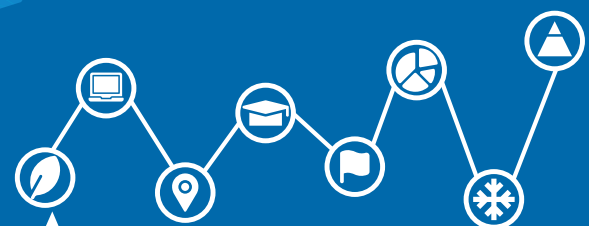


ISSN: 3034-1434

Том / Vol. **4**

№ / No. **2**

2 0 2 6



Арктика и инновации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Мурманский арктический университет» (ФГАОУ ВО «МАУ»)
Federal State Autonomous Educational Institution
of Higher Education "Murmansk Arctic University" (FSAEI HE "MAU")

Научный журнал

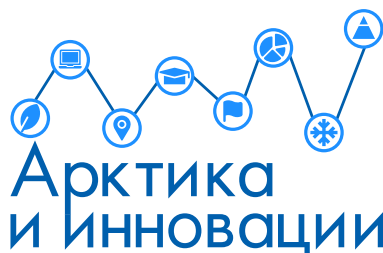
«Арктика и инновации»

Том 4 / № 2 / 2026

Scientific Journal

"Arctic and Innovations"

Vol. 4 / No. 2 / 2026



ФГАОУ ВО «МАУ»
FSAEI HE "MAU"



Том 4
№ 2
2026

Периодичность

4 раза в год

Префикс DOI

<https://doi.org/10.21443>

ISSN

3034-1434

Учредитель, издатель, редакция

ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет»

Адрес

ул. Спортивная, д. 13, г. Мурманск, Россия, 183010

Сайт

<https://www.arcainnov.ru/>

E-mail

arcainnov@mauniver.ru

Выход в свет

15 июня 2026

Копирайт

ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет», оформление, 2026

Цена

Распространяется бесплатно

Условия распространения материалов

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

Редакторы-корректоры

Пигулевская И.С., Зелексон Л.А.

Верстка

Храмова О.В.

Целью журнала является создание ведущей международной экспертно-аналитической площадки, на которой будут обсуждаться актуальные вопросы научного формирования и практической реализации арктических инновационных исследований и разработок, а также содействие развитию фундаментальных и прикладных знаний в области арктических инноваций и выявления критериев для их устойчивого развития.

Задачи журнала:

- освещение новейших результатов научной и научно-практической деятельности в области разработки и реализации арктических инноваций в разнообразных сферах обеспечения комфортного проживания человека в Арктике: социально-экономическое развитие, инновационные технологии, особенности международного арктического сотрудничества, мониторинг и сохранение природных экосистем, климат и космическая погода в полярных регионах, применение информационных технологий в арктических исследованиях, урбанизация и туризм, проблемы сохранения малочисленных коренных народов Севера, арктическое здоровье, обеспечение, инновации в образовании и др.;
- создание единой научной экспертно-аналитической площадки для интеграции знаний и опыта ведущих ученых и практиков в этих областях;
- апробация научных исследований ученых и аспирантов, занимающихся арктическими инновационными исследованиями и разработками.

Главный редактор

Юрманов Антон Алексеевич, кандидат биологических наук, проректор по научной и инновационной деятельности, Мурманский арктический университет (Мурманск, Российская Федерация)

Заместитель главного редактора

Шилин Михаил Борисович, доктор географических наук, профессор, член Ассоциации полярников Санкт-Петербурга, Российский государственный гидрометеорологический университет (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Щебарова Наталья Николаевна, доктор экономических наук, профессор, Мурманский арктический университет (Мурманск, Российская Федерация)

Председатель редакционной коллегии

Фадеев Алексей Михайлович, доктор экономических наук, Высшая школа производственного менеджмента Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого

Редакционная коллегия

Абакумов Евгений Васильевич, доктор биологических наук, профессор РАН, профессор, заведующий кафедрой прикладной экологии Санкт-Петербургского государственного университета, (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Ахмад Алаа Али, кандидат географических наук, эксперт по экологии Генеральной дирекции сирийских портов (Тартус, Сирийская Арабская Республика)

Жигульский Владимир Александрович, кандидат технических наук, заслуженный эколог Российской Федерации, директор ООО «Эко-Экспресс-Сервис» (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Жигунова Галина Владимировна, доктор социологических наук, доцент, заведующий кафедрой философии и социальных наук, Мурманский арктический университет (Мурманск, Российская Федерация)

Зимин Алексей Вадимович, доктор географических наук, профессор, главный научный сотрудник Лаборатории геофизических пограничных слоев Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Истомин Евгений Петрович, доктор технических наук, профессор, и. о. директора Института информационных систем и геотехнологий Российского государственного гидрометеорологического университета (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Кузьмичева Татьяна Викторовна, доктор педагогических наук, доцент, профессор кафедры психологии и коррекционной педагогики, доцент педагогического института, Мурманский арктический университет (Мурманск, Российская Федерация)

Ли Ифань, профессор, профессор Международного объединенного исследовательского центра стойких токсичных веществ Харбинского политехнического университета (г. Харбин, Китайская Народная Республика).

Маслаков Алексей Алексеевич, кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова; заместитель декана Географического факультета МГУ по международным связям; секретарь Экспертного совета Русского географического общества; секретарь редакции журнала Geography, Environment, Sustainability (Москва, Российская Федерация)

Чжан Цзыфэн, профессор, доцент Школы окружающей среды Харбинского политехнического университета (г. Харбин, Китайская Народная Республика).

Чибис Евгения Владимировна, кандидат экономических наук, руководитель Единого волонтерского центра Мурманской области, доцент кафедры экономики и управления, Институт креативных индустрий и предпринимательства, Мурманский арктический университет (Мурманск, Российская Федерация)

Чусов Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент, членкор, Международная академия наук экологии, безопасности человека и природы, почетный работник системы образования РФ, лауреат Премии Правительства СПб (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

The Arctic is one of the largest territories of Russia that the state pays close attention to. It is proven by the number of strategic documents of innovative development that have been adopted or are being prepared for adoption. From the point of ensuring national security and stable development of the Russian Federation, it is vital for the country's geopolitics to explore the Arctic. Innovation in the Arctic as a driving factor of progress is of critical priority in modern scientific research. Without innovation, it would be impossible to advance.

The international scientific journal “Arctic and Innovations” is devoted to the specifics of innovations in the Arctic. The journal publishes articles on innovative activities in ensuring comfortable environment for people, Arctic economy and management, tourism, social development of territories, education, etc. The articles present both a complex inter- and multidisciplinary outlook on the processes taking place in the Arctic. Therefore, the research covering the issue from various perspectives such as geography, history, economics, political science, sociology, education, etc., is given priority.

The editorial board welcomes works that make significant difference to the theory and methodology of regional studies.

Editor-in-chief

Anton A. Iurmanov, Cand. Sci. (Biology), Vice-Rector for Research and Innovation, Murmansk Arctic University (Murmansk, Russian Federation)

Deputy editor-in-chief

Mikhail B. Shilin, Dr. Sci. (Geography), professor, Russian State Hydrometeorological University (Saint Petersburg, Russian Federation)

Natalja N. Schebarova, Dr. Sci. (Economy), professor, Murmansk Arctic University (Murmansk, Russian Federation)

Chairman of the Editorial Board

Aleksey M. Fadeev, Dr. Sci. (Economy), Professor, Graduate School of Production Management Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russian Federation)

Editorial board

Evgeniy V. Abakumov, Dr. Sci. (Biology), Professor, Professor of the Russian Academy of Sciences (RAS), Head of the Department of Applied Ecology at St. Petersburg State University (Saint Petersburg, Russian Federation)

Ahmad Alaa Ali, PhD (Geography), environmental expert at the General Directorate of ports in Syria (Tartus, Syria)

Vladimir A. Zhigulsky, Cand. Sci. (Technical), Honored ecologist of Russian Federation, director, Eco-Express-Service Ltd (Saint Petersburg, Russian Federation)

Galina V. Zhigunova, Dr. Sci. (Sociology), associated professor, head of the Chair of Philosophy and Social Sciences, Murmansk Arctic University (Murmansk, Russian Federation)

Alexey V. Zimin, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Dr. Sc. (Geography), head of the Laboratory of geophysical boundary layers, Shirshov Institute of Oceanology of RAS; professor of the Department of oceanology, Saint Petersburg State University (Saint Petersburg, Russian Federation)

Yevgenij P. Istomin, Dr. Sci. (Technical), professor, head, Institute of Informational Systems and Geotechnology, Russian State Hydrometeorological University (Saint Petersburg, Russian Federation)

Tatjana V. Kuzmicheva, Dr. Sci. (Pedagogic), associated professor, professor, Chair of psychology and correcting pedagogic, head, Psycho-Pedagogical Institute, Murmansk Arctic University (Murmansk, Russian Federation)

Li Yifan, Professor, Professor, The International Joint Research Center for Persistent Toxic Substances of Harbin Polytechnic University (Harbin, People's Republic of China)

Alexey A. Maslakov, Cand. Sci. (Geography), Senior Researcher, Deputy Dean for International Relations, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University; Secretary Expert Council of the Russian Geographical Society; Secretary of the Editorial Board of the Geography, Environment, Sustainability magazine (Moscow, Russian Federation).

Zhang Zifeng, Professor, Associate Professor, School of Environment, Harbin Institute of Technology (HIT) (Harbin, People's Republic of China)

Evgeniya V. Chibis, Cand. Sci. (Economy), Head of the United Volunteer Center of the Murmansk Region, Associate Professor at the Department of Economics and Management, Institute of Creative Industries and Entrepreneurship, Murmansk Arctic University (Murmansk, Russian Federation)

Aleksandr N. Chusov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Corresponding Member, International Academy of Ecology and Life Protection Sciences, Honorary Worker of the Education System of the Russian Federation, Laureate, St. Petersburg Government Prize. (Saint Petersburg, Russian Federation)



Arctic
and Innovations

Vol. 4
2
2 0 2 6

Frequency

quarterly

DOI Prefix

<https://doi.org/10.21443>

ISSN

3034-1434

Founder, publisher, editorial office

Murmansk Arctic University

Address

183010, Russian Federation, Murmansk,
Sportivnaya str., 13

Website

<https://www.arcainnov.ru/>

E-mail

arcainnov@mauniver.ru

The publication

15 June 2026

Copyright

Murmansk Arctic University,
layout, 2026

Price

free

Distribution

The content is distributed under
the Creative Common License CC BY

Editors and proofreaders

Irina S. Pigulevskaya, Lev A. Zelexon

Редакция

Olga V. Khramova

- 8** Задачи и перспективы реализации корпоративной долгосрочной программы ПАО «ГМК «Норильский никель» по сохранению и восстановлению экосистем
Алькова Е.В., Курбатов Е.А., Фадеев А.М., Бортник А.С., Рыжкова Н.А.
- 17** Единая программа мониторинга экосистем на особо охраняемых природных территориях федерального значения в Мурманской области по градиенту промышленного загрязнения на 2025–2027 гг.
Боровичев Е.А., Кожин М.Н., Сухарева Т.А., Терентьев П.М., Поликарпова Н.В., Толмачева Е.Л., Алфертьев Н.Л.
- 40** Аprobация технологии воспроизводства лососевых видов рыб с применением гнезда-инкубатора Salmo-3000 в условиях арктической реки Мончи (Кольский п-ов)
Ефремов Д.А., Ручьев М.А.
- 54** Разработка технологии восстановительных сукцессий и перспективы ее апробации на техногенно преобразованных ландшафтах Никель — Заполярный (Мурманская область)
Хлебосолова О.А.
- 69** Содержание и запасы углерода в компонентах наземных и водных экосистем Мурманской области в зоне воздействия АО «Кольская ГМК»
Сухарева Т.А., Денисов Д.Б., Живов Д.А., Слуковский З.И., Курбатов Е.А., Фадеев А.М., Бортник А.С.
- 90** Мониторинг и охрана популяции дикого северного оленя (*Rangifer tarandus tarandus*) в Лапландском заповеднике: состояние и перспективы восстановления в западной части Мурманской области
Алфертьев Н.Л., Чуева Н.В., Гилязов А.С., Вобликова Д.В., Кочеткова Т.Е.
- 99** Сохранение и восстановление популяции европейской жемчужницы в Арктической зоне России (Мурманская область)
Ефремов Д.А., Иешко Е.П., Поликарпова Н.В.
- 109** Аprobация технологии восстановления лесов методом имитации аэрозасева с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для целей сохранения биоразнообразия
Ефремов Д.А.

Tasks and prospects for implementing the long-term corporate program of PJSC “Mining and Metallurgical Company ‘Norilsk Nickel’” on ecosystem conservation and restoration <i>Evgenia V. Al’kova, Evgeny A. Kurbatov, Anton M. Fadeev, Anzhelika S. Bortnik, Natalia A. Ryzhkova</i>	8
Unified ecosystem monitoring program for Federal-level protected areas in the Murmansk Oblast, Russia, along an industrial pollution gradient (2025–2027) <i>Eugene A. Borovichev, Mikhail N. Kozhin, Tatyana A. Sukhareva, Petr M. Terentjev, Natalia V. Polikarpova, Ekaterina L. Tolmacheva, Nikolay L. Alfertev</i>	17
Using the Salmo-3000 nest incubator for salmonid fish reproducing in the Arctic Moncha River (Kola Peninsula) <i>Denis A. Efremov, Mikhail A. Ruch’gov</i>	40
Development of a secondary succession approach and prospects for its application in severely disturbed landscapes of the Nikel–Zapolyarny area (Murmansk Oblast, Russia) <i>Olga A. Khlebosolova</i>	54
Carbon content and carbon stocks in terrestrial and aquatic ecosystem components of Murmansk Region, Russia, in the impact zone of JSC “Kola MMC” <i>Tatyana A. Sukhareva, Dmitrii B. Denisov, Dmitry A. Zhivov, Zakhar I. Slukovskii, Evgeny A. Kurbatov, Anton M. Fadeev, Anzhelika S. Bortnik</i>	69
Monitoring and conservation of the wild reindeer (<i>Rangifer tarandus tarandus</i>) in the Lapland Nature Reserve: Current status and prospects for recovery in the western part of the Murmansk Oblast, Russia <i>Nikolai L. Alfertiev, Natalya V. Chueva, Aleksei S. Gilyazov, Daria V. Voblikova, Tatyana Y. Kochetkova</i>	90
Preservation and restoration of the European pearl mussel population in the Arctic region of Russia (Murmansk Oblast) <i>Denis A. Efremov, Yevgeniy P. Ieshko, Natal’ya V. Polikarpova</i>	99
Simulated aerial seeding with unmanned aerial vehicles in reforestation technology <i>Denis A. Efremov</i>	109



Уважаемые коллеги, исследователи и читатели!

Приветствую вас на страницах первого специального выпуска журнала «Арктика и инновации». Этот номер знаменует собой новый этап в развитии нашего издания и является результатом плодотворного сотрудничества с компанией «Норникель». Мы искренне признательны нашим партнерам за неоценимую поддержку в продвижении арктической науки и природоохранных инициатив.

В центре внимания данного выпуска — инновационные подходы к сохранению Арктики. Представленные исследования охватывают широкий спектр решения актуальных экологических проблем региона: от современных методов воспроизводства ценных биоресурсов до передовых технологий экологического мониторинга. Особое внимание уделяется разработкам в сфере восстановления биоразнообразия и защиты ключевых видов арктической фауны.

Материалы выпуска демонстрируют синергию научных исследований и практических решений, что особенно важно для устойчивого развития Заполярья. Уверен, что результаты представленных исследований станут основой для реализации значимых природоохранных проектов в Арктике.

С уважением,
главный редактор журнала «Арктика и инновации»
Антон Юрманов



Уважаемые читатели, ученые и партнеры!

Рад приветствовать вас на страницах очередного выпуска журнала «Арктика и инновации». Это издание по праву считается одной из ключевых площадок для профессионального диалога, где пересекаются академическая мысль и практический опыт, и мне приятно, что данный номер посвящен деятельности Кольской ГМК и компании «Норникель» в сфере экологии и сохранения биоразнообразия Арктического региона.

Искренне убежден, что устойчивое развитие невозможно без тесной кооперации науки и производства. Наше сотрудничество с Мурманским арктическим университетом — это не просто социальное партнерство, а стратегический альянс. Вместе мы готовим инженерные кадры нового поколения, способные мыслить «зелеными» категориями, и поддерживаем исследования в области переработки сырья и экологического мониторинга, укрепляем научный и промышленный потенциал Мурманской области и России.

Желаю авторам, экспертам и читателям этого выпуска продуктивных дискуссий и новых открытий. Пусть журнал «Арктика и инновации» и дальше остается надежным компасом в науке, технологии и экологии Севера.

С уважением,
генеральный директор Кольской ГМК
Роман Юрьевич Шаркий

УДК 502.75/ 502.2/.5/ 504.735.2

ББК 28.080.1

<https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-8-16>



Задачи и перспективы реализации корпоративной долгосрочной программы ПАО «ГМК “Норильский никель”» по сохранению и восстановлению экосистем

Алькова Е.В.¹, Курбатов Е.А.², Фадеев А.М.²,
Бортник А.С.²✉, Рыжкова Н.А.¹

¹ ПАО «Горно-металлургическая компания “Норильский никель”», Москва, Россия

² АО «Кольская горно-металлургическая компания» — дочернее предприятие ПАО «Горно-металлургическая компания “Норильский никель”», Мончегорск, Россия

✉ BortnikAS@kolagmk.ru

Аннотация. В статье рассматриваются теоретические и практические аспекты реализации корпоративной программы ПАО «ГМК “Норильский никель”» (далее — Компания) по сохранению биоразнообразия и преимуществу перехода Компании на горизонт долгосрочного планирования мероприятий по сохранению экосистем в регионах присутствия. Анализируются цели, задачи и механизмы реализации программы, а также вклад Компании в достижение национальной цели «Экологическое благополучие».

Ключевые слова: биоразнообразие, экосистемы, сохранение природы, восстановление экосистем, корпоративная социальная ответственность, экологический мониторинг, особо охраняемые природные территории, природоохранные проекты

Для цитирования: Алькова Е.В., Курбатов Е.А., Фадеев А.М., Бортник А.С., Рыжкова Н.А. Задачи и перспективы реализации корпоративной долгосрочной программы ПАО «ГМК “Норильский никель”» по сохранению и восстановлению экосистем. *Арктика и инновации*. 2026;4(2):8–16. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-8-16>

Tasks and prospects for implementing the long-term corporate program of PJSC "Mining and Metallurgical Company 'Norilsk Nickel'" on ecosystem conservation and restoration

Evgenia V. Al'kova¹, Evgeny A. Kurbatov², Anton M. Fadeev², Anzhelika S. Bortnik²✉, Natalia A. Ryzhkova¹

¹ PJSC "Mining and Metallurgical Company 'Norilsk Nickel'," Moscow, Russia

² JSC "Kola Mining and Metallurgical Company," a subsidiary of PJSC

"Mining and Metallurgical Company 'Norilsk Nickel'," Monchegorsk, Russia

✉ BortnikAS@kolagmk.ru

Abstract. This article examines the theoretical and practical dimensions of implementing the corporate biodiversity conservation program of PJSC MMC "Norilsk Nickel" (hereafter, the Company), Russia, and the advantages of adopting a long-term planning horizon for ecosystem conservation activities in the Company's regions of operation. The analysis focuses on the goals, objectives, and implementation mechanisms of the program, as well as the Company's contribution to achieving the national strategic target "Environmental Well-Being".

Keywords: biodiversity, ecosystems, nature conservation, ecosystem restoration, corporate social responsibility, environmental monitoring, protected areas, conservation projects

For citation: Al'kova E.V., Kurbatov E.A., Fadeev A.M., Bortnik A.S., Ryzhkova N.A. Tasks and prospects for implementing the long-term corporate program of PJSC "Mining and Metallurgical Company 'Norilsk Nickel'" on ecosystem conservation and restoration. *Arctic and Innovation*. 2026;4(2):8-16. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-8-16>

Введение

Экологическая доктрина Российской Федерации, утвержденная распоряжением Правительства РФ от 31.08.2002 г. №1225-р, заложила стратегические основы государственной политики в области экологии, включая сохранение биоразнообразия и природных систем. Указом Президента РФ от 7 мая 2024 г. № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» по национальной цели «Экологическое благополучие» в числе целевых показателей и задач определено сохранение лесов и биологического разнообразия, устойчивое развитие особо охраняемых природных территорий и создание условий для экологического туризма во всех национальных парках.

В 2025 г. стартовал национальный проект «Экологическое благополучие», в рамках которого реализуется Федеральный проект

«Сохранение биологического разнообразия и развитие экологического туризма». Его цель — сохранение биологического разнообразия, устойчивое развитие особо охраняемых природных территорий (ООПТ) и создание условий для экологического туризма во всех национальных парках.

Национальные цели Российской Федерации соотнесены с международными целями Куньминско-Монреальской глобальной рамочной программы в области биоразнообразия, которая предусматривает для всех стран достижение к 2030 г. целей, таких как сохранение не менее 30 % земель, морей и внутренних вод, восстановление деградированных экосистем и сокращение инвазивных видов, проведение мероприятий по воспроизводству ценных промысловых видов рыб и упорядочивания правил рыболовства, для обеспечения населения страны ценным экологически чистым ресурсом питания и объектом спортивного лова и отдыха.

Учитывая значительный вклад в проекты биоразнообразия ПАО «ГМК «Норильский никель»», в первую очередь на Арктической территории, систематизация всех проектов, их приоритизация и формирование перспективных направлений позволяют Компании внести весомый вклад в достижение национальной цели. Стратегия в области экологии и изменения климата ПАО «ГМК «Норильский никель»» до 2035 года была актуализирована в 2025 году. В соответствии с ней Компания ставит перед собой цель по отсутствию потерь биологического разнообразия в ходе производственной деятельности.

Методология исследования

Исследование базируется на анализе нормативно-правовой базы, включая соответствующие требования законодательства в сфере охраны окружающей среды и животного мира, а также отдельные положения документов стандартизации в сфере биоразнообразия и охраны окружающей среды, действующие в 2025 году:

- Экологическая доктрина Российской Федерации (одобрена распоряжением Правительства Российской Федерации от 31.08.2002 № 1225-р);
- ГОСТ Р 59782-2021. Рекомендации по формированию и реализации коммерческой организацией программы по сохранению биологического разнообразия;
- ГОСТ Р 70765-2023. Организация и порядок проведения оценки воздействия хозяйственной и иной деятельности на биологическое разнообразие;
- ГОСТ Р 70766-2023. Методология формирования индикаторных показателей программы сохранения биологического разнообразия коммерческой организации.
- Методические рекомендации по структуре и содержанию программ сохранения биоразнообразия коммерческих организаций, утвержденные распоряжением Министерством природных ресурсов и экологии РФ от 25.11.2019 № 35-р.
- GRI 101: Biodiversity 2024;
- IFC Biodiversity Finance Metrics for Impact Reporting, 2024;

- TNFD (Recommendations of the Taskforce on Nature-related Financial Disclosures, 2023);
- Metals & Mining. Sustainability Accounting Standard, SASB, 2023.
- ISO 17298:2025 Biodiversity — Considering biodiversity in the strategy and operations of organizations — Requirements and guidelines», разработана дорожная карта по сертификации одного из производственных активов Норникеля АО «Кольская КГМК».

Основная часть

Программа «Сохраняя экосистемы» является корпоративным стратегическим документом, направленным на управление процессами сохранения биоразнообразия на территориях присутствия Компании. В рамках утвержденной Стратегии в области экологии и изменения климата до 2035 г. «Норникель» ставит перед собой цель по отсутствию потерь биологического разнообразия в ходе производственной деятельности. Кроме того, Компания придерживается Целей устойчивого развития, в том числе в контексте сохранения биоразнообразия ЦУР 14 «Сохранение морских экосистем» и ЦУР 15 «Сохранение экосистем суши».

При принятии решений определяющими являются следующие принципы:

- рациональное использование природных ресурсов;
- стремление к защите и сохранению популяционно-видового разнообразия наземных и водных живых организмов;
- соблюдение границ особо охраняемых природных территорий и признание их ценности;
- стремление к предотвращению утраты биологического разнообразия.

Задачи Программы:

- координация реализуемых проектов мониторинга, сохранения и восстановления биоразнообразия на территориях присутствия Компании;
- восстановление отдельных видов биоразнообразия и экосистем;
- поддержка и инфраструктурное развитие заповедных территорий;

- развитие системы оценки эффективности предпринимаемых мер по предотвращению потерь биоразнообразия;
- обеспечение информационной открытости Компании в соответствии с действующими и перспективными стандартами и рекомендациями в области биоразнообразия, а также по запросу заинтересованных сторон.

В контур Программы включены заповедные территории. На каждой из них определено флагманское направление по сохранению биоразнообразия с учетом целей создания особо охраняемых природных территорий (далее — ООПТ), мнения научных коллективов, заинтересованных сторон и интересов Компании. Реализация флагманских проектов предполагает долгосрочные мероприятия, включающие в себя различные этапы, такие как углубленные исследования, прогнозирование, разработка решения, непосредственно реализация и анализ. Помимо флагманского направления определены проекты-спутники, которые позволяют решать более краткосрочные задачи в рамках Программы.

Целевые ориентиры по мероприятиям и проектам Программы заданы с учетом текущей ситуации и в условиях действующего на дату разработки Программы законодательства, подлежат корректировке в случае необходимости или изменения условий.

Для информирования всех заинтересованных лиц о своих проектах и об отдельных мероприятиях в сфере сохранения биоразнообразия «Норникель» создал цифровую платформу «Сохраняя экосистемы»: <https://life.nornickel.ru/>. Ее содержание отражает комплексный подход Компании к вопросам сохранения биоразнообразия. На сайте представлена не только информация общего характера о животных, обитающих в регионах присутствия Компании, но и углубленные данные научных экспедиций и исследований, которые регулярно проводятся совместно с учеными. Кроме того, есть раздел, посвященный спасению животных.

Помимо совместных проектов с заповедными территориями в Программу включены проекты филиалов и дочерних предприятий Компании, реализуемые в инициативном порядке, с учетом мнения научного сообщества и профильных экспертов. Также определены проекты, тиражируемые на все территории

присутствия Компании, например Интегральный показатель состояния экосистем (ИПСЭ) — метод оценки состояния экосистем, разработанный Сибирским отделением Российской академии наук. С 2022 г. на территориях вокруг промышленных площадок «Норникеля» специалисты собирают сведения о состоянии различных компонентов наземных и водных экосистем: флоры, фауны и почв.

Если принять ИПСЭ контрольной зоны равным 1, то для исследуемых зон промышленного воздействия возможны три варианта:

- 1) ИПСЭ исследуемой зоны = 1 означает соответствие экосистем изучаемой зоны и контрольной;
- 2) ИПСЭ исследуемой зоны < 1 свидетельствует о потерях биоразнообразия в рассматриваемой зоне воздействия;
- 3) ИПСЭ исследуемой зоны > 1 означает условный прирост биоразнообразия в рассматриваемой зоне (что далеко не всегда хорошо, а может подтверждать дисбаланс экосистем).

3 декабря 2024 г. на координационном совещании по вопросам биоразнообразия в регионах присутствия АО «Кольская ГМК» было принято решение организовать трехлетние мониторинговые работы в границах ООПТ — государственных заповедников «Пасвик», «Лапландский», государственного заказчика «Мурманский тундровый» — по оценке состояния экосистем с применением индекса ИПСЭ (2025–2027 гг.).

В случае успешной апробации ИПСЭ на различных экспериментальных полигонах методика будет размещена для публичного обсуждения и возможного тиражирования, начиная с 2027 г. Целевой ориентир к 2035 г.: адаптировать ИПСЭ как общепризнанный инструмент измерения эффективности деятельности по сохранению биоразнообразия.

Результаты

Свод проектов Программы (табл. 1) сформирован по состоянию на 2025 г., подлежит актуализации по итогам промежуточных замеров с учетом мнения заинтересованных сторон, требований законодательства и стратегически приоритетов Компании.

Таблица 1. Перечень собственных и партнерских проектов в регионах присутствия Компании

Table 1. List of in-house and partner projects in the Company's regions of operation

Наименование регионов присутствия Компании	Партнерские проекты			Собственные проекты	Проекты на всех территориях присутствия	
Мурманская область: Кольская площадка	Лапландский заповедник	Сохраним оленя вместе	Инновационные методы восстановления численности ценных видов рыб	Апробация интегрального показателя состояния экосистем (ИПСЭ)	Развитие и поддержка научного волонтерства	Развитие цифровой платформы «Сохраняя экосистемы»
		Природа рядом: доступные экотропы и маршруты				
		Друзья Лапландского заповедника				
	Кандалакшский заповедник	Сохранение атлантического серого тюленя на Западном Мурмане	Реализация мероприятий по обеспечению охраны объектов растительного и животного мира, и среды их обитания в зоне воздействия АО «Кольская ГМК»			
		Морские птицы Западного и Восточного Мурмана				
		Цифровые технологии для сохранения традиционного природопользования: комплексное изучение состояние экосистем Мурманского тундрового заказника				
	Заповедник «Пасвик»	Интенсификация естественного восстановления арктических экосистем	Развитие технологии восстановления лесов с применением метода имитации аэрозасева территорий в районе пгт. Никель — г. Заполярный и Мончегорской агломерации			
		Центр реинтродукции популяции европейской жемчужницы				
Мониторинг состояния экосистем и их компонентов в районе АО «Кольская ГМК» и заповедника «Пасвик»						
Мурманский арктический университет	Центр изучения проблем сохранения морских млекопитающих	Реализация экспедиционной деятельности на Кольском полуострове				
Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина	Растительные инвазии в экосистемах Кольского Севера					
Красноярский край: Норильские предприятия	Заповедники Таймыра	Сохранение путоранского снежного барана	Сохранение лиственницы сибирской			
	Национальный парк «Красноярские столбы»	Развитие центра научного волонтерства				
Забайкальский край: Быстринский ГОК			Восстановление численности бизонов			

Выводы

Реализация корпоративной Программы «Норникеля» соответствует национальным ориентирам и способствует достижению национальных целей в области экологического благополучия и сохранения биоразнообразия на территориях присутствия Компании. Перспективы развития Программы связаны с расширением географии реализации, углублением научного сотрудничества, развитием инновационных методов сохранения экосистем, повышением эффективности мер по восстановлению биоразнообразия.

При реализации Программы осуществляется взаимодействие с органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации, в административных границах которых осуществляется хозяйственная деятельность, органами местного самоуправления, с научными, образовательными, общественными и иными организациями, а также с населением, проживающим в районах ведения хозяйственной деятельности и в границах территории воздействия хозяйственной деятельности на биологическое разнообразие в целях определения:

- заинтересованных сторон, имеющих отношение к разработке и реализации Программы;
- потребностей, ожиданий и требований заинтересованных сторон;
- целесообразности и возможности трансформации потребностей, ожиданий и требований заинтересованных сторон при реализации включенных в Программу проектов.

Вовлечение заинтересованных сторон является непрерывным процессом. Постоян-

ный диалог обеспечивается через обратную связь между Компанией и заинтересованными сторонами в форме встреч, координационных советов, на площадках форумов и научных конференций и других иных доступных формах взаимодействия.

Критерии результативности программы сформированы на основе накопленного опыта Компании в сфере сохранения биоразнообразия, ключевой показатель результативности — интегральный показатель сохранения экосистем (ИПСЭ). По результатам ежегодных наблюдений делается вывод о положительных либо негативных изменениях через изменение (Δ) усредненного показателя ИПСЭ. Целевые ориентиры обозначены в таблице 2.

Дополнительные (качественные) критерии оценки Программы, результативности ее реализации:

- публичное одобрение хода реализации проектов Программы заинтересованными сторонами (публикации в СМИ, освещение на конференциях, форумах и т.д.);
- оценка реализации Программы органами власти на территориях присутствия по запросу Компании не реже одного раза в год (в соответствии с протоколами публичных отчетов и обсуждений);
- публикация научных статей и отчетов по проектам программы — не менее двух раз в три года;
- включение в рейтинги по существующим методологиям оценки эффективности корпоративных программ, разработанными научными и/или общественными организациями (при наличии).

Таблица 2. Целевые ориентиры результативности интегрального показателя сохранения экосистем (ИПСЭ) в регионах присутствия Компании

Table 2. Performance targets for the Integral Indicator of Ecosystems Health (IIEH) in the Company's regions of operation

Дивизионы	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030–2035	Цель
Заполярный (Норильск)	ИПСЭ _{исх} = 0,826	$\Delta = 0$	-	-	-	-	$\Delta \geq 0$	$\Delta \geq 0$	$\Delta \geq 0$	$\Delta \geq 0$
Заполярный (Кольская ГМК)	ИПСЭ _{исх} = 0,93	$\Delta = 0$	$\Delta = 0$	$\Delta \geq 0$	$\Delta \geq 0$	$\Delta \geq 0$	$\Delta \geq 0$	$\Delta \geq 0$	$\Delta \geq 0$	$\Delta \geq 0$
Забайкальский	ИПСЭ _{исх} = 0,913	$\Delta = 0$	-	-	-	-	$\Delta \geq 0$	$\Delta \geq 0$	$\Delta \geq 0$	$\Delta \geq 0$

Непосредственно отчет о ходе реализации Программы за предшествующий год рассматривается в формате очного координационного совещания с участием заинтересованных сторон. Выработанные в ходе обсуждения отчета рекомендации являются основанием для актуализации Программы.

Информация о ходе реализации Программы отражается в ежегодном отчете об устойчивом развитии Компании в той мере, в которой соответствует требованиям к нефинансовой отчетности. Дополнительная информация о реализации Программы размещается на публичных ресурсах «Норникеля», а также на цифровой платформе «Сохраняя экосистемы» life.nornickel.ru.

Литература

1. Экологическая доктрина Российской Федерации. Одобрена распоряжением Правительства Российской Федерации от 31 августа 2002 г. №1225-р. [интернет]. Режим доступа: https://www.mid.ru/ru/foreign_policy/official_documents/1688732/
2. ГОСТ Р 59782-2021. Охрана окружающей среды. Биологическое разнообразие. Рекомендации по формированию и реализации коммерческой организацией программы по сохранению биологического разнообразия. Москва: Российский институт стандартизации; 2021.
3. ГОСТ Р 70765-2023. Охрана окружающей среды. Биологическое разнообразие. Организация и порядок проведения оценки воздействия хозяйственной и иной деятельности на биологическое разнообразие. Москва: Российский институт стандартизации; 2023.
4. ГОСТ Р 70766-2023. Охрана окружающей среды. Биологическое разнообразие. Методология формирования индикаторных показателей программы сохранения биологического разнообразия коммерческой организации. Москва: Российский институт стандартизации; 2023.
5. Методические рекомендации по структуре и содержанию программ сохранения биологического разнообразия коммерческих организаций. Утверждены распоряжением Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 25 ноября 2019 года №35-р. [интернет]. Режим доступа: <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-minprirody-rossii-ot-25112019-n-35-r-ob-utverzhdanii/>

References

1. Ecological doctrine of the Russian Federation. Approved by the order of the Government of the Russian Federation of August 31, 2002 No. 1225-p. [internet]. Available at: https://www.mid.ru/ru/foreign_policy/official_documents/1688732/. (In Russ.).
2. State Standard R 59782-2021. Environmental protection. Biological diversity. Recommendations for the formation and implementation of a program for the conservation of biological diversity by a commercial organization. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2021. (In Russ.).
3. State Standard R 70765-2023. Environmental protection. Biological diversity. Organization and procedure for assessing the impact of economic and other activities on biological diversity. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2023. (In Russ.).
4. State Standard R 70766-2023. Environmental protection. Biological diversity. Methodology for the formation of indicators of biodiversity conservation program of a commercial organization. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2023. (In Russ.).
5. Methodological recommendations on the structure and content of biodiversity conservation programs for commercial organizations. Approved by the order of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation dated November 25, 2019 No. 35-r. [internet]. Available at: <https://legalacts.ru/doc/rasporjazhenie-minprirody-rossii-ot-25112019-n-35-r-ob-utverzhdanii/>. (In Russ.).

Сведения об авторах

Алькова Евгения Владимировна — руководитель по направлению Главного офиса ПАО «Горно-металлургическая компания «Норильский никель»». Россия, 123112, г. Москва, 1-й Красногвардейский пр-д, д. 15. Тел.: +7 (495) 787-76-67 (доб. 45-3590)
E-mail: AlkovaEV@nornik.ru

Курбатов Евгений Александрович — директор департамента экологической безопасности Кольской площадки АО «Кольская горно-металлургическая компания» — дочернее предприятие ПАО «Горно-металлургическая компания «Норильский никель»». Россия, 184507, Мурманская обл., г. Мончегорск, терр. Промплощадка КГМК. Тел.: +7 (815) 366-22-52
E-mail: KurbatovEA@kolagmk.ru

Фадеев Антон Михайлович — начальник управления сопровождения надзорной деятельности и аудита, департамента экологической безопасности Кольской площадки АО «Кольская горно-металлургическая компания» — дочернее предприятие ПАО «Горно-металлургическая компания «Норильский никель»». Россия, 184507, Мурманская обл., г. Мончегорск, терр. Промплощадка КГМК. Тел.: +7 (815) 367-70-53
E-mail: FadeevAM@kolagmk.ru

Бортник Анжелика Сергеевна — главный специалист управления сопровождения надзорной деятельности и аудита, департамента экологической безопасности Кольской площадки АО «Кольская горно-металлургическая компания» — дочернее предприятие ПАО «Горно-металлургическая компания «Норильский никель»». Россия, 184507, Мурманская обл., г. Мончегорск, терр. Промплощадка КГМК. Тел.: +7 (815) 366-50-54
E-mail: BortnikAS@kolagmk.ru

Рыжкова Наталья Анатольевна — главный менеджер Главного офиса ПАО «Горно-металлургическая компания «Норильский никель»». Россия, 123112, г. Москва, 1-й Красногвардейский пр-д, д. 15. Тел.: +7 (495) 787-76-67 (доб. 45-3521)
E-mail: RyzhkovaNA@nornik.ru

Вклад авторов

Алькова Евгения Владимировна — определение стратегических ориентиров корпоративной программы, общее руководство, утверждение окончательного текста рукописи.

Information about the authors

Evgenia V. Al'kova — Head of the Main Office of PJSC MMC "Norilsk Nickel". Russia, 123112, Moscow, 1st Krasnogvardeysky proyezd, 15. Tel.: +7 (495) 787-76-67 (ext. 45-3590)
E-mail: AlkovaEV@nornik.ru

Evgeny A. Kurbatov — Director, Environmental Safety Department of the Kola Division, JSC "Kola Mining and Metallurgical Company," a subsidiary of PJSC MMC "Norilsk Nickel" (JSC "Kola MMC"). Russia, 184507, Monchegorsk, territory of KMMC industrial site. Tel.: +7 (815) 366-22-52
E-mail: KurbatovEA@kolagmk.ru

Anton M. Fadeev — Head of the Regulatory Oversight and Audit Unit, JSC "Kola Mining and Metallurgical Company," Environmental Safety Department of the Kola Division, a subsidiary of PJSC MMC Norilsk Nickel (JSC Kola MMC)/ Russia, 184507, Monchegorsk, territory of KMMC industrial site. Tel.: +7 (815) 367-70-53
E-mail: FadeevAM@kolagmk.ru

Anzhelika S. Bortnik — Lead Specialist, Regulatory Oversight and Audit Unit, Environmental Safety Department of the Kola Division, JSC "Kola Mining and Metallurgical Company," a subsidiary of PJSC MMC "Norilsk Nickel". Russia, 184507, Monchegorsk, territory of KMMC industrial site. Tel.: +7 (815) 366-50-54
E-mail: BortnikAS@kolagmk.ru

Natalia A. Ryzhkova — Chief Manager, Main Office of MMC Norilsk Nickel/ Russia, 123112, Moscow, 1st Krasnogvardeysky proyezd, 15. Tel.: +7 (495) 787-76-67 (ext. 45-3521)
E-mail: RyzhkovaNA@nornik.ru

Author contribution statement

Evgenia V. Al'kova — conceptualization; supervision; approval of the final manuscript.

Evgeny A. Kurbatov — project administration; formal analysis (Integrated Ecosystem Condition Index); Writing (reviewing and editing).

Курбатов Евгений Александрович — организация координационных и мониторинговых работ на Кольской площадке, анализ применения интегрального показателя состояния экосистем (ИПСЭ), редактирование текста.

Фадеев Антон Михайлович — методология исследования, сбор и систематизация нормативно-правовой базы, анализ соответствия программы российским ГОСТам и международным экологическим стандартам.

Бортник Анжелика Сергеевна — подготовка сводной информации по партнерским и собственным проектам регионов присутствия (табл. 1), подготовка первоначального черновика статьи.

техническое оформление рукописи и списка литературы, ведение переписки с редакцией.

Рыжкова Наталья Анатольевна — анализ качественных и количественных критериев результативности программы (табл. 2), описание механизмов функционирования цифровой платформы

Anton M. Fadeev — methodology; data curation (regulatory and legal frameworks); formal analysis (alignment with GOST and international standards).

Anzhelika S. Bortnik — resources (collection of information on partner and in-house projects, Table 1); writing original draft; visualization (technical formatting); project administration (editorial correspondence).

Natalia A. Ryzhkova — Formal analysis (performance criteria, Table 2); writing original draft (digital-platform functionality).

Благодарность

Авторы выражают признательность и благодарность за поддержку научных исследований научные сообщества и ООПТ, специалистам департамента экологической безопасности Кольской площадки Кольской площадки АО «Кольская горно-металлургическая компания» и лично Курбатову Евгению Александровичу, директору Департамента экологической безопасности Кольской площадки. Большая благодарность экспертам, которые помогли авторам в изучении проблемы и поиске возможных вариантов ее решения с учетом конкретной территории.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to the scientific community and protected area institutions that supported this research, as well as to the specialists of the Environmental Safety Department of the Kola Division of JSC “Kola Mining and Metallurgical Company,” and in particular to Evgeny Aleksandrovich Kurbatov, Director of the Environmental Safety Department of the Kola Division.

The authors also thank the experts who contributed to the analysis of the problem and the identification of feasible solutions tailored to the specific regional context.

УДК 502.5+504.3/.6+574.4(470.21)
ББК 26.888.9
<https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-17-39>



Единая программа мониторинга экосистем на особо охраняемых природных территориях федерального значения в Мурманской области по градиенту промышленного загрязнения на 2025–2027 гг.

Боровичев Е.А.¹✉, Кожин М.Н.¹, Сухарева Т.А.²,
Терентьев П.М.², Поликарпова Н.В.³, Толмачева Е.Л.⁴,
Алфертьев Н.Л.⁵

¹ Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина ФГБУН ФИЦ «Кольский научный центр РАН», Апатиты, Россия

² Институт проблем промышленной экологии Севера ФГБУН ФИЦ «Кольский научный центр РАН», Апатиты, Россия

³ ФГБУ «Государственный природный заповедник «Пасвик», Никель, Россия

⁴ Кандалакшский государственный природный заповедник, Кандалакша, Россия

⁵ ФГБУ «Лапландский государственный природный биосферный заповедник», Мончегорск, Россия

✉ e.borovichev@ksc.ru

Аннотация. В условиях интенсивного промышленного освоения Арктической зоны РФ, где сосредоточены крупнейшие предприятия горно-металлургического комплекса, возрастает необходимость в системном и сопоставимом экологическом мониторинге. В статье представлена единая программа мониторинга экосистем, разработанная и внедренная на базе заповедника «Пасвик», Лапландского заповедника и Мурманского тундрового заказника на 2025–2027 гг. Она основана на методологии международных научных подходов к оценке биоразнообразия и использует иерархическую структуру «биологические индикаторы — атрибуты — переменные». В нее входят ключевые компоненты наземных и водных экосистем: растительные сообщества, охраняемые аборигенные и чужеродные инвазионные виды, птицы, млекопитающие и гидробионты. Особое внимание уделено унификации методик, что позволило получать верифицируемые и сопоставимые данные по градиенту промышленного загрязнения. Реализация программы направлена на формирование научно обоснованной основы принятия управленческих решений по сохранению биоразнообразия, минимизации антропогенного воздействия и адаптивному управлению природными ресурсами в регионе Арктической зоны РФ.

Ключевые слова: особо охраняемые природные территории, биоразнообразие, экологический мониторинг, промышленное загрязнение, биологические индикаторы, Мурманская область, Арктика

Для цитирования: Боровичев Е.А., Кожин М.Н., Сухарева Т.А., Терентьев П.М., Поликарпова Н.В., Толмачева Е.Л., Алфертьев Н.Л. Единая программа мониторинга экосистем на особо охраняемых природных территориях федерального значения в Мурманской области по градиенту промышленного загрязнения на 2025–2027 гг. *Арктика и инновации*. 2026;4(2):17–39. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-17-39>

Unified ecosystem monitoring program for Federal-level protected areas in the Murmansk Oblast, Russia, along an industrial pollution gradient (2025–2027)

Eugene A. Borovichev¹✉, Mikhail N. Kozhin¹,
Tatyana A. Sukhareva², Petr M. Terentjev²,
Natalia V. Polikarpova³, Ekaterina L. Tolmacheva⁴,
Nikolay L. Alfertev⁵

¹ Polar-Alpine Botanical Garden-Institute named after N.A. Avrorin, Federal Research Centre Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

² Institute of North Industrial Ecology Problems, Federal Research Centre Kola Science Centre of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

³ Pasvik Nature Reserve, Nikel, Russia

⁴ Kandalaksha Nature Reserve, Kandalaksha, Russia

⁵ Lapland Nature Reserve, Monchegorsk, Russia

✉ e.borovichev@ksc.ru

Abstract. Rapid industrial development in the Arctic Zone of the Russian Federation, home to major mining and metallurgical operations, has intensified the need for systematic environmental monitoring. This article presents a unified ecosystem monitoring program developed for implementation in 2025–2027 across the Pasvik Nature Reserve, the Lapland Nature Reserve, and the Murmansk Tundra Reserve. The program follows internationally recognized biodiversity assessment frameworks and uses a hierarchical system of indicators, attributes, and variables. It covers key components of terrestrial and aquatic ecosystems, including vegetation, protected native species, invasive alien species, birds, mammals, and aquatic biota. A major focus is the harmonization of field and analytical protocols to ensure that data collected along gradients of industrial pollution are scientifically comparable and verifiable. The program provides a robust foundation for biodiversity conservation, reduction of anthropogenic impacts, and adaptive natural resource management in the Russian Arctic.

Keywords: protected areas, biodiversity, environmental monitoring, industrial pollution, biological indicators, Murmansk Oblast, Arctic

For citation: Borovichev E.A., Kozhin M.N., Sukhareva T.A., Terentjev P.M., Polikarpova N.V., Tolmacheva E.L., Alfertev N.L. Unified ecosystem monitoring program for Federal-level protected areas in the Murmansk Oblast, Russia, along an industrial pollution gradient (2025–2027) *Arctic and Innovation*. 2026;4(2):17–39. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-17-39>

Введение

Мурманская область — регион с крупнейшими предприятиями минерально-сырьевого комплекса Арктической зоны РФ и страны в целом. Она обеспечивает преобладающую часть потребности России в фосфатных рудах, циркониевом сырье (бадделеите), тантале, ниобии и редкоземельных металлах. Ведется добыча медно-никелевых и железных руд, нефелинового и керамического сырья, облицовочного камня и строительных материалов. Предприятия горнопромышленного комплекса являются градообразующими, поскольку их финансово-экономическое положение определяет состояние не только производственной, но и социальной инфраструктуры населенных пунктов, а также занятость и благосостояние значительной части населения региона. В городах и поселках при этих предприятиях проживает треть населения области, а их продукция представляет свыше 60 % промышленного производства региона [1, 2]. Более сотни месторождений полезных ископаемых составляют перспективную сырьевую базу области. Среди них платинометалльные месторождения Федорово-Панского массива, кианитовые месторождения в Кейвах, редкоземельные объекты Колмозеро-Воронья и многие другие. На шельфе Баренцева моря открыты богатые месторождения нефти и газа, в числе которых получившее мировую известность Штокмановское [1, 2].

Освоение ресурсного потенциала определяет не только современный профиль экономики региона, но и его будущее. С одной стороны, это способствует социально-экономическому развитию Мурманской области, но с другой — оказывает негативное влияние на природные экосистемы и ухудшает качество окружающей среды, поскольку освоение невозобновляемых минеральных ресурсов связано со значительным преобразованием и разрушением природы. В связи с этим в районах интенсивного природопользования необходимо проведение регулярного экологического мониторинга. Сотрудники Кольского научного центра РАН уже более 35 лет изучают состояние, динамику развития и степень антропогенной модификации наземных и водных экосистем европейского Севера [3–15]. В 1990 г. была заложена сеть биогеохимического мониторинга лесов, которая в настоящее время включает 17 пробных площадей, в том числе 2 — в Лапландском заповеднике,

расположенных по градиенту загрязнения атмосферного загрязнения от медно-никелевых предприятий и в условно фоновых районах [16, 17]. Стационары оборудованы осадкоприемниками, гравитационными лизиметрами, опадоуловителями, коллекторами для сбора стволочных вод, температурными датчиками воздуха и почвы [18, 19]. С 2023 г. на площадках проводятся измерения эмиссии углекислого газа. За годы функционирования сети мониторинговых станций создана обширная база данных по состоянию различных компонентов наземных экосистем в зоне воздействия промышленных объектов АО «Кольская ГМК» [20, 21]. В настоящее время выбросы сернистого ангидрида, меди и никеля снизились по сравнению с 1990 г. Выявлены некоторые позитивные сдвиги в сторону улучшения состояния наземных экосистем: снижение концентраций поллютантов в атмосферных выпадениях, почвенных водах, растениях [22–25]. Зафиксировано начало восстановления напочвенного покрова в зоне техногенной пустоши и увеличение разнообразия мохообразных и лишайников в этих местообитаниях [26].

С 1991 г. в зоне воздействия горнопромышленных предприятий действует также сеть постоянных мониторинговых станций водных экосистем и стационар комплексного экологического мониторинга «Имандра», позволяющие получать информацию о динамике состояния окружающей среды, давать современные и прогнозные оценки состояния пресноводных экосистем в условно-фоновых и антропогенно нарушенных территориях [7, 9–10, 12–15, 27–29].

В заповедниках Мурманской области ведутся ежегодные многолетние исследования биоразнообразия. В заповеднике «Пасвик» в 2010–2020 гг. проведен очередной крупный раунд инвентаризации флоры и фауны, опубликованы аннотированные списки видов объектов растительного и животного мира [30–34]. В последние пять лет наряду с продолжающимся мониторингом биоразнообразия значительное внимание уделяется вопросам восстановления наземных и водных экосистем в окрестностях заповедника, в первую очередь пострадавшим в прежние годы от антропогенной, в том числе промышленной деятельности [34, 35], исследованиям миграций птиц [36–38]. В Лапландском

заповеднике многолетние наблюдения за параметрами окружающей среды, охватываемыми как биотические, так и абиотические показатели, ведутся с момента его открытия в 1930 г. Совокупные показатели по выявленному биоразнообразию приближаются к 2500 видов живых организмов [39–47; и др.]. Первые комплексные исследования Мурманского тундрового заказника начались в 2024 г. в районе озера Кальмозера. Была изучена флора и растительность, охарактеризована орнитофауна [48]. В 2025 г. работы были расширены: исследованы водные (озеро Кальмозеро) и наземные экосистемы в районе горы Магазин-Мусюр [49]. Ранее (1976–1981 гг.) в районе Иоканги проводились только орнитологические работы [50–51].

В 2022 и 2023 гг. в районах размещения объектов компании «Норильский никель» Сибирским отделением РАН был проведен масштабный проект по изучению биоразнообразия «Большая научная экспедиция». В результате был предложен и апробирован интегральный метод оценки состояния экосистем, а также степени негативного воздействия на биоразнообразие с использованием мультиметрического индекса на основе нормированных относительно фона биоиндикационных параметров, названный «интегральным показателем состояния экосистемы» — ИПСЭ [52, 53]. ИПСЭ как индикатор промышленного влияния на окружающую среду был разработан для компании «Норильский никель» с целью оценить экологическую ситуацию в регионах присутствия. В основе данного метода оценки состояния экосистемы лежит сравнение биоразнообразия на нарушенном участке с его показателями на фоновой или эталонной природной территории, где негативное воздействие отсутствует или пренебрежимо мало [52]. В Мурманской области эти исследования было решено проводить на базе сети федеральных особо охраняемых природных территорий в районах современной и планируемой добычи компании «Норильский никель». В 2024 г. были проведены первые исследования и получены обширные результаты, однако их интерпретация вызвала ряд затруднений и показала дисбаланс в объеме исследований разных групп организмов и типов экосистем на трех территориях (заповедник «Пасвик», Лапландский заповедник, Мурманский тундровый заказник).

Перед проведением полевых исследований в 2025 г. была проведена унификация подходов и выделены модельные территории на основании единого принципа в районах заповедника «Пасвик», Лапландского заповедника и Мурманского тундрового заказника. В результате была сформирована единая программа мониторинговых исследований в интересах компании «Норильский никель», которая включала блоки исследования биоразнообразия разных групп организмов и экосистем, так и интеграцию данных экологической сети мониторинга. Разработанный комплексный подход позволяет получать верифицируемые и сравнимые данные, а также проводить разностороннюю интерпретацию полученных результатов.

Подход к разработке программы

Проведение мониторинга биоразнообразия остается одной из приоритетных задач современной экологии и природопользования, особенно в условиях усиливающегося антропогенной нагрузки на экосистемы и происходящие климатические изменения. При проведении мониторинга биологического разнообразия было предложено выделять переменные — ключевые индикаторы биоразнообразия [54], которые позволяют выработать сравнительно небольшой, но исчерпывающий набор индикаторов для мониторинга изменений биологического разнообразия. С их помощью можно составить представление о биоразнообразии и оценить соблюдение международных и национальных целевых показателей по биоразнообразию. Они были нами положены в основу единой программы для заповедников Мурманской области, проводящих исследования в районах деятельности промышленных предприятий.

Любая деятельность, связанная с оценкой, мониторингом, охраной или восстановлением биоразнообразия, должна в значительной степени основываться на принятии и оценке соответствующих наборов или систем количественных показателей, обладающих следующими свойствами:

- возможность представить показатели в виде количественных значений;
- ясное биологическое и экологическое значение — показатели должны непосред-

ственно отражать числовое или функциональное значение;

- соответствие географическому масштабу или охвату, а также уровню биоразнообразия, которое они представляют (популяции, виды, межвидовой уровень и экосистемы);
- репрезентативность для максимально возможной части компонентов биоразнообразия наземных или водных экосистем.

Рабочей группой Арктического совета по сохранению арктической флоры и фауны — CAFF [55] для систематического мониторинга в полярных районах рекомендованы четыре основные группы наземной биоты: 1) растительность (включая грибы); 2) беспозвоночные (в том числе некоторые членистоногие, которые проводят определенные стадии жизни в водной среде); 3) птицы (оседлые и перелетные); 4) млекопитающие (оседлые и мигрирующие).

Мы предлагаем использовать многоуровневый мониторинг с привлечением не только количественных показателей мер биоразнообразия, но и качественных, а также биогеохимических данных для верификации возможного антропогенного воздействия. В основу рекомендаций положен трехуровневый иерархический подход, применяемый CAFF [56] и группой по наблюдениям за Землей [57].

1. Биологические индикаторы — приоритетный компонент экосистемы (отдельный вид, группа видов или сообщество), на котором следует сосредоточить внимание (синоним «вида-индикатора», «вида-биоиндикатора» и пр.).
2. Атрибуты — это величины или группа параметров, при помощи которых определяется состояние конкретного компонента экосистемы.
3. Переменные являются результатом параметра или набора параметров, используемых для представления состояния экосистемы или ее компонента.

В качестве примера биологического индикатора можно привести растительные сообщества, где возможными атрибутами их оценки являются разнообразие, вертикальное и горизонтальное строение, а перемен-

ными — число видов, видовой состав, средние высоты ярусов, характеристика мозаики растительного покрова, покрытия ярусов и покрытия отдельных видов. В результате оценки выбранных биологических индикаторов будет сформирован массив сравнимых между собой значений переменных. Особую роль при анализе их значений будут играть показатели экологического и биогеохимического мониторинга, которые будут ключом к познанию и интерпретации полученных биологических данных. Они позволят проводить сравнения с материалами длительных натуральных наблюдений за состоянием наземных и водных экосистем на значительной территории индустриально развитого региона на высоком методическом уровне для формирования корректного представления о современных процессах в экосистемах. Наличие сети мониторинговых станции является необходимым инструментом для выявления долговременных трендов трансформации качества природных сред, откликов биологических систем на различные виды антропогенного воздействия, оценки критических нагрузок на экосистемы. Накопленный массив многолетних данных является основой для анализа пространственно-временной динамики наземных и водных естественных и нарушенных экосистем, для различных исследований по верификации новых методов мониторинга в регионе.

Выбор биологических индикаторов для наземных экосистем

При подготовке программы 2025–2027 гг. с перспективой на систематический многолетний мониторинг в качестве биологических индикаторов наземных экосистем были выбраны следующие компоненты: растительные сообщества, охраняемые виды растений и животных, инвазионные виды растений, насекомые, птицы и млекопитающие. В программе представлены необходимые работы для оценки атрибутов (показателей биоразнообразия) и типы экосистем, на которых должны быть сфокусированы исследования (таблица).

Растительные сообщества — самый доступный для наблюдения компонент экосистем, который характеризуется динамичностью и чувствительностью к любым изменениям в окружающей среде [58, 59]. В то же время растительность является

ключевым компонентом природно-территориальных комплексов, знания о ее состоянии могут помочь установить взаимосвязи и объяснить изменения, которые могут быть выявлены при мониторинге других групп биологических индикаторов, например птиц и млекопитающих. Для оценки состояния растительных сообществ как биологических индикаторов необходимо проводить наблюдения на сети стационарных мониторинговых геоботанических площадей. При формировании сети площадей необходимо придерживаться катенарного и горно-поясного принципов, а также охватить наиболее типичные и широко распространенные растительные сообщества.

Экологическое состояние основных типов сообществ. Среди исследуемых компонентов экосистем особое внимание необходимо обращать на состояние почвенно-растительного покрова, в том числе учитывать роль растительного компонента в биогеохимическом перераспределении потоков тяжелых металлов на нарушенных территориях. Изменение условий произрастания растений под влиянием аэротехногенного загрязнения и климатических изменений может приводить к нарушениям экосистемных функций сообществ: изменять круговорот биофильных элементов, структуру, продуктивность и разнообразие экосистем. В зоне воздействия выбросов промышленных предприятий наблюдается загрязнение почв и биоты поллютантами, ухудшается санитарное состояние деревьев, сокращается плодородие почвы, что неизбежно сказывается на видовом составе наземной растительности [60, 61]. Атмосферные выпадения также являются информативным индикатором выявления загрязнения атмосферы и одним из важнейших факторов питательного режима почв [16]. Результаты эколого-биогеохимического анализа наземных экосистем позволят зонировать прилегающие к источнику атмосферных выбросов территории, прогнозировать уровни накопления загрязняющих веществ в различных природных компонентах, планировать природоохранные мероприятия.

Инвазивные виды растений. Распространение инвазивных видов как результат хозяйственного освоения территорий является глобальной проблемой [62], влекущей деградацию и гомогенизацию экосистем [63]. В глобальном масштабе чужеродные виды

являются одной из наиболее серьезных угроз биоразнообразию [64]. Многочисленными исследованиями показано, что внедрение чужеродных видов в природные сообщества может нанести значительный экологический и экономический ущерб [65]. Инвазионные виды являются важными биологическими индикаторами трансформации экосистем под воздействием антропогенных и климатических факторов. В задачи мониторинга входит определение видового состава, экологии и динамики распространения чужеродных видов.

В настоящее время для Мурманской области нет утвержденного перечня инвазионных видов. Многолетние исследования Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН (ПАБСИ КНЦ РАН) позволили к числу опасных видов инвазивных (чужеродных) растений отнести: борщевик Сосновского (*Heracleum sosnowskyi*), розу морщинистую (*Rosa rugosa*), люпин нутканский (*Lupinus nootkatensis*), люпин многолистный (*Lupinus polyphyllus*), недотрогу железконосную (*Impatiens glandulifera*) и кенигию (таран) Вейриха (*Koenigia weyrichii*).

Редкие и охраняемые виды сосудистых растений традиционно используются в качестве видов-индикаторов для мониторинга или оценки состояния окружающей среды [66–68]. К ним отнесены виды, имеющие официальный охранный статус включенных в региональную [69] и федеральную [70] Красные книги. Для проведения мониторинга редких и охраняемых видов используются только сосудистые растения, поскольку они позволяют провести количественный учет, отметить фенологическую фазу и оценить жизненное состояние. Данные об их численности позволяют интерпретировать происходящие изменения, которые могут быть вызваны как естественными, так и антропогенными факторами. При обнаружении новых местонахождений ранее известных видов и новых видов, включенных в Красные книги, рекомендуется включать их в программу мониторинга.

Население птиц чувствительно к изменениям экосистем и чутко реагирует на трансформационные процессы — климатические, сукцессионные и антропогенные. В различных типах экосистем птицы являются значимым компонентом пищевых и экологических сетей. Орнитофауна в районе промышленных

предприятий подвергается прямому и косвенному воздействию в связи с изменением местообитаний, в том числе растительности, загрязнением водоемов и водотоков, изменениям в структуре и емкости трофических сетей. Влияние различных типов воздействий может приводить к изменениям видового состава, представленности экологических групп, плотности населения, смещению фенологических дат и ряду внутри популяционных параметров. Для оценки состояния населения птиц важно проводить наблюдения в течение всех фенологических сезонов на сети маршрутных, площадных и точечных участков.

Отдельно рекомендуется включать хозяйственно значимые, синантропные и инвазионные виды птиц. В качестве объектов мониторинга структуры населения птиц по параметрам видового и экологического разнообразия должна выступать ключевая (самая разнообразная и многочисленная) группа — воробьеобразные. В водных и околоводных типах сообществ в качестве индикаторных групп могут выступать водоплавающие и околоводные птицы. Отдельные наблюдения проводятся за охраняемыми видами птиц, включенными в региональную [69] и федеральную [71] Красные книги.

Млекопитающие. Для оценки изменения состояния экосистем наиболее чувствительной и показательной являются мелкие млекопитающие. В отличие от крупных млекопитающих они являются массовыми, что необходимо для проведения количественной оценки. Для ее проведения используются различные методы в соответствии с группами индикаторов биоразнообразия. Наиболее широко распространенный метод учета — ловушко-линии. Он позволяет провести видовое определение (как правило, ведется по зубной системе), оценить численность, структуру популяции. Морфологические пробы могут быть использованы для исследования гистологических особенностей и загрязнения поллютантами.

Наземные беспозвоночные. Основной проблемой при оценке биоразнообразия сообществ почвенных беспозвоночных в условиях Севера является их низкое видовое разнообразие и невысокая численность [72–74]. Исследование видов индикаторов может служить перспективным направлением для оценки состояния природных экосистем

Севера, так как в этом случае нет привязки к численности и количеству видов в биотопе, поэтому можно рекомендовать использование видов-индикаторов жужелиц как качественный показатель, который не требует длительных и массивных сборов. Дополнительно стоит анализировать сообщества жужелиц по биотопическому преферендуму и жизненным формам, что позволит отследить изменения структуры сообществ [75–77].

Пионерные инвентаризационные исследования. В Мурманском тундровом заказнике помимо указанных биологических индикаторов были также рекомендованы для проведения работы по описанию ключевых типов растительных сообществ (тундры, сообщества бугристых болот) и инвентаризация разнообразия сосудистых растений, печеночников, лишайников и позвоночных животных. Необходимость этих работ связана с отсутствием информации по большей части территории заказника и носит фундаментальный характер, являясь отправной точкой для дальнейших мониторинговых работ.

Выбор биологических индикаторов для водных экосистем

Подход в оценке биологического разнообразия и качества вод по показателям гидробиологических сообществ водоема должен быть основан на принципе анализа всех его компонентов: химия вод и донных отложений, состояние сообществ планктона (фито- и зоопланктона), бентоса и рыб. В качестве индикаторных организмов может быть использован широкий круг представителей каждой группы. Выбор видов индикаторов определяется исходя из способности организмов быть маркерами процессов эвтрофирования/биогеогенной нагрузки, токсичной нагрузки (тяжелые металлы) и климатических флуктуаций. В сообществах фитопланктона такими индикаторами могут быть представители водорослей и цианопрокариот; в зоопланктонных сообществах — представители коловраток и ракообразных; в бентосных сообществах — олигохеты, моллюски, двукрылые, ручейники и амфиподы.

Отдельную индикаторную группу представляют потенциально токсичные цианопрокариоты в составе фитопланктона, которые способны к массовому развитию (цветению вод) и выделению токсичных

соединений — цианотоксинов, которые могут негативно сказаться на качестве вод, состоянии других гидробионтов и биоразнообразии в целом.

Для рыбной части сообщества целесообразно использовать наиболее распространенные виды рыб (сиг, окунь и щука). Арктический голец и кумжа рекомендуются для оценки состояния водоемов зон незначительного воздействия. При этом сиг европейский ввиду широкой распространенности, чувствительности к качеству вод, но при этом обладающий известной устойчивостью к процессам антропогенных преобразований водоемов, является наиболее предпочтительным тест-объектом исследований.

Территория действия программы мониторинга

Территория ведения мониторинга влияния на окружающую среду для компании «Норильский никель» охватывает районы заповедника «Пасвик», Лапландского заповедника и заказника федерального значения «Мурманский тундровый». На каждой охраняемой территории и в ее окрестностях выделено три исследовательских полигона по мере удаления от существующего завода или места планирующегося строительства завода.

Государственный природный заповедник «Пасвик» находится в Печенгском округе на северо-западе Мурманской области. Территория заповедника площадью



Рис. 1. Расположение станций многолетнего мониторинга и полигоны, обследованные в 2025 г. в рамках реализации Программы. Рисунок составлен по данным авторов О.В. Петровой (ИППЭС КНЦ РАН, ПАБСИ КНЦ РАН).

Fig. 1. Locations of long-term monitoring stations and test sites examined in 2025 as part of the program. Figure prepared using data provided by O.V. Petrova (INEP KSC RAS, PABGI KSC RAS).

146,8 км² (площадь суши — 117 км²) располагается между российско-норвежской государственной границей и линией инженерно-технических сооружений и простирается узкой полосой (от 350 м до 10 км) на 44 км по правому берегу р. Паз от Хевоскоски ГЭС на юге до оз. Сальмиярви на севере. По ландшафтному районированию Мурманской области [78] территория заповедника относится к Лотто-Тулломскому округу, включающему Тальвикульский ландшафт низких варак, единичных тунтури и озер. По флористическому районированию [79] территория заповедника относится к таежной части Северо-Западного флористического района, отличающегося расчленением рельефа на отдельные возвышенности и спецификой флористического состава (сюда проникают западные и арктические виды).

Для исследования биотического компонента в заповеднике заложены три полигона: 1) северная часть заповедника «Пасвик» и окр. пос. Никель, гора Шпиль (Сяраслаки); 2) центральная часть заповедника «Пасвик», включающая гору Калкупя и окр. оз. Каскамаярви; 3) южнее заповедника «Пасвик», окр. бывшего н. п. Янискоски. Мониторинговые площадки экологического состояния лесов расположены на территории заповедника по градиенту загрязнения с северо-востока на юго-запад (рисунок). Для оценки состояния водных экосистем было выбрано оз. Каскамаярви (полигон 2) и водохранилище вблизи пос. Раякоски, расположенное между полигонами 2 и 3.

Лапландский государственный природный биосферный заповедник на подведомственной территории города Мончегорск в центральной части Мурманской области. Территория заповедника в ландшафтном отношении входит в состав Кольского северного района — Карельской провинции Северо-Запада России [78]. Это типичный участок, характеризующийся чередованием озерных котловин, речных долин, всхолмленных равнин с обилием низких (до 120 м относительной высоты) скальных гряд и небольших по площади горных поднятий с высотами 600–1115 м надур. м. и выраженной вертикальной поясностью. В состав заповедника входят крупные горные массивы — Нявка-тундра, Чуна-тундра, Монче-тундра и Сальные тундры. Наибольшим по площади является горный массив

Чуна-тундра, вытянутый в меридиональном направлении на 40 км. Южные подножия гор замыкаются дугообразной тектонической впадиной, заполненной водами озера Чунозеро (глубина до 40 м). Территория относится к таежному Имандровскому флористическому району, отличающемуся разнообразием флоры и наличием «островных» местонахождений более южных видов [79].

Для исследования биотического компонента были заложены три полигона: 1) район Матрешкиных озер, ущелья Чингльскорр и оз. Красная Ламбина; 2) район оз. Чунозеро и горы Чуна-тундра; 3) район оз. Нижняя Пиренга и горы Нявчик. В 2026 г., учитывая полученные данные в 2024 и 2025 гг., первый полигон было предложено перенести в район р. Вите, озер Островского и Девичья Ламбина и горы Майявр. Мониторинговые площадки экологического состояния лесов расположены на территории заповедника по градиенту загрязнения (рисунок). Исследования химии вод, донных отложений и гидробиологической составляющей водных экосистем в 2025 г. проводилось на оз. Чунозеро. В 2026 г. работы планируется проводить на оз. Девичья Ламбина, а в 2027 г. — в акватории южной части оз. Нижняя Пиренга (полигон 3).

Мурманский тундровый заказник расположен в Ловозерском округе Мурманской области. В ландшафтном отношении заказник расположен на всхолмленных поверхностях пенепленезированного низкогорья в северо-восточной, континентальной части Кольского полуострова к северо-западу от гряд возвышенности Кейвы, в пределах Кольской лесотундровой ландшафтной провинции [78]. Согласно флористическому районированию он относится к подзоне лесотундры Териберского флористического района, где господствуют ерниково-лишайниковые тундры и лишайниковые березовые криволесья [79]. Для исследований наземных экосистем в целом предложено заложить три полигона. В связи с высокой стоимостью вертолетной заброски экспедиции в район работ ежегодно проводится обследование только одного полигона для исследования всех компонентов программы. Первый полигон охватывает район горы Марья, оз. Кальмозера, устье р. Тичка на р. Иоканга; он был обследован в 2024 г. Второй полигон включает район горы Магазин-Мусюр близ р. Иоканга и оз. Сухое; обследован

в 2025 г. Третий полигон в 2026 г. предполагается размесить по северному борту долины р. Иоканга между оз. Иокявр и горы Покруайв. Изучение качества вод, состояния гидробиологических сообществ и рыбной фауны водных экосистем проводилось в 2025 г. на оз. Кальмозеро. Следующий этап работ — оценка состояния экосистемы оз. Иокявр (2026 г.). Выбор водного объекта финального этапа работ Программы будет определен после работ 2026 г.

Единая программа исследований на 2025–2027 гг.

Ниже представлена единая программа исследований особо охраняемых природных территорий Мурманской области на 2025–2027 гг., реализуемая в районах современной и планируемой добычи

компании «Норильский никель» (таблица). В ней приведены биологические индикаторы, их атрибуты и необходимые работы для их оценки. Для Лапландского заповедника и заповедника «Пасвик» определен тип работ на определенных типах экосистем предлагается исследовать в один год, чередуя разные типы экосистем между годами. Это позволяет получать данные, пригодные для дальнейшего сравнения. В Мурманском тундровом заказнике, напротив, исследуются не определенные типы экосистем, а все биологические индикаторы на одном полигоне исследования, что обусловлено значительной удаленностью и территории и высокими логистическими затратами для организации полевых работ. В результате реализации трехлетней программы она может стать программой постоянного мониторинга.

Таблица 1. Единая программа исследований на особо охраняемых природных территориях Мурманской области на 2025–2027 гг., реализуемая в районах современной и планируемой добычи компании «Норильский никель»

Table 1. Unified research program for protected areas of the Murmansk Oblast for 2025–2027, implemented in areas of current and planned Nor Nickel operations

Типы работ	Атрибуты биоразнообразия	Единицы измерения	Типы экосистем	Лапландский заповедник			Заповедник «Пасвик»			Мурманский тундровый заказник		
				П1	П2	П3	П1	П2	П3	П1	П2	П3
Биологические индикаторы: растительные сообщества												
Закладка постоянных пробных площадей в основных типах сообществ с выполнением полных геоботанических описаний	Видовое разнообразие всех групп фототрофной биоты, проективное покрытие по ярусам и частное, средние вегетативные высоты, вертикальное и горизонтальное строение сообществ (с применением БПЛА)	описание	Горные тундры	26	26	26	26	26	–	–	–	–
			Березовые криволесья и редколесья	26	26	26	26	26	–	27	25	26
			Сосновые леса	25	25	25	25	25	25	–	–	–
			Еловые леса	25	25	25	–	25	–	–	–	–
			Кустарничковые болота	27	27	27	27	27	27	27	25	26
Описание ключевых типов растительных сообществ	Видовое разнообразие всех групп фототрофной биоты, проективное покрытие по ярусам и частное, средние вегетативные высоты	описание	Можжевелники	–	–	–	–	–	–	–	25	–
			Равнинные тундры	–	–	–	–	–	–	–	–	26
			Бугристые болота	–	–	–	–	–	–	27	25	–
Экологическое состояние основных типов сообществ	Состав атмосферных выпадений, химия почв, листьев древесных растений, лишайников напочвенного покрова, листовая диагностика, оценка жизненного состояния деревьев, учет вредителей и болезней	комплекс работ	Сосновые леса	–	25 26 27	–	–	25 26 27	–	–	–	–
			Еловые леса	–	25 26 27	–	–	–	–	–	–	–
			Березовые редколесья	–	–	–	–	–	–	27	25	26

Продолжение таблицы 1

Типы работ	Атрибуты биоразнообразия	Единицы измерения	Типы экосистем	Лапландский заповедник			Заповедник «Пасвик»			Мурманский тундровый заказник		
				П1	П2	П3	П1	П2	П3	П1	П2	П3
Биологические индикаторы: фототрофная биота												
Обследование популяций редких видов всех групп фототрофной биоты	Оценка размера популяций и их состояния, функциональные черты растений, фиксация фенологии	полевое обследование	Редкие типы экосистем с обилием охраняемых видов	`25` `27	`25` `27	`25` `27	`25` `26	`25` `26	`25`	`27`	`25`	`26`
Выявление чужеродных и потенциально инвазионных видов	Размер популяций, их функциональные черты, состояние популяций, экология	полевое обследование	Участки антропогенных нарушений, в т.ч. территории кордонов	`26`	`26`	`26` `27	`25`	`26`	`27`	`27`	`25`	`26`
Инвентаризация разнообразия сосудистых растений	Выявление информации о видовом разнообразии	полевое обследование	Территория полигона или специальное обследование (*)	-	-	-	-	-	-	`27`	`25`	`26`
Инвентаризация разнообразия лишайников	Выявление информации о видовом разнообразии	полевое обследование	Территория полигона или специальное обследование (*)	-	-	-	-	-	-	`27`	`25`	`26`
Биологические индикаторы: наземные позвоночные												
Стандартные учеты птиц по маршрутам	Видовое разнообразие, распределение, численность и/или плотность, ключевые места обитания и пути миграции	учет	Фоновые экосистемы (для заповедников леса, для МТЗ редколесья и тундры)	`25` `26` `27	`25` `26` `27	`25` `26` `27	`25` `26` `27	`25` `26` `27	`25` `26` `27	`27`	`25`	`26`
			Водные и околотовдные экосистемы	`25` `26` `27	`25` `26` `27	`25` `26` `27	`25` `26` `27	`25` `26` `27	`27`	`25`	`26`	
Стандартные учеты мелких млекопитающих	Видовое соотношение, численность, структура популяции, гистологические особенности, загрязнение поллютантами	ловушко-линии, канавки	Фоновые экосистемы (для заповедников леса, для МТЗ редколесья и тундры)	`25` `26` `27	`25` `26` `27	`25` `26` `27	`25` `26` `27	`25` `26` `27	`25` `26` `27	`27`	`25`	`26`
			Горные тундры	`25` `26`	`25` `26`	-	-	-	-	-	-	-
			Долинные леса	-	-	-	-	-	-	`27`	`25`	`26`
Инвентаризация разнообразия позвоночных животных	Выявление информации о видовом разнообразии	полевое обследование	Все экосистемы ООПТ	-	-	-	-	-	-	`27`	`25`	`26`
Биологические индикаторы: наземные беспозвоночные												
Стандартные учет жулици	Определение видового состава и уловистости (в экз. на 100 л/с), экологическая структура населения, структура доминирования, установление видов-индикаторов	линия учета	Фоновые экосистемы	`25` `26` `27	`25` `26` `27	`25` `26` `27	`25` `26` `27	`25` `26` `27	`25` `26` `27	`27`	`25`	`26`
Биологические индикаторы: водные экосистемы												
Оценка качества вод	Химический состав	полевое обследование	Озерные экосистемы	-	`25` `26` `27	-	`25` `26` `27	-	-	`25`	`26`	`27`
Оценка качества донных отложений	Химический состав	полевое обследование	Озерные экосистемы	-	-	-	-	-	-	`25`	`26`	`27`

Окончание таблицы 1

Типы работ	Атрибуты биоразнообразия	Единицы измерения	Типы экосистем	Лапландский заповедник			Заповедник «Пасвик»			Мурманский тундровый заказник		
				П1	П2	П3	П1	П2	П3	П1	П2	П3
Оценка состояния фитопланктонных сообществ	Оценка видового разнообразия, численность, биомасса	полевое обследование	Озерные экосистемы	-	`25 `26 `27	-	`25 `26 `27	-	-	`25 `26 `27	`26	`27
Оценка состояния зоопланктонных сообществ	Оценка видового разнообразия, численность, биомасса	полевое обследование	Озерные экосистемы	-	`25 `26 `27	-	`25 `26 `27	-	-	`25 `26 `27	`26	`27
Оценка состояния бентосных сообществ	Оценка видового разнообразия, численность, биомасса	полевое обследование	Озерные экосистемы	-	`25 `26 `27	-	`25 `26 `27	-	-	`25 `26 `27	`26	`27
Оценка состояния рыбной части сообществ	Оценка видового разнообразия, размерно-весовая, половая и возрастная структура, оценка состояния здоровья рыб	полевое обследование	Озерные экосистемы	-	`25 `26 `27	-	`25 `26 `27	-	-	`25 `26 `27	`26	`27

Примечание: годы проведения мониторинговых работ: `25 — 2025, `26 — 2026, `27 — 2027. Обозначение мониторинговых полигонов — П1, П2, П3. * — участки могут располагаться не обязательно в границах полигонов, а рядом с ними.

Note: Monitoring years: `25 – 2025, `26 – 2026, `27 – 2027. Monitoring polygons: П1, П2, П3. *Sampling sites may be located adjacent to, but not necessarily within, test site boundaries.

Заключение

Разработка и внедрение единой программы мониторинга экосистем на особо охраняемых природных территориях федерального значения в Мурманской области на 2025–2027 гг. является стратегическим ответом на вызовы, связанные с интенсивным промышленным освоением региона. Предложенная программа обеспечивает методологическое единство и сопоставимость данных, собираемых на территориях заповедника «Пасвик», Лапландского заповедника и Мурманского тундрового заказника (под управлением Кандалакшского заповедника).

Программа охватывает ключевые группы биоты — от растительных сообществ и флоры до населения птиц, млекопитающих и гидробионтов, а также базовые биогеохимические исследования. Это позволяет не только фиксировать текущее состояние экосистем, но и выявлять долгосрочные тренды их трансформации под влиянием как промышленного загрязнения, так и климатических изменений и строить прогнозные модели.

Первые результаты реализации программы в 2025 г. подтверждают ее эффективность: собраны значительные объемы стандартизированных данных, пригодных для пространственно-временного анализа и межрегионального сравнения. Полученная информация служит научной основой для реализации концепции адаптивного управления по схеме «состояние среды — воздействие — управленческий отклик» и формирования обоснованных рекомендаций по минимизации негативного антропогенного влияния. Предложенные нами биологические индикаторы и проведенный анализ их переменных являются обоснованием для принятия конкретных управленческих решений и планирования работ по минимизации или ликвидации негативного воздействия и сохранение биоразнообразия региона присутствия.

Она является одним из важнейших инструментов для выполнения цели Национальной стратегии сохранения биоразнообразия России: «сохранение биоразнообразия природных биосистем на уровне, обеспечивающем их устойчивое существование».

и не истощительное использование, а также сохранение разнообразия одомашненных и культивируемых форм живых организмов и созданных человеком экологически сбалансированных природно-культурных комплексов на уровне, обеспечивающем

развитие эффективного хозяйства и формировании оптимальной среды для жизни человека». Данная цель определяет направление движения на долговременную перспективу и не ограничивается каким-либо временным периодом.

Литература

1. Makarov D.V., Borovichev E.A., Klyuchnikova E.M., Masloboev V.A. Environmental protection and sustainable development of the mining industry in Murmansk Region, Russia. Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2020;23(1):63–71. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2020-23-1-63-71>
2. Аксенова О.В., Бочарников В.Н., Боровичёв Е.А., Данилов А.Ф., Денисов Д.Б., Зацаринный И.В., и др. Природа и коренное население Арктики под влиянием изменения климата и индустриального освоения: Мурманская область. Москва: Графит; 2020.
3. Лукина Н.В., Никонов В.В. Состояние словых биогеоценозов в условиях техногенного загрязнения. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН; 1993.
4. Лукина Н.В., Сухарева Т.А., Исаева Л.Г. Техногенные дигрессии и восстановительные сукцессии в северотаёжных лесах. Москва: Наука; 2005.
5. Сухарева Т.А. Элементный состав листьев древесных растений в условиях техногенного загрязнения. Химия в интересах устойчивого развития. 2012;(3):369–376.
6. Ershov V., Ryabov N., Sukhareva T. The link between stemflow chemistry and forest canopy condition under industrial air pollution. Forests. 2026;17(1):147. <https://doi.org/10.3390/f17010147>
7. Моисеенко Т.И., Даувальтер В.А., Лукин А.А., Кудрявцева Л.П., Ильящук Б.П., Ильящук Л.И. Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра. Москва: Наука; 2002.
8. Даувальтер В.А. Геоэкология донных отложений озер. Мурманск: Изд-во Мурманского гос. техн. ун-та; 2012.
9. Даувальтер В.А., Сандимиров С.С., Денисов Д.Б., Демин В.И., Кашулин Н.А., Терентьев П.М. и др. Экологическое состояние озера Имандра. Т. 1: Гидролого-геохимические условия. Апатиты: изд-во КНЦ РАН; 2023. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.484.6>
10. Денисов Д.Б., Валькова С.А., Даувальтер В.А., Королева И.М., Разумовская А.В., Терентьев П.М. и др. Лимнологические исследования Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН. Труды Кольского научного центра РАН. 2020;(6-19):68–86
11. Денисов Д.Б., Кашулин Н.А., Терентьев П.М., Валькова С.А. Современные тенденции изменения биоты пресноводных экосистем Мурманской области. Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2009;12(3):525–538.
12. Кашулин Н.А., Даувальтер В.А., Денисов Д.Б., Валькова С.А., Вандыш О.И., Терентьев П.М., Кашулин А.Н. Некоторые аспекты современного состояния пресноводных ресурсов Мурманской области. Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2013;16(1):98–107.
13. Кашулин Н.А., Даувальтер В.А., Денисов Д.Б., Валькова С.А., Вандыш О.И., Терентьев П.М., Зубова Е.М., Королева И.М., Косова А.Л., Черепанов А.А. Комплексные исследования пресноводных экосистем Фенноскандии. Труды Кольского научного центра РАН. 2018;9(9-6):34–86. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.9.34-86>
14. Кашулин Н.А., Денисов Д.Б., Валькова С.А., Вандыш О.И., Терентьев П.М. Современные тенденции изменений пресноводных экосистем Евро-Арктического региона. Труды Кольского научного центра РАН. 2012;(3):7–54.
15. Масlobоев В.А., Боровичев Е.А., Валькова С.А., Вокуева С.И., Гилязов А.С., Даувальтер В.А. и др. Экосистемы в районе Кольской АЭС (Мурманская область): современное состояние: Монография. Апатиты: ФИЦКНЦРАН; 2024. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.525.6>

16. Лукина Н.В., Никонов В.В. Биогеохимические циклы в лесах Севера в условиях аэротехногенного загрязнения. Ч. 1. Апатиты: Изд. КНЦ РАН; 1996.
17. Ершов В.В., Исаева Л.Г., Сухарева Т.А., Урбанавичюс Г.П., Иванова Е.А., Белова Е.А. Организация мониторинговых исследований состояния северотаежных лесов на территории Лапландского заповедника. Вестник Кольского научного центра РАН. 2021;13(2):34–42. <https://doi.org/10.37614/2307-5228.2021.13.2.004>
18. Исаева Л.Г., Сухарева Т.А., Боровичев Е.А., Урбанавичюс Г.П., Химич Ю.Р., Зенкова И.В. и др. Изучение и охрана наземных экосистем Мурманской области. Труды Кольского научного центра РАН. 2018;9(9-6):6–33. <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.9.6-33>
19. Сухарева Т.А., Ершов В.В., Иванова Е.А., Штабровская И.М., Алфертьев Н.Л., Живов Д.А., Рябов Н.С. Биогеохимический мониторинг основных лесов на территории Лапландского заповедника (Мурманская область). Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Естественные и гуманитарные науки. 2025;4(3):127–144. <https://doi.org/10.37614/2949-1185.2025.4.3.008>
20. Сухарева Т.А., Ершов В.В., Исаева Л.Г., Иванова Е.А., Зенкова И.В., Рябов Н.С., Штабровская И.М. Многолетние данные комплексного эколого-биогеохимического мониторинга лесных экосистем Лапландского заповедника. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024624519 от 17.10.2024 г.
21. Ершов В.В., Сухарева Т.А., Исаева Л.Г., Иванова Е.А., Живов Д.А., Рябов Н.С. Химический состав различных компонентов лесных экосистем на северо-западе Кольского полуострова. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025623970 от 23.09.2025 г.
22. Ершов В.В., Лукина Н.В., Орлова М.А., Исаева Л.Г., Смирнов В.Э., Горбачева Т.Т. Оценка динамики состава почвенных вод северотаежных лесов при снижении аэротехногенного загрязнения выбросами медно-никелевого комбината. Сибирский экологический журнал. 2019;(1):119–132. <https://doi.org/10.15372/SEJ20190110>
23. Сухарева Т.А., Ершов В.В., Исаева Л.Г., Шкондин М.А. Оценка состояния северотаежных лесов в условиях снижения промышленных выбросов комбинатом «Североникель». Цветные металлы. 2020;(8):33–41. <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.08.05>
24. Сухарева Т.А., Ершов В.В., Иванова Е.А. Содержание тяжелых металлов и серы в лесных экосистемах в зоне воздействия комбината «Печенганикель» в связи с прекращением атмосферных выбросов. Лесоведение. 2025;(1):106–123. <https://doi.org/10.31857/S0024114825010094>
25. Ershov V., Sukhareva T., Isaeva L., Ivanova E., Urbanavichus G. Pollution-induced changes in the composition of atmospheric deposition and soil waters in coniferous forests at the northern tree line. Sustainability. 2022;14:15580. <https://doi.org/10.3390/su142315580>
26. Урбанавичюс Г.П., Боровичев Е.А., Ершов В.В. Криптогамные организмы – пионеры восстановления северотаежных лесов при снижении воздушного промышленного загрязнения. Лесоведение. 2021;(2):195–207. <https://doi.org/10.31857/S0024114821020108>
27. Dauvalter V.A., Kashulin N.A. Assessment of the Ecological State of the Arctic Freshwater System Based on Concentrations of Heavy Metals in the Bottom Sediments. Geochemistry International. 2018;56(8):842–856. <https://doi.org/10.1134/S0016702918080037>
28. Denisov D.B., Barinova S.S. Algal diversity and ecological variables in the arctic lakes of the Kola peninsula, Russian North. Issues of Modern Algology. 2015;(2):4.
29. Kashulin N.A., Dauvalter V.A., Denisov D.B., Valkova S.A., Vandysh O.I., Terentjev P.M., Kashulin A.N. Selected aspects of the current state of freshwater resources in the Murmansk Region, Russia. Journal of Environmental Science and Health, Part A. 2017;52(9):921–929. <https://doi.org/10.1080/10934529.2017.1318633>
30. Боровичев Е.А., Бойчук М.А. Мохообразные заповедника «Пасвик». Петрозаводск: КарНЦ РАН; 2018.
31. Урбанавичюс Г.П., Фадеева М.А. Лихенофлора заповедника «Пасвик»: разнообразие, распространение, экология, охрана. Петрозаводск: КарНЦ РАН; 2018.
32. Зацаринный И.В., Большаков А.А., Бузун В.А., Макарова О.А., Поликарпова Н.В., Катаев Г.Д. и др. Позвоночные животные заповедника «Пасвик». Петрозаводск: Карельский научный центр РАН; 2018.
33. Кравченко А.В. Сосудистые растения заповедника «Пасвик» и смежной территории Мурманской области. Петрозаводск: КарНЦ РАН; 2020.

34. Golubkina N., Sheshnitsan S., Koshevarov A., Plotnikova U., Sosna E., Lapchenko V., et al. Bioavailable Forms of Heavy Metals and Se in Soil in the Vicinity of the Pechenganikel Smelting Plant and the Relationship with Mineral Composition and Antioxidant Status of Biocrusts. *Standards*. 2025;5(4):28. <https://doi.org/10.3390/standards5040028>
35. Хлебосолова О.А., Сосна Е.М., Быстров А.А. Сбор фенологических и других данных по восстановительным сукцессиям на техногенных пустошах (Никель, Мурманская область). В: Охрана природы и гражданская наука: Материалы III Всерос. науч.-практ. фенологической конф. (9-12 сент. 2025 г., Никель, Мурманская область, ФГБУ «Государственный заповедник «Пасвик»). Москва: Товарищество научных изданий КМК; 2025, с. 103–108.
36. Мельников Е.Ю., Слесарева Е.А., Смолякова Д.С., Валова Е.В., Большаков А.В., Поликарпова Н.В. Редкие виды птиц заповедника «Пасвик» в отловах стационара «Остров Варлама». *Амурский зоологический журнал*. 2025;XVII(1):56–65.
37. Мельников Е.Ю., Слесарева Е.А., Смолякова Д.С., Поликарпова Н.В. Миграционные перемещения воробьиных птиц в долине р. Паз в летне-осенний период (по данным стационара «Остров Варлама»). *Российский журнал прикладной экологии*. 2025;(3):18–22. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2025.3.18.22>
38. Смолякова Д.С., Мельников Е.Ю., Слесарева Е.А., Поликарпова Н.В. Итоги исследований осеннего пролёта птиц семейства дроздовые (Turdidae) в долине реки Паз заповедника «Пасвик». *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология*. 2025;25(4):469–476. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-4-469-476>
39. Берлина Н.Г., Костина В.А. Флора сосудистых растений Лапландского заповедника: аннотированный список. В: Труды Лапландского государственного природного биосферного заповедника. Москва: Перо; 2012, вып. 6, с. 112–198.
40. Урбанавичюс Г.П., Урбанавичене И.Н., Мелехин А.В. Лихенофлора Лапландского государственного природного биосферного заповедника (аннотированный список). Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН; 2013.
41. Боровичев Е.А. Аннотированный список печеночников (Marchantiophyta) Лапландского заповедника. В: Труды Лапландского государственного природного биосферного заповедника. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН; 2019, с. 30–65. <https://doi.org/10.25702/KSC.978-5-91137-392-4.30-65>
42. Белкина О.А., Андреева Е.Н., Лихачев А.Ю. Материалы к флоре мхов Лапландского заповедника. В: Труды Лапландского государственного природного биосферного заповедника. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН; 2019, с. 66–118. <https://doi.org/10.25702/KSC.978-5-91137-392-4.66-118>
43. Осипов Д.В. Пауки (Aranei) Лапландского заповедника. В: Труды Лапландского государственного природного биосферного заповедника. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН; 2019, с. 119–194. <https://doi.org/10.25702/KSC.978-5-91137-392-4.119-194>
44. Янковский А.В. Мошки (Diptera, Simuliidae) Лапландского государственного биосферного заповедника и описание нового вида рода *Argentisimulium* Rubzovet Yankovsky, 1982. *Энтомологическое обозрение*. 2006;85(1):226–233.
45. Dmitriev D.A. Cicadina (Hemiptera: Auchenorrhyncha) of the Kola Peninsula basing mainly on the material collected in the Lapland Biosphere Nature Reserve. *Denisia*. (N.F.). 2002;4(176):339–348.
46. Катаев Г.Д. Фауна и экология млекопитающих (Rodentia, Insectivora) Лапландии. СПб.: Изд-во ВВМ; 2021.
47. Владимирова Н.В., Новгородова Т.А., Чуева Н.В. Сообщества панцирных клещей (ACARI:ORIBATIDA) Лапландского заповедника (Мурманская область). *Сибирский экологический журнал*. 2025;32(3):422–436. <https://doi.org/10.15372/SEJ20250308>
48. Отчет о выполнении работ по теме «Мониторинг состояния биоразнообразия государственного заказника «Мурманский тундровый». Кандалакша; 2024.
49. Отчет о выполнении научно-исследовательских работ по теме «Комплексная оценка состояния экосистем Мурманского тундрового заказника в период 2025-2027 гг., отчет за 2025 г.». Кандалакша; 2025.
50. Михайлов К.Е. Авифауна зональных тундр северной части Кольского полуострова. *Русский орнитологический журнал*. 1993;2(1):7–28.

51. Михайлов К.Е., Фильчагов А.В. Особенности распространения и расселения некоторых видов птиц в тундре Кольского полуострова. *Русский орнитологический журнал*. 2012;21(767):1395–1405.
52. Novgorodova T.A., Abramov S.A., Glupov V.V. An integrated method for assessing the state of biodiversity of disturbed ecosystems. *Euroasian entomological Journal*. 2024;23(6):297–307. <https://doi.org/10.15298/euroasentj.23.06.01>
53. Отчет о научно-исследовательской работе «Углубленный анализ результатов, полученных в ходе Большой научной экспедиции 2022–2023 гг., проработка методической основы интегральной оценки состояния экосистем». Новосибирск: ИСиЭЖ СО РАН; 2024.
54. Vihervaara P., Auvinen A. P., Mononen L., Törmä M., Ahlroth P., Anttila S., Virkkala R. How essential biodiversity variables and remote sensing can help national biodiversity monitoring. *Global Ecology and Conservation*. 2017;10:43–59. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2017.01.007>
55. Christensen T., Barry T., Taylor J.J., Doyle M., Aronsson M., Braa J., et al. Developing a circumpolar programme for the monitoring of Arctic terrestrial biodiversity. *Ambio*. 2020;49(3):655–665. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01311-w>
56. Christensen T., Payne J., Doyle M., Ibaruchi G., Taylor J., Schmidt N.M., et al. The Arctic terrestrial biodiversity monitoring plan. Akureyri: CAFF; 2013.
57. Pereira H.M., Ferrier S., Walters M., Geller G.N., Jongman R.H.G., Scholes R.J., et al. Essential Biodiversity Variables. *Science*. 2013;339(6117):277–278. <https://doi.org/10.1126/science.1229931>
58. Воронов А.Г. Геоботаника. Изд. 2-е. Москва: Высшая школа; 1973.
59. Кораблёв А.П., Мирин Д.М. Динамика растительных сообществ: теория и методические аспекты. *Растительность России*. 2025;(52):3–20. <https://doi.org/10.31111/veg-rus/2025.52.3>
60. Черненкова Т.В., Басова Е.В., Бочкарев Ю.Н., Пузаченко М.Ю. Оценка биоразнообразия лесов в зоне влияния горно-металлургического комбината «Североникель». *Лесоведение*. 2009;(6):32–45.
61. Лянгузова И.В., Гольдвирт Д.К. Фадеева И.К. Пространственно-временная динамика загрязнения Al-Fe-гумусового подзола в зоне влияния комбината цветной металлургии. *Почвоведение*. 2016;(10):1261–1276. <https://doi.org/10.7868/So032180X16100105>
62. Kumschick S., Gaertner M., Vilà M., Essl F., Jeschke J. M., Pyšek P., et al. Ecological impacts of alien species: quantification, scope, caveats, and recommendations. *BioScience*. 2015;65(1):55–63. <https://doi.org/10.1093/biosci/biu193>
63. Dar P.A., Reshi Z.A. Components, processes and consequences of biotic homogenization: a review. *Contemporary Problems of Ecology*. 2014;7(2):123–136. <https://doi.org/10.1134/S1995425514020103>
64. Lockwood J.L., Hoopes M.F., Marchetti M.P. *Invasion ecology*. John Wiley & Sons; 2013.
65. Hejda M., Pyšek P., Jarošík V. Impact of invasive plants on the species richness, diversity and composition of invaded communities. *Journal of ecology*. 2009;97(3):393–403. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01480.x>
66. Ott W.R. *Environmental indices: theory and practice*. OSTI; 1978.
67. Thomas L., Buckland S.T., Rexstad E.A., Laake J.L., Strindberg S., Hedley S.L., et al. Distance software: design and analysis of distance sampling surveys for estimating population size. *Journal of Applied Ecology*. 2010;47(1):5–14. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01737.x>
68. Cairns J., Patil G.P., Waters W.E. (ed.). *Environmental biomonitoring, assessment, prediction, and management: certain case studies and related quantitative issues*. International Cooperative Publishing House; 1979. Available at: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1971712334765968651>
69. Боровичёв Е.А., Поликарпова Н.В., Константинова Н.А., Макарова О.А. (ред.). *Красная книга Мурманской области. Официальное издание. Изд. 3-е*. Ижевск: Принт; 2025.
70. Гельтман Д.В. (ред.). *Красная книга Российской Федерации. Растения и грибы*. Москва: ВНИИ Экология; 2024.
71. Павлов Д.С. (ред.). *Красная книга Российской Федерации. Животные*. Москва: ВНИИ Экология; 2021.
72. Чернов Ю.И. *Природная зональность и животный мир суши*. Москва: Мысль; 1975.
73. Чернов Ю.И., Макаров К.В., Еремин П.К. Семейство жужелицы (Coleoptera, Carabidae) в арктической фауне. Сообщение 2. *Зоологический журнал*. 2001;80(3):285–293. <https://doi.org/10.7868/So044513413080114>

74. Филиппов Б.Ю., Шувалов Е.В. Жужелицы южных тундр полуострова Канин. Вестник Поморского университета. Серия: Естественные и точные науки. 2006;(1):99–109.
75. Шарова И.Х. Жизненные формы жужелиц (Coleoptera, Carabidae). Москва: Наука; 1981.
76. Булохова Н.А. Эколого-фаунистическая характеристика жужелиц (Coleoptera, Carabidae) луговых экосистем. В: Фауна и экология жужелиц лугов юго-запада России. Брянск: Изд-во Брянского педуниверситета; 1995, с. 4–18.
77. Ананьева С.И., Белова Е.А., Булычев А.Г., Булычева И.А., Заколдаева А.А., Зацаринный И.В. и др. Кольская горно-металлургическая компания (промышленные площадки «Никель» и «Заполярный»): влияние на наземные экосистемы. Рязань: НП «Голос губернии», 2012, с. 52–59.
78. Казакова О.Н. Ландшафтное районирование Северо-Запада СССР. В: Доклады научной сессии ЛГУ. Ленинград: ЛГУ; 1959, с. 3–24.
79. Раменская М.Л. Анализ флоры Мурманской области и Карелии. Ленинград: Наука; 1983.

References

1. Makarov D.V., Borovichev E.A., Klyuchnikova E.M., Masloboev V.A. Environmental protection and sustainable development of the mining industry in Murmansk Region, Russia. Vestnik of MSTU. 2020;23(1):63–71. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2020-23-1-63-71>
2. Aksenova O.V., Bocharnikov V.N., Borovichev E.A., Danilov A.F., Denisov D.B., Zatsarinny I.V., et al. Nature and the indigenous population of the Arctic under the influence of climate change and industrial development: Murmansk region. Moscow: Grafit Publ.; 2020. (In Russ.).
3. Lukina N.V., Nikonov V.V. The state of spruce biogeocenoses under conditions of technogenic pollution. Apatity: Kola Science Centre Publisher; 1993. (In Russ.).
4. Lukina N.V., Sukhareva T.A., Isaeva L.G. Technogenic Digressions and Restorative Successions in Northern Taiga Forests. Moscow: Nauka Publ.; 2005. (In Russ.).
5. Sukhareva T.A. Elemental composition of woody plant leaves under conditions of technogenic pollution. Chemistry for Sustainable Development. 2012;(3):369–376. (In Russ.).
6. Ershov V., Ryabov N., Sukhareva T. The link between stemflow chemistry and forest canopy condition under industrial air pollution. Forests. 2026;17(1):147. <https://doi.org/10.3390/f17010147>
7. Moiseenko T.I., Dauval'ter V.A., Lukin A.A., Kudryavtseva L.P., Il'yashchuk B.P., Il'yashchuk L.I. Anthropogenic modifications of the Lake Imandra ecosystem. Moscow: Nauka Publ.; 2002. (In Russ.).
8. Dauval'ter V.A. Geology of Lake Bottom Sediments. Murmansk: Publishing House of the Murmansk State Technical University; 2012. (In Russ.).
9. Dauval'ter V.A., Sandimirov S.S., Denisov D.B., Demin V.I., Kashulin N.A., Terentyev P.M., et al. Ecological State of Lake Imandra. Vol. 1: Hydrological and geochemical conditions. Apatity: Kola Science Centre Publisher; 2023. (In Russ.). <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.484.6>
10. Denisov D.B., Valkova S.A., Dauval'ter V.A., Koroleva I.M., Razumovskaya A.V., Terentyev P.M., et al. Limnological Research at the Institute of Industrial Ecology of the North of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. Proceedings of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. 2020;(6-19):68–86 (In Russ.).
11. Denisov D.B., Kashulin N.A., Terentyev P.M., Valkova S.A. Modern trends in the change of biota of freshwater ecosystems of the Murmansk region. Vestnik MGTU. Proceedings of the Murmansk State Technical University. 2009;12(3):525–538. (In Russ.).
12. Kashulin N.A., Dauval'ter V.A., Denisov D.B., Valkova S.A., Vandysh O.I., Terentyev P.M., Kashulin A.N. Some Aspects of the Current State of Freshwater Resources in the Murmansk Region. Vestnik MGTU. Proceedings of the Murmansk State Technical University. 2013;16(1):98–107. (In Russ.).
13. Kashulin N.A., Dauval'ter V.A., Denisov D.B., Valkova S.A., Vandysh O.I., Terentyev P.M., Zubova E.M., Koroleva I.M., Kosova A.L., Cherepanov A.A. Comprehensive Studies of Freshwater Ecosystems in Fennoscandia. Proceedings of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. 2018;9(9-6):34–86. (In Russ.). <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.9.34-86>

14. Kashulin N.A., Denisov D.B., Valkova S.A., Vandysh O.I., and Terentyev P.M. Modern Trends in the Changes of Freshwater Ecosystems in the Euro-Arctic Region. Proceedings of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. 2012;(3):7–54. (In Russ.).
15. Masloboev V.A., Borovichev E.A., Valkova S.A., Vokueva S.I., Gilyazov A.S., Dauvalter V.A., et al. Ecosystems in the Kola NPP area (Murmansk region): Current State. Apatity: Federal Research Centre “Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences”; 2024. (In Russ.). <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.525.6>
16. Lukina N.V., Nikonov V.V. Biogeochemical cycles in Northern forests under conditions of aerotechnogenic pollution. Part 1. Apatity: Kola Science Centre Publisher; 1996. (In Russ.).
17. Ershov V.V., Isaeva L.G., Sukhareva T.A., Urbanavichyus G.P., Ivanova E.A., Belova E.A. Organisation of monitoring studies of the state of northern taiga forests on the territory of the Lapland Reserve. Herald of the Kola Science Centre of the RAS. 2021;13(2):34–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.37614/2307-5228.2021.13.2.004>
18. Isaeva L.G., Sukhareva T.A., Borovichev E.A., Urbanavichyus G.P., Khimich Yu.R., Zenkova I.V., et al. Study and protection of terrestrial ecosystems in the Murmansk region). Proceedings of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences. 2018;9(9-6):6–33. (In Russ.). <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.9.6-33>
19. Sukhareva T.A., Ershov V.V., Ivanova E.A., Shtabrovskaya I.M., Alfertyev N.L., Zhivov D.A., Ryabov N.S. Biogeochemical monitoring of pine forests in the Lapland Nature Reserve (Murmansk Region). Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Natural Sciences and Humanities. 2025;4(3):127–144. (In Russ.). <https://doi.org/10.37614/2949-1185.2025.4.3.008>
20. Sukhareva T.A., Ershov V.V., Isaeva L.G., Ivanova E.A., Zenkova I.V., Ryabov N.S., Shtabrovskaya I.M. Long-term data of integrated ecological and biogeochemical monitoring of forest ecosystems in the Lapland Nature Reserve. Certificate of Database Registration RU № 2024624519 от 17.10.2024. (In Russ.).
21. Ershov V.V., Sukhareva T.A., Isaeva L.G., Ivanova E.A., Zhivov D.A., Ryabov N.S. Chemical composition of various components of forest ecosystems in the northwestern part of the Kola Peninsula. Certificate of Database Registration RU № 2025623970 от 23.09.2025. (In Russ.).
22. Ershov V.V., Lukina N.V., Orlova M.A., Isaeva L.G., Smirnov V.E., Gorbacheva T.T. Assessment of the dynamics of the composition of soil water in the north-taiga forests in the context of reducing aero-technogenic pollution caused by emissions from a copper-nickel plant. Sibirskiy Ekologicheskiy Zhurnal = Contemporary Problems of Ecology. 2019;(1):119–132. (In Russ.). <https://doi.org/10.45372/SEJ20190110>
23. Sukhareva T.A., Ershov V.V., Isaeva L.G., Shkondin M.A. Assessment of the state of the northern taiga forests in the context of reducing industrial emissions by the Severonikel smelter. Tsvetnye Metally. 2020;(8):33–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2020.08.05>
24. Sukhareva T.A., Ershov V.V., Ivanova E.A. The Content of Heavy Metals and Sulfur in Forest Ecosystems in the Pechenganikel Smelter’s Zone of Impact Due to the Reduction of Atmospheric Emissions. Forest Science. 2025;(1):106–123. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S3034535925010094>
25. Ershov V., Sukhareva T., Isaeva L., Ivanova E., Urbanavichyus G. Pollution-induced changes in the composition of atmospheric deposition and soil waters in coniferous forests at the northern tree line. Sustainability. 2022;14:15580. <https://doi.org/10.3390/su142315580>
26. Urbanavichyus G.P., Borovichev E.A., Ershov V.V. Cryptogamic organisms as pioneers of the northern taiga recovery affected under the conditions of lowered industrial air pollution. Forest Science. 2021;(2):195–207. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114821020108>
27. Dauvalter V.A., Kashulin N.A. Assessment of the Ecological State of the Arctic Freshwater System Based on Concentrations of Heavy Metals in the Bottom Sediments. Geochemistry International. 2018;56(8):842–856. <https://doi.org/10.1134/S0016702918080037>
28. Denisov D.B., Barinova S.S. Algal diversity and ecological variables in the arctic lakes of the Kola peninsula, Russian North. Issues of Modern Algology. 2015;(2):4.
29. Kashulin N.A., Dauvalter V.A., Denisov D.B., Valkova S.A., Vandysh O.I., Terentjev P.M., Kashulin A.N. Selected aspects of the current state of freshwater resources in the Murmansk Region, Russia. Journal of Environmental Science and Health, Part A. 2017;52(9):921–929. <https://doi.org/10.1080/10934529.2017.1318633>
30. Borovichev E.A., Boychuk M.A. Mohoobraznye zapovednika «Pasvik». Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences; 2018. (In Russ.).

31. Urbanavichus G.P., Fadeeva M.A. Lichen flora of the Pasvik Nature Reserve: diversity, distribution, ecology, and protection. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences; 2018. (In Russ.).
32. Zatsarinny I.V., Bolshakov A.A., Buzun V.A., Makarova O.A., Polikarpova N.V., Kataev G.D., et al. Vertebrate Animals of the Pasvik Nature Reserve. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences; 2018. (In Russ.).
33. Kravchenko A.V. Vascular Plants of the Pasvik Nature Reserve and the Adjacent Territory of Murmansk Region. Petrozavodsk: Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences; 2020. (In Russ.).
34. Golubkina N., Sheshnitsan S., Koshevarov A., Plotnikova U., Sosna E., Lapchenko V., et al. Bioavailable Forms of Heavy Metals and Se in Soil in the Vicinity of the Pechenganikel Smelting Plant and the Relationship with Mineral Composition and Antioxidant Status of Biocrusts. *Standards*. 2025;5(4):28. <https://doi.org/10.3390/standards5040028>
35. Khlebosolova O.A., Sosna E.M., Bystrov A.A. Collection of phenological and other data on regenerative successions on technogenic wastelands (Nikel, Murmansk Region). In: *Nature Conservation and Citizen Science: Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Phenological Conf.* (September 9-12, 2025, Nickel, Murmansk Region, Pasvik State Nature Reserve). Moscow: KMK Scientific Publications Partnership; 2025, pp. 103–108. Moscow: KMK Scientific Publishing House; 2025, pp. 103–108. (In Russ.).
36. Melnikov E.Yu., Slesareva E.A., Smolyakova D.S., Valova E.V., Bolshakov A.V., Polikarpova N.V. Rare Bird Species of the Pasvik Nature Reserve in the Trapping of the Varlam Island Station. *Amurskii Zoologicheskii Zhurnal = Amur Zoological Journal*. 2025;XVII(1):56–65. (In Russ.).
37. Melnikov E.Yu., Slesareva E.A., Smolyakova D.S., Polikarpova N.V. Migration movements of passerine birds in the river valley. The groove in the summer-autumn period (according to the Varlama Island hospital. *Russian Journal of Applied Ecology*. 2025;(3):18–22. (In Russ.). <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2025.3.18.22>
38. Smolyakova D.S., Melnikov E.Yu., Slesareva E.A., Polikarpova N.V. Results of studies of the autumn flight of birds of the thrush family (Turdidae) in the valley of the Paz River of the Pasvik Nature Reserve. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*. 2025;25(4):469–476. (In Russ.). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-4-469-476>
39. Berlina N.G., Kostina V.A. Vascular plant flora of the Lapland Nature Reserve: annotated list. In: *Proceedings of the Lapland State Nature Biosphere Reserve*. Moscow: Pero Publ.; 2012, iss. 6, pp. 112–198. (In Russ.).
40. Urbanavichus G.P., Urbanavichene I.N., Melekhin A.V. Lichen Flora of the Lapland State Nature Biosphere Reserve (Annotated List). Apatity: Kola Science Centre Publisher; 2013. (In Russ.).
41. Borovichev E.A. Annotated list of liverworts (Marchantiophyta) of the Lapland Nature Reserve. In: *Proceedings of the Lapland State Nature Biosphere Reserve*. Apatity: Federal Research Centre «Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences»; 2019, pp. 30–65. (In Russ.). <https://doi.org/10.25702/KSC.978-5-91137-392-4.30-65>
42. Belkina O.A., Andreeva E.N., Likhachev A.Yu. Materials on the Flora of Mosses in the Lapland Nature Reserve. In: *Proceedings of the Lapland State Nature Biosphere Reserve*. Apatity: Federal Research Centre «Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences»; 2019, pp. 66–118. (In Russ.). <https://doi.org/10.25702/KSC.978-5-91137-392-4.66-118>
43. Osipov D.V. Spiders (Aranei) of the Lapland Nature Reserve. In: *Proceedings of the Lapland State Nature Biosphere Reserve*. Apatity: Federal Research Centre «Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences»; 2019, pp. 119–194. (In Russ.). <https://doi.org/10.25702/KSC.978-5-91137-392-4.119-194>
44. Yankovsky A.V. Blackflies (Diptera, Simuliidae) of the Lapland State Biosphere Nature Reserve, with description of a new species of the genus *Argentisimulium* Rubzov et Yankovsky, 1982. *Entomological Review*. 2006;86(2):240–246. <https://doi.org/10.1134/soo13873806020114>
45. Dmitriev D.A. Cicadina (Hemiptera: Auchenorrhyncha) of the Kola Peninsula basing mainly on the material collected in the Lapland Biosphere Nature Reserve. *Denisia*. (N.F.). 2002;4(176):339–348.
46. Kataev G.D. Fauna and Ecology of Mammals (Rodentia, Insectivora) of Lapland. St. Petersburg: VVM Publishing House; 2021. (In Russ.).

47. Vladimirova N.V., Novgorodova T.A., Chueva N.V. Communities of Armored Mites (ACARI:ORIBATIDA) in the Lapland Nature Reserve (Murmansk Region). *Sibirskiy Ekologicheskiy Zhurnal = Contemporary Problems of Ecology*. 2025;32(3):422–436. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SE|20250308>
48. Report on the implementation of the topic «Monitoring the state of biodiversity of the Murmansk Tundra State Nature Reserve». Kandalaksha; 2024. (In Russ.).
49. Report on the implementation of research work on the topic «Comprehensive Assessment of the State of Ecosystems in the Murmansk Tundra Nature Reserve in the Period 2025–2027, Report for 2025». Kandalaksha; 2025. (In Russ.).
50. Mikhailov K.E. Avifauna of the Zonal Tundra of the Northern Part of the Kola Peninsula. *Russian Ornithological Journal*. 1993;2(1):7–28. (In Russ.).
51. Mikhailov K.E., Filchagov A.V. Features of the distribution and settlement of some bird species in the tundra of the Kola Peninsul. *Russian Ornithological Journal*. 2012;21(767):1395–1405. (In Russ.).
52. Novgorodova T.A., Abramov S.A., Glupov V.V. An integrated method for assessing the state of biodiversity of disturbed ecosystems. *Euroasian entomological Journal.*, 2024;23(6):297–307. <https://doi.org/10.15298/euroasentj.23.06.01>
53. Research Report «In-depth analysis of the results obtained during the Great Scientific Expedition of 2022–2023, development of the methodological basis for the integral assessment of the state of ecosystems». Novosibirsk: ISEDJ SB RAS; 2024. (In Russ.).
54. Vihervaara P., Auvinen A. P., Mononen L., Törmä M., Ahlroth P., Anttila S., Virkkala R. How essential biodiversity variables and remote sensing can help national biodiversity monitoring. *Global Ecology and Conservation*. 2017;10:43–59. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2017.01.007>
55. Christensen T., Barry T., Taylor J.J., Doyle M., Aronsson M., Braa J., et al. Developing a circumpolar programme for the monitoring of Arctic terrestrial biodiversity. *Ambio*. 2020;49(3):655–665. <https://doi.org/10.1007/s13280-019-01311-w>
56. Christensen T., Payne J., Doyle M., Iburguchi G., Taylor J., Schmidt N.M., et al. The Arctic terrestrial biodiversity monitoring plan. Akureyri: CAFF; 2013.
57. Pereira H.M., Ferrier S., Walters M., Geller G.N., Jongman R.H.G., Scholes R.J., et al. Essential Biodiversity Variables. *Science*. 2013;339(6117):277–278. <https://doi.org/10.1126/science.1229931>
58. Voronov A.G. Geobotany. 2nd Edition. Moscow: Vysshaya Shkola Publ.; 1973. (In Russ.).
59. Korablyov A.P., Mirin D.M. Dynamics of Plant Communities: Theory and Methodological Aspects. *Vegetation of Russia*. 2025;(52):3–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.3111/vegus/2025.52.3>
60. Chernenkova T.V., Basova E.V., Bochkarev Yu.N., Puzachenko M.Yu. Assessment of Forest Biodiversity in the Zone of Influence of the Severonikel Mining and Metallurgical Smelter. *Forest Science*. 2009;(6):32–45. (In Russ.).
61. Lyanguzova I. V., Goldvirt D. K., Fadeeva I. K. Spatial and temporal dynamics of Al-Fe-humus podzol contamination in the area affected by a non-ferrous metallurgy smelter. *Eurasian Soil Science*. 2016;(10):1261–1276. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0032180X16100105>
62. Kumschick S., Gaertner M., Vilà M., Essl F., Jeschke J. M., Pyšek P., Winter M. Ecological impacts of alien species: quantification, scope, caveats, and recommendations. *BioScience*. 2015;65(1):55–63. <https://doi.org/10.1093/biosci/biu193>
63. Dar P.A., Reshi Z.A. Components, processes and consequences of biotic homogenization: a review. *Contemporary Problems of Ecology*. 2014;7(2):123–136. <https://doi.org/10.1134/s1995425514020103>
64. Lockwood J.L., Hoopes M.F., Marchetti M.P. *Invasion ecology*. John Wiley & Sons; 2013.
65. Hejda M., Pyšek P., Jarošík V. Impact of invasive plants on the species richness, diversity and composition of invaded communities. *Journal of ecology*. 2009;97(3):393–403. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01480.x>
66. Ott W.R. *Environmental indices: theory and practice*. OSTI; 1978.
67. Thomas L., Buckland S.T., Rexstad E.A., Laake J.L., Strindberg S., Hedley S.L., et al. Distance software: design and analysis of distance sampling surveys for estimating population size. *Journal of Applied Ecology*. 2010;47(1):5–14. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01737.x>
68. Cairns J., Patil G.P., Waters W.E. (ed.). *Environmental biomonitoring, assessment, prediction, and management: certain case studies and related quantitative issues*. International Cooperative Publishing House; 1979. Available at: <https://cir.nii.ac.jp/crid/1971712334765968651>
69. Borovichev E.A., Polikarpova N.V., Konstantinova N.A., Makarova O.A. *The Red Book of the Murmansk region*. Official edition. 3rd Ed. Izhevsk: Print Publ.; 2025. (In Russ.).

70. Gel'tman D.V. (ed.). The Red Book of the Russian «Federation. Plants and Fungi. Moscow: VNIIEkologiya; 2024. (In Russ.).
71. Pavlov D.S. (ed.). The Red Book of the Russian Federation. Animals. Moscow: VNIIEkologiya; 2021. (In Russ.).
72. Chernov Yu. I. Natural Zonality and Terrestrial Animal World. Moscow: Mysl Publ.; 1975. (In Russ.).
73. Chernov Yu. I., Makarov K. V., Eremin P. K. The family of ground beetles (Coleoptera, Carabidae) in the Arctic fauna. Report 2. Zoological Journal. 2001;80(3):285–293. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0044513413080114>
74. Filippov B.Yu., Shuvalov E.V. Ground Beetles of the Southern Tundra of the Kanin Peninsula. Vestnik Pomorskogo Universiteta. Series: Natural and Exact Sciences. 2006;(1):99–109. (In Russ.).
75. Sharova I.Kh. Life Forms of Ground Beetles (Coleoptera, Carabidae). Moscow: Nauka Publ.; 1981. (In Russ.).
76. Bulokhova N.A. Ecological and Faunistic Characteristics of Ground Beetles (Coleoptera, Carabidae) in Meadow Ecosystems. In: Fauna and Ecology of Ground Beetles in Meadows of Southwestern Russia. Bryansk: Bryansk State Pedagogical University; 1995, pp. 4–18. (In Russ.).
77. Anan'eva S.I., Belova E.A., Bulychev A.G., Bulycheva I.A., Zakoldaeva A.A., Zatsarinnyi I.V., et al. Kola Mining and Metallurgical Company (Nikel and Zapolyarny industrial sites): impact on terrestrial ecosystems. Ryazan: Golos Gubernii Publ.; 2012, pp. 52–59. (In Russ.).
78. Kazakova O.N. Landscape Zoning of the North-West of the USSR. In: Reports of the Scientific Session of Leningrad State University. Leningrad: Leningrad State University; 1959, pp. 3–24. (In Russ.).
79. Ramenskaya M.L. Analysis of the Flora of the Murmansk Region and Karelia. Leningrad: Nauka Publ.; 1983. (In Russ.).

Сведения об авторах

Боровичев Евгений Александрович — кандидат биологических наук, заместитель генерального директора Федерального исследовательского центра Кольский научный центр по научной работе, директор Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН. Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 18а.
Scopus ID: 55834961100
Researcher ID: U-9117-2017
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7310-6872>
SPIN-код: 1042-1273
Тел.: +7 (815) 556-33-50
E-mail: e.borovichev@ksc.ru

Кожин Михаил Николаевич — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН. Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 18а.
Scopus ID: 54401367100
Researcher ID: AAG-9409-2019
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0153-0287>
SPIN-код: 2446-7294
E-mail: m.kozhin@ksc.ru

Information about the authors

Eugene A. Borovichev — Cand. Sci. (Biology), Deputy Director General of Research, Federal Research Center Kola Science Center, Director, Polar-Alpine Botanical Garden-Institute named after N.A. Avrorin, Federal Research Centre Kola Science Centre of Russian Academy of Sciences. Russia, 184209, Murmansk Region, Apatity, Akademgorodok, 18A.
Scopus ID: 55834961100
Researcher ID: U-9117-2017
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7310-6872>
SPIN-code: 1042-1273
Тел.: +7 (815) 556-33-50
E-mail: e.borovichev@ksc.ru

Mikhail N. Kozhin – Cand. Sci. (Biology), Leading Research Scientist, Polar-Alpine Botanical Garden-Institute named after N.A. Avrorin, Federal Research Centre Kola Science Centre of Russian Academy of Sciences. Russia, 184209, Murmansk Region, Apatity, Akademgorodok, 18A.
Scopus ID: 54401367100
Researcher ID: AAG-9409-2019
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0153-0287>
SPIN-code: 2446-7294
E-mail: m.kozhin@ksc.ru

Сухарева Татьяна Алексеевна — кандидат биологических наук, заведующий лабораторией наземных экосистем, Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН. Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 14а.
Scopus ID: 55918629900
Researcher ID: J-1100-2018
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6451-3495>
SPIN-код: 3302-1130
Тел.: +7 (815) 557-97 79
E-mail: t.sukhareva@ksc.ru

Терентьев Пётр Михайлович — кандидат биологических наук, заведующий лабораторией водных экосистем, Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН. Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 14а.
Scopus ID: 59157933200
Researcher ID: K-3164-2018
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6810-1823>
SPIN-код: 3395-2611
Тел.: +7 (815) 557-97 79
E-mail: p.terentjev@ksc.ru

Поликарпова Наталья Владимировна — кандидат географических наук, директор Государственного природного заповедника «Пасвик». Россия, 184421, Мурманская область, пгт Никель, Гвардейский просп., д. 43б.
Scopus ID: 54892721300
Researcher ID: F-1493-2014
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3332-035X>
SPIN-код: 4627-5814
Тел.: +7 (815) 545-07-00
E-mail: polikarpova-pasvik@yandex.ru

Толмачева Екатерина Леонидовна — кандидат биологических наук, заместитель директора по научной работе, федеральное государственное бюджетное учреждение «Кандалакшский государственный природный заповедник». Россия, 184042, Мурманская область, г. Кандалакша, ул. Линейная, д. 35.
Scopus ID: 57324299200
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3274-5771>
Тел.: +7 (815) 339-22-50
E-mail: kand.nauka@yandex.ru

Алфертьев Николай Леонидович — заместитель директора по научной работе Лапландского заповедника. Россия, 184506, Мурманская область, г. Мончегорск, Зеленый пер., 8.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3108-1728>
Тел.: +7 (921) 034-70-89
E-mail: alfertev@laplandzap.ru

Tatyana A. Sukhareva — Cand. Sci. (Biology), Head of the laboratory of terrestrial ecosystems, Institute of North Industrial Ecology Problems, Federal Research Centre Kola Science Centre. Russia, 184209, Murmansk region, Apatity, Akademgorodok, 14A.
Scopus ID: 55918629900
Researcher ID: J-1100-2018
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6451-3495>
SPIN-code: 3302-1130
Tel.: +7 (815) 557-97 79
E-mail: t.sukhareva@ksc.ru

Petr M. Terentjev — Cand. Sci. (Biology), Head of the laboratory of water ecosystems, Institute of North Industrial Ecology Problems, Federal Research Centre Kola Science Centre. Russia, 184209, Murmansk Region, Apatity, Akademgorodok, 14A.
Scopus ID: 59157933200
Researcher ID: K-3164-2018
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6810-1823>
SPIN-code: 3395-2611
Tel.: +7 (815) 557-97 79
E-mail: p.terentjev@ksc.ru

Natalia V. Polikarpova — Cand. Sci. (Geography), Director, Pasvik Nature Reserve. Russia, 184421 Nikel Murmansk Region, Gvardeysky Avenue, 43B.
Scopus ID: 54892721300
Researcher ID: F-1493-2014
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3332-035X>
SPIN-code: 4627-5814
Tel.: +7 (815) 545-07-00
E-mail: polikarpova-pasvik@yandex.ru

Ekaterina L. Tolmacheva — Cand. Sci. (Biology), Deputy Director of Research, Kandalaksha Nature Reserve. Russia, 184042, Murmansk Region, Kandalaksha, Lineynaya str., 35.
Scopus ID: 57324299200
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3274-5771>
Tel.: +7 (815) 339-22-50
E-mail: kand.nauka@yandex.ru

Nikolay L. Alfertev — Deputy Director of Research, Lapland Nature Reserve. Russia, 184506, Murmansk Region, Monchegorsk, Zeleny lane, 8.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3108-1728>
Tel.: +7 (921) 034-70-89
E-mail: alfertev@laplandzap.ru

Вклад авторов

Боровичев Евгений Александрович — концептуализация, дизайн и наполнение программы, сбор и анализ данных, подготовка текста статьи.

Кожин Михаил Николаевич — концептуализация, дизайн и наполнение программы, сбор и анализ данных, подготовка текста статьи.

Сухарева Татьяна Алексеевна — дизайн и наполнение программы, сбор и анализ данных, подготовка текста статьи.

Терентьев Петр Михайлович — дизайн и наполнение программы, сбор и анализ данных, подготовка текста статьи.

Поликарпова Наталья Владимировна — сбор и анализ данных, подготовка текста статьи.

Толмачева Екатерина Леонидовна — сбор и анализ данных, подготовка текста статьи.

Алфертьев Николай Леонидович — сбор и анализ данных, подготовка текста статьи.

Author contribution statement

Eugene A. Borovichev — conceptualization; program design and development; data collection and analysis; manuscript preparation.

Mikhail N. Kozhin — conceptualization; program design and development; data collection and analysis; manuscript preparation.

Tatyana A. Sukhareva — program design and development; data collection and analysis; manuscript preparation.

Petr M. Terentyev — program design and development; data collection and analysis; manuscript preparation.

Natalya V. Polikarpova — data collection and analysis; manuscript preparation.

Ekaterina L. Tolmacheva — data collection and analysis; manuscript preparation.

Nikolai L. Alfertyev — data collection and analysis; manuscript preparation.

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке «Кольская ГМК».

Funding

The study was supported by the Kola Mining and Metallurgical Company (Kola Site, Nornickel Group).

Благодарность

Авторы выражают благодарность сотрудникам ПАБСИ КНЦ РАН и ИППЭС КНЦ РАН за помощь в проведении полевых, камеральных и химико-аналитических исследований.

Благодарим О.В. Петрову за подготовку карты.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the staff of the PABGI KSC RAS and the INEP KSC RAS for their assistance with fieldwork, laboratory processing, and chemical-analytical studies. We also thank O.V. Petrova for preparing the map.

УДК 597.2/5 (639.3.034, 591.613)

ББК 28.688.2

<https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-40-53>

Апробация технологии воспроизводства лососевых видов рыб с применением гнезда-инкубатора Salmo-3000 в условиях арктической реки Мончи (Кольский п-ов)

Ефремов Д.А.✉, Ручьёв М.А.

Институт биологии ФИЦ «Карельский научный центр РАН»,
Петрозаводск, Россия

✉denisefremov@list.ru

Аннотация. Представлен результат апробации технологии воспроизводства кумжи с применением искусственного гнезда-инкубатора икры Salmo-3000 с полной загрузкой опытной партии 10 устройств. Испытания проведены в р. Мончи (басс. Белого моря). Технология включает отлов созревших производителей кумжи непосредственно перед нерестом, выдерживание их в садках до созревания, получение оплодотворенной икры, ее транспортировку к месту установки гнезд-инкубаторов, закладку устройств в грунт, процесс инкубации (8 месяцев), снятие гнезд-инкубаторов и оценку эффективности технологии и работоспособности устройств. В эксперименте использовано авторское устройство, устанавливаемое на дно порогового участка реки. Гнездо позволяет инкубировать в течение осени, зимы и весны оплодотворенную икру кумжи (автономность не менее 8 месяцев) и летом (июнь) получать жизнестойких личинок, самостоятельно расселяющихся в пороге реки или принудительно извлекаемых из устройств для подращивания в бассейнах. В ходе испытания выявлены как преимущества (повышенная емкость для инкубируемой икры — до 3000 икринок кумжи на устройство; эффективный распределитель воды; решетки, предохраняющие икринки от вымывания при закладке; неокисляющиеся крепящие стержни из стеклопластиковой арматуры; водозаборник/фильтр, эффективно очищающий и подающий воду к икре), так и недостаток — сложность и длительность (до 30 минут) установки устройства. В целом эффективность выклева личинок составила 68–74 % при полной загрузке. Выход малька в реку составил 68–74 %. Устройство с некоторыми доработками можно использовать для восстановления численности кумжи (*Salmo trutta* L.) в арктических реках со сложным гидрологическим режимом, где заводское воспроизводство по разным причинам невыгодно.

Ключевые слова: технология зарыбления, воспроизводство лососевых, оплодотворение икры, инкубация икры, икра кумжи, гнездо-инкубатор икры Salmo-3000

Конфликт интересов: авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Ефремов Д.А., Ручьёв М.А. Апробация технологии воспроизводства лососевых видов рыб с применением гнезда-инкубатора Salmo-3000 в условиях арктической реки Мончи (Кольский п-ов). *Арктика и инновации*. 2026;4(2):40–53. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-40-53>

Using the Salmo-3000 nest incubator for salmonid fish reproducing in the Arctic Moncha River (Kola Peninsula)

Denis A. Efremov✉, Mikhail A. Ruch'yov

Institute of Biology, the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Karelia, Russia

✉denisefremov@list.ru

Abstract. This study examines the use of a Salmo-3000 artificial nest incubator in brown trout reproduction technology. The pilot batch consisted of ten fully loaded devices. The testing was conducted in the Moncha River (White Sea basin). The reproduction technology involves catching mature female brown trout immediately before they spawn. The fish are held in cages until they are ready to spawn. Then, the eggs are obtained and transported to the plot where the proprietary Salmo-3000 nest incubators are installed. The devices are placed in the ground and the incubation process begins. After eight months, the nest incubators are removed, and a final evaluation is conducted to determine the effectiveness of the technology and the performance of the devices. The Salmo-3000 nest incubator allows for the incubation of fertilized brown trout eggs throughout the fall, winter, and spring, with a minimum operational life of eight months, and for the production of viable larvae in the summer (June), which either disperse independently into the river rapids or are manually removed from the devices for rearing in tanks. The test revealed an increased capacity for incubating eggs (up to 3,000 trout eggs per unit); an efficient water distributor; grids that prevent eggs from being washed away during loading; non-oxidizing fastening rods made of fiberglass reinforcement; a water intake/filter that effectively cleans and supplies water to the eggs. However, installing the device is complex and time-consuming, taking up to 30 minutes. The overall hatching efficiency of the larvae was 68–74 % at full capacity. Juvenile fish release into the river was 68–74 %. With some modifications, the device can be used to restore the population of trout (*Salmo trutta* L.) in Arctic rivers with complex hydrological regimes, where hatchery production is economically unfeasible for various reasons.

Keywords: stocking technology, salmonid reproduction, egg fertilization, egg incubation, rainbow trout eggs, Salmo-3000 nest incubator

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interests.

For citation: Efremov D.A., Ruch'yov M.A. Using the Salmo-3000 nest incubator for salmonid fish reproducing in the Arctic Moncha River (Kola Peninsula). *Arctic and Innovation*. 2026;4(2):40–53. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-40-53>

Введение

В процессе эволюции лососевые рыбы рода *Salmo* выработали сложный жизненный цикл, состоящий из нескольких этапов. Первый — нерест и инкубация икры — происходит в реках с постоянным течением, что обеспечивает идеальные условия для аэрации эмбрионов в грунте. Затем молодь развивается на нерестово-выростных участках тех же рек, после чего переходит к этапу нагула как в пресных озерах, так и в морских водах. Смена водоемов происходит благодаря катадромной и анадромной миграции, то есть переме-

щению рыбы из нерестового водоема в нагульный и обратно. На всех этапах жизненного цикла наблюдаются значительные потери икры и эмбрионов, мальков и взрослых особей. В условиях повышенного антропогенного воздействия производители лосося изымаются даже из труднодоступных нерестилищ. Браконьеры активно используют жаберные сети в период нагула и нереста, что приводит к перевылову. В результате численность кумжи значительно снизилась, и во многих реках Кольского полуострова она уже ниже допустимого уровня.

Одним из наиболее критических этапов жизни лососей является период инкубации и выклева икры в грунте пресных водотоков. В это время наблюдается наибольший уровень отхода неоплодотворенной икры и эмбрионов — до 90 % от икры, сформированной самкой в период нагула и созревания. В связи с этим ихтиологи по всему миру стремятся повысить эффективность естественного нереста производителей лососевых рыб и снизить потери эмбрионов и личинок в реках. Их цель — увеличить продуктивность естественных нерестилищ и повысить возврат товарной рыбы. Одним из направлений в этой работе является разработка искусственных устройств для инкубации лососевой икры в естественных условиях рек [1–10]. В эти устройства закладывают искусственно оплодотворенную икру и размещают их на порогах и перекатах рек. После длительной инкубации, которая может длиться до 8 месяцев с момента оплодотворения или до 3 месяцев со стадии «пигментация глаз», личинки лососевых рыб самостоятельно расселяются из гнезд-инкубаторов по порогам. Они ведут образ жизни, характерный для дикой молоди, и растут и развиваются на естественной кормовой базе. Некоторые устройства позволяют извлекать вылупившихся личинок или мальков для дальнейшего подращивания в искусственно созданных заводях, бассейнах, прудах и других водоемах с использованием различных кормов. На базе лаборатории экологии рыб и водных беспозвоночных Института биологии КарНЦ РАН уже больше 25 лет ведутся разработки искусственных гнезд-инкубаторов икры, создано и испытано более 27 образцов гнезд-инкубаторов. В устройстве типа «шайба» удалось добиться наибольшей эффективности выхода жизнестойких личинок — до 97 % [5]. Следует учесть, что данное устройство рассчитано на инкубацию только 100 икринок, и этого недостаточно для работ по интенсивному восстановлению запасов лососевых видов рыб. Повторные испытания данных устройств на ряде рек показали их эффективность, в некоторых реках с высоким уровнем заиления получить личинок не удалось, устройства заиливались. Оценка пустующих площадей нерестово-выростных участков (НВУ) рек Кольского полуострова позволяет говорить о необходимости значительного увеличения выпусков мальков и необходимости создания устройств с большей вместимостью.

На основе имеющегося опыта было разработано оригинальное устройство Salmo-3000, позволяющее одновременно инкубировать до 3000 икринок атлантического лосося или кумжи. Вместимость данного инкубатора значительно возросла по сравнению с ранее разработанными устройствами для инкубации икры благородных лососей. За основу взято разработанное нами устройство для тихоокеанских лососей «Многослойное-10000» [9] вместимостью в поздних модификациях до 12 000 икринок кеты/горбуши. В связи с особенностями территориального поведения лососей рода *Salmo* установка устройства вместимостью 10 000 и более икринок привела бы к созданию избыточной концентрации молоди на НВУ, значительному увеличению пищевой конкуренции, снижению эффективности мероприятий по зарыблению водоемов. В связи с этим был выбран показатель вместимости гнезда не более 3000 икринок на устройство, что соответствует количеству икринок, попадающих в грунт (в нескольких естественных буграх) на участке нереста одной пары семги или кумжи. В результате было разработано и изготовлено компактное устройство с выносным водозаборником/фильтром вместимостью 3000 икринок, адаптированное для инкубации икры лососей рода *Salmo*. В 2021 году устройство прошло апробацию с частичной загрузкой 1 единицы в реке Индере [11]. По результатам испытаний устройство было доработано, следующим этапом работ стала апробация опытной партии гнезд-инкубаторов в условиях реки Умбы с полной загрузкой.

Цель работы — апробировать технологию получения оплодотворенной икры атлантического лосося на нерестилищах арктических рек, провести испытания конструкции гнезда-инкубатора икры Salmo-3000 повышенной вместимости с заложенной в них икрой атлантического лосося с полной загрузкой по полноцикловой технологии с момента оплодотворения икры, отработать методику отлова производителей лосося в период нереста, забор половых продуктов и закладку икры в гнезда-инкубаторы, получить жизнестойких личинок, самостоятельно расселяющихся на порогах в условиях арктических рек, выявить и устранить возможные недостатки технологии получения и транспортировки икры, конструктивные недостатки устройств и способов их установки.

Первичные испытания устройства проводились с загрузкой оплодотворенной икры семги, как и большинство опытов с более ранними устройствами также проводились с икрой атлантического лосося, морской или озерной формы. В то же время на Кольском полуострове сохраняется ряд рек, в которых основным видом лососевых рыб является кумжа, одной из таких является река Монча. В 2021–2024 гг. Фондом «Мурманский лосось» (г. Мончегорск) при финансовой поддержке АО «Кольская ГМК «Норникель»» был организован ряд научных экспедиций по изучению нерестово-выростных участков (НВУ) кумжи в бассейне Имандровского водохранилища и в реке Монче, было выявлено, что ряд порогов в городской черте города Мончегорск утратили запасы кумжи, воспроизводство полностью прекратилось, при этом на порогах в верховьях реки нерест кумжи сохраняется, но на низком уровне, и эти участки не могут быть донорскими для получения оплодотворенной икры. В то же время в соседней реке Пиренге сохраняется стабильный нерест кумжи, именно эта река и стала донорской для отбора половых продуктов кумжи. В результате наша инициатива по апробации искусственных гнезд-инкубаторов икры *Salmo-3000* на порогах реки Мончи в черте города Мончегорск была поддержана и профинансирована АО «Кольская ГМК «Норникель»». Осенью 2024 г. была заложена опытная партия устройств на порогах реки Мончи, также в эксперимент включили расположенный здесь же ручей Кумужий и реку Тиханка, приток реки Мончи. В июне 2025 г. при участии сотрудников АО «Кольская ГМК «Норникель»», руководителя Министерства природных ресурсов Мурманской области, фонда «Мурманский лосось» устройства были извлечены, проведена оценка их работоспособности, эффективности и применимости в условиях арктической реки.

Материалы и методы

Испытания гнезда-инкубатора икры *Salmo-3000* проводили в 2024–2025 гг. в реке Монче — одном из крупных притоков Имандровского водохранилища, относящегося к бассейну реки Нивы, впадающей в Белое море. Берет начало в безымянном озере на высоте 450 м над уровнем моря. Протекает по лесной, местами болотистой местности. В нижнем течении на реке расположен

город Мончегорск. Через реку перекинута автомобильный (на трассе Кола) и железнодорожные мосты. Длина водотока — 86 км, площадь водосбора — 1580 км².

Отлов производителей кумжи осуществляли вблизи расположенной реки Пиренги (соседний приток Имандровского водохранилища) ниже плотины ГЭС, оба притока относят к бассейну реки Нивы, поэтому перевозка икры не является перекрестной икры между бассейнами рек. Лов кумжи осуществляли по разрешению № 5120240317118, выданному 03.05.2024 г. Североморским территориальным управлением Росрыболовства РФ. Для лова использовались жаберные сети с ячейей 60 × 60 мм, а также спиннинг. Сразу после отлова на акватории рыбу по 1–3 особи помещали в емкость объемом 127 литров и перемещали к месту расположения полевого лагеря и установки садков для выдерживания производителей. Использовали 2 малых садка 60 × 60 × 60 мм с ячейей 5 мм. Садки были установлены на глубине не менее 50 см, со скоростью течения 0,3–0,5 м/с в них постоянно сохранялась проточность. С целью недопущения обьячеивания и гибели производителей семги в сетях сети проверяли каждые 3–4 часа, в случае обнаружения рыбы сразу выпутывали ее и транспортировали к садкам. Лов рыбы осуществлялся в период с 25 сентября по 6 октября при температуре воды от 11 до 4 °С. Время транспортировки от места лова до садков не превышало 5–6 минут. Самок и самцов содержали отдельно. Ни одной особи кумжи ни в сетях, ни в садках за время эксперимента не погибло. После получения половых продуктов производители выдерживались в садках 1 сутки для восстановления после процедуры отбора икры. По завершении эксперимента все особи были выпущены в реку Пиренгу и самостоятельно ушли на стрежень реки, без задержки на отмелях. Было отобрано 11 самок и 10 самцов кумжи, не имеющих повреждений. Рыба была взята с запасом, чтобы обеспечить получение икры в количестве не менее 44 000 икринок. В результате было получено около 55 000 оплодотворенных икринок кумжи. Икра от двух самок в количестве около 10 000 шт. была помещена в грунт с помощью посадочной лопатки в реку Пиренгу в месте отлова для компенсации возможного ущерба дикой популяции кумжи. В 10 устройств *Salmo-3000* было

заложено $30\,000 \pm 500$ оплодотворенных икринок кумжи в реке Монче, в 2 устройства Salmo-3000 в ручей Кумужий было заложено $6\,000 \pm 500$ икринок, в грунт ручья Кумужий было заложено 3000 икринок кумжи, искусственно были сформированы естественные гнезда, в 2 устройства Salmo-3000 в реку Тиханку было заложено $6\,000 \pm 500$ икринок. Вся икра закладывалась сразу после оплодотворения, по полноцикловой технологии инкубации икры. Эффективность оплодотворения икры составила 99,9 %, неоплодотворенными остались 45–50 икринок, отход 10–12 икринок был отобран после транспортировки к месту установки устройств.

Для проведения эксперимента была изготовлена опытная партия гнезд-инкубаторов икры Salmo-3000 (рис. 1).

Всего было изготовлено и доставлено в г. Мончегорск 14 опытных образцов гнезд-инкубаторов Salmo-3000 с выносным водозаборником, фильтром и укороченным соединительным патрубком. В основном русле они были установлены на участке площадью $10 \times 5 \text{ м}^2$, ниже трубы водовода, выступающей как дополнительная защита устройств в период весеннего паводка, ближе к центральной стрежневой струе с мак-

симальным уровнем воды. Сборку и установку устройств осуществляли на берегу, близ места установки устройств (рис. 2).

Установку осуществляли в два этапа, на первом последовательно загрузили икру в 10 устройств и временно установили их на отмели, близ берега, нагрузив валунами, чтобы минимизировать время нахождения икры в транспортировочном контейнере и избежать переохлаждения эмбрионов. На втором этапе по одному переносили устройства на окончательное место установки и закапывали их валунами для обеспечения их сохранности в период весеннего паводка и избегания обнаружения браконьерами. Сборка инкубаторов происходила без контейнера, благодаря относительно высокой температуре воздуха $+5 \text{ }^\circ\text{C}$ оперативно последовательно смачивали слои гнезд.

Выбранный тип конструкций относится к группе необслуживаемых гнезд-инкубаторов. Так как перед попаданием в основной корпус инкубатора вода фильтруется через слой грунта, а затем через выносной водозаборник/фильтр с галькой, количество иловых и взвешенных частиц в поступающей воде значительно снижается. В этом случае не требуется периодически обслуживать гнезда, заменяя фильтры и удаляя

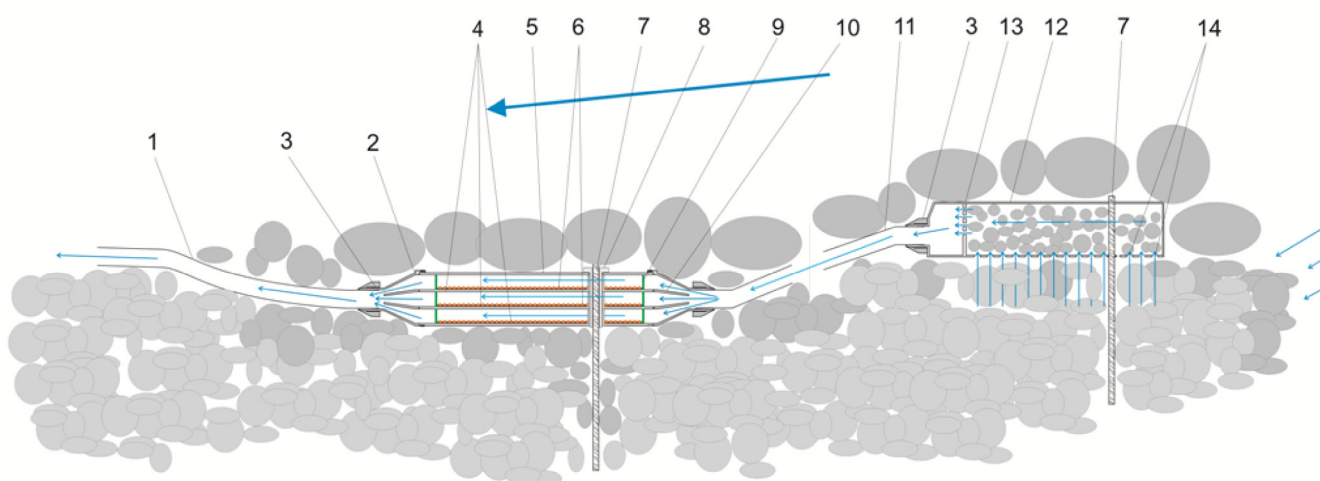


Рис. 1. Устройство гнезда-инкубатора икры Salmo-3000, схема работы; 1 — выпускной патрубок, 2 — собирающая камера, 3 — быстроразъемное соединение, 4 — инкубационные лотки с канавками для икры, 5 — крышка верхнего инкубационного лотка, 6 — инкубируемая икра, 7 — стеклопластиковая арматура-фиксатор, 8 — направляющий штифт-трубка, 9 — ограничивающая решетка (зеленый цвет), 10 — распределительная камера, 11 — соединительный патрубок, 12 — водозаборник/фильтр, 13 — перепускная пластина с перфорациями, 14 — перфорации для впуска воды (Д.А. Ефремов)

Fig. 1. The Salmo-3000 nest incubator and its operating diagram; 1 — outlet pipe, 2 — collecting chamber, 3 — quick-release coupling, 4 — incubation trays with grooves for eggs, 5 — lid of the upper incubation tray, 6 — incubated eggs, 7 — fiberglass retaining bracket, 8 — guide pin-tube, 9 — retaining grid (green), 10 — distribution chamber, 11 — connecting pipe, 12 — water intake/filter, 13 — perforated overflow plate, 14 — openings for water intake (photos taken by D.A. Efremov)



Рис. 2. Временная установка снаряженных инкубаторов Salmo-3000 (Д.А. Ефремов)

Fig. 2. Temporary installation of fully equipped Salmo-3000 nest incubators (photos taken by D.A. Efremov)

погибших личинок. Подробный принцип работы устройства Salmo-3000 описан в нашей статье [11].

После установки и закрепления всех 10 гнезд-инкубаторов икры в основном русле реки направились на реку Тиханку, приток реки Мончи, где произвели установку 2 гнезд-инкубаторов с 6000 икринок кумжи. Процедура полностью повторялась и тщательно была соблюдена. На участке наблюдалось значительное заиление, сложность для установки гнезд представляли обилие крупных валунов, а также искусственная дамба, возведенная местными жителями для подъема уровня воды и ее забора из реки насосом. Точка установки гнезд имеет координаты N67°57'49.5148" E32°55'54.1681".

В этот же день 2 гнезда были установлены в 2 точки ручья Кумужий, точка 1 с координатами N67°55'41.0314" E32°50'56.6242",

мостовой переход через ручей. И точка 2 с координатами N67°55'44.7426" E32°49'31.5510", близ мостового перехода через ручей. Икра была доставлена к точкам в изотермическом боксе. Ранее в реку Тиханку также было заложено 2 инкубатора икры, в результате после установки всех 14 гнезд Salmo-3000 в изотермическом боксе оставалось около 3000 икринок, их поместили в грунт, искусственно сформировав естественные гнезда на участке 100 м ниже точки 1, в точке 3 с координатами N67°55'48.5667" E32°49'33.9457".

Измерения температуры воды в ходе эксперимента получены с использованием стандартного электронного термометра для воды. Так, на момент закладки икры в устройство 8 октября 2024 г. температура воды в реке Монче составляла 6,8 °С.

Оценку эффективности устройств делали на основе подсчета погибших эмбрионов/

личинок, не вышедших из устройств. Сводные данные по устройствам приведены в таблице 1. Для устройств под номерами 1–7 указано фактическое количество погибших эмбрионов, подсчитанное при анализе. Для устройств с номерами 8 указан процент отхода 50, выбранный нами условно. Это были поврежденные устройства, в которых оставались единичные погибшие эмбрионы. Мы условно приняли, что эмбрионы попали в грунт, а известно, что процент выживания эмбрионов при естественной инкубации составляет 50 %. Именно эту величину условно и указали для поврежденных устройств. Для устройств 9 и 10, обнаруженных на берегу, процент отхода указали 100 %.

Результаты и обсуждение

Первичная оценка эффективности и применимости устройств показала, что устройства с выносным водозаборником-фильтром применимы в условиях арктических рек для восстановления запасов лососевых видов рыб. Расчетная вместимость устройств была реализована в полном объеме, 3000 икринок на устройство. В ходе закладки икры, снаряжения устройств, сборки и установки не возникло проблем. Икра оставалась на инкубационном субстрате, не происходило ее вымывания или просачивания сквозь распределительные решетки, несмотря на полную закладку устройств. Следует подчеркнуть, что устройства установлены по полноцикловой технологии, от момента оплодотворения икры до естественного расселения личинок на пороги. Предполагается автономная работа устройств на протяжении 8 месяцев в условиях ледостава, без этапов промежуточного обслуживания.

Дополнительной задачей данных устройств стал мониторинг чистоты вод реки Мончи в районе производственной площадки Кольской ГМК «Норникель» на протяжении части осени, зимы и весны. Эмбрионы кумжи выступают биоиндикатором состояния воды. Первичная оценка свидетельствует о высокой чистоте воды, показатели pH, прозрачность, отсутствие загрязнителей позволяют икре кумжи оплодотворяться с эффективностью 99,99 %, отход после первичного выдерживания 12 и 24 часа составил лишь 25–30 икринок на более чем 45 000 успешно оплодотворенных, это очень высокий

показатель. При транспортировке к месту закладки инкубаторов отход икры составил не более 120 шт., менее 1 %, что также является хорошим показателем.

При поиске и снятии устройств на реке Монче в июне 2025 г. (рис. 3) место установки гнезд-инкубаторов было легко идентифицировать, поэтому трудностей с поиском установленных гнезд не возникло.

В основном русле реки Мончи 9 устройств находились на местах установки и не были перемещены ни льдом, ни паводком в весенний период. Одно устройство оказалось раздавлено льдом, одно полностью заилено, одно снесено паводком, его обнаружить не удалось. В целом эффективность инкубации оказалась достаточно высокой, основные потери икры были связаны с повреждением устройств.

В ручей Кумужий было установлено 2 гнезда-инкубатора Salmo-3000 с 6000 тысячами икринок кумжи из реки Пиренги. В июне 2025 года удалось обнаружить 2 гнезда, одно из них было частично занесено песком, один нижний слой, второе раздавлено и полностью занесено песком. При интенсивном таянии снега уровень воды в реке значительно возрос, ручей приобрел характер горной реки, что и привело к повреждению и заиливанию устройств. С учетом погибших икринок и поврежденных устройств суммарная эффективность выхода малька составила около 40 %. Из 6000 икринок было получено 2400 мальков кумжи. В ручье Кумужий из-за сложного гидрологического режима нецелесообразно применение гнезд-инкубаторов Salmo-3000. В дальнейших экспериментах будут применяться другие гнезда-инкубаторы, адаптированные к условиям ручья. Сводные данные по эффективности выхода малька приведены в таблице 1.

В реке Тиханке в июне 2025 г. удалось обнаружить оба гнезда-инкубатора икры. Одно было целое, но на 100 % заилено песком и мелкодисперсным торфяным илом, второе было раздавлено льдом и также заилено. Гибель икры составила 100 %, результаты не были включены в общий анализ из-за критических факторов, не позволяющих икре эффективно инкубироваться. Эксперимент в реке подтвердил теорию, выдвинутую в ходе обследования реки



Рис. 3. Вскрытые гнезда-инкубаторы 1–4 на реке Монче (Д.А. Ефремов)

Fig. 3. Opened nest incubators 1–4 on the Moncha River (photos taken by D.A. Efremov)

Таблица 1. Оценка эффективности гнезд-инкубаторов Salmo-3000, река Монча и ручей Кумужий, 2024–2025 гг.

Table 1. Evaluating the effectiveness of Salmo-3000 nest incubators in the Moncha River and Kumuzhy Stream, 2024–2025

№ инкубатора	Количество заложеной икры	Отход икры, шт.	Отход икры, %	Выход малька, шт.	Выход малька, %
Монча 1 целое	3000	125	4,2	2875	95,8
Монча 2 целое	3000	235	7,8	2765	92,2
Монча 3 целое	3000	216	10,5	2684	89,5
Монча 4 целое	3000	137	4,6	2863	95,4
Монча 5 заилено	3000	2970	99,0	30	1,0
Монча 6 целое	3000	220	7,4	2780	92,6
Монча 7 целое	3000	126	4,2	2874	95,8
Монча 8 раздавлено	3000	210	7,0	2790	93,0
Монча 9	3000	243	8,1	2757	91,9
Монча 10 снесено	3000	1500	50,0	1500	50,0
Кумужий 1 раздавлено	3000	3000	100,0	0	0
Кумужий 2 целое	3000	655	21,9	2345	78,1
Всего	36000	9737	27,1	26263	72,9

Тиханки летом 2024 г. Река в результате мелиоративных работ времен СССР оказалась полностью загрязнена торфяной взвесью. Нерестовый грунт стал непригоден для естественного нереста кумжи и сига, которые здесь обитали до проведения сельскохозяйственных преобразований. Восстановление ихтиофауны в данном водотоке нецелесообразно до полного очищения нерестилищ от торфяной взвеси (необходимо восстановление полей в состоянии болот, выполняющих фильтрующую функцию в естественных условиях). После восстановительных работ процесс самоочищения нерестилищ может составить не менее 20 лет, поскольку как плесы в русле реки, так и проточные озера накопили огромное количество торфяного ила, который при каждом последующем паводке продолжит вымываться и заносить пороги.

На основе подсчета оставшихся погибших икринок в гнездах и потерянных гнезд-инкубаторов средняя эффективность инкубации составила 72,9 %. Было получено около 26 000 мальков кумжи. При разборке гнезд некоторые личинки оставались в устройстве, не успели покинуть их (рис. 4). Всего было зафиксировано около 45–50 личинок в 7 устройствах.

12 из 14 выносных водозаборников-фильтров и выпускные патрубки также были

обнаружены, крепежные штифты располагались на своих местах, визуальными валуны, которыми накрывали устройства, находились на своих местах. Некоторые водозаборники были раздавлены льдом в зимний период.

После снятия инкубатора все элементы промыли проточной водой (было необходимо смыть мелкодисперсный ил), просушили и поместили на хранение. Устройство пригодно для повторного использования без необходимости проведения ремонта или дополнительной промывки. Для снятия крепежных отрезков арматуры следует использовать щипцы с длинными ручками, поскольку арматура крепко закрепляется в седиментированном грунте.

Испытания гнезд-инкубаторов Salmo-3000 в р. Монче проводили по полноцикловой технологии [11]. В данном регионе она была предпочтительна, так как поблизости отсутствуют рыболовные заводы и икру негде инкубировать до стадии «пигментации глаз». Кроме того, стадия «пигментации глаз» у кумжи наступает в марте–апреле, когда на реках сохраняется толстый ледовый покров и закладка инкубатора с выносным водозаборником крайне затруднительна — под каждое устройство необходима прорубь длиной не менее 2 м и шириной 1 м. По нашему опыту, три человека могут



Рис. 4. Молодь кумжи 0+, вылупившаяся в гнезде-инкубаторе Salmo-3000 и не успевшая покинуть гнездо-инкубатор (Д.А. Ефремов)

Fig. 4. Juvenile brown trout (0+) hatched in the Salmo-3000 nest incubator that did not manage to leave the nest incubator (photos taken by D.A. Efremov)

сделать подходящую прорубь в течение двух дней при толщине льда около 1 м, с учетом короткого светового дня. В некоторых случаях короткоцикловая технология незаменима при зарыблении труднодоступных рек и притоков, где доставку икры осуществляют с использованием снегоходов по льду, но в этих работах следует применять устройства без выносного водозаборника с длинным (2 м и более) соединительным патрубком. При проведении таких работ гнезда-инкубаторы устанавливаются в пропильные во льду майны или промоины на выбранные еще осенью площадки, на которых не происходит «перепахивания» грунта при весеннем ледоходе. Ранее короткоцикловая технология была успешно апробирована нами в 2008, 2011 и 2014 гг. на реках Суна, Лижма и Улмосенйоки (бассейны Онежского и Ладожского озер), где выход диких личинок пресноводного лосося составил 95–97 % [5, 13, 14]. В эксперименте учитывали, что наиболее критичный период инкубации икры связан с переходом зимней межени в паводковый режим, когда поступающая внутрь вода может существенно насыщаться губительными для эмбрионов взвесями детрита, ила или минеральными частицами [15]. В нашем случае превышения содержания частиц ила в устройствах в реке Кумже обнаружить не удалось, в ручье Кумужий преобладала мелкая фракция песка, в реке Тиханке — торфа.

Апробированное нами устройство ориентировано в основном на одиночный способ установки с заданной плотностью 1 инкубатор на 1,0–1,2 тыс. м². Испытания в реках показали, что они частично устойчивы к паводкам, потеря устройств составила менее 10 %, так как находятся между возвышающимися валунами и удобны для использования в порогах рек с неровным рельефом дна. Глубины на участке должны составлять не менее 0,6 м в осенний период, скорость течения — не менее 0,6 и не более 1,0 м/с. Также следует внимательно выбирать места установки гнезд: на них скорость течения у поверхности воды должна быть в пределах 0,6–0,9 м/с, а глубина составлять 0,3–0,7 м. Такие показатели типичны для естественных нерестовых участков лососевых рыб. При колебании уровня воды в реке это позволяет избежать обсыхания или промерзания гнезд в зимнюю межень [16, 17]. Также для установки не следует избирать узкие канализированные участки — в период

паводка здесь скорости течения становятся критическими, предпочтительны предпекатные участки перед разливом на сравнительно широкий перепад или порог.

Апробация гнезда-инкубатора Salmo-3000 показала его эффективность и автономность более 8 месяцев, с октября по июнь. Таким образом, наша разработка полностью соответствует критериям необслуживаемых гнезд-инкубаторов, что позволяет применять их во всех климатических зонах России для инкубации икры лососевых видов рыб рода *Salmo*. Успешный опыт апробации гнезда-инкубатора с частичной загрузкой позволяет провести второй этап испытаний устройства с полной загрузкой, и в случае высокой эффективности на втором этапе возможно рекомендовать устройство для массового применения.

Заключение

Проведенные в 2024–2025 гг. испытания гнезда-инкубатора икры Salmo-3000 с полной загрузкой 3000 икринок кумжи на устройство по полноцикловой технологии (автономность 8 месяцев) оказались успешными, удалось получить около 26 000 жизнестойких мальков кумжи, без учета закладки икры в грунт с формированием нерестовых бугров из гальки. Всего было апробировано 14 устройств. Эффективность выхода малька — 72,9 %. В ходе работ недостатком устройства стала трудоемкость его установки, связанная с необходимостью подготовить дно реки на участке установки, а также покрыть устройство и все его компоненты крупными валунами, что в условиях холодной (5–6 °С) воды вынуждает использовать сухой гидрокостюм.

Также отработана методика отлова производителей кумжи непосредственно на нерестилище в период нереста. Одним из преимуществ данной методики является возможность применения ее на малых реках, где нецелесообразно устанавливать рыбоучетные заграждения и выдерживать производителя в течение лета до созревания половых продуктов. Исключение отловленных особей из естественного нереста в рамках апробированной методики наносит некоторый ущерб популяции, но он полностью компенсируется установкой гнезд-инкубаторов с полученной от выловленных самок икрой. В результате исключаются потери икры

при естественном нересте до 50 % от плодовитости самки. Также самцы, используемые для оплодотворения, сразу выпускаются в среду без какого-либо вреда для них, и они способны продолжить нерест с оставшимися в реке самками. Самки, от которых была получена икра, после выдерживания в садках также выпускаются обратно в среду. Мягкое сдаивание икры, исключение травм при копании естественного гнезда также позволяют самкам восстановить силы и успешно скатиться в нагульный водоем весной, что позволит им участвовать в последующих нерестах.

Испытания гнезда-инкубатора Salmo-3000 показали, что модели с ярусным расположением инкубационных лотков в три слоя и канавками, оснащенные распределительной решеткой для воды и выносным водозаборником-фильтром, превосходят одноярусные устройства по вместимости закладываемой икры. Ограничивающие решетки в лотках обеспечивали безопасную и быструю загрузку, а также упрощали сборку инкубатора. При перемещении лотков икра не выливалась через подающие и выпускные отверстия. После выклева все личинки оставались в инкубационных лотках до тех пор, пока не поднялись на плав, после чего успешно покидали инкубатор через выпускной патрубок. Применение стеклопла-

стиковой арматуры позволило сохранить устройство во время сильного весеннего паводка, когда уровень воды увеличивался на 1–2 м по сравнению с осенними значениями. Использование крупных валунов в качестве груза и маскировки предотвратило разрушение инкубатора рыбаками, которые часто посещают этот участок реки.

В то же время стеклопластиковая арматура оказалась сложной для извлечения из грунта при снятии устройства. Для этого потребовалось использовать клещи, так как арматура плотно застряла в осадочном грунте реки. Предпочтительно, чтобы устройства были установлены одиночным способом с плотностью 1 устройство на 1000–1500 м². Этим обеспечивается плотность мальков после выхода 150–200 экз./100 м². Конструктивные решения обеспечивают защиту и устойчивость гнезд на неровном дне в паводки, устойчивость к большому весу (наступившего человека, зверя или просевшего льда).

После завершения второго этапа испытаний с полной загрузкой гнезда-инкубатора можно рекомендовать при восстановлении численности популяций и воссоздания стад лососевых видов рыб в реках с критически низким количеством производителей или с утраченными популяциями кумжи.

Литература

1. Donaghy M.J., Verspoor E. A new design of instream incubator for planting out and monitoring Atlantic salmon eggs. *N. Am. J. Fish. Manag.* 2000;20(2):521–527. [https://doi.org/10.1577/1548-8675\(2000\)020<0521:ANDOH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8675(2000)020<0521:ANDOH>2.3.CO;2)
2. Лупандин А.И., Павлов Д.С., Веселов А.Е., Калюжин С.М. Искусственное воспроизводство атлантического лосося (*Salmo salar*) в естественных условиях. В: *Фундаментальные основы управления биологическими ресурсами*. Москва: Т-во науч. изд. КМК; 2005, с. 434–445.
3. Dumas J., Marty S. A new method to evaluate egg-to-fry survival in salmonids, trials with Atlantic salmon. *J. Fish Biol.* 2006;68(1):284–304. <https://doi.org/10.1111/j.0022-1112.2006.00907.x>
4. Веселов А.Е., Аликов Л.В., Скоробогатов М.А., Зубченко А.В., Калюжин С.М., Шустов Ю.А., Потуткин А.Г. Искусственная инкубация икры атлантического лосося (*Salmo salar* L.) в естественных условиях. *Труды КарНЦ РАН*. 2007;(11):14–19.
5. Веселов А.Е., Павлов Д.С., Скоробогатов М.А., Ефремов Д.А., Белякова Е.Н., Потапов К.Ю. Опыт искусственной инкубации икры атлантического лосося (*Salmo salar* L.) в р. Суне (бассейн Онежского озера). *Труды КарНЦ РАН*. 2011;(3):28–38.
6. Pander J., Schnell J., Sterneckner K., Geist J. The «egg sandwich» a method for linking spatially resolved salmonid hatching rates with habitat variables in stream ecosystems. *J. Fish Biol.* 2009;74(3):683–690. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2008.02145.x>

7. Павлов Д.С., Скоробогатов М.А., Веселов А.Е., Калюжин С.М., Волков Б.А. Устройство для инкубации икры в естественных условиях. Патент на полезную модель № 99688. Оpubл. 27.11.2010.
8. Скоробогатов М.А., Волков Б.А., Веселов А.Е., Павлов Д.С. Устройство для инкубации икры лососевых рыб в естественных условиях. Патент на полезную модель № 110229. Оpubл. 20.11.2011.
9. Павлов Д.С., Веселов А.Е., Скоробогатов М.А., Волков Б.А., Ефремов Д.А. Устройство для инкубации икры и получения личинок лососевых рыб в естественных условиях. Патент на полезную модель №127587. Оpubл. 10.05.2013.
10. Ефремов Д.А., Веселов А.Е., Ручьев М.А., Скоробогатов М.А., Федорова Л.К., Мадудин А.И. Испытание гнезд-инкубаторов икры кеты (*Oncorhynchus keta*) «Шайба 400» в малых притоках реки Малка (о. Сахалин). Труды КарНЦ РАН. 2019;(6):57–73. <https://doi.org/10.17076/eb1019>
11. Ефремов Д.А. Скоробогатов М.А., Потуткин А.Г. Испытание гнезда-инкубатора икры лососевых видов рыб рода *Salmo* “Salmo-3000” в условиях Арктической реки Индѐра (Кольский п-ов). Труды Карельского научного Центра Российской академии наук. 2021;(11):80–92. <https://doi.org/10.17076/eb1490>
12. Павлов Д.С., Веселов А.Е., Скоробогатов М.А., Ефремов Д.А. Устройство для инкубации икры лососевых рыб в реках. Патент на полезную модель RU 147950. Оpubл. 20.11.2014.
13. Веселов А.Е., Павлов Д.С., Скоробогатов М.А., Ефремов Д.А., Нагирняк Г.А., Ручьев М.А. Результаты испытаний новой конструкции гнезда-инкубатора лососевой икры в речных условиях. Труды КарНЦ РАН. 2013;(3):179–184.
14. Ручьев М.А., Ефремов Д.А., Скоробогатов М.А., Веселов А.Е. Испытание гнезд-инкубаторов икры кумжи (*Salmo trutta* L.) двухъярусной конструкции в реке Улмосен-йоки (бассейн Ладожского озера). Труды КарНЦ РАН. 2016;(6):91–98. <https://doi.org/10.17076/eb344>
15. Казаков Р.В. Биологические основы разведения атлантического лосося. Москва: Легкая и пищевая промышленность; 1982.
16. Смирнов Ю.А. Пресноводный лосось (экология, воспроизводство, использование). Ленинград: Наука; 1979.
17. Tonina D., Buffington J.M. A tree-dimensional model for analyzing the effects of salmon redds on hyporheic exchange and egg pocket habitat. *Can. J. Fish Aquat. Sci.* 2009;66(12):2157–2173. <https://doi.org/10.1139/F09-146>

References

1. Donaghy M.J., Verspoor E. A new design of instream incubator for planting out and monitoring Atlantic salmon eggs. *N. Am. J. Fish. Manag.* 2000;20(2):521–527. [https://doi.org/10.1577/1548-8675\(2000\)020<0521:ANDOH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8675(2000)020<0521:ANDOH>2.3.CO;2)
2. Lupandin A.I., Pavlov D.S., Veselov A.E., Kalyuzhin S.M. Artificial reproduction of the Atlantic salmon (*Salmo salar*) under natural conditions. *Fundamentals of biological resource management*. Moscow: KMK Scientific Press Ltd.; 2005, pp. 434–445. (In Russ.).
3. Dumas J., Marty S. A new method to evaluate egg-to-fry survival in salmonids, trials with Atlantic salmon. *J. Fish Biol.* 2006;68(1):284–304. <https://doi.org/10.1111/j.0022-1112.2006.00907.x>
4. Veselov A.E., Alikov L.V., Skorobogatov M.A., Zubchenko A.V., Kalyuzhin S.M., Shustov Yu.A., Potutkin A.G. Artificial incubation of eggs of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) under natural conditions. *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences.* 2007;(11):14–19. (In Russ.).
5. Veselov A.E., Pavlov D.S., Skorobogatov M.A., Efremov D.A., Belyakova E.N., Potapov K.Yu. An experience of artificially incubating Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) eggs in the Suna River (Lake Onega Basin). *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences.* 2011;(3):28–38. (In Russ.).
6. Pander J., Schnell J., Sternecker K., Geist J. The «egg sandwich» a method for linking spatially resolved salmonid hatching rates with habitat variables in stream ecosystems. *J. Fish Biol.* 2009;74(3):683–690. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.2008.02145.x>
7. Pavlov D.S., Skorobogatov M.A., Veselov A.E., Kalyuzhin S.M., Volkov B.A. The device for eggs incubation under natural conditions. Patent for utility model no. 99688. Publ. date 27 November 2010. (In Russ.).

8. Pavlov D.S., Veselov A.E., Skorobogatov M.A., Volkov B.A. The device for salmon eggs incubation under natural conditions. Patent for utility model no. 110229. Publ. date 20 November 2011. (In Russ.).
9. Pavlov D.S., Veselov A.E., Skorobogatov M.A., Volkov B.A., Efremov D.A. The device for eggs incubation and salmon larvae breeding under natural conditions. Patent for utility model no. 127587. Publ. date 10 May 2013. (In Russ.).
10. Efremov D.A., Veselov A.E., Ruch'ev M.A., Skorobogatov M.A., Fedorova L.K., Madudin A.I. Trials of "Shayba 400" incubation nests for chum salmon (*Oncorhynchus keta*) eggs in small tributaries to the Malka River (Sakhalin Island). Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. 2019;(6):91–98. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/eb344>
11. Efremov D.A. Skorobogatov M.A., Potutkin A.G. Ispytaniye gnezda-inkubatora ikry lososovykh vidov ryb roda Salmo "Salmo-3000" v usloviyakh Arkticheskoy reki Indera (Kol'skiy poluostrov). Transactions of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2021;(11):80–92. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/eb1490>
12. Pavlov D.S., Veselov A.E., Skorobogatov M.A., Efremov D.A. The device for salmon eggs incubation in rivers. Patent for utility model no. RU 147950. Publ. date 20 November 2014. (In Russ.).
13. Veselov A.E., Pavlov D.S., Skorobogatov M.A., Efremov D.A., Nagirnyak G.A., Ruch'ev M.A. Results of trials of a new design of the salmon eggs incubation redd in fluvial settings. Transactions of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2013;(3):179–184. (In Russ.).
14. Ruchev M.A., Efremov D.A., Skorobogatov M.A., Veselov A.E. Trials of two-level nests for incubation of brown trout (*Salmo trutta* L.) eggs in the Ulmosenjoki River (Lake Ladoga Catchment). Transactions of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2016;(6):91–98. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/eb344>
15. Kazakov R.V. Biological bases of the Atlantic salmon cultivation. Moscow: Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ.; 1982. (In Russ.).
16. Smirnov Yu. A. Landlocked salmon (ecology, reproduction, and management). Leningrad: Nauka; 1979. (In Russ.).
17. Tonina D., Buffington J.M. A tree-dimensional model for analyzing the effects of salmon redds on hyporheic exchange and egg pocket habitat. Can. J. Fish Aquat. Sci. 2009;66(12):2157–2173. <https://doi.org/10.1139/F09-146>

Сведения об авторах

Ефремов Денис Александрович — к. б. н., старший научный сотрудник Института биологии ФИЦ «Карельский научный центр РАН». Россия, 185910, Республика Карелия, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11. Тел.: +7 (911) 410-31-05
E-mail: denisefremov@list.ru

Ручьев Михаил Андреевич — ведущий биолог Института биологии ФИЦ «Карельский научный центр РАН». Россия, 185910, Республика Карелия, Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11. Тел.: +7 (921) 457-18-45
E-mail: denisefremov@list.ru

Information about the authors

Denis A. Efremov — Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher Institute of Biology, the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. Russia, 185910, Karelia, Petrozavodsk, Pushkinskaya str., 11. Tel.: +7 (911) 410-31-05
E-mail: denisefremov@list.ru

Mikhail A. Ruch'ov — lead biologist, Institute of Biology, the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. Russia, 185910, Karelia, Petrozavodsk, Pushkinskaya str., 11. Tel.: +7 (921) 457-18-45
E-mail: ruchev_mikhail@list.ru

Вклад авторов

Ефремов Денис Александрович — разработка устройства, изготовление опытных образцов, постановка эксперимента, подготовка публикации.

Ручьев Михаил Андреевич — отлов рыбы, постановка эксперимента, оценка результатов.

Author contribution statement

Denis A. Efremov — development of the device, manufacturing of prototypes, setting up the experiment, preparation of the manuscript

Mikhail A. Ruch'yov — fish catching, setting up the experiment, evaluating the results

Благодарность

Финансовое обеспечение работ осуществлялось за счет средств АО «Кольская ГМК» (г. Мончегорск), государственного задания КарНЦ РАН (тема № FMEN-2022-0007, № г.р. 122031700452-3.), при участии Министерства природных ресурсов Мурманской области, Фонда «Мурманский лосось», ООО «Промрыбвод».

Acknowledgement

The work was funded by Kolskaya MMC JSC (Monchegorsk) and a government grant from the Karelia Research Center of the Russian Academy of Sciences (Project No. FMEN-2022-0007, No. 122031700452-3), with the participation of the Ministry of Natural Resources of the Murmansk Region, the Murmansk Salmon Fund, and Promrybvod LLC.

УДК 502.211

ББК 26.821.73

<https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-54-68>



Разработка технологии восстановительных сукцессий и перспективы ее апробации на техногенно преобразованных ландшафтах Никель — Заполярный (Мурманская область)

Хлебосолова О.А. ✉

ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ), Москва, Россия
✉ hlebosolovaoa@mgri.ru

Аннотация. В работе дается аналитический обзор исследований по оценке влияния природных факторов и особенностей природопользования на формирование техногенно преобразованных ландшафтов в Печенгском муниципальном округе Мурманской области. Основное внимание уделяется результатам многолетнего экологического мониторинга за ходом техногенной дигрессии и последующей восстановительной сукцессии березовых редколесий и тундр на техногенно преобразованных ландшафтах Никель — Заполярный (2006–2025 гг.) и результатам применения здесь природоподобных технологий рекультивации. Обсуждаются возможности разработки инновационной технологии по искусственному ускорению сукцессионных процессов и перспективы ее апробации на экспериментальных полигонах по инициативе Кольской ГМК.

Ключевые слова: мониторинг, инновационная технология, восстановительная сукцессия, арктические экосистемы, Кольская ГМК, Никель, Заполярный

Конфликт интересов: автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Хлебосолова О.А. Разработка технологии восстановительных сукцессий и перспективы ее апробации на техногенно преобразованных ландшафтах Никель — Заполярный (Мурманская область). *Арктика и инновации*. 2026;4(2):54–68. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-54-68>

Development of a secondary succession approach and prospects for its application in severely disturbed landscapes of the Nikel–Zapolyarny area (Murmansk Oblast, Russia)

Olga A. Khlebosolova ✉

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI), Moscow, Russia
✉ hlebosolovaoa@mgri.ru

Abstract. This paper presents an analytical review of research examining the influence of natural factors and land use history on landscapes affected by industrial activity in the Pechenga Municipal District of the Murmansk Region, Russia. The analysis draws on long-term ecological monitoring of industrial degradation and subsequent secondary succession in birch open woodlands and tundra ecosystems across the Nickel–Zapolyarny industrial area (2006–2025). Particular attention is given to the results of applying nature-based reclamation approaches in these severely disturbed Arctic environments. The paper also evaluates the feasibility of developing a method to accelerate successional recovery, while considering prospects for testing this approach at experimental sites established by Kola Mining and Metallurgical Company (Kola MMC).

Keywords: monitoring, innovative technology, secondary succession, Arctic ecosystems, Kolskaya GMK, Nickel, Zapolyarny

Conflict of interest: the author reports no conflict of interest.

For citation: Khlebosolova O.A. Development of a secondary succession approach and prospects for its application in severely disturbed landscapes of the Nickel–Zapolyarny area (Murmansk Oblast, Russia). *Arctic and Innovations*. 2026;4(2):54–68. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-54-68>

Введение

Хозяйственное освоение арктических территорий продолжается на протяжении многих тысячелетий и сопровождается многофакторным очаговым воздействием на экосистемы, что привело к сокращению биологического разнообразия, деградации почв, расширению площади нарушенных земель. Обострение экологических проблем произошло во второй половине XX века, когда Арктика стала одним из ведущих центров добычи и переработки минерально-сырьевых и топливно-энергетических ресурсов страны [1]. Экосистемы арктических пустынь, тундр и редколесий оказались максимально чувствительны к техногенному воздействию ввиду быстрого превышения порога экологической емкости и медленного протекания процессов естественного восстановления даже по окончании периода активной эксплуатации [2, 3]. Итогом хозяйственного освоения стало формирование вблизи промышленных площадок техногенно преобразованных ландшафтов (техногенных комплексов) с присущими им процессами деградации почвенно-растительного покрова [4–7]. Попытки решения проблемы восстановления и рекультивации хрупких арктических экосистем оказались финансово затратными и малоэффективными из-за сильного химического загрязнения почв и продолжающегося переноса мелкодисперсных частиц на значительные расстояния от источника [8, 9]. В настоящее время проведение исследований, направленных на изучение техногенных депрессий, восстановительных сукцессий, технологий рекультивации в Арктике, является приори-

тетной задачей деятельности научно-исследовательских учреждений, университетов, промышленных компаний. Особенно актуально изучение естественных механизмов восстановления экосистем за полярным кругом и разработка соответствующих технологий [10, 11].

Целью данной статьи стало обобщение результатов оценки влияния природных и антропогенных процессов на экологическое состояние техногенно преобразованных ландшафтов Никель — Заполярный и разработка инновационной технологии по искусственному ускорению сукцессионных процессов.

Выбранная модельная территория Никель — Заполярный имеет площадь около 10 700 га и расположена в пределах Печенгского муниципального округа Мурманской области к северо-востоку от поселка городского типа Никель. Территория характеризуется доминированием техногенно преобразованных ландшафтов (техногенных комплексов), появившихся на месте тундр и березовых редколесий с примесью сосны во второй половине XX века в ходе промышленного освоения медно-никелевых месторождений [12].

Основу исследования составил анализ первоисточников, в которых приведены данные по археологии и истории природопользования, климату, биоразнообразию, экологическому состоянию компонентов природной среды в бассейне реки Паз и на прилегающей территории. Созданная электронная

база материалов включает более 620 публикаций, а также 75 фондовых отчетов о результатах научных исследований (из архива ГПЗ «Пасвик»). В статье обобщены результаты полевых экспедиционных исследований с участием автора за 2006–2025 годы, посвященные изучению экологического состояния почв и растительности модельной территории.

Основная часть

Отправным моментом изучения перспектив восстановления техногенно преобразованных ландшафтов Никель — Заполярный (Мурманская область) служит *ретроспективный анализ влияния природных и антропогенных факторов* на их формирование. Анализ охватывает российскую часть бассейна реки Паз и прилегающую территорию в период последнего межледниковья [13].

Имеющиеся на сегодня данные свидетельствуют о том, что главным агентом изменений на протяжении последних 10 тысяч лет был человек, главным фактором — его преобразующая деятельность, виды которой постепенно расширялись, а характер и степень воздействия усиливались. Изучение истории формирования техногенно преобразованных ландшафтов на модельной территории позволило выделить пять основных этапов [14].

I. Самые ранние археологические памятники, найденные на изучаемой территории, относятся к эпохе раннего мезолита [13, 15], когда сюда двумя путями — «западным» и «юго-восточным» — приходили народы, занимавшиеся добычей морского зверя и рыболовством, а вместе с ними проникали различные технологии [16–18]. В железном веке (предположительно в начале I тысячелетия до н. э.) на реку Паз пришли представители саамской культуры (хотя найденные к настоящему времени памятники относятся к Средневековью — началу II тысячелетия н. э.) [13, 19]. Их традиционными промыслами были рыболовство, охота, а впоследствии — разведение оленей, что привело к активной эксплуатации природных ресурсов [20]. Представители саамской культуры осваивали эту территорию на протяжении пятнадцати столетий, что постепенно привело к замене естественных ландшафтов природно-антропогенными (промысловые угодья, места лесозаготовок,

зимние погосты), снижению численности отдельных видов (белая куропатка, лось, щука, налим, сиг), деградации мохово-лишайникового покрова и фрагментации старовозрастных сосняков. Вместе с тем, оценивая природопользование представителей ранних культур, следует отметить, что оно обеспечивало восстановление экосистем и поддержание экологического равновесия. К началу следующего этапа (середина XVI в.) произошел переход от дисперсного ресурсосберегающего к фоновому природопользованию с характерным для него умеренно-сбалансированным обменом (рис. 1) [14].

II. Колонизация бассейна реки Паз в XVI–XIX вв. сопровождалась значительным ростом населения и формированием небольших поселений. Среди основных видов хозяйственной деятельности особое значение приобрели земледелие, рыболовство (озерно-речное и морское), промысел зверя и боровой дичи, солеварение, дубильное производство, заготовка древесины в промышленных масштабах, что характеризует очаговое природопользование. На изучаемой территории отмечалось увеличение площади вторично-производных и антропогенно-модифицированных ландшафтов, а также появление техногенных (поселения, промышленные и транспортные объекты). Продолжалось снижение численности отдельных видов (белая куропатка, рябчик, выдра, лось, бобр, жемчужница, семга, щука, налим, сиг, окунь), усилилась деградация экосистем — преимущественно лесных и пойменных.

III. В первой половине XX в. в бассейне реки Паз проживало постоянное население и развивался ресурсопотребляющий промышленный тип природопользования (очаговый и крупноочаговый) с характерным для него дисбалансным обменом. Эксплуатация минерально-сырьевых, гидроэнергетических, биологических ресурсов, активные военные действия, рост населения привели к расширению площади техногенных комплексов: урбанизированных, индустриальных, энергетических, горнодобывающих, транспортных, водохозяйственных. Активное преобразование рельефа и геологической среды, загрязнение воздуха и водных объектов, регулирование стока привело к развитию проблем экологического характера. Изменения почвенно-растительного покрова отразилось преимущественно на хозяйственно-ценных видах и экосистемах.

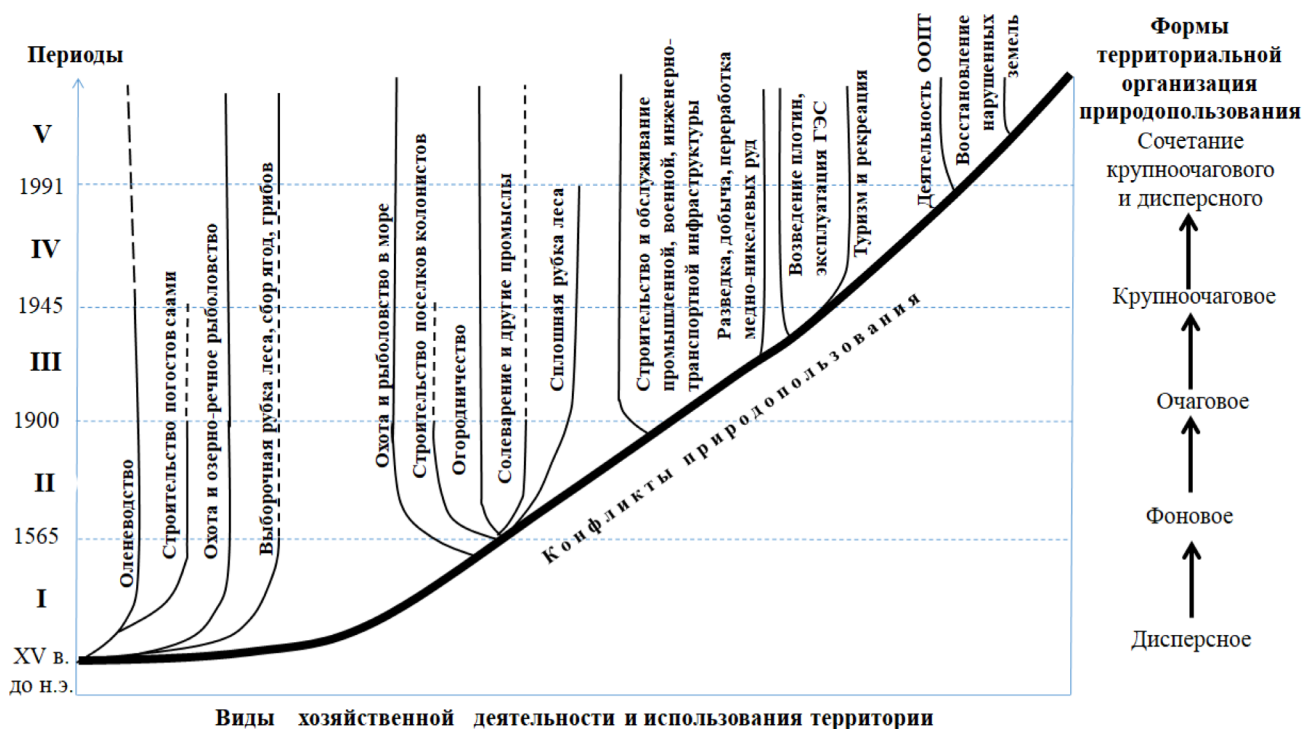


Рис. 1. Основные периоды природопользования на территории Печенгского района Мурманской области [14]

Fig. 1. Major periods of land use in the Pechenga District, Murmansk Oblast [14]

IV. Быстрый рост населения в 1945–1990 гг. был связан с разведкой, добычей и переработкой медно-никелевых руд, строительством и эксплуатацией ГЭС, лесозаготовками, строительством и обслуживанием военной, инженерной, транспортной и социальной инфраструктуры. Это свидетельствовало о преобладании ресурсопотребляющего промышленного типа природопользования с дисбалансным обменом. Эксплуатация природных ресурсов, загрязнение всех компонентов природной среды достигли максимальных значений, что привело к необратимым изменениям экосистем и развитию техногенной дигрессии. Условно-коренные ландшафты сохранились только вдоль государственной границы, резко увеличилась площадь техногенных комплексов (горнодобывающих, индустриальных, транспортных, урбанизированных, энергетических, водохозяйственных) [12]. Экологическая ситуация за этот период крайне усугубилась из-за использования в последней четверти XX в. привозной норильской руды с высоким содержанием серы и площадных рубок леса.

V. Начавшаяся в 90-е годы XX в. диверсификация хозяйства сопровождалась почти двукратной убылью населения российской

части бассейна реки Паз за счет работников горнорудных и металлургических предприятий, лесозаготовителей, военных. Активно стала развиваться природоохранная деятельность на базе сформированных ООПТ (в 1992 г. был организован заповедник «Пасвик», в 2018 г. — природный парк «Кораблекк» и другие). В дополнение к ресурсопотребляющему природопользованию промышленного типа вновь появилось дисперсное (рекреационное и природоохранное) природопользование с характерным для него сбалансированным обменом. Площадь основных типов ландшафтов, включая техногенные комплексы, практически не изменилась. Вместе с тем начали проводиться мероприятия по восстановлению лесов и апробация методов рекультивации техногенно преобразованных ландшафтов.

Следует отметить, что изучение влияния природных факторов за рассматриваемый период (после отступления ледника) указывает на значительные климатические колебания на фоне относительного постоянства геолого-геоморфологических условий [21, 22]. Имеющиеся данные свидетельствуют о широком диапазоне различий в температурах и количестве осадков, а также чередовании периодов — теплых

и холодных, сухих и влажных. Интеграция данных по российской части бассейна реки Паз позволила построить кривые изменения климатических показателей и спектры растительности, а затем соотнести их с основными этапами освоения территории [23]. Было выявлено, что климатические колебания сопровождались сменой растительности: в периоды потепления преобладала лесная растительность, в периоды похолодания — лесотундровая и тундровая. Смена зональных спектров происходила в следующей последовательности: 1) аркто-тундровая, 2) лесотундровая с преобладанием березы, 3) лесная с преобладанием сосны, 4) тундрово-лесотундрово-лесная (с хвойными и лиственными породами), 5) лесная сосново-березовая, 6) лесотундрово-лесная, 7) растительность с преобладанием на возвышенностях кустарничковых тундр и березовых редколесий, на склонах и в понижениях — сосновых лесов. Выявленные тренды позволили спрогнозировать особенности климата в ближайшие десятилетия и определить целевые ориентиры восстановления техногенно-преобразованных ландшафтов: они связаны с сохранением современного спектра экосистем кустарничковых тундр, березового редколесья и сосновых лесов в условиях средних для территории значений температур и осадков.

Для анализа экологического состояния техногенно преобразованных ландшафтов Никель — Заполярный были рассмотрены материалы научных отчетов последнего десятилетия XX в., целью которых было исследование накопленного загрязнения и трансграничного переноса [25, 26]. В 2003–2006 гг. проводились масштабные международные исследования, посвященные изучению состояния компонентов окружающей среды в пограничном районе Инари — Паз, которые осуществлялись с участием экспертов 20 исследовательских и природоохранных организаций трех стран, материалы которых были также проанализированы [27]. Итоговый отчет проекта «Интеррег IIIA Коларктик» представлял оценку фактического состояния компонентов природной среды водосборного бассейна реки Паз в связи с деятельностью комбината «Печенганикель». Следует отметить, что общей особенностью всех отчетов была приблизительная оценка зон техногенного воздействия и их площади, крайне велик разброс итоговых сведений о состоя-

нии экосистем и видов. Согласно этим исследованиям радиус зоны аэротехногенного загрязнения составлял от 25 до 700 км, имел форму круга или овала с центром в районе промышленных площадок «Никель» и «Заполярный». Зона возможного загрязнения осадками никеля охватывала значительную пограничную территорию трех стран, а зона с превышением средней концентрации сернистого ангидрида включала Россию и территорию Норвегии вблизи границы. Совершенно не обследованным на тот момент оказался район к северу и северо-востоку от Никеля.

В 2006 году по инициативе ГК «Печенганикель» была разработана «Программа мониторинговых исследований» [12], которая предусматривала сбор объективных данных о фактическом состоянии наземных экосистем в районе медно-никелевого производства. Созданная сеть стационаров охватывала значительную территорию Печенгского муниципального округа Мурманской области, в центре которой находились промышленные площадки «Никель» и «Заполярный». Мониторинговая сеть включала 5 стационаров по 9 км² общей площадью 45 км², 40 км учетных орнитологических маршрутов, 63 км ландшафтно-экологических трансект (рис. 2).

Наблюдательная сеть простиралась с юго-запада на северо-восток на 100 км от северной части заповедника «Пасвик» до поселка городского типа Печенга, что позволило собирать многолетние ряды данных на обширной территории, выявлять лимитирующие факторы, проводить зонирование. Результатом 20 лет наблюдений стал сбор данных по широкому кругу объектов и параметров: 1) определение степени загрязнения почвы, воды и воздуха от медно-никелевого производства; 2) изучение состояния видового биологического разнообразия по группам беспозвоночных и позвоночных животных; 3) выявление степени накопления загрязняющих веществ сосудистыми растениями, такими как береза пушистая (*Betula pubescens* Ehrh.), береза извилистая (*Betula tortuosa* Ledeb.), черника (*Vaccinium myrtillus* L.).

До декабря 2020 г., когда прекратил работу плавильный цех в Никеле, особый акцент в исследованиях делался на мониторинг загрязнения всех компонентов природной

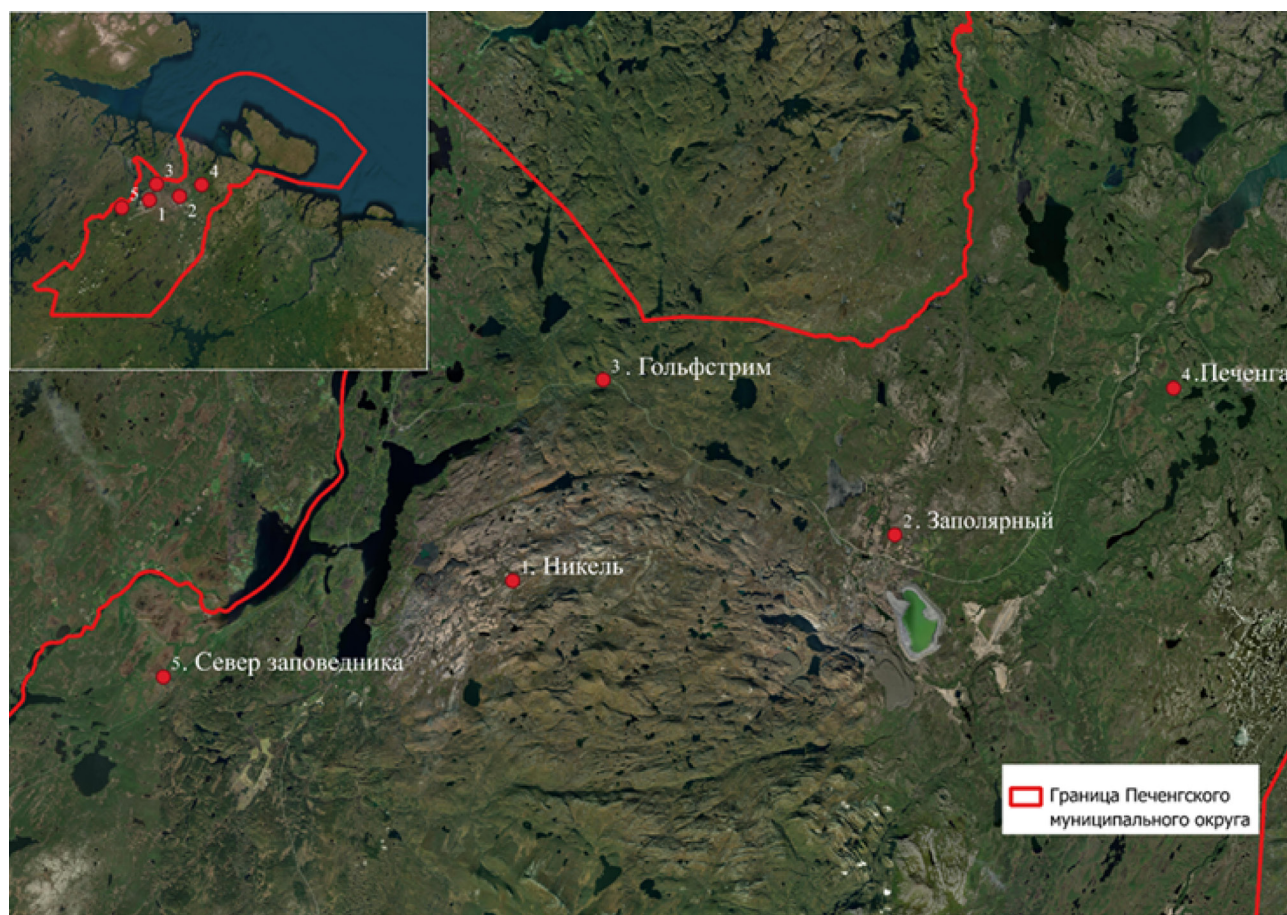


Рис. 2. Основу мониторинговой сети 2006–2025 гг. составили пять стационаров (составлено О.А. Хлебосоловой и Е.М. Сосна)

Fig. 2. Monitoring network operated during 2006–2025, which includes five permanent stations (prepared by O.A. Khlebosolova and E.M. Sosna)

среды — воздуха, поверхностных вод, почв, растительности и животного населения. После останова комбината в пгт Никель главное внимание стало обращаться на разработку методов и проведение мониторинга восстановления экосистем (2021–2025 гг.).

Для сравнения полученных данных с фоновыми значениями в ходе мониторинговых исследований были описаны аналогичные эталонные участки коренных экосистем за пределами области аэротехногенного воздействия. Они представлены лесотундровым березовым редколесьем и криволевым из березы пушистой (*Betula pubescens* Ehrh. / *Betula tortuosa* Ledeb.) с примесью сосны лапландской (*Pinus Sylvestris lapponica*), вереска (*Calluna vulgaris*), дерна шведского (*Chamaeperic lymenumsuecicum*) и можжевельника (*Juniperus commúnis*) на подбурях, маломощных подзолистых иллювиально-железистых и иллювиально-гумусовых почвах. Эти виды сменялись на вершинах гряд

лишайниково-кустарничковой и кустарничково-лишайниковой тундрой на горных тундровых примитивных почвах.

Результаты и их обсуждение

Анализ данных многолетних исследований убедительно доказал, что главной причиной появления техногенно-преобразованных ландшафтов (техногенных комплексов) стало аэротехногенное загрязнение территории выбросами медно-никелевого производства на протяжении более 80 лет работы комбината в сочетании с эпизодически возникающими пожарами. Максимальный негативный эффект имели «пиковые нагрузки» 70–80-х годов XX в., когда сюда доставлялась норильская руда, не подходящая по технологическим требованиям для переработки на местных предприятиях. Именно в этот период сформировались техногенно преобразованные ландшафты, площадь которых в последующие десятилетия

увеличивалась из-за поступления новых объемов аэротехногенных выбросов и переноса загрязненных частиц с эродированных поверхностей, лишенных растительного покрова. Полученные в ходе мониторинговых исследований 2006–2025 гг. данные о состоянии почв, накоплении загрязняющих веществ в растениях, состоянии популяций воробьинообразных птиц, паукообразных и насекомых (жесткокрылых и муравьев) позволили дать адекватные оценки пространственного распространения техногенно преобразованных ландшафтов [12]. Было доказано, что техногенно преобразованные ландшафты сосредоточены преимущественно между промышленными площадками «Никель» и «Заполярный», а их распространение носит очаговый и мозаичный характер. Было установлено наличие зон высокого (0–3 км), среднего (3–15 км) и слабого (15–30 км) загрязнения, а также градиент изменений в направлении восток — северо-восток от Никеля [12].

В 2021 г. после останова плавильного производства в Никеле дополнительно к основной была разработана и мониторинговая сеть, охватывающая 1100 га между промышленными площадками «Никель» и «За-

полярный» в центре очага трансформации коренных экосистем березовых редколесий и тундр (рис. 3). В 2023 г. была сделана картографическая съемка этого участка с применением БПЛА (DJI Phantom 4 Pro V2.0 и DJI Phantom 4 Advanced), всего было выполнено 8610 снимков. Для обработки полевых исследований было использовано ПО Agisoft Metashape, построены ортофотопланы и цифровые модели рельефа.

На мониторинговых площадках проводилось изучение химического загрязнения почв и растений, был выявлен видовой состав и проективное покрытие растительности с использованием ландшафтных описаний ключевых участков (15 площадок общей площадью 8000 м²), оформлением ландшафтно-экологических трансект, электронного гербария, проведением химических анализов почвенных образцов (по 22 показателям) на маршрутах общей протяженностью более 140 км.

Исследования позволили выявить пространственную прерывистость и высокую мозаичность участков с различной степенью трансформации, что обусловлено сочетанием лимитирующих факторов. К их числу

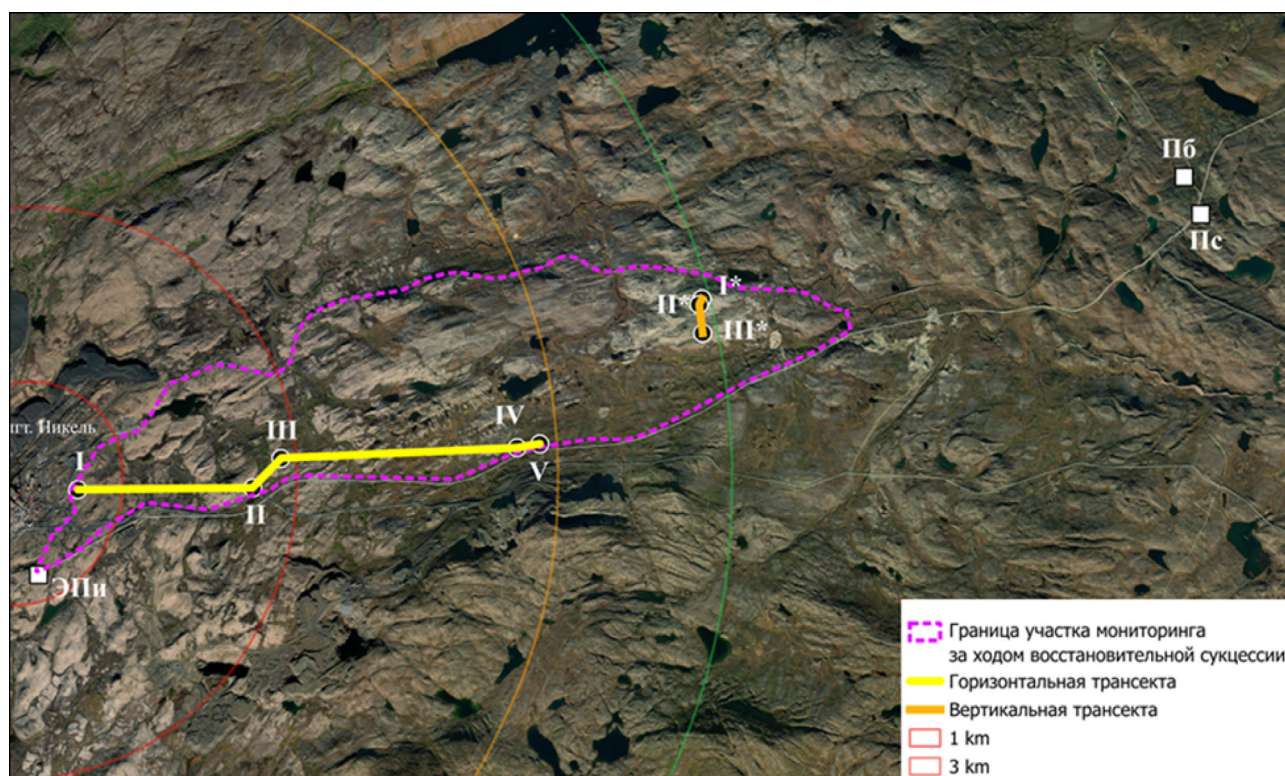


Рис. 3. Основные маршруты и площадки мониторинга 2021–2025 гг. (составлено О.А. Хлебосоловой и Е.М. Сосна)

Fig. 3. Main monitoring routes and sampling sites in 2021–2025 (prepared by O.A. Khlebosolova and E.M. Sosna)

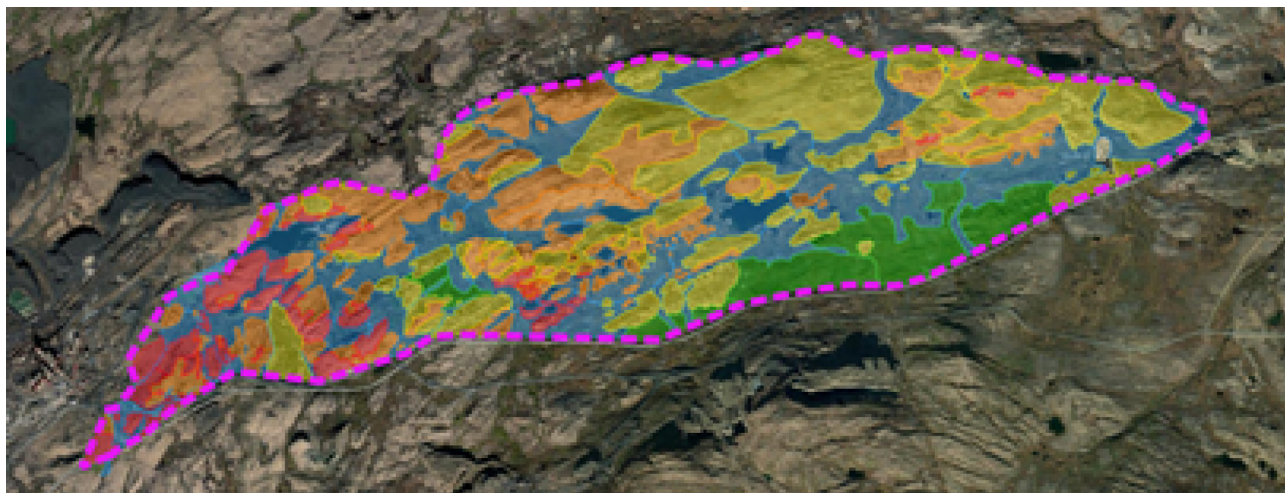


Рис. 4. Зонирование модельной территории по степени трансформации почвенно-растительного покрова. Степень трансформации показана цветом: красным — чрезвычайно высокая, оранжевым — высокая, желтым — средняя, бледно-зеленым — слабая, ярко-зеленым — незначительная, голубым — долинно-ручьевые, озерные, болотные комплексы (составлено О.А. Хлебосоловой и Е.М. Сосна)

Fig. 4. Classification of the study area by the degree of soil and vegetation disturbance. Disturbance intensity is shown by color: red — extremely high; orange — high; yellow — moderate; pale green — low; bright green — very low; blue — valley, stream, lake, and mire complexes (prepared by O.A. Khlebosolova and E.M. Sosna)

относятся: расстояние от источника аэротехногенных выбросов, особенности рельефа (высота, экспозиция, крутизна склонов), литология подстилающих пород, расположение участка относительно преобладающих ветров, близость к долинно-ручьевым, озерным, болотным комплексам, видовой состав коренных экосистем [28].

Анализ данных дистанционного зондирования района исследований позволил оценить примерные площади техногенно преобразованных ландшафтов с различной степенью трансформации почвенно-растительного покрова. Полученные данные свидетельствуют о том, что площадь зон с чрезвычайно высокой, высокой и средней степенью трансформации почвенно-растительного покрова составляет 2805 га. Эти зоны характеризуются значительным химическим загрязнением почв, повсеместным развитием плоскостного смыва, линейной эрозии, формированием почв с отсутствующими верхними горизонтами [28].

Результаты комплексных исследований и данных дистанционного зондирования позволили создать шкалу трансформации, оценить площади, выявить актуальные границы участков трансформации и нанести их на карту. Были выделены пять градаций степени трансформации: чрезвычайно высокая (проективное покрытие растительности не более 15 %, распространены «обезглав-

ленные» почвы), высокая (соответственно 16–25 %, почвы сильно эродированы), средняя (26–50 %, оголенные участки эродированы), слабая (51–85 %) и незначительная (86 % и более). Карта отражает высокую мозаичность участков с различной степенью трансформации и их связь с лимитирующими факторами (рис. 4).

Полученная карта была соотнесена с результатами картирования состояния лимитирующих факторов, в результате чего были уточнены границы и оценены площади участков с различной степенью трансформации (6 % — чрезвычайно высокая, 22 % — высокая, 29 % — средняя, 9 % — слабая и незначительная), долинно-ручьевых, приозерных и водных комплексов (33 %) и выходы скальных пород (15 %). В дальнейшем материалы по техногенно-преобразованным ландшафтам «Никель — Заполярный» были использованы для выбора участков заложения экспериментальных полигонов и апробации технологии восстановительных сукцессий.

В 2023 году нами были начаты работы по изучению скорости естественного развития биологических почвенных корок как начального этапа сукцессионного ряда восстановления экосистем [29]. Анализ состава биокорок в районе исследований показал, что они включают сообщества криптогамных организмов (печеночники, мхи,

лишайники, водоросли, грибы, различные микроорганизмы) и почвогрунты, следовательно, необходимо изучать единую систему «почвы — растения». Продолжение исследований в 2024–2025 гг. показало, что организмы в составе биокорки способны выдерживать сильное химическое загрязнение, а доминирующие в них печеночники имеют ряд биологических особенностей, обуславливающих их высокий антиоксидантный статус (по показателям содержания полифенолов, пролина, малонового диальдегида, хлорофилла и каротина). Отмечены факты гипераккумуляции биокорками селена, меди, цинка, марганца, железа, свинца, кадмия, преобладания в них хлорофилла *b*, установлены корреляционные зависимости между химическими элементами в биокорках [30, 31].

Следует отметить, что ввиду слабой изученности и медленного роста организмов в составе биокорки они не входили ранее в эксперименты по рекультивации нарушенных земель, однако благодаря высокой толерантности к химическому загрязнению и адаптации к жизни за полярным кругом они могут рассматриваться как важный элемент биологической рекультивации арктических территорий.

Полученные нами данные позволили сделать вывод о том, что в благоприятных условиях (при высоком увлажнении участка, незначительном уклоне поверхности и незначительной эрозии) скорость разрастания биокорки (от центра маточного участка к периферии) максимально составляет до 2 см в год. Следовательно, создание таких условий может быть использовано при разработке технологии восстановительных сукцессий. Проведенные исследования также показали, что биологические почвенные корки одновременно выполняют роль защитного экрана (экокожи) и препятствуют распылению загрязненных микрочастиц.

Одновременно с изучением роли биологических почвенных корок нами проводились работы по оценке состояния растительности на пробных площадях 1997–2003 гг. в ходе экспериментальных исследований Л.Г. Исаевой, Е.А. Беловой, Н.В. Лукиной (лаборатория наземных экосистем ИППС КНЦ РАН) [12]. На этих площадях были апробированы различные варианты ремедиации и восстановления растительности в зоне

сильного аэротехногенного загрязнения (включая дефолирующие леса). В нашу работу были также включены площадки рекультивации вблизи Никеля и Заполярного (3000 м²). Для оценки результативности рекультивации на 2023 г. были использованы БПЛА, с помощью которых были сделаны снимки и ортофотопланы 6 площадок датируемой искусственной рекультивации в зонах сильного и среднего аэротехногенного загрязнения, а также проведены полевые почвенно-геоботанические исследования. Было выявлено экологическое состояние более 22 тысяч экземпляров древесно-кустарниковых растений и последовательно описаны участки с применением основных технологий (подходов) — инвестиционного и экологического.

Результаты исследований показали эффективность инвестиционного подхода. Он предусматривает проведение комплекса работ по технической и биологической рекультивации, включая изъятие почвогрунта (на глубину до 30 см), выравнивание участка с последующим отсыпанием аналогичного объема чистого почвогрунта, высев травосмесей (с ежегодным обновлением), посадку деревьев (преимущественно ивы), внесение мелиорантов и удобрений (ежегодное, на протяжении 15 лет). Вместе с тем использование данной технологии требует больших капиталовложений с учетом общей площади техногенно преобразованных ландшафтов в этом районе. Использование доступных травосмесей ведет к биологическому загрязнению экосистем чужеродными видами. Проведенные учеты численности и состояния выживших растений на участках рекультивации свидетельствуют о том, что повторное применение апробированных ранее технологий в долгосрочной перспективе неэффективно.

Итогом проведенных исследований стало обоснование правил (приоритетов), соблюдение которых позволяет обосновать инновационную технологию восстановления техногенно преобразованных ландшафтов Никель — Заполярный.

Технология восстановительных сукцессий предусматривает управление процессом естественного восстановления посредством создания оптимальных гидрогеологических и почвенно-геоботанических условий развития сообществ криптогамных

организмов (биологических почвенных корок) и последующих стадий сукцессии вплоть до формирования стабильных сообществ. Экспериментальная апробация технологии предполагает создание экспериментальных полигонов в виде круга (для снижения краевого эффекта) по 500 м² каждый в зонах с высокой и средней степенью трансформации почвенно-растительного покрова.

Технология восстановительных сукцессий предусматривает проведение комплекса работ по технической и биологической рекультивации, включающих сохранение исходного субстрата (без изъятия и выравнивания), сохранение маточных участков (имеющихся на участке фрагментов почвенно-растительного покрова), отсыпку на эродированных поверхностях конструктозема модифицированного, создание системы удержания влаги, использование местных видов растений, антистрессовых препаратов и активаторов роста. Варианты использования растений в различных секторах экспериментального полигона предполагают: создание условий для развития биологических почвенных корок, включение в эксперимент видов, встречающихся на эталонных площадках, а также «ремонтных» и рудеральных, адаптированных к местным условиям.

По итогам анализа результатов мониторинга 2006–2025 г. нами было предложено несколько вариантов заложения экспериментальных полигонов. Проведение полевых исследований позволит выбрать наилучший вариант с учетом комплекса лимитирующих факторов, транспортной доступности и других особенностей.

Для практической реализации поставленных задач была составлена Программа работ на 2026 г. и на период до 2035 г., а также обоснованы перспективы расширения эксперимента за счет включения в него других видов нарушенных земель, встре-

чающихся в пределах Печенгского муниципального округа Мурманской области (промышленные площадки, водные объекты, участки вдоль дорог и других линейных объектов, селитебные территории).

Заключение

Экологические исследования состояния техногенно преобразованных ландшафтов, проведенные в Печенгском муниципальном районе Мурманской области, а также анализ апробированных здесь ранее технологий рекультивации нарушенных земель стали основой разработки инновационной технологии по искусственному ускорению сукцессионных процессов. Эксперимент по апробации технологии в районе Никель — Заполярный, инициированный АО «Кольская ГМК», направлен на изучение естественных механизмов закрепления эродированных поверхностей биологическими почвенными корками (экокожей). Криптогамные сообщества биологических почвенных корок способны развиваться в условиях сильного химического загрязнения и могут рассматриваться как начальный элемент сукцессионного ряда восстановления техногенно преобразованных ландшафтов. Экспериментальная апробация позволит выявить реальные возможности предлагаемой технологии по закреплению субстрата, прекращению переноса загрязняющих веществ, ускорению естественных процессов за счет создания комплекса необходимых гидрогеологических и почвенно-геоботанических условий. Перспективы применения инновационных технологий и тиражирование успешных практик позволят объединить усилия промышленных компаний, научно-исследовательских учреждений, университетов, особо охраняемых природных территорий, представителей власти и общественности для практического решения проблемы восстановления нарушенных земель за полярным кругом.

Литература

1. Додин Д.А. Устойчивое развитие Арктики (проблемы и перспективы). СПб.: Наука; 2005.
2. Жиров В.К., Голубева Е.И., Говорова А.Ф., Хаитбаев А.Х. Структурно-функциональные изменения растительности в условиях техногенного загрязнения на Крайнем Севере. Москва: Наука; 2007.

3. Ганичева С.Н., Лукина Н.В., Костина В.А., Никонов В.В. Техногенная дигрессия и восстановительная сукцессия в хвойных лесах Кольского полуострова. *Лесоведение*. 2004;(3):57–67.
4. Лукина Н.В., Сухарева Т.А., Исаева Л.Г. Техногенные дигрессии и восстановительные сукцессии в северотаежных лесах. Москва: Наука; 2005.
5. Баркан В.Ш. Загрязнение почвы никелем и медью от промышленного источника металлургических пылей. В: Проблемы разработки полезных ископаемых и стратегия устойчивого развития регионов России (на примере Воронежской области): материалы науч. конф. Воронеж; 2014, с. 95–105.
6. Лянгузова И.В., Баркан В.Ш. Сравнительный анализ уровня загрязнения органогенного горизонта Al-Fe-подзолов и болотных почв в локальной зоне воздействия медно-никелевого комбината. *Принципы экологии*. 2019;(4):57–68.
7. Василевская Н.В., Лукина Ю.М. Влияние техногенного загрязнения на динамику роста и мезоструктуру листьев *Betula czeretpanovii* Orlova (Мурманская область). *Ученые записки Петрозаводского государственного университета*. 2011;(8):14–18.
8. Глухова Е.В., Голубева Е.И., Зимин М.В. Рекультивация нарушенных экосистем Северных побережий. *Вопросы географии*. 2023;156:244–255.
9. Никонов В.В., Лукина Н.В., Исаева Л.Г., Горбачева Т.Т., Белова Е.А. Восстановление территорий, нарушенных воздушным загрязнением медно-никелевого производства на Кольском полуострове. В: *Инновационный потенциал Кольской науки*. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН; 2005, с. 288–293.
10. Коротков В.Н., Копчик Г.Н., Смирнова И.Е., Копчик С.В. Восстановление растительности на техногенных пустошах в окрестностях Мончегорска (Мурманская область, Россия). *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2019;4(1):1–18. <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2019-1-4>
11. Урбанавичюс Г.П., Боровичев Е.А., Ершов В.В. Криптогамные организмы — пионеры восстановления северотаежных лесов при снижении воздушного промышленного загрязнения. *Лесоведение*. 2021;(2):195–207. <https://doi.org/10.31857/So024114821020108>
12. Ананьева С.И., Белова Е.А., Булычев А.Г., Булычева И.А., Заколдаева А.А., Зацаринный И.В., и др. Кольская горно-металлургическая компания (промышленные площадки «Никель» и «Заполярный»): влияние на наземные экосистемы. Рязань: Голос губернии; 2012.
13. Гурина Н.Н. История культуры древнего населения Кольского полуострова. СПб.: Центр «Петербург. Востоковедение»; 1997.
14. Хлебосолова О.А., Голубева Е.И. Эволюция проблем природопользования в Печенгском районе Мурманской области. В: *Рациональное природопользование: традиции и инновации: Материалы III Междунар. конф. (Москва, МГУ, 20–22 окт. 2022 г.)*. Москва: Наука; 2022, с. 321–327.
15. Шумкин В.Я. Этапы освоения Северо-Запада Европейской Арктики. В: *Человек и Север: Антропология, археология, экология: Материалы Всерос. конф., г. Тюмень, 6–10 апр. 2015 г.* Тюмень: Изд-во ИПОС СО РАН; 2015, Вып. 3, с. 72–76.
16. Колпаков Е.М., Киселева А.М., Мурашкин А.И., Шумкин В.Я. Археология Кольского Севера: обзор на 2022 год. *Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Естественные и гуманитарные науки*. 2023;2(1):164–183. <https://doi.org/10.37614/2949-1185.2023.2.1.015>
17. Woodman P.C. The Komsa culture. A re-examination of its position in the Stone Age of Finnmark. *Acta Archaeologica*. 1993;63:57–76.
18. Sorensen M., Rankama T., Kankaanpää J., Knutsson K., Knutsson H., Melvold S., Eriksen B. V., Glorstad H. The First Eastern Migrations of People and Knowledge into Scandinavia: Evidence from Studies of Mesolithic Technology, 9th–8th Millennium BC. *Norwegian Archaeological Review*. 2013;46(1):19–56. <https://doi.org/10.1080/00293652.2013.770416>
19. Шумкин В.Я. Приложение 5. Археолого-этнографические объекты в районе заповедника «Пасвик». В: *Летопись природы заповедника «Пасвик»: Книга шестая, 1999 год*. Мурманск: Пазори; 2001, с. 106–107.
20. Шеффер И. Лапландия. Москва: У Никитских ворот; 2008.
21. Евзеров В.Я. Последствия климатических изменений четвертичного периода в Кольском регионе (на примере поздневалдайского оледенения и голоцена). *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2016;(2):5–18.

22. Григорьева С.О., Константинов А.В., Трещевская Э.И., Кузнецова М.Л., Школьник И.М. Палеоклиматическая реконструкция ареалов древесных пород территории Северо-Запада России. Воронеж: ВГЛТУ; 2018.
23. Khlebosolova O., Sosna E. Prospects for restoring ecosystems in the Pasvik River basin reconstruction of climate change, biodiversity, history of nature management and conservation practices. *Mongolian Journal of Geography and Geoecology*. 2025;62(46):222–226. <https://doi.org/10.5564/mjgg.v62i46.4154>
24. Norton S.A., Rognerud S., Dauvalter V., Rognerud S. Heavy metal pollution in lake sediments in the border areas between Russia and Norway. Rapport 522/93. Norsk institutt for vannforskning; 1993. Available at: <https://nva.sikt.no/registration/019937dca03b-80038f7a-087e-4147-999d-88f22f970a6b>
25. Hagen L.O., Sivertsen B., Aarnes M.J. Overvaking av luft- og nedborkvalitet i grenseomradene i Norge og Russland. Oktober 1992-mars 1993. Rapport nr.: 543/93. Norsk institutt for luftforskning; 1993. Available at: <https://nva.sikt.no/registration/019938c37513-910ab340-cd81-4cca-b4e6-f11deb91d866>
26. Stebel K., Christinsen G., Derome J., Grekelä I. (eds). State of the Environment in the Norwegian, Finnish and Russian Border Area. The Finnish Environment. 2007;(6). Available at: <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/bcbdc35-fa6a-43a6-a98e-f548480283ea/content>
27. Хлебосолова О.А., Сосна Е.М. Перспективы создания охраняемой техногенно нарушенной территории «Никель-Заполярный». Астраханский вестник экологического образования. 2024;(4):28–36. <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2024-4-28-36>
28. Хлебосолова О.А., Сосна Е.М., Быстров А.А. Сбор фенологических и других данных по восстановительным сукцессиям на техногенных пустошах (Никель, Мурманская область). В: Охрана природы и гражданская наука: Материалы III Всерос. науч.-практ. конф. (9–12 сент. 2025 г., Никель, Мурманская область, ФГБУ «Государственный природный заповедник Пасвик»). Москва: Т-во научных изданий КМК; 2025, с. 103–108.
29. Golubkina N., Plotnikova U., Koshevarov A., Sosna E., Khlebosolova O., Polikarpova N., Murariu O.C., Tallarita A.V., Caruso G. Nickel, Cu, Fe, Zn, and Se Accumulation, and the Antioxidant Status of Mushrooms Grown in the Arctic Under Ni/Cu Pollution and in Unpolluted Areas. *Stresses*. 2025;5(2):25. <https://doi.org/10.3390/stresses5020025>
30. Golubkina N., Plotnikova U., Koshevarov A., Sosna E., Lapchenko V., Antoshkina M., et al. Bioavailable Forms of Heavy Metals and Se in Soil in the Vicinity of the Pechenganikel Smelting Plant and the Relationship with Mineral Composition and Antioxidant Status of Biocrusts. *Standards*. 2025;5(4):28. <https://doi.org/10.3390/standards5040028>

References

1. Dodin D.A. Sustainable development of the Arctic (problems and prospects). St. Petersburg: Nauka Publ.; 2005. (In Russ.).
2. Zhiron V.K., Golubeva E.I., Govorova A.F., Khaitbaev A.Kh. Structural and functional changes in vegetation under conditions of technogenic pollution in the Far North. Moscow: Nauka Publ.; 2007. (In Russ.).
3. Ganicheva S.N., Lukina N.V., Kostina V.A., Nikonov V.V. Technogenic digression and restoration succession in coniferous forests of the Kola Peninsula. *Forest Science*. 2004;(3):57–67. (In Russ.).
4. Lukina N.V., Sukhareva T.A., Isaeva L.G. Technogenic digressions and restoration successions in northern taiga forests. Moscow: Nauka Publ.; 2005. (In Russ.).
5. Barkan V.Sh. Soil pollution with nickel and copper from an industrial source of metallurgical dust. In: Проблемы разработки полезных ископаемых и стратегия устойчивого развития регионов России (на примере Воронежской области): материалы науч. конф. Voronezh; 2014, pp. 95–105. (In Russ.).
6. Lyanguzova I.V., Barkan V.Sh. Comparative Analysis of the Pollution Level of the Organogenic Horizon of Al-Fe Podzols and Marsh Soils in the Local Impact Zone of a Copper-Nickel Plant. *Principles of Ecology*. 2019;(4):57–68. (In Russ.).
7. Vasilevskaya N.V., Lukina Yu.M. The Impact of Technogenic Pollution on the Growth Dynamics and Mesostructure of *Betula czerepanovii* Orlova Leaves (Murmansk Region). *Proceedings of Petrozavodsk State University*. 2011;(8):14–18. (In Russ.).

8. Glukhova E.V., Golubeva E.I., Zimin M.V. Reclamation of Disturbed Ecosystems of the Northern Coasts. *Problems of geography*. 2023;156:244–255. (In Russ.).
9. Nikonov V.V., Lukina N.V., Isaeva L.G., Gorbacheva T.T., Belova E.A. Restoration of areas damaged by air pollution from copper-nickel production on the Kola Peninsula. In: *Innovative potential of Kola science*. Apatity: Publishing house of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences; 2005, pp. 288–293. (In Russ.).
10. Korotkov V.N., Koptsik G.N., Smirnova I.E., Koptsik S.V. Restoration of vegetation on mine lands near Monchegorsk (Murmansk region, Russia). *Russian Journal of Ecosystem Ecology*. 2019;4(1):1–18. <https://doi.org/10.21685/2500-0578-2019-1-4>
11. Urbanavichus G.P., Borovichev E.A., Ershov V.V. Cryptogamic organisms as pioneers of the northern taiga recovery affected under the conditions of lowered industrial air pollution. *Forest Science*. 2021;(2):195–207. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0024114821020108>
12. Anan'eva S.I., Belova E.A., Bulychev A.G., Bulycheva I.A., Zakoldaeva A.A., Zatsarinnyi I.V., et al. Kola Mining and Metallurgical Company (Nikel and Zapolyarny industrial sites): impact on terrestrial ecosystems. Ryazan: Golos gubernii Publ.; 2012. (In Russ.).
13. Gurina N.N. History of the culture of the ancient population of the Kola Peninsula. St. Petersburg: Center "Peterburg. Vostokovedenie"; 1997. (In Russ.).
14. Khlebosolova O. A., Golubeva E. I. Evolution of nature management problems in the Pechenga district of the Murmansk region. In: *Rational nature management: traditions and innovations: Proceedings of the III International Conference (Moscow, Moscow State University, October 20–22, 2022)*. Moscow: Nauka Publ.; 2022, pp. 321–327. (In Russ.).
15. Shumkin V.Ya. Stages of Development of the Northwest European Arctic. In: *Man and the North: Anthropology, Archaeology, Ecology: Proceedings of the All-Russian Conference, Tyumen, April 6–10, 2015*. Tyumen: Publishing House of the Institute of Social and Political Sciences of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2015, Iss. 3, pp. 72–76. (In Russ.).
16. Kolpakov E.M., Kiseleva A.M., Murashkin A.I., Shumkin V.Ya. Kola North archaeology: an overview for 2022. *Transactions of the Kola Science Centre. Series: Natural Sciences and Humanities*. 2023; 2(1):164–183. (In Russ.). <https://doi.org/10.37614/2949-1185.2023.2.1.015>
17. Woodman P.C. The Komsa culture. A re-examination of its position in the Stone Age of Finnmark. *Acta Archaeologica*. 1993;63:57–76.
18. Sorensen M., Rankama T., Kankaanpaa J., Knutsson K., Knutsson H., Melvold S., Eriksen B.V., Glorstad H. The First Eastern Migrations of People and Knowledge into Scandinavia: Evidence from Studies of Mesolithic Technology, 9th–8th Millennium BC. *Norwegian Archaeological Review*. 2013;46(1):19–56. <https://doi.org/10.1080/00293652.2013.770416>
19. Shumkin V.Ya. Appendix 5. Archaeological and Ethnographic Objects in the Area of the Pasvik Nature Reserve. In: *Chronicle of the Nature of the Pasvik Nature Reserve: Book Six*, 1999. Murmansk: Pazori Publ.; 2001, pp. 106–107. (In Russ.).
20. Scnefferi J. *Lappland*. Franckfurt am Mayn und Leipzig; 1675.
21. Evzerov V.Ya. Consequences of Quaternary Climate Change in the Kola Region (using the Late Valdai Glaciation and the Holocene as an Example). *Herald of the Kola Science Centre of RAS*. 2016;(2):5–18. (In Russ.).
22. Grigor'eva S.O., Konstantinov A.V., Treshchevskaya E.I., Kuznetsova M.L., Shkol'nik I.M. Paleoclimatic reconstruction of tree species ranges in Northwest Russia. Voronezh: VGTU; 2018. (In Russ.).
23. Khlebosolova O., Sosna E. Prospects for restoring ecosystems in the Pasvik River basin reconstruction of climate change, biodiversity, history of nature management and conservation practices. *Mongolian Journal of Geography and Geoecology*. 2025;62(46):222–226. <https://doi.org/10.5564/mjgg.v62i46.4154>
24. Norton S.A., Rognerud S., Dauvalter V., Rognerud S. Heavy metal pollution in lake sediments in the border areas between Russia and Norway. Rapport 522/93. Norsk institutt for vannforskning; 1993. Available at: <https://nva.sikt.no/registration/019937dca03b-80038f7a-087e-4147-999d-88f22f970a6b>
25. Hagen L.O., Sivertsen B., Aarnes M.J. Overvaking av luft- og nedborkvalitet i grenseomradene i Norge og Russland. Oktober 1992–mars 1993. Rapport nr.: 543/93. Norsk institutt for luftforskning; 1993. Available at: <https://nva.sikt.no/registration/019938c37513-910ab340-cd81-4eea-b4e6-f11deb91d866>

26. Stebel K., Christinsen G., Derome J., Grekelä I. (eds.). State of the Environment in the Norwegian, Finnish and Russian Border Area. The Finnish Environment. 2007;(6). Available at: <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/bcbdca35-fa6a-43a6-a98e-f548480283ea/content>.
27. Khlebosolova O.A., Sosna E.M. Prospects for the Creation of the Protected Technogenically Disturbed Area “Nikel-Zapolyarny”. Astrakhan Bulletin for Environmental Education. 2024;(4):28–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2024-4-28-36>
28. Khlebosolova O.A., Sosna E.M., Bystrov A.A. Collection of Phenological and Other Data on Restorative Successions on Technogenic Wastelands (Nikel, Murmansk Region). In: Nature Conservation and Civil Science: Proceedings of the III All-Russian Scientific and Practical Conference (September 9-12, 2025, Nickel, Murmansk Region, Pasvik State Nature Reserve). Moscow: KMK Scientific Publications Association; 2025, pp. 103–108. (In Russ.).
29. Golubkina N., Plotnikova U., Koshevarov A., Sosna E., Khlebosolova O., Polikarpova N., Murariu O.C., Tallarita A.V., Caruso G. Nickel, Cu, Fe, Zn, and Se Accumulation, and the Antioxidant Status of Mushrooms Grown in the Arctic Under Ni/Cu Pollution and in Unpolluted Areas. Stresses. 2025;5(2):25. <https://doi.org/10.3390/stresses5020025>
30. Golubkina N., Plotnikova U., Koshevarov A., Sosna E., Lapchenko V., Antoshkina M., et al. Bioavailable Forms of Heavy Metals and Se in Soil in the Vicinity of the Pechenganikel Smelting Plant and the Relationship with Mineral Composition and Antioxidant Status of Biocrusts. Standards. 2025;5(4):28. <https://doi.org/10.3390/standards5040028>

Сведения об авторе

Хлебосолова Ольга Анатольевна — доктор педагогических наук, доцент, профессор кафедры экологии и природопользования ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ). Россия, 117437, Москва, ул. Ак. Арцимовича, 8, кв. 120. Web of Science ID: V-7457-2019
РИНЦ ID: 151954
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7531-1543>
SPIN-код: 9941-1560
Тел.: +7 (926) 564-38-11
E-mail: hlebosolovaoa@mgri.ru

Author information

Olga A. Khlebosolova — Dr. Sci. (Pedagogy), Associate Professor, Professor, Department of Ecology and Natural Resource Management, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI). Russia, 117437, Moscow, Ak. Artsimovich str., 8, Apt. 120. Web of Science ID: V-7457-2019
RSCI ID: 151954
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7531-1543>
SPIN-code: 9941-1560
Tel.: +7 (926) 564-38-11
E-mail: hlebosolovaoa@mgri.ru

Вклад автора

Автор подтверждает единоличную ответственность за концепцию и дизайн исследования, сбор и анализ данных, интерпретацию результатов, а также подготовку рукописи.

Author contribution statement

The author confirms sole responsibility for conceptualization, methodology, investigation, data curation, formal analysis, visualization, interpretation, and manuscript preparation.

Благодарности

Автор благодарит за поддержку научных исследований и высказанные ценные замечания специалистов АО «Кольская горно-металлургическая компания» и лично Курбатова Евгения Александровича, директора Департамента экологической безопасности Кольской площадки.

Acknowledgments

The author expresses sincere gratitude to the specialists of the Kola Mining and Metallurgical Company (Kola Site, Nornickel Group) for their support and valuable comments, with special thanks to Evgeny Aleksandrovich Kurbatov, Director of the Environmental Safety Department of the Kola Division.

Автор хотел бы отметить особую роль ФГБУ ГПЗ «Пасвик» в организации и проведении многолетних мониторинговых исследований и лично директора заповедника к.г.н. Поликарповой Натальи Владимировны, начальника научного отдела Шавриной Ульяны Юрьевны, сотрудника научного отдела Дороша Ивана Дмитриевича.

Автор выражает искреннюю признательность многочисленным коллегам за их доброжелательное и деятельное участие в проведении исследований и высказанные замечания, в т. ч. Голубкиной Надежде Александровне, д.с.-х.н., главному научному сотруднику лабораторно-аналитического отдела ФГБНУ «Федеральный научный центр овощеводства» (Московская область); сотрудникам лаборатории эволюционной экологии ФГБУ «Рязанский государственный университет им. С.А. Есенина» и лично руководителю лаборатории к.б.н. Зацаринному Ивану Викторовичу, к.б.н. Трушицыной Ольге Сергеевне и всем студентам университета, принимавшим участие в экспедициях; преподавателям и студентам кафедры картографии и геоинформатики географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и лично доценту кафедры к.г.н. Наталье Анатольевне Алексеенко; сотрудникам Кольской археологической экспедиции ИИМК РАН и лично ведущему научному сотруднику отдела палеолита, д.и.н. Евгению Михайловичу Колпакову; сотрудникам ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева»: руководителю ИЛЦ Хаматнурову Шамилю Айдаровичу, старшему научному сотруднику к.г.-м.н. Быстрову Ивану Георгиевичу.

Большая благодарность экспертам, которые помогли автору в изучении проблемы и поиске возможных вариантов ее решения с учетом конкретной территории: профессору кафедры рационального природопользования ФГБУ «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» д.б.н. Голубевой Елене Ильиничне; руководителю аппарата комитета по экологии, природным ресурсам и охране окружающей среды Госдумы РФ к.п.н. Пановой Елене Васильевне; ведущему научному сотруднику ФГБУН «Институт почвоведения и агрохимии СО РАН России» (Новосибирск) д.б.н. Манакову Юрию Александровичу.

Автор благодарен всем студентам экологического факультета ФГБУ «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» за неоценимую помощь в проведении экспедиций, обработке материалов, подготовке отчетов и лично аспирантам кафедры экологии и природопользования Евгении Михайловне Сосна и Антону Станиславовичу Пискунову, студентам Ульяне Дмитриевне Плотниковой, Алексею Андреевичу Быстрову и Анастасии Сергеевне Быстровой.

The author acknowledges the essential role of the Pasvik Nature Reserve in organizing and conducting long-term monitoring and thanks its Director, Dr. Natalia Vladimirovna Polikarpova; Head of the Scientific Department, Ulyana Yuryevna Shavrina; and Research Associate Ivan Dmitrievich Dorosh.

The author is grateful to numerous colleagues for their valuable discussions and comments, including Nadezhda Aleksandrovna Golubkina, Dr. Sci. (Agriculture), Chief Researcher of the Laboratory-Analytical Department, Federal Scientific Vegetable Center (Moscow Region); the staff of the Laboratory of Evolutionary Ecology, Ryazan State University named after S.A. Yesenin, in particular, the Head of the Laboratory, Ivan Viktorovich Zatsarinniy, Cand. Sci. (Biology), Olga Sergeevna Trushitsyna, Cand. Sci. (Biology), and all students who participated in field expeditions; the faculty and students of the Department of Cartography and Geoinformatics, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, especially Associate Professor Natalia Anatolyevna Alekseenko, Cand. Sci. (Geography); the staff of the Kola Archaeological Expedition, Institute for the History of Material Culture, Russian Academy of Sciences, especially Dr. Evgeny Mikhailovich Kolpakov, Leading Researcher of the Paleolithic Department; and the staff of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, including Shamil Aidarovich Khamatnurov, Head of the Testing Laboratory Center, and Ivan Georgievich Bystrov, Senior Researcher, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy).

Special thanks are extended to experts who assisted in analyzing the issue and identifying region-specific solutions: Dr. Elena Ilinichna Golubeva, Professor, Department of Rational Environmental Management, Lomonosov Moscow State University; Elena Vasilievna Panova, Cand. Sci. (Political Science), Chief of Staff of the Committee on Ecology, Natural Resources, and Environmental Protection of the State Duma of the Russian Federation; and Dr. Yuri Aleksandrovich Manakov, Leading Researcher, Institute of Soil Science and Agrochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk).

The author also thanks all students of the Faculty of Ecology, MGRI, for their invaluable assistance in fieldwork, data processing, and report preparation, in particular, graduate students Evgeniya Mikhailovna Sosna and Anton Stanislavovich Piskunov, and students Ulyana Dmitrievna Plotnikova, Alexey Andreevich Bystrov, and Anastasia Sergeevna Bystrova.

УДК 502.51/52:546.26 (985)

ББК 26.23 (231)

<https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-69-89>



Содержание и запасы углерода в компонентах наземных и водных экосистем Мурманской области в зоне воздействия АО «Кольская ГМК»

Сухарева Т.А.¹✉, Денисов Д.Б.¹, Живов Д.А.¹,
Слуковский З.И.¹, Курбатов Е.А.², Фадеев А.М.²,
Бортник А.С.²

¹Институт проблем промышленной экологии Севера ФГБУН ФИЦ
«Кольский научный центр» РАН, Апатиты, Мурманская область,
Россия

²АО «Кольская горно-металлургическая компания», Мончегорск,
Мурманская область, Россия

✉ t.sukhareva@ksc.ru

Аннотация. В Мурманской области учеными Института проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН (ИППЭС КНЦ РАН) совместно с АО «Кольская ГМК» впервые начаты комплексные исследования наземных и водных экосистем с целью оценки их способности к депонированию углерода в зоне расположения металлургического производства (площадка Мончегорск). В 2024–2025 гг. в ходе экспедиционных исследований получены новые данные по составу почвы, воды и донных отложений на фоновых и нарушенных территориях. Анализ собранного полевого научного материала с привлечением данных многолетних мониторинговых наблюдений показал, что в настоящее время существует недооценка углерододепонирующей способности экосистем Севера, в том числе в условиях промышленного воздействия. Получены объективные оценки по депонированию углерода различными компонентами экосистемам (лесных, водных, болотных). Результаты работы будут способствовать совершенствованию национальной системы мониторинга климатически активных веществ и планированию компенсационных мероприятий, направленных на сокращение содержания парниковых газов в атмосфере. Дальнейшие исследования позволят оценить потенциал северных экосистем по депонированию углерода, разработать научно-методические рекомендации по адаптации экосистем к климатическим изменениям и достижению углеродной нейтральности в регионе, в том числе при реализации природно-климатических проектов.

Ключевые слова: углерод, почва, торф, озера, донные отложения, техногенное воздействие, Российская Арктика

Конфликт интересов: авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Сухарева Т.А., Денисов Д.Б., Живов Д.А., Слуковский З.И., Курбатов Е.А., Фадеев А.М., Бортник Е.А. Содержание и запасы углерода в компонентах наземных и водных экосистем Мурманской области в зоне воздействия АО «Кольская ГМК». *Арктика и инновации*. 2026;4(2):69–89. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-69-89>

Carbon content and carbon stocks in terrestrial and aquatic ecosystem components of Murmansk Region, Russia, in the impact zone of JSC “Kola MMC”

Tatyana A. Sukhareva[✉], Dmitrii B. Denisov¹,
Dmitry A. Zhivov¹, Zakhar I. Slukovskii¹,
Evgeny A. Kurbatov², Anton M. Fadeev²,
Anzhelika S. Bortnik²

¹ Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Kola Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Apatity, Murmansk region, Russia

² JSC “Kola Mining and Metallurgical Company”, Monchegorsk, Murmansk region, Russia

✉ t.sukhareva@ksc.ru

Abstract. In Murmansk Region, Russia, researchers from the Institute of North Industrial Ecology Problems of the Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences (INEP KSC RAS), together with JSC “Kola MMC”, conducted the first integrated assessment of terrestrial and aquatic ecosystems to evaluate their carbon sequestration capacity in the vicinity of metallurgical operations at the Monchegorsk site. During field campaigns in 2024–2025, new data were obtained on the composition of soils, waters, and bottom sediments in background areas and in areas affected by industrial activity. Analysis of these field data, combined with long-term monitoring records, indicates that the carbon sequestration potential of northern ecosystems, including those exposed to industrial emissions, has been systematically underestimated. Actual estimates were generated for carbon storage across major ecosystem components, including forest, freshwater, and peatland systems. The results will support improvements to the national monitoring system for climate-active substances and inform the planning of compensatory measures aimed at reducing atmospheric greenhouse gas concentrations. Continued research will enable more accurate assessments of the carbon sequestration potential of northern ecosystems and provide scientific and methodological guidance for ecosystem adaptation to climate change and for achieving regional carbon neutrality, including through nature-based climate projects.

Keywords: carbon, soil, peat, lakes, bottom sediments, anthropogenic impact, Russian Arctic

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Sukhareva T.A., Denisov D.B., Zhivov D.A., Slukovskii Z.I., Kurbatov E.A., Fadeev A.M., Bortnik E.A. Carbon content and carbon stocks in terrestrial and aquatic ecosystem components of Murmansk Region, Russia, in the impact zone of JSC “Kola MMC”. *Arctic and Innovation*. 2026;4(2): 69–89. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-69-89>

Введение

Мурманская область — один из наиболее промышленно развитых регионов Арктики, на территории которого функционируют крупные предприятия горнопромышленного и металлургического комплексов. Наземные и водные экосистемы Мурманской области испытывают экстремальное

воздействие природных и антропогенных факторов, сложное сочетание которых определяет особенности биогеохимических циклов и деструкции органического вещества.

Значительный вклад в поглощение углерода вносят леса [1]. Треть углеродного стока наземных экосистем приходится на леса

бореальной зоны [2]. Около 2/3 всех мировых бореальных лесов находятся на территории России, что свидетельствует о глобальном значении лесов страны в контексте депонирования атмосферного углерода. По современным оценкам [3], Российская Федерация является крупнейшей страной-поглотителем углерода. Количественные оценки вклада лесных экосистем страны в углеродный баланс и, следовательно, в регуляцию климата планеты являются важным и актуальным вопросом, что подтверждается международным Парижским соглашением [4].

Большая часть углерода в лесах мира содержится в фитомассе и почвах [1]. По некоторым оценкам, доля почвенного углерода в бореальных лесах может быть весьма значительной и составлять 40 % и более от общих запасов углерода в лесных экосистемах [5]. Бореальные леса содержат около 15 % мировых запасов почвенного углерода и вносят весомый вклад в глобальный цикл углерода [6–9], являясь значительным резервуаром органического вещества. Потепление климата может привести к интенсификации процессов разложения органических остатков в лесах и к увеличению поступления CO_2 из почвы в атмосферу. В последние годы исследования по оценке пулов и потоков углерода в наземных экосистемах, в том числе в почвах, активизировались в разных странах и регионах [10–16]. Однако анализ литературных данных свидетельствует о недостатке актуальных сведений о пространственном распределении почвенных пулов углерода в бореальных лесах, в том числе в Мурманской области.

Аналогичный интерес вызывают пресноводные и болотные экосистемы, которые также выступают как резервуары накопления органического углерода, запасы которого в зависимости от географического положения варьируют в широких пределах [17–21]. Органический углерод выступает одним из индикативных показателей, отражающих скорость продукции и деструкции, климатические и техногенные воздействия, качество вод и эффективность процессов самоочищения водоемов. Содержание органического углерода в незагрязненных поверхностных водах, как правило, находится в диапазоне от 1 до 10 мг/дм³, в загрязненных — превышает 10 мг/дм³, а в сильно загрязненных — превышает 100 мг/дм³ [22]; для питьевой воды установлено нормативное значение

содержания общего органического углерода, равное 5 мг/дм³ [23]. К настоящему времени практически отсутствует информация о содержании и запасах углерода водными и болотными экосистемами Мурманской области.

Пресноводные и болотные экосистемы являются важными элементами ландшафтной структуры Арктики, обеспечивая транспорт, трансформацию и депонирование углерода. Однако степень их участия в региональном и глобальном углеродном балансе в зоне воздействия металлургической промышленности остается недостаточно изученной, особенно для территории Мурманской области, где наблюдается дефицит комплексных полевых и долговременных наблюдений.

Актуальность исследований различных экосистем обусловлена усиливающимися процессами климатического потепления: повышение температуры воздуха наряду с изменениями гидрологического режима приводят к активизации разложения органического вещества и высвобождению углерода в атмосферу. Это может усиливать парниковый эффект и формировать положительную обратную связь в системе «климат — экосистемы».

Научно-исследовательская работа направлена на решение экологической проблемы оценки способности наземных и водных экосистем Мурманской области к депонированию углерода. Значимость результатов работы обусловлена необходимостью получения объективных данных о запасах углерода в экосистемах, совершенствования методологии их оценки и устойчивого управления экосистемами Арктики, в том числе в зоне расположения промышленных предприятий. Полученная информация является частью общих объективных данных о пулах углерода в экосистемах России и позволяет разрабатывать научную основу и методические рекомендации по мониторингу углерода и парниковых газов, а также по адаптации экосистем к климатическим изменениям и достижению углеродной нейтральности в регионе.

Цель данного исследования — оценка содержания и запасов углерода в почве, воде и озерных донных отложениях в экосистемах Мурманской области в зоне расположения АО «Кольская ГМК» (площадка Мончегорск).

Объекты и методы исследования

Проведение исследований по содержанию и запасам углерода в наземных и водных экосистемах требует применения единых методических подходов для получения корректных сравнительных данных в различных регионах и природно-климатических зонах. Методической основой данной работы являются рекомендации, разработанные в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИП ГЗ) в 2022–2024 гг. «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах».

При проведении работ руководствовались следующими методиками.

1. Методические рекомендации по проведению исследований на пробных площадях сети интенсивного уровня мониторинга для оценки запасов углерода в лесных экосистемах: геоботанические исследования, отбор почвенных образцов, отбор растительных образцов [24].

2. Методические рекомендации по проведению исследований на пробных площадях сети интенсивного уровня мониторинга для оценки запасов углерода в болотных экосистемах: геоботанические исследования, отбор почвенных образцов, отбор растительных образцов [25].

3. Методические рекомендации по проведению химического анализа природных вод [26].

4. Методические рекомендации по пробоподготовке и проведению физико-химического анализа почвенных и растительных образцов [27].

Наземные экосистемы. Полевые исследования были проведены в 2024–2025 гг. в конце вегетации (август–сентябрь). Объектами исследования послужили доминирующие в бореальной зоне хвойные леса на ненарушенных (фоновых) территориях и на пробной площадке (ПП) № 46-24 в зоне расположения АО «Кольская ГМК» (площадка Мончегорск) (рис. 1, табл. 1). Фоновая ПП отражает региональный фон района исследований и соответствует всем критериям для контрольных площадок, которые рекомендуются международной программой ICP Forests [29].

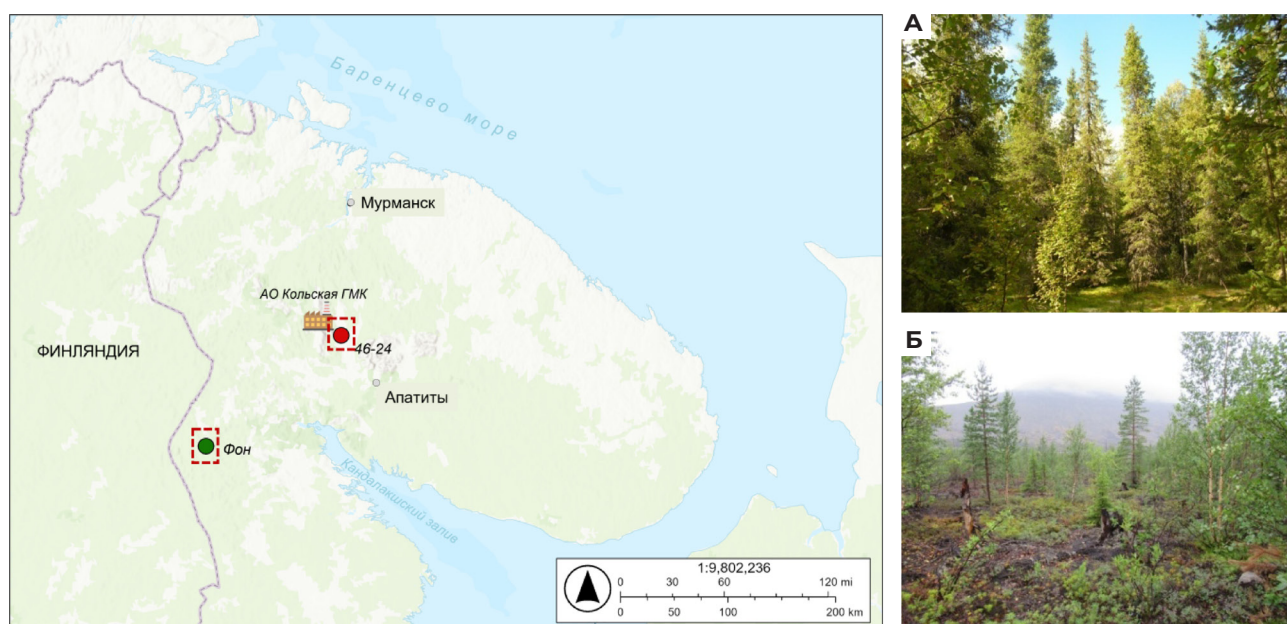


Рис. 1. Карта-схема расположения пробных площадей наземных экосистем в зоне расположения АО «Кольская ГМК» (площадка Мончегорск) и на фоновых территориях. Примечание: А — фон, Б — техногенное редколесье (пробная площадка № 46-24)

Fig. 1. Sampling plots of the terrestrial ecosystem in the impact zone of JSC Kola MMC (Monchegorsk site) and in background areas. Note: A — background area, B — open woodland affected by industrial activity (plot No. 46-24)

Таблица 1. Объекты исследования наземных экосистем

Table 1. Sampling sites of terrestrial ecosystems

Объект исследования The object of research	Размер, га Size, ha	Расстояние (км), направление от АО «Кольская ГМК» Distance (km), direction from JSC «Kola MMC»	Растительное сообщество The plant community
Фон	0,25	167, ЮЗ	Ельник кустарничково-зеленомошный
Техногенное редколесье (ПП № 46-24)	0,25	3, ЮВ	Редкостойный сосняк с березами кустарничковый моховой на месте сосново-березово-елового леса

Почвенные исследования на пробной площади № 46-24 выполнены в рамках выполнения Договора АО «Кольская ГМК»; на фоновой ПП — в рамках выполнения темы Госзадания ИППЭС КНЦ РАН и Проекта ВИП ГЗ.

В ходе полевых исследований для определения запаса подстилки отбирали почвенный монолит рамкой 25×25 см на глубину органогенного горизонта (подстилки), закладывали почвенный разрез, измеряли мощность органогенных и минеральных горизонтов (рис. 2).

На каждой ПП закладывали три полнопрофильных разреза (до горизонта С) в межкрупных пространствах и три почвенные прикопки (до горизонта В) — под кронами деревьев. Для измерения плотности, доли мелкозема, содержания и запасов органического углерода (Сорг.) в минеральных гори-

зонтах, пробы отбирали почвенным буром (гор. Е, ВНФ, С). В лабораторных условиях почвенный монолит разбирали, отделяли надземную и подземную фитомассу. Пробы почвы высушивали при комнатной температуре, взвешивали и просеивали. Рассчитывали абсолютно сухую массу органогенных и минеральных горизонтов. Аналитической обработке подвергали мелкозем (фракция <2,0 мм). Актуальную кислотность (рН) измеряли потенциометрически в водной вытяжке согласно ГОСТ 26423-85 [30], используя соотношение почва: раствор для органогенных горизонтов как 1:25, минеральных горизонтов — 1:2,5. Содержание углерода в почве и растениях определяли на элементном анализаторе CHNS EMA 502 (VELP, Италия). Для определения запасов Сорг. использовали собственные аналитические данные по мощности, плотности почвенных горизонтов и содержанию в них углерода. Расчет



Рис 2. Почвенный разрез (А) и почвенный монолит (Б), полевые исследования на пробной площади в зоне расположения АО «Кольская ГМК»

Fig. 2. Soil profile (A) and soil monolith (B) collected at a sampling plot in the impact zone of JSC «Kola MMC»

запаса углерода в органическом почвенном горизонте (O) проводили путем умножения абсолютно сухой массы почвы на содержание углерода, в минеральных горизонтах (E, BHF, C) — путем умножения мощности соответствующего горизонта на плотность, долю мелкозема и содержание в нем углерода. Оценка вариабельности содержания и запасов углерода в почве проводилась с применением программного обеспечения MS Excel через оценку средних значений и стан-

дартной ошибки методами описательной статистики. Для сравнения содержания и запасам углерода в почве ненарушенных (фоновых) экосистем и техногенных редколесий использовали *U*-критерий Манна—Уитни.

Водные экосистемы. Исследования водных и болотных экосистем были проведены в безледный период 2024–2025 гг. Объекты исследования и отобранный материал представлен на рис. 3 и табл. 2. Отбор проб

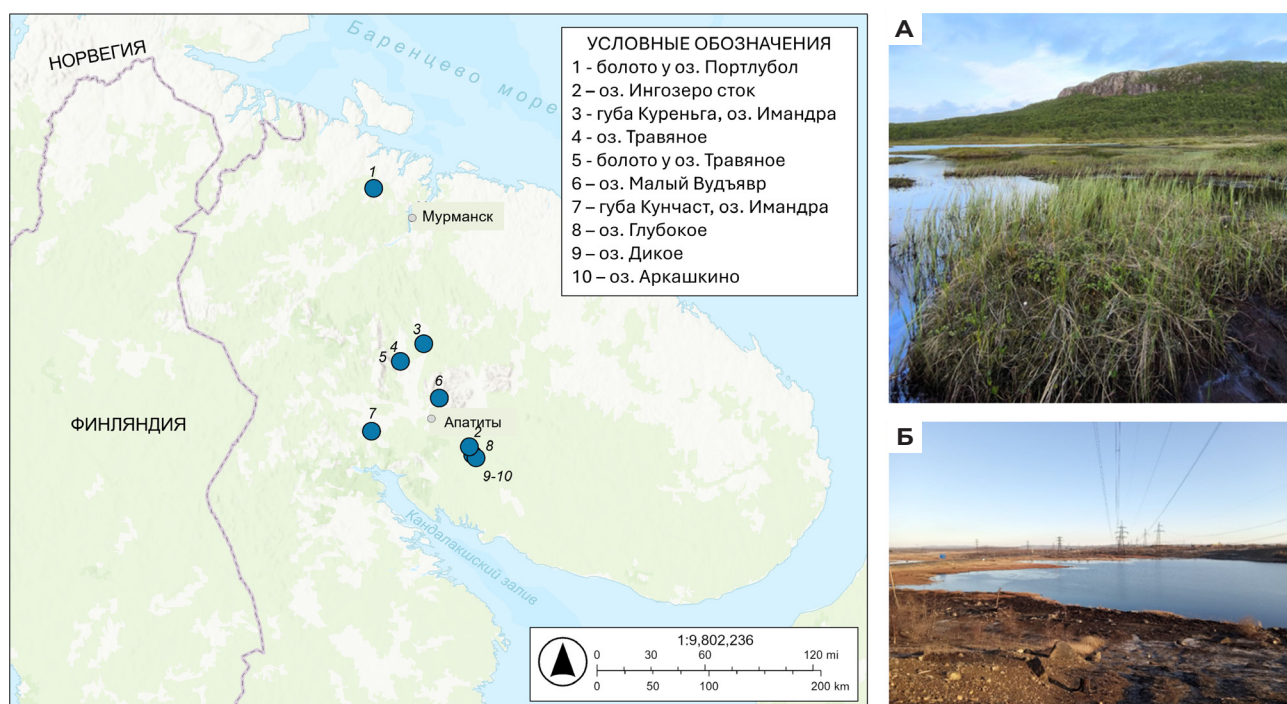


Рис. 3. Карта-схема расположения пробных площадей водных и болотных экосистем в зоне расположения АО «Кольская ГМК» (площадка Мончегорск) и на фоновых территориях. Примечание: А — вид на заболоченный участок оз. Портлубол, Б — вид оз. Травяного и приозерной низменности

Fig. 3. Sampling plots of aquatic and peatland areas in the impact zone of JSC “Kola MMC”. (Monchegorsk site) and in background areas. Note: A — wetland of Lake Portlubol, B — Lake Travyanoye and adjacent lowlands

Таблица 2. Объекты исследования водных и болотных экосистем

Table 2. Sampling sites of aquatic and peatland ecosystems

№	Объект исследования The object of research	Координаты (WGS 84) Coordinates(WGS 84)		Материал Material
		Широта Width	Долгота Longitude	
1	Озеро Травяное	67,941277	32,850522	вода, ДО
2	Болото у оз. Травяного	67,938015	32,847749	торф
3	Болото у оз. Портлубол	69,194283	32,311829	торф
4	Озеро Дикое	67,237358	34,266393	вода, ДО
6	Озеро Малый Вудъявр	67,666847	33,611630	вода
7	Озеро Глубокое	67,293507	34,218174	вода
8	Озеро Аркашкино	67,213291	34,353285	вода
9	Озеро Ингозеро сток	67,237358	34,266393	вода
10	Губа Куреньга, озеро Имандра	68,073228	33,314591	вода
11	Губа Кунчаст, озеро Имандра	67,411866	32,271439	вода

донных отложений (ДО) был выполнен с помощью трубчатого пробоотборника (диаметром 8,5 см) открытого гравитационного типа с автоматически закрывающейся диафрагмой, разработанного по схеме, предложенной Скогхеймом [31], керны торфяных отложений — посредством торфяного геологического бура [32]. Отбор проб воды для анализа содержания углерода был осуществлен с помощью стандартного батометра Руттнера объемом 2,2 л, в подготовленные химически инертные пластиковые бутылки объемом 1 л. Для контроля исследуемых параметров также был произведен отбор воды из озер, не подверженных непосредственному влиянию загрязнителей, расположенных на значительном удалении от источников антропогенного воздействия. В качестве фоновых были выбраны разнотипные озера, отличающиеся морфометрией, географическим положением и условиями формирования качества вод.

Подготовка проб и аналитические процедуры были выполнены в соответствии с рекомендованными стандартными методиками, принятыми в международной и отечественной практике по схеме, принятой в ИППЭС КНЦ РАН [32].

Анализ потерь при прокаливании, которые характеризуют содержание органического вещества в (органические соединения выгорают обычно в диапазоне температуры от 100 до 500 °С), проводится весовым способом после прокалывания образцов при температуре 500 °С в муфельной печи. Для оценки химического состава отложений и торфа, включая содержание углерода, образцы просушивались в сушильном шкафу при температуре 100–105 °С до постоянного веса изучаемых образцов. Далее пробы измельчались до порошкообразного состояния на лабораторном истирателе или в ступке при помощи пестика. Определение углерода в пробах проводилось по методикам изучения почвы на аналогичном оборудовании в ИППЭС КНЦ РАН.

Расчет запаса углерода, измеряемый в т/га, в торфе и донных отложениях согласно следующей формуле:

$$C_{\text{зап.}} = L_{\text{зап.}} \times C / 1000 ,$$

где $L_{\text{зап.}}$ — это запас слоя, рассчитываемый как отношение сухого веса осадка в этом

слое к площади берущей части пробоотборника, а C — концентрация (в мг/кг) углерода в изучаемом слое.

Результаты и обсуждение

Наземные экосистемы. Основными средообразующими природными факторами в Мурманской области, определяющими варьирование циклов углерода в наземных экосистемах, являются климат, рельеф, почвы и почвообразующие породы, растительность. На функционирование лесных экосистем наряду с природными значительное влияние оказывают антропогенные факторы — рубки, пожары, воздушное промышленное загрязнение [33].

Промышленная деятельность оказывает значительное влияние на структурно-функциональную организацию лесных биогеоценозов, обуславливает пространственную неоднородность накопления и разложения органического вещества, способствует изменению запасов углерода в подстилке и минеральных почвенных горизонтах [34]. Изменение количества органического вещества в наземных экосистемах, вызываемое техногенным загрязнением, выражается в нарушении соотношения процессов его продуцирования, аккумуляции, отмирания и депонирования.

Для количественной характеристики депонирования углерода в почве используется величина его запаса, вычисленная из расчета выбранного объема почвы: на 1 м², 1 га, на слой (например, 0–50 или 0–100 см) или на генетический горизонт [35]. Данные по запасам углерода в почвах — важная составляющая баланса углерода в наземных экосистемах. В настоящее время оценка содержания и запасов углерода в почвах приобрела особую значимость в связи с глобальными климатическими изменениями [9, 36–38]. На современном этапе накопилось немалое количество работ по оценке глобальных и региональных запасов органического углерода в почвах [8, 16, 39–41]. В Мурманской области депонирующая способность почв региона до сих пор остается слабо изученной. Особый интерес представляют особенности депонирования углерода в репрезентативных экосистемах региона, в том числе в зоне расположения промышленных предприятий.

Почвы на пробных площадях представлены альфегумусовыми подзолами с типичным для них профилем: O–E–BHF–C [42], развивающиеся на моренных отложениях. Данные почвы являются типичными для лесных экосистем Мурманской области, имеют небольшую мощность подстилки (органогенного горизонта), невысокие запасы органического вещества, реакция среды обычно кислая.

Мощность органогенного горизонта на исследуемых пробных площадях варьировала в фоновых условиях от 6 до 12 см, в зоне воздействия АО «Кольская ГМК» — от 8 до 11 см. Доля мелкозема в минеральных горизонтах почвы ненарушенных экосистем варьировала от 86 до 100%, техногенном редколесье — от 75 до 97 %. Плотность почвы сопоставима по двум пробным площадям и составляет в среднем 1,2–1,3 г/см³. Вниз по почвенному профилю наблюдается снижение кислотности от органогенного горизонта к почвообразующей породе (табл. 2).

При оценке углерододепонирующей роли лесных почв Севера крайне важным является учет содержания углерода в подстилке [43]. Среднее содержание углерода в верхнем органогенном горизонте почв (подстилке) в фоновых условиях в техногенных редколесьях сопоставимо и составляет 48 % (табл. 3), диапазон варьирования составляет от 43 до 52 %.

Минеральные горизонты в разной степени обогащены органическим веществом и имеют схожие тенденции распределения

по профилю углерода на обследованных пробных площадях (табл. 3). Иллювиальный горизонт (гор. BHF) является горизонтом максимальной аккумуляции углерода, содержание варьирует от 0,46 до 2,01% в фоновых условиях и от 1,97 до 4,37% — в техногенном редколесье. Подзолистый горизонт (гор. E) содержит меньше углерода: от 0,20 до 0,69 % в ненарушенных экосистемах и от 0,88 до 1,69 % — в зоне воздействия АО «Кольская ГМК». В почвообразующей породе содержание углерода снижается и варьирует на пробных площадях в диапазоне от 0,59 до 1,30 %. Подобный характер распределения Сорг. по почвенному профилю является одной из генетических особенностей подзолов [44]. Результаты исследований показали, что в техногенном редколесье содержание углерода в минеральных горизонтах (E, BHF) достоверно выше ($p < 0,05$) по сравнению с фоновыми значениями (табл. 2).

В фоновых условиях и техногенном редколесье запасы углерода по почвенному профилю изменяются следующим образом: максимальные значения характерны для подстилки и иллювиального горизонта BHF, минимальные — для подзолистого горизонта E и почвообразующей породы E и почвообразующей породы E (табл. 3). В ненарушенных (фоновых) лесных экосистемах запас подстилки в среднем составляет 54 т/га, в углеродном эквиваленте это соответствует 22т С/га. Полученные данные согласуются с результатами, которые приведены для подзоны северной тайги в Республике Коми, где запасы подстилки составляли от 26 до 57 т/га, запасов

Таблица 3. Кислотность, содержание и запасы углерода в почвенных горизонтах Al-Fe-гумусовых подзолов (2024–2025 гг.) северотаежных лесов

Table 3. Acidity, carbon content, and carbon stocks in soil horizons of Al-Fe-humus podzols (2024–2025) in northern taiga forests

Почвенный горизонт Soil horizon	Фон Background areas			Техногенноередколесье (ПП № 46-24) Pollution-induced sparse forests		
	pH	Содержание С, % Carbon Content, %	Запасы С, т/га Carbon reserves, t/ha	pH	Содержание С, % Content C, %	Запасы С, т/га Carbon reserves, t/ha
O	4,62 0,13	48,42 0,57	22,49 4,25	4,73 0,15	47,63 1,96	41,59 4,08
E	4,37 0,04	0,44 0,07	3,84 1,12	5,20 0,17	1,37 0,18	12,40 4,80
BHF	5,16 0,09	1,36 0,26	20,91 3,90	5,32 0,15	3,49 0,58	51,11 4,87
C	5,32 0,08	0,89 0,21	7,62 0,91	5,58 0,04	0,86 0,17	8,27 1,55

Примечание: над чертой — среднее значение, под чертой — стандартная ошибка.
Note: above the line is the mean value, and below the line is the standard error.

углерода— от 12 до 27 т С/га [36]. Достаточно большие запасы подстилки в северотаежных лесах обусловлены невысокой скоростью разложения органических остатков.

В зоне воздействия АО «Кольская ГМК», в техногенном редколесье наблюдается достоверное увеличение ($p < 0,05$) запасов подстилки (96 т/га) и углерода (42 т С/га) по сравнению с фоном. Увеличение запасов подстилки на ПП № 46-24 может свидетельствовать о накоплении здесь неразложившихся органических остатков (замедлении скорости деструкции), изменении продуктивности лесной экосистемы и подавлении активности почвенных микроорганизмов в условиях техногенного воздействия. В минеральных почвенных горизонтах Е и ВНН запасы углерода также возрастают ($p < 0,05$) в 3,2 и в 2,4 раза соответственно относительно регионального фона (табл. 3). В почвообразующей породе (гор. С) запасы углерода были сопоставимы по двум исследованным пробным площадям.

Таким образом, результаты проведенных исследований показали, что почвы в зоне воздействия АО «КГМК» обладают значительными запасами почвенного углерода

в техногенных редколесьях и значительно превышают фоновые значения.

Водные экосистемы. В воде оз. Травяного, находящегося в зоне влияния АО «Кольская ГМК», содержание NPOC (Non-Purgeable Organic Carbon) на период отбора составило 4,00 мгС/л, при этом в воде отстойника оз. Нюдъявр его концентрация была ниже — 2,80 мгС/л. Установлено, что значение концентраций NPOC в воде имеет сравнительно широкий диапазон значений (рис. 4а). В глубоководном оз. Дикое (Печенгский район Мурманской области) в поверхностных слоях воды, а также на глубине 30 м содержание NPOC оказалось выше на порядок по сравнению с другими изученными водными объектами. При этом на глубине 50 м концентрация органического углерода составила 5,80 мг/л. В горном озере Малый Вудъявр, расположенном в Хибинском горном массиве, концентрация NPOC составила 2,45 и 6,20 на глубинах 1 и 12 метров соответственно. Сопоставимые значения были выявлены и для самого крупного внутреннего водоема региона — оз. Имандра, где концентрации NPOC составили 5,63 и 4,39 на глубинах 1 и 25 метров соответственно. В водоемах, расположенных

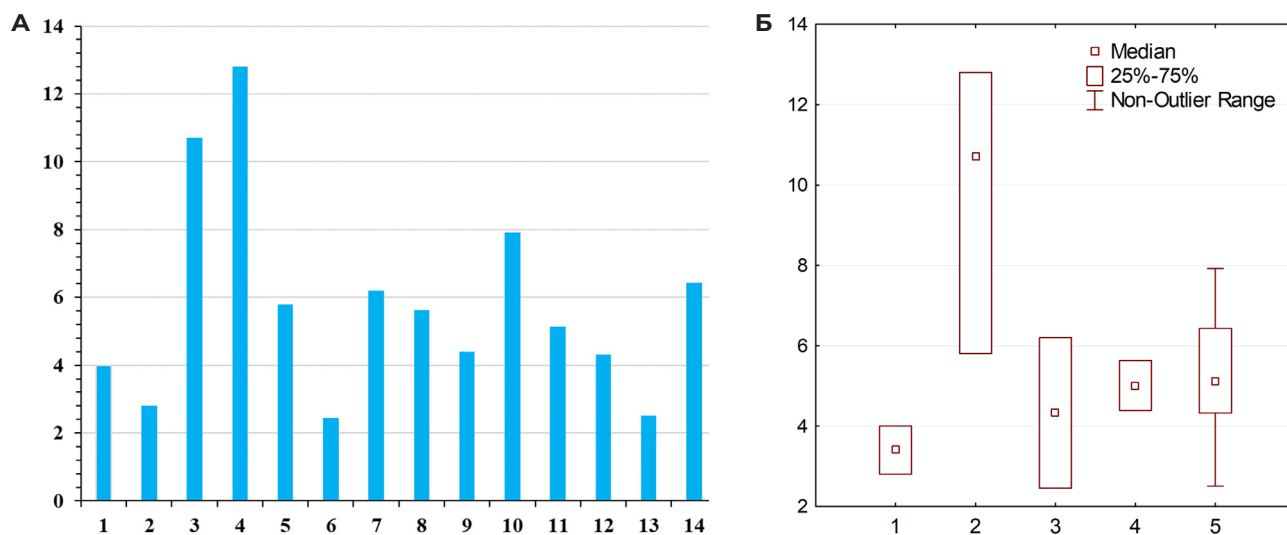


Рис. 4. А — содержание общего органического углерода (NPOC) в воде исследованных водоемов, мгС/л: 1 — Травяное, 2 — отстойник оз. Нюдъявр, 3, 4, 5 — оз. Дикое, глубина 1, 20 и 50 м соответственно, 6, 7 — оз. Малый Вудъявр, глубина 1 и 12 м соответственно, 8, 9 — оз. Бабинская Имандра, глубина 1 и 25 м соответственно, 10 — оз. Аркашкино малое, 11 — оз. Аркашкино среднее, 12 — оз. Аркашкино, 13 — оз. Глубокое, 14 — оз. Ингозеро, сток; Б — сравнение содержания NPOC водоемов разных ландшафтов: 1 — Мончегорская площадка, 2 — Печенгский район, 3 — Хибинский горный массив, 4 — оз. Имандра, 5 — озера зоны северной тайги.

Fig. 4. А — Concentration of non-purgeable organic carbon (NPOC) in waters of the studied lakes, mg C/L: 1 — Travyanoye; 2 — settling pond of Lake Nyud'yavr; 3, 4, 5 — Lake Dikoye (depths 1, 20, and 50 m); 6, 7 — Lake Maly Vud'yavr (depths 1 and 12 m); 8, 9 — Babinskaya Imandra (depths 1 and 25 m); 10 — Lake Arkashkino Maloe; 11 — Lake Arkashkino Srednee; 12 — Lake Arkashkino; 13 — Lake Glubokoe; 14 — Lake Ingozero, outflow. Б — Comparison of NPOC concentrations across landscape types: 1 — Monchegorsk site; 2 — Pechenga District; 3 — Khibiny Mountains; 4 — Lake Imandra; 5 — lakes of the northern taiga zone

в таежной зоне, концентрации NPOC варьировали от 2,50 до 7,92 (рис. 4А). В целом в водоемах в зоне влияния АО «Кольская ГМК» (площадка Мончегорск) содержание органического углерода в среднем (по медиане) оказалось ниже, чем во всех остальных изученных водных объектах различных ландшафтов (рис. 4Б).

Высокая вариативность значений концентрации NPOC объясняется, вероятно, не только разницей в типологии озер и биогеохимических особенностях ландшафтов, но и активностью биоты. Основные процессы биогеохимического цикла углерода в озерных экосистемах включают поглощение углекислого газа (CO_2) фотоавтотрофными организмами (водоросли, цианобактерии и высшие растения); продукцию органического вещества, и частичное ее захоронение в виде донных отложений, а также деструкционные процессы минерализации, с последующим выбросом CO_2 в атмосферу [45]. Поэтому непосредственное влияние на содержание углерода оказывает уровень развития планктона, который играет ключевую роль в циклах углерода в водных экосистемах. В свою очередь, уровень развития планктона в специфических условиях Арктики подвержен значительным колебаниям в течение короткого гидробиологического лета, что затрудняет адекватную оценку запасов углерода непосредственно в водной среде. Очевидно, необходимо использовать данные о гидробиологической активности и роли отдельных групп организмов в циклах углерода в водоемах.

Было показано [46], что основной вклад в общий пул углерода внутренних водоемов северных широт вносит аллохтонная органика, которая уже подверглась той или иной форме деградации перед попаданием в водную экосистему. Увеличение автохтонной составляющей в результате развития процессов эвтрофирования (в том числе антропогенного) и потепления климата может привести к увеличению продуктивности вод, и как следствие, увеличению потоков парниковых газов с поверхности водоемов [47]. В связи с этим при анализе запасов углерода в водных экосистемах необходимо оценивать трофический статус вод. На основе полученных данных сложно сделать выводы о величине антропогенного вклада в динамику депонирования углерода в воде изученных озер.

Донные и торфяные отложения. Запасы углерода в донных отложениях (ДО) озера Травяного варьируют от 7,8 до 30 т/га (рис. 5). Максимальные значения запасов С приходятся на верхние слои отложений от 3 до 10 см, что хорошо коррелирует с данными по общему накоплению углерода в отложениях озера Травяного. Кроме того, значения запасов С в верхних слоях ДО озера Травяного близки к данным по запасам углерода в органогенных горизонтах лесных почв Мурманской области (27–34 т/га) [33]. На основе полученных данных по вертикальному распределению углерода и его запасов, можно говорить о том, что повышение уровня накопления углерода в ДО этого водоема связано с антропогенной деятельностью

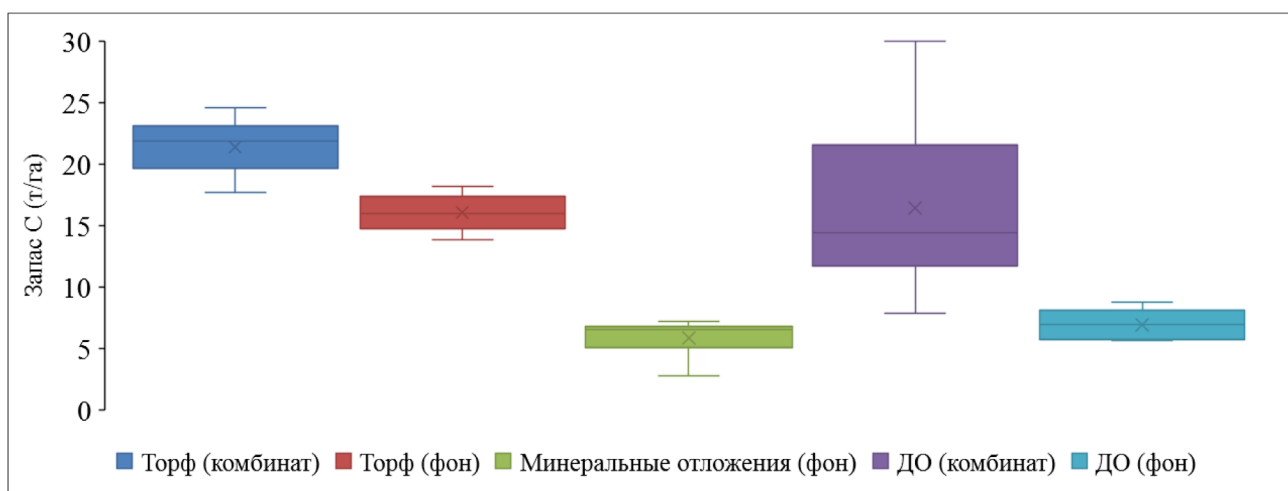


Рис. 5. Сравнение уровней запасов углерода в торфе, минеральных отложениях и донных осадках (ДО) разных районов Мурманской области

Fig. 5. Comparison of carbon stocks in peat, mineral deposits, and bottom sediments across districts of Murmansk Region

в районе исследования. Средний запас С в ДО фонового озера Дикого составляет около 7 т/га, что близко к значениям запасов С в нижних (вероятно, фоновых) слоях отложений озера Травяного. Эти исследования необходимо продолжать, однако уже сейчас видно, что метод палеолимнологических реконструкций позволяет выявлять темпы и объемы накопления С в озерах, расположенных в районах с повышенной антропогенной активностью.

Содержание углерода в торфяных отложениях южного берега оз. Травяного изменяется от 281 до 458 тыс. мг/кг. Медианное по профилю значение составляет 426 тыс. мг/кг. Максимальное содержание углерода было выявлено в нижних слоях торфяных отложений в интервале 70–80 см, минимальное — в поверхностных слоях от 0 до 30 см. В целом распределение характеризуется снижением величины содержания углерода в поверхностных слоях. Запасы углерода в слоях различного возраста варьируют от 17,7 до 24,5 т/га (рис. 5). При этом распределение запасов углерода не вполне соответствует его концентрациям в отложениях. Максимальные значения запасов С приходятся на слои отложений в интервале 45–57 см, минимальные (17,7 т/га) — в самых древних слоях в интервале 90–97 см. Сравнительно невысоки запасы углерода также в современных торфяных отложениях — 19,6 т/га. В отличие от донных отложений наблюдается снижение запасов углерода, начиная с середины профиля к поверхностным слоям. Не исключено, что это объясняется деградацией растительности и снижением темпов торфообразования на водосборной площади оз. Травяного в результате антропогенной деятельности.

Анализ содержания углерода в керне торфа болота у оз. Портлубол показал, что с повышенным содержанием органики и С можно считать верхние слои от 20 до 45 см. В этих слоях концентрация С варьирует от 31,4 до 42,1 % при среднем содержании С 35,7%. В более глубоких слоях исследованного керна, где отмечалось большое число песчаных частиц, содержание углерода существенно ниже — от 6,2 до 10,9 %.

Сопоставление данных по запасам углерода в разных средах показало, что торфяные отложения имеют наибольшие значения этого показателя, так как торф, более чем на 50%

состоит из органических остатков. При этом торфяные отложения, отобранные вблизи промышленного объекта (район вблизи г. Мончегорска), имеют более высокие значения запасов С по сравнению с торфами болота фонового района на севере региона. В определенной степени это связано с антропогенными выбросами от АО «Кольская ГМК». Известно, что в результате антропогенного воздействия в современных осадочных формациях увеличивается уровень накопления и запаса углерода [48].

Донные отложения вблизи комбината также имеют повышенные уровни запаса углерода, особенно это касается самых верхних слоев отложений (рис. 5). Минимальный уровень запаса С отмечен для минеральных отложений, представленных преимущественно ледниковыми образованиями, а также для минеральных типов донных отложений, которые были взяты за фон в данной работе. Здесь решающую роль играет общее минимальное содержание органического вещества.

Рекомендации по дальнейшему мониторингу пулов и потоков углерода в наземных и водных экосистемах в зоне воздействия АО «Кольская ГМК»

По результатам проведенных исследований разработаны рекомендации по дальнейшему мониторингу климатически активных веществ в наземных и водных экосистемах в зоне воздействия АО «Кольская ГМК».

Следует отметить, что получение данных по пулам и потокам углерода в экосистемах отдельных регионов, а также оценка вклада отдельных компонентов экосистем (воды, почвы, торфа, донных отложений) в общий углеродный баланс в настоящее время особенно актуальны.

На территории Мурманской области представлены различные сукцессионные стадии лесов, обусловленные комбинированным действием естественных и антропогенных факторов. С 1990-х гг. Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН проводит биогеохимический мониторинг и имеет уникальную базу данных по динамике потоков углерода в северо-таежных лесах на фоновых и нарушенных

территориях [49, 50]. Однако результатов исследований, на основании которых можно сделать определенные заключения о связи между сукцессионным статусом лесов и закономерностями накопления и динамики углерода в них, недостаточно.

Совместная работа ученых и промышленников позволила оценить запасы почвенного углерода в наземных экосистемах в зоне расположения АО «Кольская ГМК» (площадка Мончегорск). Получены уникальные данные по запасам углерода в почве и изменению содержания и запасов углерода вниз по почвенному профилю. Почва — важнейший, но не единственный компонент фитосеносов, определяющий углерододепонирующую способность экосистем. Для полных и объективных оценок бюджета углерода в наземных экосистемах необходимо определение запасов надземной и подземной фитомассы, запасов углерода в древостое и напочвенных ярусах (травяно-кустарничковом, мохово-лишайниковом). Необходимо продолжать мониторинговые исследования пулов и потоков углерода в зоне расположения АО «Кольская ГМК» по следующим направлениям исследований: 1) изучение состояния, структуры, продуктивности древостоев на основе данных таксационных исследований на пробных площадях; 2) описание видового разнообразия для учета вклада различных групп биоты (сосудистые растения, мохообразные, лишайники) в бюджет углерода наземных экосистем на основе данных геоботанических исследований; 3) оценка продукции и запасов органического вещества в фитомассе и мортмассе наземных экосистем; 4) учет вклада почвенной эмиссии парниковых газов в углеродный баланс репрезентативных наземных экосистем. Реализация перечисленных задач позволит оценить бюджет углерода наземных экосистем с учетом всех компонентов (атмосферные выпадения, почва, растительность, опад). Это станет научной основой для разработки новых подходов и принципов управления наземными природными ресурсами Арктики в условиях глобальных и региональных изменений окружающей среды, а также по адаптации экосистем к климатическим изменениям и достижению углеродной нейтральности в регионе.

С учетом реализации отдельных элементов «углеродной политики» промышленными предприятиями, очевидна необходимость

получения точной количественной оценки углеродопоглощающей способности внутренних водоемов региона. Научно обоснованная оценка способности водно-болотных экосистем связывать значительное количество двуокиси углерода, входящей в состав промышленных выбросов, позволит предприятиям сокращать углеродный след своей продукции в соответствии с актуальными тенденциями рынка.

Перспективы исследований способности к депонированию углерода различными компонентами водных экосистем в зоне воздействия объектов компании АО «Кольская ГМК» на основе проведенных исследований имеют несколько важных аспектов, а именно:

- расширение современных представлений о ключевой роли вод, донных отложений и элементов водосборной площади в накоплении углерода. Понимание механизмов углеродного цикла в компонентах водных экосистем может играть важную роль в выявлении интенсивности и направленности климатических изменений Арктики, оценке здоровья и устойчивости экосистем с точки зрения реализации экосистемных услуг;
- применение результатов исследований в разработке стратегий управления водными ресурсами, более глубокому изучению биогеохимических циклов и взаимодействий между различными компонентами экосистем.

Полученные результаты позволяют заключить, что перспективными направлениями исследований водных экосистем являются следующие: 1) выявление роли водной биоты в углеродных циклах, количественная оценка продукционных и деструкционных процессов, вклада отдельных групп организмов, в первую очередь фотоавтотрофов (водорослей и цианобактерий), а также высшей водной растительности. Анализ вклада гетеротрофного дыхания и уровня мортмассы в торфяных и донных отложениях, оценка запасов и скорости разложения фитомассы и формирования торфов в голоцене, изучение особенностей происхождения торфяных отложений с учетом их возраста; 2) оценка потоков аллохтонного органического вещества водоемы, и вклад этих потоков в экосистемные углеродные циклы; оценка количественного

соотношения форм миграции и аккумуляции углерода; 3) изучение концентрации и распределения углерода в донных отложениях водоемов различных ландшафтов Мурманской области, выявление диапазонов содержания в зависимости от типологии и происхождения осадков, литологических и геохимических особенностей, возраста, темпов осадконакопления.

На основании результатов комплексных исследований может быть дана объективная количественная оценка способности наземных и водно-болотных экосистем к связыванию двуокси углерода атмосферы.

Заключение

Проведенные исследования пулов и потоков углерода в наземных и водных экосистемах Мурманской области позволили установить некоторые ориентировочные величины концентраций и запасов углерода в воде, донных озерных отложениях, почве и торфе. Установлено, что величины запасов углерода в верхних слоях озерных отложений близки к данным по запасам углерода в органогенных горизонтах лесных почв Мурманской области. Почвы в зоне воздействия АО «КГМК» (площадка Мончегорск) обладают значительными запасами почвенного углерода в техногенных редколесьях. Увеличение запасов почвенного углерода в условиях промышленного воздействия может быть связано со снижением скорости разложения органических остатков в условиях атмосферного загрязнения. Торфяные отложения, отобранные вблизи промышленного объекта, также имеют более высокие значения запасов углерода по сравнению с торфами болота фонового района на севе-

ре Мурманской области. В озере Травяном, расположенном в зоне техногенного воздействия, выявлены повышенные уровни накопления углерода в донных отложениях, максимальные запасы углерода отмечены в верхних слоях. В воде озер в зоне влияния АО «Кольская ГМК» (площадка Мончегорск) содержание органического углерода оказалось ниже, чем во всех остальных изученных водных объектах.

Полученные результаты свидетельствуют о значительной роли наземных и водных экосистем в аккумуляции углерода депонирующими средами. В то же время недостаточно информации о диапазонах запасов углерода, формирующихся в условиях различных ландшафтов, что необходимо для адекватной оценки эффективности взаимодействия аккумулярующих сред с атмосферой. Существует необходимость продолжения комплексных исследований пулов и потоков углерода с учетом всех компонентов экосистем на основе различных показателей, характеризующих их структурно-функциональную организацию.

Результаты работы будут способствовать совершенствованию национальной системы мониторинга климатически активных веществ и планированию компенсационных мероприятий, направленных на сокращение содержания парниковых газов в атмосфере. Дальнейшие исследования позволят оценить потенциал северных экосистем по депонированию углерода, разработать научно-методические рекомендации по адаптации экосистем к климатическим изменениям и достижению углеродной нейтральности в регионе, в том числе при реализации климатических проектов.

Литература

1. Pan Y., Birdsey R.A., Phillips O.L., Houghton R., Fang J., Kauppi P.E., Keith H., Kurz W.A., Ito A., Lewis S.L., Nabuurs G., Shvidenko A., Hashimoto S., Lerink B., Schepaschenko D., Castanho A., Murdiyars D. The enduring world Forest carbon sink. *Nature*. 2024;631:536–569. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07602-x>
2. Pappas C., Maillet J., Rakowski S., Baltzer J.L., Barr A.G., Black T.A., Fatichi S., Laroque C.P., Matheny A.M., Roy A., Sonnentag O., Zha T. Aboveground tree growth is a minor and decoupled fraction of boreal forest carbon input. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2020;290:108030. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108030>
3. Friedlingstein P., O'Sullivan M., Jones M.W., Andrew M.R., Bakker D.C.E., Hauck J., et al. Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data*. 2023;15(12):5301–5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>

4. Adoption of the Paris agreement. 2015. Conference of the Parties Twenty-first session Paris, 30 November to 11 December 2015. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1 Available at: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/lo9r01.pdf>
5. Framstad E., de Wit H., Mäkipää R., Larjavaara M., Vesterdal L., Karlton E. Biodiversity, carbon storage and dynamics of old northern forest. Copenhagen: Nordic Council of Ministers; 2013. <https://doi.org/10.6027/tn2013-507>
6. Schlesinger W.H. Carbon balance in terrestrial detritus. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1977;8:51–81. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.08.110177.000411>
7. Post W.M., Emanuel W.R., Zinke P.J., Stangenberger A.G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*. 1982;298(5870):156–159. <https://doi.org/10.1038/298156a0>
8. Bradshaw C.J.A., Warkentin I.G. Global estimates of boreal forest carbon stocks and. *Global and Planetary Change*. 2015;128:24–30. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.02.004>
9. Paradis L., Thiffault E., Achim A. Comparison of carbon balance and climate change mitigation potential of forest management strategies in the boreal forest of Quebec (Canada). *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 2019;92(1):264–277. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpy035>
10. Щепашенко Д.Г., Мухортова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф. Запасы органического углерода в почвах России. *Почвоведение*. 2013;(2):123–132. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13020123>
11. Бобкова К.С., Машика А.В., Смагин А.В. Динамика содержания углерода органического вещества в среднетаежных ельниках на автоморфных почвах. Санкт-Петербург: Наука; 2014.
12. Баева Ю.И., Курганова И.Н., Лопес Де Гереню В.О., Почикалов А.В., Кудяров В.Н. Физические свойства и изменение запасов углерода серых лесных почв в ходе постагрогенной эволюции (юг Московской области). *Почвоведение*. 2017;(3):345–353. <https://doi.org/10.1134/S0032180X1703002X>
13. Бахмет О.Н. Запасы углерода в почвах сосновых и еловых лесов Карелии. *Лесоведение*. 2018;(1):48–55. <https://doi.org/10.7868/S0024114818010047>
14. De Vos B., Cools N., Ilvesniemi H., Vesterdal L., Vanguelova E., Carnicelli S. Benchmark values for forest soil carbon stocks in Europe: Results from a large scale forest soil survey. *Geoderma*. 2015;251–252:33–46. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.008>
15. Hounkpatin K.O.L., Stendahl J., Lundblad M., Karlton E. Predicting the spatial distribution of soil organic carbon stock in Swedish forests using a group of covariates and site-specific data. *Soil*. 2021;7(2):377–398. <https://doi.org/10.5194/soil-7-377-2021>
16. Osipov A.F., Bobkova K.S., Dymov A.A. Carbon stocks of soils under forest in the Komi Republic of Russia. *Geoderma Regional*. 2021;27(2):e00427. <https://doi.org/10.1016/j.geoder.2021.e00427>
17. Kortelainen P., Rantakari M., Huttunen J.T., Mattsson T., Alm J., Juutinen S., Larmola T., Silvola J., Martikainen P.J. Sediment respiration and lake trophic state are important predictors of large CO₂ evasion from small boreal lakes. *Global Change Biology*. 2006;12(8):1554–1567. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01167.x>
18. Лим А.Г., Лойко С.В., Крицков И.В., Кузьмина Д.М. Структурно-функциональные особенности ландшафтов с активным термокарстом в северной тайге Западной Сибири. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2017;(4):414–423. https://doi.org/10.15421/2017_136
19. Сабылина А.В. Поступление в Онежское озеро органического углерода, общего фосфора и общего азота с речным стоком и вынос с водами р. Свири в 1965–2008 годах. *Труды Карельского научного центра РАН*. 2016;(9):68–77. <https://doi.org/10.17076/lim307>
20. Головацкая Е.А., Веретенникова Е.Э., Дюкарев Е.А. Потоки парниковых газов и депонирование углерода в олиготрофных торфяных почвах южной тайги Западной Сибири. *Почвоведение*. 2024;(2):226–236. <https://doi.org/10.31857/S0032180X24020023>
21. Леонова О.А., Волкова Е.М. Запасы углерода в торфяных залежах водораздельных болот на северо-востоке среднерусской возвышенности. *Труды Карельского научного центра РАН*. 2023;(8):20–27. <https://doi.org/10.17076/eco1845>
22. ГОСТ 31958-2012. Вода. Методы определения содержания общего и растворенного органического углерода» (введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 декабря 2012 г. N 1907-ст) [интернет]. Режим доступа: <https://base.garant.ru/71231976/> (дата обращения: 25.03.2026).

23. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания [интернет]. Режим доступа: https://base.garant.ru/400274954/#block_1000 (дата обращения: 25.03.2025).
24. Методические рекомендации по проведению исследований на пробных площадях сети интенсивного уровня мониторинга для оценки запасов углерода в лесных экосистемах: геоботанические исследования, отбор почвенных образцов, отбор растительных образцов. Важнейший инновационный проект «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ). Москва: ЦЭПЛ РАН; 2024.
25. Методические рекомендации по проведению исследований на пробных площадях сети интенсивного уровня мониторинга для оценки запасов углерода в болотных экосистемах: геоботанические исследования, отбор почвенных образцов, отбор растительных образцов. Важнейший инновационный проект «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ). Ханты-Мансийск; 2024.
26. Методические рекомендации по оценке поступления растворенного органического углерода с атмосферными выпадениями. Важнейший инновационный проект «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ). Москва: ЦЭПЛ РАН; 2024.
27. Методические рекомендации по пробоподготовке и проведению физико-химического анализа почвенных и растительных образцов. Важнейший инновационный проект «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ). Москва: ЦЭПЛ РАН; 2024.
28. Методические рекомендации по проведению химического анализа природных вод. Важнейший инновационный проект «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (ВИП ГЗ). Москва: ЦЭПЛ РАН; 2024.
29. Методика мониторинга лесов по международной программе ICP Forests. Москва: ЦЭПЛ РАН, Российский центр защиты леса; 2008.
30. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки [интернет]. Режим доступа: <https://files.stroy-inf.ru/Data2/1/4294828/4294828015.pdf> (дата обращения: 23.03.2025)
31. Skogheim O.K. Rapport fra Arungenprosjektet. Ås-NLH-Report No. 2. Oslo: Norges landbrukskøleskole (NLH); 1979.
32. Сандимиров С.С., Кудрявцева Л.П., Даувальтер В.А., Денисов Д.Б., Косова А.Л., Черепанов А.А. Методы экологических исследований водоемов Арктики. Мурманск: Издво МГТУ; 2019.
33. Сухарева Т.А., Иванова Е.А., Ершов В.В., Зенкова И.В., Корнейкова М.А., Штабровская И.М., Сошина А.С. Содержание и запасы углерода и азота в наземных экосистемах Мурманской области. Вопросы лесной науки. 2023;6(2):125. <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202362-125>
34. Живов Д.А., Сухарева Т.А. Запасы азота и углерода в почвах еловых лесов Мурманской области. Вестник Нижневартского государственного университета. 2025;(4):84–100. <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/07>
35. Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И. Органическое вещество почв Российской Федерации. Москва: Наука; 1996.
36. Бобкова К.С., Галенко Э.П. (ред.). Коренные еловые леса Севера: биоразнообразие, структура, функции. СПб.: Наука; 2006.
37. Lukina N., Kuznetsova A., Tikhonova E., Smirnov V., Danilova M., Gornov A., Tebenkova D., Knyazeva S., Bakhmet O., Kryshen A., Shashkov M. Linking forest vegetation and soil carbon stock in Northwestern Russia. Forests. 2020;11(9):979. <https://doi.org/10.3390/f11090979>
38. Scharlemann J.P.W., Tanner E.V.J., Hiederer R., Kapos V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. Carbon Management. 2014;5(1):81–91. <https://doi.org/10.4155/CMT.13.77>
39. Дымов А.А. Сукцессии почв в бореальных лесах Республики Коми. Москва: ГЕОС; 2020.
40. Чернова О.В., Рыжова И.М., Подвезенная М.А. Оценка запасов органического углерода лесных почв в региональном масштабе. Почвоведение. 2020;(3):340–350. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2003002X>

41. Самсонова В.П., Мешалкина Ю.Л., Добровольская В.А., Кондрашкина М.И., Дядькина С.Е., Филиппова О.И., Кротов Д.Г., Морозова Т.М., Красильников П.В. Исследование неопределенности запасов органического углерода в масштабах угодий. Почвоведение. 2023;(11):1437–1449. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2311010X>
42. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена; 2004.
43. Черкинский А.Е., Чичагова О.А. Типы органофильных почв мира. В: Глобальная география почв и факторы почвообразования: сб. ст. Москва; 1991, с. 164–195.
44. Переверзев В.Н. Почвообразование на рыхлых и кристаллических породах в Северной Фенноскандии. Апатиты: Изд. КНЦ РАН; 2013.
45. Denfeld B., Lupon A., Sponseller R., Laudon H., Karlsson J. Heterogeneous CO₂ and CH₄ patterns across space and time in a small boreal lake. *Inland Waters*. 2020;10(3):348–359. <https://doi.org/10.1080/20442041.2020.1787765>
46. Paerl H.W., Otten T.G. Blooms bite the hand that feeds them. *Science*. 2013;342(6157):433–434. <http://doi.org/10.1126/science.1245276>
47. Чупакова А.А., Чупаков А.В., Неверова Н.В., Прасолов С.Д., Забелина С.А. Растворенный органический и неорганический углерод в разнотипных озерах бореальной зоны. Проблемы региональной экологии. 2023;(6):49–55. <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2023-6-49-55>
48. Белкина Н.А. Закономерности осадконакопления и раннего диагенеза донных отложений в водоемах юго-восточной части Фенноскандинавского кристаллического щита [диссертация]. Санкт-Петербург; 2021.
49. Сухарева Т.А., Ершов В.В. Запасы углерода в почвах северотаежных лесов Мурманской области в условиях регионального фона и при аэротехногенном загрязнении. Свидетельство о регистрации базы данных RU 2024624518. Оpubл. 17.10.2024.
50. Сухарева Т.А., Иванова Е.А., Рябов Н.С., Ершов В.В., Живов Д.А. Запасы и содержание углерода и азота в фитомассе еловых лесов геохимически сопряженных ландшафтов (Мурманская область). Свидетельство о регистрации базы данных RU 2025623969. Оpubл. 23.09.2025.

References

1. Pan Y., Birdsey R.A., Phillips O.L., Houghton R., Fang J., Kauppi P.E., Keith H., Kurz W.A., Ito A., Lewis S.L., Nabuurs G., Shvidenko A., Hashimoto S., Lerink B., Schepaschenko D., Castanho A., Murdiyars D. The enduring world Forest carbon sink. *Nature*. 2024;631:536–569. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07602-x>
2. Pappas C., Maillet J., Rakowski S., Baltzer J.L., Barr A.G., Black T.A., Fatichi S., La-roque C.P., Matheny A.M., Roy A., Sonnentag O., Zha T. Aboveground tree growth is a minor and decoupled fraction of boreal forest carbon input. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2020;290:108030. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108030>
3. Friedlingstein P., O’Sullivan M., Jones M.W., Andrew M.R., Bakker D.C.E., Hauck J., et al. Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data*. 2023;15(12):5301–5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>
4. Adoption of the Paris agreement. 2015. Conference of the Parties Twenty-first session Paris, 30 November to 11 December 2015. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1 Available at: <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>
5. Framstad E., de Wit H., Mäkipää R., Larjavaara M., Vesterdal L., Karlton E. Biodiversity, carbon storage and dynamics of old northern forest. Copenhagen: Nordic Council of Ministers; 2013. <https://doi.org/10.6027/tn2013-507>
6. Schlesinger W.H. Carbon balance in terrestrial detritus. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1977;8:51–81. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.08.110177.000411>
7. Post W.M., Emanuel W.R., Zinke P.J., Stangenberger A.G. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*. 1982;298(5870):156–159. <https://doi.org/10.1038/298156a0>
8. Bradshaw C.J.A., Warkentin I.G. Global estimates of boreal forest carbon stocks and. *Global and Planetary Change*. 2015;128:24–30. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.02.004>
9. Paradis L., Thiffault E., Achim A. Comparison of carbon balance and climate change mitigation potential of forest management strategies in the boreal forest of Quebec (Canada). *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 2019;92(1):264–277. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpy035>

10. Shchepashchenko D.G., Mukhortova L.V., Shvidenko A.Z., Vedrova E.F. The pool of organic carbon in the soils of Russia. *Eurasian Soil Science*. 2013;46(2):107–116. <https://doi.org/10.1134/s1064229313020129>
11. Bobkova K.S., Mashika A.V., Smagin A.V. Dynamics of organic matter carbon content in middle taiga spruce forests on automorphic soils. St. Petersburg: Nauka Publ.; 2014. (In Russ.).
12. Baeva Yu.I., Kurganova I.N., Lopes De Gerenyu V.O., Pochikalov A.V., Kudiyarov V.N. Changes in physical properties and carbon stocks of gray forest soils in the southern part of Moscow region during postagrogenic evolution. *Eurasian Soil Science*. 2017;50(3):327–334. <https://doi.org/10.1134/s1064229317030024>
13. Bakhmet O.N. Carbon Deposits in Soils of Pine and Spruce Forests of Karelia. *Contemporary Problems of Ecology*. 2018;11(7):697–703. <https://doi.org/10.7868/S0024114818010047>
14. De Vos B., Cools N., Ilvesniemi H., Vesterdal L., Vanguelova E., Carnicelli S. Benchmark values for forest soil carbon stocks in Europe: Results from a large scale for est soil survey. *Geoderma*. 2015;251–252:33–46. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.008>
15. Hounkpatin K.O.L., Stendahl J., Lundblad M., Karlton E. Predicting the spatial distribution of soil organic carbon stock in Swedish forests using a group of covariates and site-specific data. *Soil*. 2021;7(2):377–398. <https://doi.org/10.5194/soil-7-377-2021>
16. Osipov A.F., Bobkova K.S., Dymov A.A. Carbon stocks of soils under forest in the Komi Republic of Russia. *Geoderma Regional*. 2021;27(2):e00427. <https://doi.org/10.1016/j.geoder.2021.e00427>
17. Kortelainen P., Rantakari M., Huttunen J.T., Mattsson T., Alm J., Juutinen S., Larmola T., Silvola J., Martikainen P.J. Sediment respiration and lake trophic state are important predictors of large CO₂ evasion from small boreal lakes. *Global Change Biology*. 2006;12(8):1554–1567. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01167.x>
18. Lim, A.G., Loiko, S.V., Kritskov, I.V., Kuzmina, D.M. Structural and functional features of landscapes with active thermokarst in the northern taiga of Western Siberia. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2017;(4):414–423. (In Russ.). https://doi.org/10.15421/2017_136
19. Sabylina A.V. Organic carbon, total phosphorus and total nitrogen inflow to lake Onego with stream runoff, and their removal by Svir river waters in 1965–2008. *Proceedings of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2016;(9):68–77. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/lim307>
20. Golovatskaya E.A., Veretennikova E.E., Dyukarev E.A. Greenhouse Gas Fluxes and Carbon Sequestration in the Oligotrophic Peat Soils of Southern Taiga in Western Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2024;57(2):210–219. <https://doi.org/10.1134/s1064229323602871>
21. Leonova O.A., Volkova E.M. Carbon reserves in peat deposits of watershed mires in the northeast of the Middle-Russian Upland. *Proceedings of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*. 2023;(8):20–27. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/eco1845>
22. State Standard 31958-2012. Water. Methods for determining the content of total and dissolved organic carbon (Introduced 2012.12.12. Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology No. 1907-st) [internet]. Available at: <https://base.garant.ru/71231976/> (accessed 25 March 2026). (In Russ.).
23. Sanitary Regulations and Norms 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans [internet]. Available at: https://base.garant.ru/400274954/#block_1000 (accessed 25 March 2025). (In Russ.).
24. Methodological guidelines for conducting research on test areas of the intensive monitoring network for assessing carbon reserves in forest ecosystems: geobotanical research, sampling of soil samples, and sampling of plant samples. Major Innovation Project «Unified National Monitoring System for Climate-Active Substances». Moscow: Isaev Centre for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences (CEPF RAS); 2024. (In Russ.).
25. Methodological guidelines for conducting research on sample plots of the intensive-level monitoring network for assessing carbon stocks in bog ecosystems: geobotanical studies, soil sampling, plant sampling. Major Innovation Project «Unified National Monitoring System for Climate-Active Substances». MIP SG. Khanty-Mansiysk; 2024. (In Russ.).
26. Methodological guidelines for assessing the input of dissolved organic carbon with atmospheric deposition. Major Innovation Project «Unified National Monitoring System for Climate-Active Substances». MIP SG. Moscow: Isaev Centre for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences (CEPF RAS); 2024. (In Russ.).

27. Methodological guidelines for sample preparation and conducting physicochemical analysis of soil and plant samples. Major Innovation Project «Unified National Monitoring System for Climate-Active Substances». MIP SG. Moscow: Isaev Centre for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences (CEPF RAS); 2024. (In Russ.).
28. Methodological guidelines for conducting chemical analysis of natural waters. Major Innovation Project «Unified National Monitoring System for Climate-Active Substances». MIP SG. Moscow: Isaev Centre for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences (CEPF RAS); 2024. (In Russ.).
29. Forest monitoring methodology under the international ICP Forests programme. Moscow: Isaev Centre for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences (CEPF RAS); 2008. (In Russ.).
30. State Standard 26423-85. Soils. Methods for determining specific electrical conductivity, pH, and residue of water extract [internet]. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294828/4294828015.pdf> (accessed 23 March 2025). (In Russ.).
31. Skogheim O.K. Rapport fra Arungenprosjektet. Ås-NLH-Report No. 2. Oslo: Norges landbrukshøgskole (NLH); 1979. (In Norway).
32. Sandimirov S.S., Kudryavtseva L.P., Dauval'ter V.A., Denisov D.B., Kosova A.L., Cherepanov A.A. Methods of ecological research of Arctic water bodies. Murmansk: MSTU Publishing; 2019. (In Russ.).
33. Sukhareva T.A., Ivanova E.A., Ershov V.V., Zenkova I.V., Korneykova, M.A., Shtabrovskaya I.M., Soshina A.S. Carbon and nitrogen content and reserves in terrestrial ecosystems of the Murmansk region. *Forest Science Issues*. 2023;6(2):125. (In Russ.). <https://doi.org/10.31509/2658-607x-202362-125>
34. Zhivov D.A., Sukhareva, T.A. Nitrogen and carbon reserves in the soils of spruce forests of the Murmansk region. *Bulletin of Novosibirsk State Water Transport University*. 2025;(4):84–100. (In Russ.). <https://doi.org/10.36906/2311-4444/25-4/07>
35. Orlov D.S., Biryukova O.N., Sukhanova N.I. Organic matter of soils of the Russian Federation. Moscow: Nauka Publ.; 1996. (In Russ.).
36. Bobkova K.S., Galenko E.P. (eds.). Native spruce forests of the North: biodiversity, structure, functions. St. Petersburg: Nauka Publ.; 2006. (In Russ.).
37. Lukina N., Kuznetsova A., Tikhonova E., Smirnov V., Danilova M., Gornov A., Tebenkova D., Knyazeva S., Bakhmet O., Kryshen A., Shashkov M. Linking forest vegetation and soil carbon stock in Northwestern Russia. *Forests*. 2020;11(9):979. <https://doi.org/10.3390/f11090979>
38. Scharlemann J.P.W., Tanner E.V.J., Hiederer R., Kapos V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*. 2014;5(1):81–91. <https://doi.org/10.4155/CMT.13.77>
39. Dymov A.A. Soil successions in boreal forests of the Komi Republic. Moscow: GEOS Publ.; 2020. (In Russ.).
40. Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A. Assessment of organic carbon stocks in forest soils at the regional scale. *Eurasian Soil Science*. 2020;53(3):339–348. <https://doi.org/10.1134/s1064229320030023>
41. Samsonova V.P., Meshalkina Yu.L., Dobrovolskaya V.A., Kondrashkina M.I., Dyad'kina S.E., Filippova O.I., Krotov D.G., Morozova T.M., Krasil'nikov P.V. Investigation of Uncertainty in Organic Carbon Stock Estimates on a Field Scale. 2023;56(11):1765–1775. <https://doi.org/10.1134/s106422932360183x>
42. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. Classification and diagnostics of Russian soils. Smolensk: Oikumena Publ.; 2004. (In Russ.).
43. Cherkinskii A.E., Chichagova O.A. Types of soil organoprofiles worldwide. In: *Global soil geography and soil-forming factors*. Collection of articles. Moscow; 1991, pp. 164–195. (In Russ.).
44. Pereverzev V.N. Soil formation on loose and crystalline rocks in Northern Fennoscandia. Apatity: Publishing House of the Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences; 2013. (In Russ.).
45. Denfeld B., Lupon A., Sponseller R., Laudon H., Karlsson J. Heterogeneous CO₂ and CH₄ patterns across space and time in a small boreal lake. *Inland Waters*. 2020;10(3):348–359. <https://doi.org/10.1080/20442041.2020.1787765>

46. Paerl H.W., Otten T.G. Blooms bite the hand that feeds them. *Science*. 2013;342(6157):433–434. <http://doi.org/10.1126/science.1245276>
47. Chupakova A.A., Chupakov A.V., Neverova N.V., Prasolov S.D., Zabelina S.A. Dissolved organic and inorganic carbon in different types of lakes in the boreal zone. *Regional Environmental Issues*. 2023;(6):49–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/1728-323X-2023-6-49-55>
48. Belkina N.A. Patterns of sedimentation and early diagenesis of bottom sediments in water bodies of the southeastern part of the Fennoscandian Shield [dissertation]. St. Petersburg; 2021. (In Russ.).
49. Sukhareva T.A., Ershov V.V. Carbon stocks in soils of northern taiga forests of the Murmansk region under regional background conditions and in the presence of aerotechnogenic pollution. Certificate of Database Registration RU 2024624518. Published 17.10.2024. (In Russ.).
50. Sukhareva T.A., Ivanova E.A., Ryabov N.S., Ershov V.V., Zhivov D.A. Carbon and nitrogen stocks and content in the phytomass of spruce forests in geochemically coupled landscapes (Murmansk region). Certificate of Database Registration RU 2025623969. Published 23.09.2025. (In Russ.).

Сведения об авторах

Сухарева Татьяна Алексеевна — кандидат биологических наук, заведующий лабораторией наземных экосистем, Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН.
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 14а.
Scopus ID: 55918629900
Researcher ID: J-1100-2018
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6451-3495>
SPIN-код: 3302-1130
Тел.: +7 (815) 557-97-79
E-mail: t.sukhareva@ksc.ru

Денисов Дмитрий Борисович — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории водных экосистем, Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН.
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 14а.
Scopus ID: 23011268200
Research ID: Q-3762-2018
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5403-5661>
SPIN-код: 7215-3063
Тел.: +7 (921) 286-83-24
E-mail: proffessuir@gmail.com

Живов Дмитрий Андреевич — ведущий инженер лаборатории наземных экосистем, Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН.
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 14а.
Researcher ID: KMY-5329-2024
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4670-0144>
SPIN-код: 7864-3354
Тел.: +7 (815) 557-97-79
E-mail: d.zhivov@ksc.ru

Information about the authors

Tatyana A. Sukhareva — Cand. Sci (Biology), Head of Laboratory of Terrestrial Ecosystems, Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences.
Russia, 184209, Murmansk region, Apatity, Akademgorodok, 14A.
Scopus ID: 55918629900
Researcher ID: J-1100-2018
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6451-3495>
SPIN-code: 3302-1130
Tel.: +7 (815) 557-97-79
E-mail: t.sukhareva@ksc.ru

Dmitrii B. Denisov — Cand. Sci. (Biology), Leading Researcher, Laboratory of Aquatic Ecosystems, Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences.
Russia, 184209, Murmansk region, Apatity, Akademgorodok, 14A.
Scopus ID: 23011268200
Research ID: Q-3762-2018
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5403-5661>
SPIN-code: 7215-3063
Tel.: +7 (921) 286-83-24
E-mail: proffessuir@gmail.com

Dmitry A. Zhivov — Leading Engineer. Laboratory of Terrestrial Ecosystems, Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences.
Russia, 184209, Murmansk region, Apatity, Akademgorodok, 14A.
Researcher ID: KMY-5329-2024
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4670-0144>
SPIN-code: 7864-3354
Tel.: +7 (815) 557-97-79
E-mail: d.zhivov@ksc.ru

Слуковский Захар Иванович — кандидат биологических наук, заведующий лабораторией геоэкологии и рационального природопользования Арктики, Институт проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН. Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 14а.
Scopus ID: 56728798800
Research ID N-1221-2016
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4238-1617>
SPIN-код: 6763-8074
Тел.: +7 (950) 893-39-63
E-mail: slukovsky87@gmail.com

Курбатов Евгений Александрович — директор Департамента экологической безопасности Кольской площадки АО «Кольская горно-металлургическая компания». Россия, 184507, Мурманская область, г. Мончегорск, территория Промплощадка КГМК.
Тел.: +7 (815) 366-22-52
E-mail: KurbatovEA@kolagmk.ru

Фадеев Антон Михайлович — начальник управления сопровождения надзорной деятельности и аудита Департамента экологической безопасности Кольской площадки АО «Кольская горно-металлургическая компания». Россия, 184507, Мурманская область, г. Мончегорск, территория Промплощадка КГМК.
Тел.: +7 (815) 367-79-98
E-mail: FadееvAM@kolagmk.ru

Бортник Анжелика Сергеевна — главный специалист управления сопровождения надзорной деятельности и аудита Департамента экологической безопасности Кольской площадки АО «Кольская горно-металлургическая компания». Россия, 184507, Мурманская область, г. Мончегорск, территория Промплощадка КГМК.
Тел.: +7 (815) 366-50-54
E-mail: BortnikAS@kolagmk.ru

Zakhar I. Slukovskii — Cand. Sci. (Biology), Head of Laboratory of Geoecology and Rational Nature Management of the Arctic, Institute of Industrial Ecology Problems of the North, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences. Russia, 184209, Murmansk region, Apatity, Akademgorodok, 14A.
Scopus ID: 56728798800
Research ID N-1221-2016
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4238-1617>
SPIN-code: 6763-8074
Tel.: +7 (950) 893-39-63
E-mail: slukovsky87@gmail.com

Evgeny A. Kurbatov — Director, Department of Environmental Safety of the Kola Site JSC “Kola Mining and Metallurgical Company”. Russia, 184507, Murmansk region, Monchegorsk, territory of the KMK Industrial Site.
Tel.: +7 (815) 366-22-52
E-mail: KurbatovEA@kolagmk.ru

Anton M. Fadeev — Head of Supervisory Activities and Audit Support Department Environmental Safety, Department of the Kola Site JSC “Kola Mining and Metallurgical Company”. Russia, 184507, Murmansk region, Monchegorsk, territory of the KMK Industrial Site
Tel.: +7 (815) 367-79-98
E-mail: FadееvAM@kolagmk.ru

Anzhelika S. Bortnik — Chief Specialist, Supervisory Activities and Audit Support, Department Environmental Safety Department of the Kola Site JSC “Kola Mining and Metallurgical Company”. Russia, 184507, Murmansk region, Monchegorsk, territory of the KMK Industrial Site.
Tel.: +7 (815) 366-50-54
E-mail: BortnikAS@kolagmk.ru

Вклад авторов

Сухарева Татьяна Алексеевна — постановка задачи, обоснование актуальности, структурирование статьи, подготовка основной части текста статьи, формулирование выводов и рекомендаций.

Денисов Дмитрий Борисович — обоснование актуальности, оценка содержания углерода в воде, подготовка основной части текста статьи, формулирование выводов и рекомендаций.

Живов Дмитрий Андреевич — сбор и анализ данных, оценка запасов углерода в почвах, оформление статьи.

Author contribution statement

Tatyana A. Sukhareva — conceptualization; justification of relevance; article structure; preparation of the main text; formulation of conclusions and recommendations.

Dmitrii B. Denisov — justification of relevance; assessment of carbon content in waters; preparation of the main text; formulation of conclusions and recommendations.

Dmitry A. Zhivov — data collection and analysis; assessment of soil carbon stocks; manuscript preparation.

Zakhar I. Slukovskii — data collection and analysis; assessment of carbon stocks in peat and bottom sediments.

Слуковский Захар Иванович — сбор и анализ данных, оценка запасов углерода в торфе и донных отложениях.

Курбатов Евгений Александрович — администрирование, существенный вклад в разработку концепции работы.

Фадеев Антон Михайлович — обоснование актуальности, анализ существующих методик.

Бортник Анжелика Сергеевна — сбор и анализ информации.

Evgeny A. Kurbatov — project administration; substantial contribution to conceptual development.

Anton M. Fadeev — justification of relevance; analysis of existing methodologies.

Anzhelika S. Bortnik — data collection and analysis.

Финансирование

Исследование выполнено Институтом проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН в рамках Договоров с АО «Кольская ГМК» № КГМК/1934-2024 от 19.09.2024 и № КГМК/841-2025 от 15.07.2025 по теме: «Оценка способности наземных и водных экосистем к депонированию углерода в районе расположения АО «Кольская ГМК», Важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджета углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6), тем государственных заданий ИППЭС КНЦ РАН (рег. № 125021402277-1, рег. № 125022102818-6, рег. № 124020100060-8).

Funding

The study was conducted by the Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, under contracts with JSC «Kola MMC» No. KGMK/1934-2024 (19.09.2024) and No. KGMK/841-2025 (15.07.2025) within the project “Assessment of the carbon sequestration capacity of terrestrial and aquatic ecosystems in the vicinity of JSC Kola MMC”. The work also contributes to the national innovation project “Development of a system for ground-based and remote monitoring of carbon pools and greenhouse gas fluxes in Russia, and establishment of a national accounting system for climate-active substances and carbon budgets in forests and other terrestrial ecosystems” (Reg. No. 123030300031-6) and to INEP KSC RAS state-assignment projects (Reg. Nos. 125021402277-1, 125022102818-6, 124020100060-8).

Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИППЭС КНЦ РАН за помощь в проведении полевых, камеральных и химико-аналитических исследований, а также инженеру лаборатории наземных экосистем И.М. Титовой за построение карт-схем расположения объектов исследования.

Acknowledgements

The authors thank the staff of INEP KSC RAS for their assistance with fieldwork, laboratory processing, and chemical-analytical measurements, and engineer I.M. Titova of the Terrestrial Ecosystems Laboratory for preparing the site-location maps.

УДК 599.735.31 (502.3)

ББК Е688.9

<https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-90-98>



Мониторинг и охрана популяции дикого северного оленя (*Rangifer tarandus tarandus*) в Лапландском заповеднике: состояние и перспективы восстановления в западной части Мурманской области

Алфертьев Н.Л. ✉, Чуева Н.В., Гилязов А.С.,
Вобликова Д.В., Кочеткова Т.Е.

ФГБУ «Лапландский государственный биосферный заповедник»,
г. Мончегорск, Россия

✉ alfertev@laplandzap.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования состояния западной популяции дикого северного оленя на территории Лапландского государственного природного биосферного заповедника и прилегающих к нему районов. Целью работы являлось уточнение условий и актуальности проведения мероприятий по восстановлению популяции на основе анализа современного состояния, оценки лимитирующих факторов и эффективности методов мониторинга. В ходе исследования проведен авиаучет, проанализированы многолетние данные из «Летописи природы Лапландского заповедника», материалы фотомониторинга и официальная статистика по численности хищников. Результаты исследования могут быть использованы при разработке региональных программ сохранения биоразнообразия, планировании природоохранных мероприятий и совершенствовании системы мониторинга охотничьих ресурсов Мурманской области.

Ключевые слова: дикий северный олень, мониторинг, ООПТ, заповедник, редкий вид, волк, хищники, Красная книга

Конфликт интересов: авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Алфертьев Н.Л., Чуева Н.В., Гилязов А.С., Вобликова Д.В., Кочеткова Т.Е. Мониторинг и охрана популяции дикого северного оленя (*Rangifer tarandus tarandus*) в Лапландском заповеднике: состояние и перспективы восстановления в западной части Мурманской области. Арктика и инновации. 2026;4(2):90–98. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-90-98>

Monitoring and conservation of the wild reindeer (*Rangifer tarandus tarandus*) in the Lapland Nature Reserve: Current status and prospects for recovery in the western part of the Murmansk Oblast, Russia

Nikolai L. Alfertiiev✉, Natalya V. Chueva, Aleksei S. Gilyazov, Daria V. Voblikova, Tatyana Y. Kochetkova

Lapland Nature Reserve, Monchegorsk, Russia

✉alfertev@laplandzap.ru

Abstract. This study assesses the status of the western population of wild reindeer within the Lapland Nature Reserve (Murmansk Oblast, Russia) and adjacent areas. The aim was to clarify the conditions and current relevance of population recovery measures by analyzing the present state of the population, identifying limiting factors, and evaluating the effectiveness of existing monitoring approaches. The research combined aerial surveys with long-term records from the *Chronicle of Nature of the Lapland Nature Reserve*, photographic monitoring data, and official statistics on predator abundance. The findings support the development of regional biodiversity conservation programs, inform the planning of conservation interventions, and strengthen the wildlife monitoring system of the Murmansk Oblast.

Keywords: wild reindeer, population monitoring, protected areas, nature reserve, rare species, wolf, predators, IUCN Red List

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Alfertiiev N.L., Chueva N.V., Gilyazov A.S., Voblikova D.V., Kochetkova T.E. Monitoring and conservation of the wild reindeer (*Rangifer tarandus tarandus*) in the Lapland Nature Reserve: Current status and prospects for recovery in the western part of the Murmansk Oblast, Russia *Arctic and Innovation*. 2026;4(2):90–98. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-90-98>

Введение

Дикий северный олень является ключевым видом арктических и субарктических экосистем, индикатором их состояния и важнейшим элементом природного и культурного наследия Кольского Севера. Популяция этого вида имеет драматическую историю, связанную с неконтролируемым промыслом в XVIII–XX вв., конкуренцией с домашним оленеводством и антропогенной трансформацией местообитаний, включая разделение единой популяции на восточную и западную из-за строительства железнодорожного полотна в XX в. [6]. Обе популяции сегодня включены в Красные книги России и Мурманской области с категорией редкости 3 — уязвимый вид.

Создание Лапландского заповедника в 1930 году позволило предотвратить исчезновение вида в пределах обитания западной популяции.

Однако в последние десятилетия нарастает комплекс новых угроз, среди которых особое место занимает резкий рост численности волка как на территории Лапландского заповедника, так и в Мурманской области в целом.

В связи с этим актуальность комплексного исследования состояния популяции и совершенствования системы мониторинга не вызывает сомнений.

Целью исследования является уточнение условий и актуальности проведения мероприятий по восстановлению популяции дикого северного оленя в западной части Мурманской области на основе комплексного анализа современного состояния популяции, оценки лимитирующих факторов и эффективности методов мониторинга.

Таким образом, основными задачами исследования является оценка состояния западной популяции дикого северного оленя Мурманской области и оценка эффективности методов учета вида.

Материалы и методы

Исследование проводилось в рамках выполнения комплексной работы по мониторингу западной популяции дикого северного оленя, осуществляемой с 2021 года. Под комплексным мониторингом в настоящей работе понимается совокупность данных, получаемых при наземных учетах, с применением беспилотных авиационных систем, фотоловушек, а также при анализе визуальных встреч и иных подтвержденных наблюдений. Мероприятия проводятся в течение года, однако основной объем учетных работ приходится на зимний период, соответствующий времени максимальной стадности вида.

Результаты исследования

Современное состояние западной популяции дикого северного оленя

От создания Лапландского заповедника, когда насчитывали около 100 особей западной популяции дикого северного оленя, к 1967 году численность западной популя-

ции дикого оленя достигла исторического максимума — 12 640 особей (рис. 1). Этому способствовали не только охранные меры, но и массовый отстрел волков на территории области [6, 7].

Для предотвращения катастрофических последствий как для популяции, так и для экосистемы, с 1968 до 1974 г. был организован официально разрешенный промысел вне границы заповедника. В результате за 5 сезонов было изъято около 6 тысяч особей. Уменьшение объемов кормовых стадий и браконьерство усугубили ситуацию. В итоге к 1979 г. популяция достигла критического минимума — около 100 особей. Восстановление проходило медленно, и стабильный прирост был отмечен лишь к 1988 г. [3, 7].

Сегодня на основании результатов комплексного мониторинга на территории Лапландского заповедника и прилегающих территорий численность популяции дикого северного оленя оценивается около 1000 особей.

Лимитирующие факторы западной популяции дикого северного оленя

Анализ лимитирующих факторов для западной популяции дикого северного оленя на сегодня целесообразно проводить

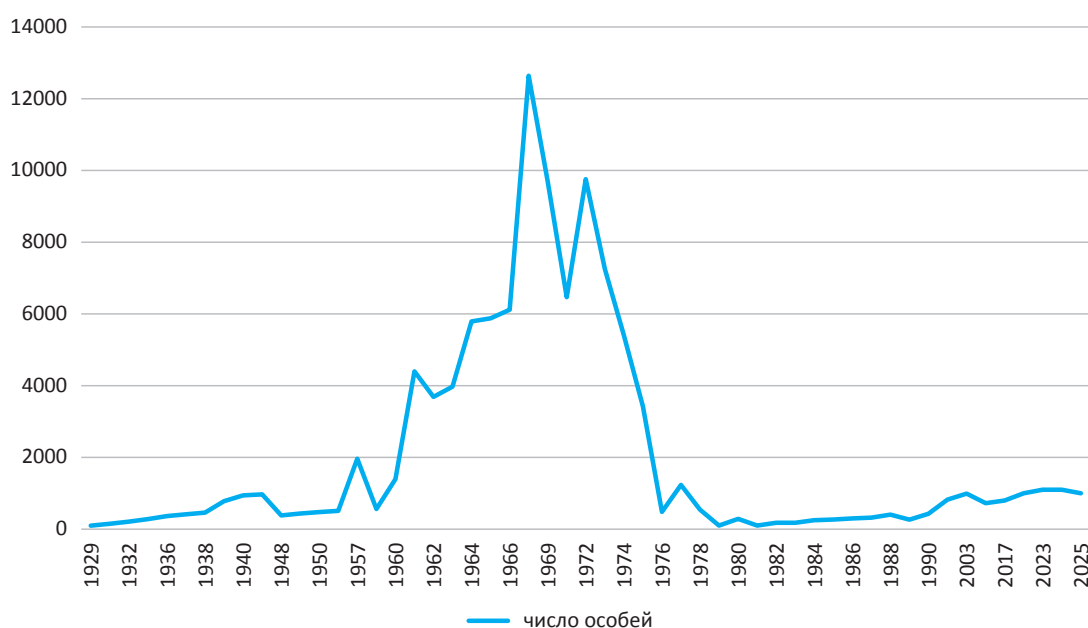


Рис. 1. Численность западной популяции диких северных оленей Лапландского заповедника и его окрестностей по годам [2]

Fig. 1. Temporal dynamics of the population size of the western wild reindeer in the Lapland Nature Reserve and surrounding areas [2]

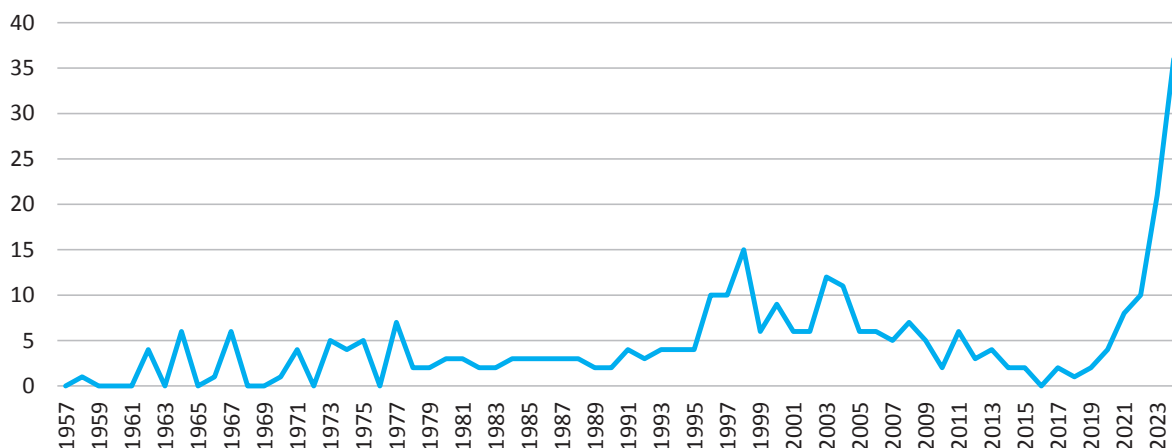


Рис. 2. Динамика численности волка на территории Лапландского заповедника [2]

Fig. 2. Temporal dynamics of wolf population size in the Lapland Nature Reserve [2]

с учетом пространственного разделения: на территории Лапландского заповедника и на территории его окрестностей.

На территории заповедника ключевым лимитирующим фактором в настоящий момент выступает хищничество, обусловленное резким увеличением численности волка (*Canis lupus*). По данным «Летописи природы» с 1958 года и результатов мониторинга 2024–2025 гг., численность волка в заповеднике достигла исторического максимума — около 36 особей. Давление волка привело к распаду стад оленей на мелкие группы (до 30 особей и менее), переходу части животных к нетипичному для зимнего периода мелкостадному образу жизни и резкому росту числа зафиксированных жертв: с 20 животных за период с 1997 по 2022 г. до 19 за 3 года (2023–2025 гг.). В силу невысокой численности западной популяции дикого северного оленя такое резкое увеличение количества хищника представляет серьезную угрозу. Следует учитывать, что зафиксированные случаи гибели животных отражают только известные факты, выявленные в ходе мониторинга. Следовательно, фактические значения, вероятно, выше зарегистрированных. В этом смысле имеющиеся данные следует рассматривать как минимальные подтвержденные оценки.

Другие крупные хищники, такие как бурый медведь (*Ursus arctos*) и россомаха (*Gulo gulo*), также оказывают влияние на популяцию оленя, однако их численность остается стабильной, а объемы добычи существенно уступают показателям волка. В сложившихся экологических условиях именно волк

выступает основным лимитирующим фактором для западной популяции дикого северного оленя.

Иные факторы, ограничивающие численность оленей (эпизоотии, браконьерство, хищничество со стороны медведя и россомахи), на территории ООПТ имеют вторичное значение.

В окрестностях заповедника к основному лимитирующему фактору (хищничество) добавляются прямое антропогенное воздействие, поскольку значительная часть оленей регулярно выходит за пределы охраняемой зоны, они становятся легкодоступной добычей как для хищников, так и для браконьеров.

- Браконьерство. Незаконная добыча оленей, особенно в районах наличия зимних кормовых станций, остается значимой проблемой. Ситуация усугубляется широким использованием снегоходной техники, позволяющей браконьерам преследовать животных в труднодоступных районах. Случаи незаконной охоты выявить и пресечь вне границ заповедника крайне сложно [4].
- Фактор беспокойства. Активная рекреационная деятельность (туризм, рыболовство, использование квадроциклов и снегоходов) в местах обитания оленя приводит к стрессу, нарушению поведения животных и вынужденному оставлению пригодных местообитаний [4].
- Хищничество (волк). Рост численности волка зафиксирован на региональном уровне. По данным Министерства природных

ресурсов, зафиксировано увеличение популяции волка за пять лет со 128 до 424 особей, что в равной степени касается и территорий, прилегающих к заповеднику [1].

Следует подчеркнуть, что на текущий момент состояние зимних кормовых станций, выступающих в роли основного лимитирующего фактора, не оценивается как критическое для западной популяции дикого северного оленя.

Таким образом, за пределами заповедника лимитирующее воздействие на популяции оказывает комплекс факторов, включающий прямое антропогенное давление (браконьерство, фактор беспокойства) и интенсивное хищничество.

Анализ методов мониторинга

Авиаучет. Анализ данного подхода проведен на опыте, полученном в ходе обследования территории Лапландского заповедника и прилегающих районов в период с 14 по 16 мая 2025 г. Было зафиксировано около 120 особей дикого северного оленя. Популяция характеризуется высокой степенью фрагментации: животные распределены мелкими группами до 30 особей, также отмечены единичные особи. Часть популяции держится за пределами охраняемой территории заповедника, что существенно повышает их уязвимость перед браконьерством и другими антропогенными факторами беспокойства [4].

Необходимо отметить, что осуществление учета происходило за пределами рекомендованных методикой сроков (март – апрель), а именно в период после распада стад. На момент проведения работ основная часть популяции оленя была сосредоточена в лесной зоне малыми группами и отдельными особями, что связано с наступлением сезона отела. Данное обстоятельство оказало негативное влияние на полноту и точность полученных учетных данных.

В ходе авиаобследования зафиксированы множественные следы антропогенного присутствия (в частности, следы от квадроциклов) вне границ заповедника, особенно в районе Волчьих тундр, где также отмечены следы присутствия оленей [4].

Проведенный авиаучет выявил ряд объективных факторов, существенно снижающих его эффективность и достоверность:

- Ограничения воздушного пространства. Полеты над территорией Мурманской области, включая заповедник и его окрестности, сопряжены с жесткими ограничениями, требующими длительных согласований и ограничивающие маневренность.
- Поздние сроки проведения. Учет был выполнен в период активного снеготаяния, что привело к пестроте снежного покрова и сложности определения оленей на местности, а также с наступлением периода отела, что совпало с естественным распадом стад на мелкие группы и одиночных животных, что также затруднило их обнаружение и подсчет. Совокупность этих факторов приводит к тому, что часть животных может быть не учтена, а итоговые данные оказываются заниженными и менее достоверными.
- Распад стад из-за беспокойства волками. Массовое давление хищника привело к нарушению традиционной структуры стад, что снизило эффективность визуального учета.
- Технические ограничения примененного пилотируемого воздушного судна. Это существенно повлияло на результаты учета. К числу основных ограничений относились невозможность проведения площадных учетов с использованием фотооборудования, а также невозможность безопасного выполнения полетов над горной местностью при наличии восходящих потоков воздуха.

Таким образом, на основании проведенного авиаучета на пилотируемом воздушном судне в указанных условиях не позволило получить объективную и полную картину состояния популяции.

При современном режиме использования воздушного пространства требования безопасности существенно ограничивают проведение авиационных работ. Часть выявленных ограничений связана с не зависящими от учетчиков причинами, из-за чего учет был проведен в неблагоприятный период. Эти ограничения могут быть исключены при более раннем планировании.

Технические ограничения примененного воздушного судна частично компенсируются использованием специализированных летательных аппаратов и фотооборудования, однако это значительно увеличивает стоимость работ. В целом классический авиаучет остается информативным для оценки численности и распределения стад, но в современных условиях не всегда является экономически и организационно оправданным.

Комплексный наземный учет. В настоящее время комплексный наземный учет является основным методом мониторинга дикого северного оленя в Лапландском заповеднике. Он включает данные снегоходных маршрутов с применением БПЛА без тепловизора, сведения, полученные при охранных мероприятиях, материалы фотоловушек, визуальные встречи животных и подтвержденные сообщения граждан, с территорий за пределами заповедника.

Основными источниками данных являются следы жизнедеятельности, фотоловушки, визуальные наблюдения и сообщения сторонних наблюдателей. Следы позволяют оценивать пространственное распределение вида, но дают субъективные оценки численности. Фотоловушки фиксируют присутствие животных, структуру отдельных стад и особенности их перемещения, однако пока не позволяют напрямую рассчитать общую численность оленя на территории заповедника. Визуальные встречи, особенно при наличии фотоматериалов, дают наиболее объективные сведения о числе особей в конкретной группе, но такие наблюдения относительно редки. Сообщения граждан полезны для выявления мест пребывания животных вне заповедника, однако требуют проверки.

Основным ограничением комплексного наземного учета является асинхронность мероприятий. Метод информативен для анализа зимнего распределения стад, но ограниченно применим для точной оценки численности и структуры популяции. Повышение синхронности работ требует увеличения финансовых, технических и кадровых ресурсов. Поэтому данные комплексного наземного учета позволяют оценивать относительную численность, общее распределение и структуру отдельных стад, но не обеспечивают полноценной оценки абсолютной численности популяции.

Авиаучет с применением беспилотных авиационных систем самолетного типа.

Авиаучет с применением БАС самолетного типа является одним из наиболее перспективных методов мониторинга дикого северного оленя в условиях Лапландского заповедника. Он позволяет проводить почти синхронный учет на значительных площадях и получать значения численности, близкие к абсолютным, с относительно небольшой погрешностью. Кроме того, в отличие от классического авиаучета, этот метод может применяться многократно в течение года, что повышает воспроизводимость наблюдений и позволяет отслеживать сезонную динамику численности и распределения животных.

Вместе с тем применение БАС ограничивается рядом факторов. Сохраняются требования безопасности воздушного пространства, однако в ряде случаев регулирование полетов БАС организационно проще, поскольку задаются площадь работ и предельная высота полета. Это позволяет проводить как площадные учеты, так и обследование мест концентрации животных. Дополнительными ограничениями являются необходимость квалифицированных операторов, технические параметры БАС, включая дальность полета, устойчивость связи, допустимую скорость ветра и продолжительность работы, а также высокая стоимость оборудования.

Таким образом, авиаучет с применением БАС самолетного типа является одним из наиболее точных и воспроизводимых методов учета дикого северного оленя, однако его широкое применение пока ограничивается нормативными, кадровыми, техническими и финансовыми факторами.

Выводы

По данным комплексного мониторинга западной популяции дикого северного оленя на территории Лапландского заповедника и его окрестностях обитает около 1000 особей, распределенных в зимний период относительно мелкими фрагментированными группами. Часть животных обитает за пределами Лапландского заповедника, что повышает их уязвимость перед браконьерством и факторами беспокойства.

Проведенный анализ методов учета подтвердил необходимость перехода к современным

методам мониторинга, для получения более точной и актуальной информации о популяции.

Ключевым лимитирующим фактором на современном этапе выступает резкий рост численности волка. За последние пять лет популяция волка в Мурманской области увеличилась почти втрое (со 128 до 424 особей), а в Лапландском заповеднике достигла исторического максимума. Это привело к распаду стад оленей, переходу животных к нетипичному для зимнего периода мелкостадному образу жизни и резкому росту числа жертв (19 жертв за 2023–2025 гг. против 20 за предыдущие 24 года). В силу небольшой численности оленя такое резкое и прогрессирующее увеличение популяции волка представляет для нее серьезную угрозу. Другие хищники (бурый медведь, россомаха) также оказывают влияние, однако их численность стабильна, а объемы добычи существенно уступают волчьим.

Вне пределов заповедника основными угрозами являются браконьерство и фактор беспокойства (использование квадроциклов, снегоходов, рекреационная деятельность).

Практическая значимость работы заключается в разработке следующих рекомендаций:

1. Организовать регулярные учеты с использованием беспилотных летательных аппаратов, оснащенных тепловизорами.
2. Организовывать учеты в зимний период до распада стад. Параллельно проводить наземные обследования на снегоходах в горных тундрах с фотофиксацией, а также использовать сеть фотоловушек для опре-

деления численности вида, его распределения, структуры стад и т.д.

3. Организовать систематический сбор данных о численности волка и его воздействии на популяцию оленя с использованием фотоловушек, БПЛА и наземных наблюдений.
4. Усилить охрану местообитаний за пределами заповедника, организовав систему мониторинга и охрану ключевых местообитаний западной популяции для снижения влияния браконьерства и фактора беспокойства.

При этом преждевременно начинать документальную работу по обоснованию создания новых особо охраняемых природных территорий для увеличения численности западной популяции Мурманской области ввиду недостаточности данных, в том числе о состоянии зимних кормовых стаций.

Теоретическая значимость исследования заключается в систематизации данных по современному состоянию западной популяции дикого северного оленя, выявлении ключевых лимитирующих факторов и обосновании необходимости перехода к новым методам мониторинга. Результаты вносят вклад в понимание механизмов выживания вида в условиях роста численности хищника и антропогенного пресса.

Полученные материалы могут быть применены при разработке региональных программ сохранения биоразнообразия Мурманской области, планировании природоохранных мероприятий Лапландского заповедника, а также для совершенствования системы мониторинга охотничьих ресурсов и обоснования природоохранных решений на региональном и федеральном уровнях.

Литература

1. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2024 году. Мурманск: Министерство природных ресурсов, экологии и рыбного хозяйства Мурманской области; 2025.
2. Летопись природы Лапландского государственного природного биосферного заповедника 1958–2024 гг. // Рукопись. Архив Лапландского заповедника. Мончегорск
3. Макарова О.А. Северный олень европейский (дикий). В: Константинова Н.А., Корякин А.С., Макарова О.А., Бианки В.В. (ред.). Красная книга Мурманской области. Кемерово: Азия-принт; 2014, с. 568–569.

4. Алфертьев Н.Л. (отв. исполн.). Комплексная проработка вопроса сохранения и мониторинга популяции дикого северного оленя в границах его ареала обитания в пределах западной части Мурманской области. Отчёт по договору с АО «Кольская горно-металлургическая компания» № КГМК/454-2025 от 25 марта 2025 г. Мончегорск; 2025.
5. Семёнов-Тян-Шанский О.И. Лапландский государственный заповедник. Мурманск: Мурманское книжное издательство; 1960.
6. Семёнов-Тян-Шанский О.И. Лапландский заповедник. Мурманск: Мурманское книжное издательство; 1975.
7. Семёнов-Тян-Шанский О.И. Северный олень. Москва: Наука; 1977.

References

1. Report on the state and environmental protection of the Murmansk Region in 2024. Murmansk: Ministry of Natural Resources, Ecology and Fisheries of the Murmansk Region; 2025. (In Russ.).
2. Chronicle of the nature of the Lapland State Natural Biosphere Reserve 1958-2024. // Manuscript. Archive of the Lapland Nature Reserve. Monchegorsk
3. Makarova O.N. European Reindeer (wild). In: Red data Book of the Murmansk region. Kemerovo: Asia-print Publ.; 2014, pp. 568–569. (In Russ.).
4. Alfertiev N.L. (Responsible Executive). Comprehensive study of the issue of conservation and monitoring of the wild reindeer population within the boundaries of its habitat within the western part of the Murmansk region. Report on the agreement with JSC Kola Mining and Metallurgical Company No. KGMK/454-2025 dated March 25, 2025. Monchegorsk; 2025. (In Russ.).
5. Semenov-Tyan-Shansky O.I. Lapland State Reserve. Murmansk: Murmansk Book Publishing House; 1960. (In Russ.).
6. Semenov-Tyan-Shansky O.I. Lapland State Reserve. Murmansk: Murmansk Book Publishing House; 1975. (In Russ.).
7. Semenov-Tyan-Shansky O.I. The Northern Deer. Moscow: Nauka Publ.; 1977. (In Russ.).

Сведения об авторах

Алфертьев Николай Леонидович — зам. директора по научной работе ФГБУ «Лапландский государственный биосферный заповедник».
Россия, 184506, Мурманская область, г. Мончегорск, Зеленый пер., 8.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3108-1728>
Тел.: +7 (921) 034-70-89
E-mail: alfertev@laplandzap.ru

Чуева Наталья Владимировна — старший научный сотрудник ФГБУ «Лапландский государственный биосферный заповедник».
Россия, 184506, Мурманская область, г. Мончегорск, Зеленый пер., 8.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2090-0965>
E-mail: chueva@laplandzap.ru

Гилязов Алекс Сабирович — старший научный сотрудник ФГБУ «Лапландский государственный биосферный заповедник».
Россия, 184506, Мурманская область, г. Мончегорск, Зеленый пер., 8.
E-mail: alex@laplandzap.ru

Information about the authors

Nikolai L. Alfertiev — Deputy Director of Research, Lapland Nature Reserve.
Russia, 184506, Murmansk Oblast, Monchegorsk, Zeleny lane, 8.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3108-1728>
Tel.: +7 (921) 034-70-89
E-mail: alfertev@laplandzap.ru

Natalya V. Chueva — Senior Researcher, Lapland Nature Reserve.
Russia, 184506, Murmansk Oblast, Monchegorsk, Zeleny lane, 8.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2090-0965>
E-mail: chueva@laplandzap.ru

Aleksei S. Gilyazov — Senior Researcher, Lapland Nature Reserve.
Russia, 184506, Murmansk Oblast, Monchegorsk, Zeleny lane, 8.
E-mail: alex@laplandzap.ru

Вобликова Дарья Васильевна — научный сотрудник ФГБУ «Лапландский государственный биосферный заповедник».

Россия, 184506, Мурманская область, г. Мончегорск, Зеленый пер., 8.

Тел.: +7 (911) 348-06-23

E-mail: vdv@laplandzap.ru

Кочеткова Татьяна Евгеньевна — научный сотрудник ФГБУ «Лапландский государственный биосферный заповедник».

Россия, 184506, Мурманская область, г. Мончегорск, Зеленый пер., 8.

E-mail: Green-shock@yandex.ru

Daria V. Voblikova — Researcher, Lapland Nature, Russia, 184506, Murmansk Oblast, Monchegorsk, Zeleny lane, 8.

Tel.: +7 (911) 348-06-23

E-mail: vdv@laplandzap.ru

Tatyana Y. Kochetkova — Researcher, Lapland Nature Reserve.

Russia, 184506, Murmansk Oblast, Monchegorsk, Zeleny lane, 8.

E-mail: Green-shock@yandex.ru

Вклад авторов

Алфертьев Николай Леонидович — сбор, анализ, интерпретация полученных данных, окончательная доработка версии работы, существенный вклад в разработку концепции работы.

Чуева Наталья Владимировна — сбор, анализ, интерпретация полученных данных, окончательная доработка версии работы.

Гилязов Алекс Сабирович — сбор, анализ, интерпретация полученных данных.

Вобликова Дарья Васильевна — интерпретация полученных данных, написание статьи и окончательная доработка версии работы, которая будет направлена на рассмотрение возможности опубликования.

Кочеткова Татьяна Евгеньевна — сбор, анализ, интерпретация полученных данных.

Author contribution statement

Nikolai L. Alfertiev — conceptualization; data curation; formal analysis; investigation; writing — reviewing and editing; project administration.

Natalya V. Chueva — data curation; formal analysis; investigation; writing — reviewing and editing.

Aleksei S. Gilyazov — data curation; formal analysis; investigation.

Daria V. Voblikova — investigation; writing — original draft; writing — reviewing and editing.

Tatyana Y. Kochetkova — data curation; formal analysis; investigation.

Благодарности

Благодарим за поддержку АО «Кольская ГМК» за помощь в реализации многолетнего комплексного мониторинга.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the Kola Mining and Metallurgical Company (Kola Site, Nor Nickel Group) for supporting the long-term integrated monitoring program.

УДК 57.084.2 (574.52)

ББК 28.688.2

<https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-99-108>



Сохранение и восстановление популяции европейской жемчужницы в Арктической зоне России (Мурманская область)

Ефремов Д.А.¹, Иешко Е.П.¹, Поликарпова Н.В.²

¹ Институт биологии ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия

² ФГБУ «Государственный заповедник «Пасвик»», Никель, Россия

[✉ denisefremov@list.ru](mailto:denisefremov@list.ru)

Аннотация. Представлен результат научной работы по апробации технологии реинтродукции жемчужницы европейской в бассейне реки Паз. Колония жемчужницы в ручье Машъйоки с высокой плотностью — до 100 экз. на 1 м² — стала донорской, из нее в 2024 г. изъяли 200 живых раковин и перевезли в ручей Каскамайоки на территории заповедника «Пасвик». Результатом работы стало создание новой колонии европейской жемчужницы на участках с высокой плотностью кумжи разных возрастных групп, служащей хозяином для паразитологической стадии личинок жемчужницы. Также представлены результаты мониторинга состояния новой колонии жемчужницы, проведенного в 2025 г. после одной зимовки. Определено удовлетворительное состояние моллюсков, обнаружена лишь одна раковина жемчужницы, предположительно погибшая в ходе механического повреждения (возможно, лось, перешедший ручей). Проведен паразитологический анализ молоди кумжи, обитающей на участках высадки жемчужницы в ручье Каскамайоки, глосидиев обнаружить на жабрах кумжи не удалось.

Ключевые слова: жемчужница европейская, реинтродукция моллюсков, Каскамайоки, Паз, кумжа, двустворчатые моллюски

Конфликт интересов: авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Ефремов Д.А., Иешко Е.П., Поликарпова Н.В. Сохранение и восстановление популяции европейской жемчужницы в Арктической зоне России (Мурманская область). *Арктика и инновации*. 2026;4(2):99–108. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-99-108>

Preservation and restoration of the European pearl mussel population in the Arctic region of Russia (Murmansk Oblast)

Denis A. Efremov¹, Yevgeniy P. Ieshko¹,
Natal'ya V. Polikarpova²

¹ Institute of Biology, the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Karelia, Russia

² Pasvik Nature Reserve, Nikel, Russia

[✉ denisefremov@list.ru](mailto:denisefremov@list.ru)

Abstract. This article discusses the research findings on the testing of a technology for the reintroduction of the European pearl mussel in the Paz River basin. In 2024, 200 live pearl mussels were collected from a donor colony in the Mashjoki Stream, which had a high density of up to 100 individuals per square meter, and then transported to the Kaskamojoki Stream at the Pasvik Nature Reserve. A new European pearl mussel colony was established in areas with a high density of brown trout of various ages, which host the parasitic stage of pearl mussel larvae. Additionally, the results of the monitoring of the new pearl mussel colony are presented. The monitoring was conducted one winter later, in 2025. Mollusks were found to be in satisfactory condition; only one pearl mussel shell with mechanical damage was discovered, which was presumably caused by a moose crossing the stream. A parasitological analysis was conducted on juvenile brown trout inhabiting the areas where pearl mussels were released into the Kaskamojoki Stream; no glochidia were found on the gills of the brown trout.

Keywords: European pearl mussel, mollusk reintroduction, Kaskamojoki, the Paz River, brown trout, bivalves

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interests.

For citation: Efremov D.A., Ieshko Ye.P., Polikarpova N.V. Preservation and restoration of the European pearl mussel population in the Arctic region of Russia (Murmansk Oblast). *Arctic and Innovation*. 2026;4(2):99–108. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-99-108>

Введение

Мониторинг состояния озерно-речных систем на европейском Севере России и оценка влияния на них антропогенных факторов — одна из актуальных задач современных исследований. Состояние и численность рыб, водных беспозвоночных, особенно редких видов, находящихся на грани исчезновения, являются надежным экологическим тестом благополучия северных озерно-речных экосистем. Особую роль в сохранении видового разнообразия водных экосистем выполняют особо охраняемые природные территории (заповедники, национальные парки и др.).

Река Паз относится к одной из крупных речных систем Кольского полуострова. Протекает по территориям Финляндии, России (Печенгский муниципальный округ) и Норвегии. Длина — 117 км, площадь водосборного бассейна — 18 320 км². Исток реки расположен на выходе из оз. Инариярви на высоте 118 м над уровнем моря, протекает через озера Гренсеватн, Хевоскосское водохранилище, Хеюхенъярви, Воуватусъярви, Боссояврре, Скугватн, Сальмиярви, Контиоярви, Клистерватн и Фоссеватн, образуя обширную долину. Крупнейший приток — Наутсийоки. Впадает в Варангер-фьорд (Варяжский залив) Баренцева моря. На реке построен каскад из 7 гидроэлектростанций. На реке развита ловля семги, на участке до плотины Борисоглеб-

ский. Питание в основном снеговое и дождевое.

Несмотря на наличие 7 плотин ГЭС, нарушающих миграционный путь анадромных видов рыб, на всех порогах исследуемых рек сохраняется нерест кумжи. В ходе научной работы 2021–2023 гг. нами был обследован ряд правобережных притоков, среди которых был приток, вытекающий из озера Машъярви, ручей мы условно назвали Машъюки, в котором на участке около 300 метров присутствует крупная колония жемчужницы и воспроизводится кумжа. Стало очевидно, что моллюски находятся в сравнительно стесненном положении и изъятие части раковин не нанесет ущерба. В то же время ряд притоков, сходных по гидрологическим условиям, сохранял нерест кумжи в достаточном количестве, но при этом моллюски в них отсутствовали. В связи с краснокнижным статусом вида и опираясь на зарубежный и отечественный опыт реинтродукции жемчужницы [3, 6, 8], было принято решение провести эксперимент по реинтродукции жемчужницы в арктических условиях Мурманской области. В границах заповедника «Пасвик» был обследован ряд притоков реки Паз, среди которых наиболее подходящим оказался ручей Каскамайоки, протекающий у подножия одноименной горы. Ручей по ряду признаков потенциально пригоден для обитания и воспроизводства жемчужницы, вытекает из озера, обладает подходящими глубинами

и не пересыхает в летнюю и зимнюю межень. Одним из определяющих факторов выбора ручья стал высокий фактический запас молодежи кумжи, присутствие на участках всех возрастных групп, свидетельствующих о ежегодном стабильном нересте этого вида рыб.

Материалы и методы

Бонитировка и паспортизация рек. Метод использовался для определения характеристик нерестово-выростного фонда в притоках реки Паз. В первую очередь выявляли участки русла реки, которые по комплексу характеристик (небольшие глубины, повышенные скорости течения, галечно-каменистые грунты) подходили для нереста производителей и обитания молодежи лосося. Длину и ширину участков определяли визуально, оценивали их площадь. На отдельных участках после визуального измерения использовали мерный шнур или оптический дальномер и определяли погрешность визуальных измерений для последующей корректировки полученных данных. По возможности в русле одной реки или в одном речном бассейне оценка фонда НВУ должна проводиться одним оператором и помощниками. В целом это снижало возможные ошибки [2].

В процессе маршрутной съемки выполняли сопутствующие наблюдения. Измерительным шестом определялись глубины. На отдельных участках поплавковым методом измеряли скорость течения у поверхности воды. По 5-балльной шкале или фотоспособом оценивали фракционный состав грунтов. На схеме отмечали истинную протяженность и порядок чередования в русле плесовых участков, перекатов, порогов и отмелевых кос, а также наличие нерестовых проток.

Метод подводных наблюдений в водотоках осуществляли, используя легководолазный комплект и фотовидеокамеру Nikon COOLPIX A120. Наблюдали за расселением молодежи, перемещением рыб, за моллюсками. Известно, что подводный способ наблюдений позволяет получить точные и надежные данные [5, 7, 9]. На некоторых участках дно реки обследовали с применением акваскопа (производство Италия), последовательно осматривая участки реки в поисках жемчужницы и молодежи лососевых видов рыб. В случае их обнаружения в дневник заносились

данные о факте обнаружения того или иного вида без оценки возрастной структуры и плотностей распределения.

Распределение и учет численности рыб осуществляли электромагнитным методом, применялся электромагнитный аппарат для учета молодежи лососевых видов рыб FA-2 (Норвегия) в сочетании с сачками 15 и 40 см в диаметре с делью ячейки 5 мм, в том числе для сбора рыб с площадями обследуемых биотопов. Известно, что при трехразовом облове изымается около 97 % рыб [10, 4]. В нашем исследовании с помощью этого метода регистрировалась численность рыб, их распределение по площади НВУ, возрастной состав. Производился отлов молодежи кумжи для паразитологических исследований. При лове также учитывались сопутствующие виды рыб. В некоторых случаях для ихтиологических исследований отбиралась репрезентативная проба мальков лосося или кумжи разных возрастных групп. Лов рыбы в 2025 г. осуществляли по разрешению Росрыболовства № 5120250317134.

В реке Машъйоки в декабре 2024 г. были отловлены моллюски в количестве 200 шт. по разрешению № P027-00113-77/01570831, выданному 28.11.2024 г. в Балтийско-Арктическом межрегиональном управлении Росприроднадзора. Лов осуществляли руками, в водолазном гидрокостюме. Моллюсков поместили в емкость 30 л, на дно которой и вдоль стенок уложили поролон, предварительно пропитав его водой из реки (рис. 1). Пересадку осуществляли при температуре воды +2 °С. В ходе перемещения изменение температуры в емкости с моллюсками не превысило 1 °С.

Сбор и обработка паразитологического материала в 2025 г. проводились стандартными методами [1]. Все отловленные особи рыб (20 экз. молодежи кумжи) обследованы методом неполного паразитологического вскрытия. Материал просматривали под стереомикроскопом LOMOMSP-2 в диапазоне увеличений от 7 до 45×. Исследование встречаемости гложидиев пресноводной жемчужницы *M. margaritifera* на жабрах молодежи кумжи дает важную информацию, позволяющую оценить успешность размножения обнаруженных колоний жемчужницы.



Рис. 1. Ручей Машъйоки (бассейн Баренцева моря), отлов моллюсков (Д.А. Ефремов)

Fig. 1. The Mashjoki Stream (Barents Sea basin), mollusk harvest (photos taken by D.A. Efremov)

Результаты и обсуждение

Река Каскамайоки берет начало в озере Каскамаярви, что, вероятно, обеспечивает стабильный ток воды в реке и исключает возможность обсыхания ручья в зимнюю межень. Впадает в бьеф водохранилища на реке Паз между плотинами Скогфос внизу и Хестефоссен наверху. Протяженность ручья — 1,7 км, в нем короткие перекаты и пороги сменяются протяженными плесами. Грунт на порожистых участках валунный, на перекатах и плесах — галечный, с высоким содержанием песка и гравия. Есть ямы, где происходит отстаивание производителей кумжи в преднерестовый период, а также есть галечники, пригодные для нереста кумжи. Плотности рыб составили 15–18 экз./100 м², что делает данный ручей крайне перспективным с точки зрения создания новой популяции европейской жемчужницы.

В 2022 году были обследованы притоки реки Паз в заповеднике Пасвик. В ходе работы были определены водотоки, в которых обитает европейская жемчужница и кумжа. Были выявлены два сходных по характеристикам ручья, один из них — Машъйоки (рис. 2), в котором была обнаружена крупная колония европейской жемчужницы. На максимальных по численности участках плотность раковин составила 100–150 на 1 м². Этот ручей определен как донорский, из которого возможно отбирать моллюсков для переселения в соседние реки и ручьи р. Паз по совокупности гидрологических характеристик, пригодных для обитания жемчужницы. Также в ручье Машъйоки воспроизводится кумжа, плотности рыб достаточно высокие — 20–25 экз./100 м². В будущем для сохранения воспроизводства жемчужницы следует минимизировать изъятие кумжи из ручья и поддерживать численность рыб на высоком уровне.

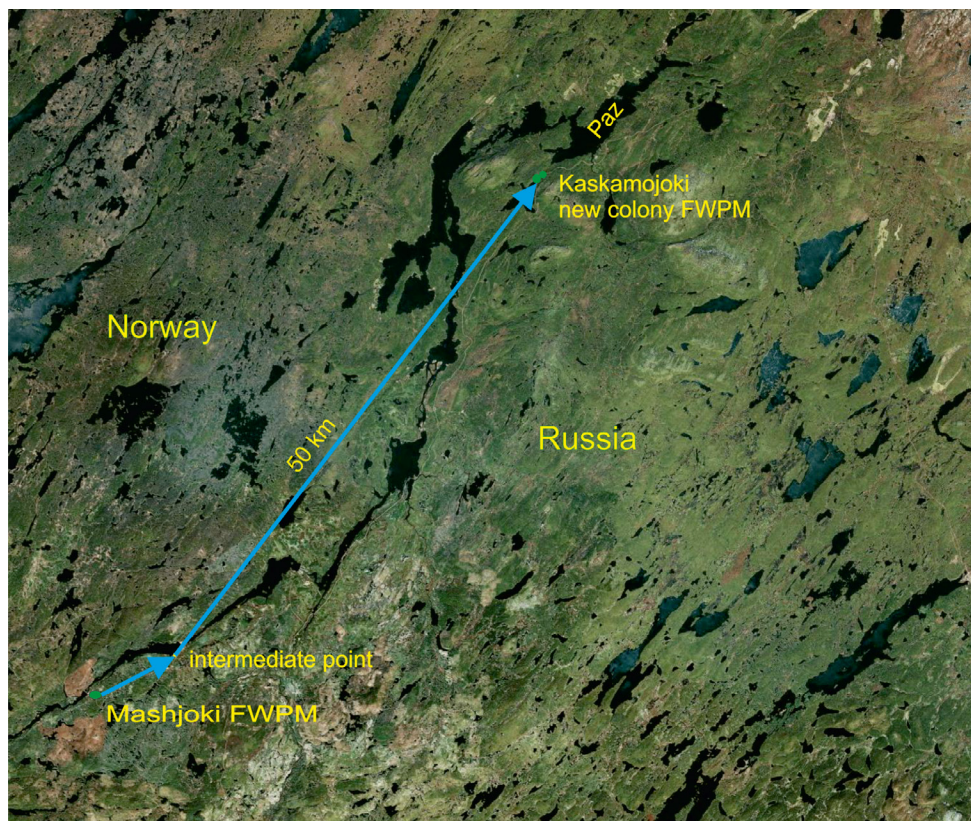


Рис. 2. Маршрут пересадки группы европейской жемчужницы из ручья Машъйоки в реку Каскамайоки (Д.А. Ефремов)

Fig. 2. Relocation route of a group of European pearl mussels from the Mashjoki Stream to the Kaskamojoki Stream (photos taken by D.A. Efremov)

Отбор производили в случайном порядке, с разных точек ручья, чтобы обеспечить будущую колонию разновозрастными раковинами с максимальными различиями в генофонде. Дистанция перемещения моллюсков составила около 50 км в северо-восточном направлении (рис. 2).

После транспортировки к месту выпуска на реке Каскамайоки (рис. 3) выровняли температуру воды в контейнере и в реке, после чего сачком перенесли моллюсков небольшими порциями по 10–15 особей на дно реки. Участок выбрали на истоке из озера Каскамаярви в центре



Рис. 3. р. Каскамайоки, участок высадки первой группы моллюсков

Fig. 3. The Kaskamojoki Stream, the planting site for the first group of mollusks



Рис. 4. р. Каскамайоки, участок высадки второй группы моллюсков (Д.А. Ефремов)

Fig. 4. The Kaskamayoki Stream, the planting site for the second group of mollusks (photos taken by D.A. Efremov)

русла с максимальными глубинами. Участок перед перекатом, глубины 0,5–0,6 м, скорости течения 0,4–0,6 м/с. Грунт преимущественно валунный, есть недостаток песка и гальки. Данный участок расположен перед основным порогом, где обитает разновозрастная молодь кумжи, что, на наш взгляд, будет способствовать максимально эффективному заражению молоди рыб глосидиями и обеспечит скорейшее расселение молоди жемчужницы уже с весны 2025 г., первое заражение рыб следует ожидать в сентябре 2024 г.

После высадки первой группы моллюсков перенесли контейнер с моллюсками ко второму участку, расположенному ниже по течению реки (рис. 4). Здесь после завершения плеса на предперекатном участке выбрали точку с максимальными глубинами в центре русла. После выравнивания температуры воды моллюсков с помощью сачка поместили на дно реки. Скорости течения на участке — 0,5–0,6 м/с, глубины — 0,6–0,7 м, грунты галечно-валунный, содержания песка и гравия до 10 %. Ниже по течению расположен перекат с галечными грунтами, идеально подходящий для нереста кумжи и обитания сеголеток, ниже расположен протяженный порог, заселенный разновозрастной молодь кумжи.

В результате проделанной работы из ручья Машъяоки в ручей Каскамайоки были переселены 200 разновозрастных моллюсков жемчужницы и создана новая колония. Моллюски высажены в две группы по 100 особей на расстоянии 600 м друг от друга.

В августе 2025 г. было произведено обследование участков ручья Каскамайоки с целью оценки состояния моллюсков, также методами электромагнитного учета молоди рыб определили места обитания молоди кумжи, а также методами подводной фото и видеосъемки двух групп жемчужницы. В ходе осеннего полевого выезда провели лов молоди кумжи в 4 точках (Лов 1; Лов 2; Лов 3; Лов 4; рис. 5) с целью определения зараженности молоди кумжи глосидиями жемчужницы.

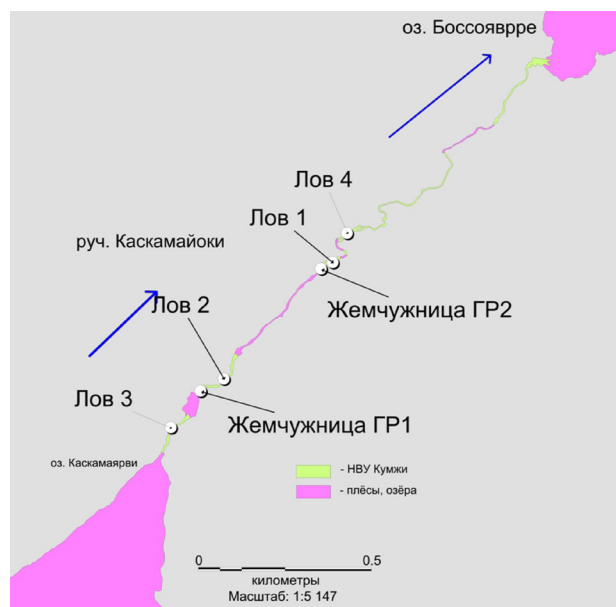


Рис. 5. Схема ручья Каскамайоки. Жемчужница расположена в точках ГР1 и ГР 2 по 100 особей; лов кумжи осуществлялся в точках (Лов 1, Лов 2, Лов 3, Лов 4) по 5 особей в каждой точке (Д.А. Ефремов)

Fig. 5. Diagram of the Kaskamojoki Stream. Pearl mussels were found at GR1 and GR 2 points, with 100 individuals at each location; brown trout were caught at points (Catch 1, Catch 2, Catch 3, Catch 4), with 5 individuals at each location (D.A. Efremov)

В ходе изучения молоди в лаборатории ни на одной особи кумжи возрастов 0+, 1+, 2+ и 3+ обнаружить глосидиев не удалось. Мониторинговый лов кумжи на 4 точках показал относительно высокие плотности молоди кумжи в ручье Каскамайоки — 24–25 экз./100 м², сопоставимые с плотностями ручья Машьюоки в 2022 г. На всех участках присутствует кумжа в возрасте 0+, 1+, 2+, 3+, 4+ и 5+, что свидетельствует о ежегодном стабильном нересте кумжи. Возрастная структура популяции представляет собой правильную возрастную пирамиду с преобладанием младших возрастных групп. Участок реки Каскамайоки, расположенный в границах Лапландского заповедника, является образцовым модельным участком, сохраняющим естественный запас кумжи в соответствии с потенциальной емкостью водотока.

Оценку состояния колонии жемчужницы начали на участке 1 ручья Каскамайоки, куда была помещена группа 1 жемчужницы, со-

стоящая из 100 особей. При первичном осмотре удалось подсчитать лишь около 25–30 особей жемчужницы, торчащих среди крупных валунов. Стало понятно, что остальные моллюски расположены глубоко под валунами. Далее произвели разбор валунов на данном участке и их перераспределили так, чтобы жемчужница оказалась на относительно ровном участке дна, где проявилась выходы песка и гравия. В результате удалось насчитать 84 особи жемчужницы, остальные 16 находились в глубоких щелях, среди неподъемных валунов. На данном участке ни одной погибшей раковины жемчужницы обнаружить не удалось. Таким образом данная группа моллюсков успешно пережила 1 год, включая 1 зиму начиная с 2024 г., моллюски выглядят хорошо, данный участок ручья хоть и с оговоркой, но пригоден для обитания моллюсков.

На рисунке 6 показан участок высадки второй группы взрослых жемчужниц в декабре 2024 г. Участок реки расположен в конце



Рис. 6. Участок ручья Каскамайоки, середина ручья, жемчужница группа 2, 100 особей, август 2025 г. (Д.А. Ефремов)

Fig. 6. Midsection of the Kaskamojoki Stream, Group 2 pearl mussels (100 individuals), August 2025 (photos taken by D.A. Efremov)

протяженного (350 м) плеса, в конце которого расположен пережат с идеальным нерестовым грунтом (разноразмерная галька и гравий). Участок имеет хорошие глубины — 60–70 см, а также хороший грунт для обитания моллюсков, достаточное количество мелкой гальки, гравия и песка. На рисунке 6 видно, что грунт на 40–50 % состоит из разноразмерных валунов, а остальной представлен галькой и гравием.

В ходе мониторингового подсчета удалось обнаружить 95 моллюсков жемчужницы и 1 погибшую раковину, вероятно, 4 особи расположены в щелях между валунами и не были обнаружены. Также возможно изъятие моллюсков ондатрой, но расколотых раковин на берегу обнаружить не удалось. Раковина имела следы слома, предположительно, гибель наступила в результате раздавливания крупным животным, возможно, лосем или оленем, раковина длиной около 10 см, среднего возраста, стенки относительно тонкие. Следов мягких тканей обнаружить не удалось, гибель, вероятно, наступила или весной 2025 г., или в 2024 г.

В целом обследование показало, что группа 2 находится в более благоприятном для обитания месте, дно участка реки сложено достаточным количеством гальки, гравия и песка, что позволяет жемчужнице успешно закрепляться на дне и фильтровать воду. С 2024 г. данная группа благоприятно пережила зиму с минимальными потерями. Корректировка расположения группы моллюсков предположительно позволит улучшить эффективность оплодотворения, что, в свою очередь, повысит эффективность воспроизводства жемчужницы ручья Каскамайоки.

Заключение

В ходе работы в 2024 г. был успешно поставлен эксперимент по реинтродукции

200 особей жемчужницы европейской из ручья Машъйоки в ручей Каскамайоки. Была отработана методика поиска донорской колонии, подбора подходящего водотока для создания новой колонии, включая оценку плотности потенциального хозяина для личинок моллюска, в нашем случае кумжи. Успешно апробирована методика перемещения живых моллюсков из водотока в водоток, потерь в ходе отлова и перемещения удалось избежать.

В 2025 г. был проведен мониторинг реинтродуцированной колонии жемчужницы, дана оценка участков, на которые произвели выпуск жемчужницы. Из 200 пересаженных раковин одна оказалась погибшей, предположительно, гибель наступила в результате механического воздействия, вероятно, крупного дикого животного. На участке высадки 1 была сделана корректировка, крупные валуны перераспределены таким образом, чтобы для моллюсков стало доступно песчано-гравийное дно. В ходе осеннего полевого выезда произвели отлов молоди кумжи с целью оценки зараженности молоди глохидиями жемчужницы. К сожалению, глохидиев на жабрах рыб в лабораторных условиях обнаружить не удалось.

Мониторинговый лов кумжи показал относительно высокие плотности молоди кумжи в ручье Каскамайоки — 24–25 экз./100 м², что соответствует потенциальной емкости данного ручья. В лове присутствовали все возрастные группы кумжи, что свидетельствует о правильном выборе ручья Каскамайоки для эксперимента по реинтродукции моллюсков. В целом поставленный эксперимент и апробированная методика являются эффективными и могут быть рекомендованы для дальнейшего масштабирования в арктических реках Северо-Запада России.

Литература

1. Быховская-Павловская И.Е. Паразиты рыб: руководство по изучению. Ленинград: Наука; 1985.
2. Веселов А.Е., Калюжин С.М. Экология, поведение и распределение молоди атлантического лосося. Петрозаводск: Карелия; 2001.
3. Иешко Е.П., Веселов А.Е., Мурзина С.А., Зотин А.А., Ефремов Д.А., Ручьев М.А., Фомина О.В. Атлантический лосось *Salmo salar* Linnaeus, 1758. Пресноводная жемчужница

- Margaritifera margaritifera Linnaeus, 1758. Сохранение и восстановление исчезающих видов северных рек. Петрозаводск: Скандинавия; 2016.
4. Клыпуть В.С., Смирнов Ю.А., Шустов Ю.А., Маслов С.Е. 1987. Эффективность использования аппаратов электролова ранцевого типа БТ-1 «Форель» на лососевых реках европейского Севера. В: Сб. научных трудов ГосНИОРХ. Т. 260. Проблемы лососеводства. Ленинград: ГосНИОРХ; 1987, с. 121–125.
 5. Павлов Д.С., Нездолий В.К., Ходоревская Р.П. Покатная миграция молоди рыб в реках Волга и Или. Москва: Наука; 1981.
 6. Щуров И.Л., Широков В.А., Тыркин И.А., Шульман Б.С. Результаты рекультивации нерестилища лосося в реке Суна. В: Труды Государственного Природного заповедника «Кивач». Петрозаводск; 2008, Вып. 4, с. 154–155.
 7. Keenleyside M.H.A. Skin-diving observations of Atlantic salmon and brook trout in the Miramichi River, New Brunswick. Journal of the Fisheries Research Board of Canada. 1962; 19(4):625–634. <https://doi.org/10.1139/f62-042>
 8. Thomas G.R., Taylor J., Garcia de Leaniz C. Captive breeding of the endangered freshwater pearl mussel *Margaritifera margaritifera*. Endangered Species Research. 2010;12(1):1–9 pp, <https://doi.org/10.3354/esr00286>
 9. Wankowski J.W.J., Thorpe J.E. Spatial distribution and feeding in Atlantic salmon, *Salmo salar* L. juveniles. Journal of Fish Biology. 1979;14(3):239–248. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1979.tb03515.x>
 10. Zippin C. The removal method of population estimation. The Journal of Wildlife Management. 1958;22(1):82–90. <https://doi.org/10.2307/3797301>

References

1. Bykhovskaya-Pavlovskaya I.Ye. Fish parasites: a study guide. Leningrad: Nauka Publ.; 1985. (In Russ.).
2. Veselov A.E., Kalyuzhin S.M. Ecology, behavior and distribution of juvenile Atlantic salmon. Petrozavodsk: Karelia Publ.; 2001. (In Russ.).
3. Iyeshko E.P., Veselov A.E., Murzina S.A., Zotin A.A., Efremov D.A., Ruch'yeв M.A., Fomina O.V. Restoration of endangered species populations in northern rivers. Land-locked Atlantic salmon, *Salmo salar* Linnaeus, 1758. Freshwater pearl mussel, *Margaritifera margaritifera* Linnaeus, 1758. Petrozavodsk: Scandinavia Publ.; 2016. (In Russ.).
4. Klyputo V.S., Smirnov YU.A., Shustov Yu.A., Maslov S.Ye. Efficiency of using backpack-type electrofishing devices БТ-1 “Trout” on salmon rivers of the European North. In: Collection of scientific papers of GosNIORKh. Vol. 260. Problems of salmon farming. Leningrad: GosNIORKh; 1987, pp. 121–125. (In Russ.).
5. Pavlov D.S., Nezdoлий V.K., Khodorevskaya R.P. Downstream migration of juvenile fish in the Volga and Ili rivers. Moscow: Nauka Publ.; 1981. (In Russ.).
6. Shchurov I.L., Широков V.A., Tyrkin I.A., Shul'man B.S. Results of reclamation of salmon spawning grounds in the Suna River. In: Proceedings of the Kivach State Nature Reserve. Petrozavodsk; 2008, Iss. 4, pp. 154–155. (In Russ.).
7. Keenleyside M.H.A. Skin-diving observations of Atlantic salmon and brook trout in the Miramichi River, New Brunswick. Journal of the Fisheries Research Board of Canada. 1962; 19(4):625–634. <https://doi.org/10.1139/f62-042>
8. Thomas G.R., Taylor J., Garcia de Leaniz C. Captive breeding of the endangered freshwater pearl mussel *Margaritifera margaritifera*. Endangered Species Research. 2010;12(1):1–9 pp, <https://doi.org/10.3354/esr00286>
9. Wankowski J.W.J., Thorpe J.E. Spatial distribution and feeding in Atlantic salmon, *Salmo salar* L. juveniles. Journal of Fish Biology. 1979;14(3):239–248. <https://doi.org/10.1111/j.1095-8649.1979.tb03515.x>
10. Zippin C. The removal method of population estimation. The Journal of Wildlife Management. 1958;22(1):82–90. <https://doi.org/10.2307/3797301>

Сведения об авторах

Ефремов Денис Александрович — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института биологии ФИЦ «Карельский научный центр РАН».

Россия, 185910, Республика Карелия, Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11.
Тел.: + 7 (911) 410-31-05
E-mail: denisefremov@list.ru

Иешко Евгений Павлович — доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник Института биологии ФИЦ «Карельский научный центр РАН».

Россия, 185910, Республика Карелия, Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11.
Тел.: + 7 (911) 410-09-58
E-mail: ieshkoep@gmail.com

Поликарпова Наталья Владимировна — кандидат геолого-минералогических наук,, директор ФГБУ «Государственный заповедник “Пасвик”».

Россия, 184421, Мурманская область, Печенгский р-н, пгт. Никель, Гвардейский просп., д. 43.
Тел.: +7 (921) 288-78-00
E-mail: polikarpova-pasvik@yandex.ru

Information about the authors

Denis A. Efremov — Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Institute of Biology, the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences.

Russia, 185010, Karelia Petrozavodsk, Pushkinskaya str., 11.
Tel.: + 7 (911) 410-31-05
E-mail: denisefremov@list.ru

Yevgeniy P. Ieshko — Dr. Sci. (Biol.), Professor, Chief Researcher, Institute of Biology, the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences.

Russia, 185010, Karelia Petrozavodsk, Pushkinskaya str., 11.
Tel.: + 7 (911) 410-09-58
E-mail: ieshkoep@gmail.com

Natal'ya V. Polikarpova — Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Director, the Pasvik Nature Reserve.

Russia, 184421, Murmansk Region, Pechenga District, urban-type settlement Nikel, Gvardeysky ave., 43.
Tel.: +7 (921) 288-78-00
E-mail: polikarpova-pasvik@yandex.ru

Вклад авторов

Ефремов Денис Александрович — осуществление эксперимента, лов рыбы, пересадка жемчужницы, подготовка публикации.

Иешко Евгений Павлович — осуществление эксперимента, паразитологический анализ рыб, редактирование публикации.

Поликарпова Наталья Владимировна — организация работ, оформление разрешений, подготовка публикации.

Author contribution statement

Denis A. Efremov — conducting the experiment, fish catching, pearl mussel relocation, preparation of the manuscript.

Yevgeniy P. Ieshko — conducting the experiment, parasitological analysis of fish, editing the manuscript.

Natal'ya V. Polikarpova — coordination of work, obtaining permits, preparation of the manuscript.

Благодарности

Финансовое обеспечение работ осуществлялось за счет средств АО «Кольская ГМК» (г. Мончегорск), ФГБУ «Заповедник “Пасвик”», государственного задания КарНЦ РАН (тема № FMEN-2022-0007, № г.р. 122031700452-3, № FMEN-2022-0005, № г.р. 122032100130-3).

Acknowledgments

The work was funded by Kolskaya MMC JSC (Monchegorsk), the Pasvik Nature Reserve, and a state-funded project of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (project No. FMEN-2022-0007, Contract No. 122031700452-3, No. FMEN-2022-0005, Contract No. 122032100130-3).



УДК 630.232.22 (58.084.2)

ББК 43.438 (43.469)

<https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-109-119>

Апробация технологии восстановления лесов методом имитации аэрозасева с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для целей сохранения биоразнообразия

Ефремов Д.А. ✉

ООО «Промрыбвод», Петрозаводск, Россия

✉ denisefremov@list.ru

Аннотация. Представлен результат апробации технологии восстановления лесов методом имитации аэросева с применением БПЛА DJI Agras T10 в Мурманской области на территории и в окрестностях города Мончегорска, в районе Промышленной площадки АО «Кольская ГМК». Технология включает определение участков, требующих мероприятий по восстановлению леса, разработку проекта лесовосстановления, заготовку семян проектных культур деревьев, высев семян деревьев с помощью беспилотного летательного аппарата с заданной нормой высева, с функцией распределения твердых гранул, мониторинг результатов всхожести семян деревьев. В ходе работы были заготовлены районированные семена сосны обыкновенной 271,4 кг и 2 кг семян ели, произведен высев семян на суммарной площади 150,5 га, всего на 9 участках с различным рельефом и типом грунта. Был произведен мониторинг участков засева, оценена всхожесть семян, их выживаемость на протяжении сезона. Отработана методика работы с БПЛА, оценена эффективность и применимость модели DJI Agras T10 для поставленной задачи. Дана оценка факторов, влияющих на итоговую всхожесть и приживаемость семян.

Ключевые слова: лесовосстановление, технология аэросева, семена сосны обыкновенной, семена ели, семена, участки сева, всхожесть семян, БПЛА для аэросева

Конфликт интересов: автор сообщает об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Ефремов Д.А. Апробация технологии восстановления лесов методом имитации аэрозасева с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для целей сохранения биоразнообразия. *Арктика и инновации*. 2026;5(2):109–119. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-109-119>

Simulated aerial seeding with unmanned aerial vehicles in reforestation technology

Denis A. Efremov ✉

Promrybvod LLC, Petrozavodsk, Republic of Karelia, Russia

✉ denisefremov@list.ru

Abstract. This article explores the use of a DJI Agras T10 unmanned aerial vehicle (UAV) for simulated aerial seeding in a reforestation technology. The testing took place in the Murmansk Region, with a focus on the area around the city of Monchegorsk and Kolskaya MMC JSC industrial site. The reforestation technology entails identifying areas requiring reforestation measures, designing a reforestation project, and harvesting seeds of the target tree species. Then, drones with a set sowing rate and granule spreading system are used to sow the tree seeds. Finally, the germination results of the seedlings are monitored. During the technology testing, 271.4 kg of regionalized Scots pine seeds and 2 kg of spruce seeds were harvested. These seeds were then sown across nine plots, covering a total area of 150.5 hectares with varying topography and soil types. The sowing plots were monitored, and the germination rate and survival rate of the seedlings were assessed throughout the planting season. The effectiveness and suitability of using a DJI Agras T10 model UAV for monitoring the plots was evaluated, and a methodology for operating the UAV was developed. Additionally, factors influencing the final germination rate and survival of seedlings were examined.

Keywords: reforestation, aerial seeding technology, Scots pine seeds, spruce seeds, seedlings, seeding plots, seedling germination, UAVs for aerial seeding

Conflict of interest: the author declares no conflict of interests.

For citation: Efremov D.A. Simulated aerial seeding with unmanned aerial vehicles in reforestation technology. *Arctic and Innovations*. 2026;4(2): 109–119. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2026-4-2-109-119>

Введение

В результате экстенсивного освоения ресурсной базы, полезных ископаемых и природных ресурсов в Мурманской области в советский период России был накоплен значительный экологический ущерб, приведший к нарушению естественных лесных насаждений. Лесные массивы были подвержены разрушению как в результате выбросов с предприятий, так и за счет лесных пожаров, спровоцированных человеком из-за неосторожного обращения с огнем. В районе г. Мончегорска до сих пор остаются пустующие земли, на пожарищах, сформированных в 90-е годы, все еще не началось возобновление хвойных лесов. Нарушения лесных массивов происходили в том числе за счет выбросов с металлургического предприятия Кольской ГМК.

Вместе с тем в настоящее время на предприятии идет процесс установки современных очистных сооружений, эффективно очищающих выбрасываемые газы. Так, по данным Кольской ГМК [1], новая установка, введенная в эксплуатацию в 2025 г., входит в число 180 мероприятий комплексной экологической программы компании на Кольском полуострове, общий объем финансирования которой до 2031 г. превысит 71,7 млрд рублей. Основная задача системы — сокращение выбросов диоксида серы (SO₂) от печей кипящего слоя в рамках единой системы очистки газов. Ожидается, что ежегодный

объем выбросов будет снижен почти на 1 тысячу тонн. По данным компании, в 1990-е гг. объем выбросов SO₂ на Кольской ГМК составлял порядка 500 тысяч тонн. К 2015 г. этот показатель снизился до 155,1 тысячи тонн, а по итогам 2024 года — до 12,4 тысячи тонн, в том числе благодаря реализации Серной программы.

В настоящее время вокруг предприятия во всех направлениях началось активное восстановление флоры, хорошо распространяются и поднимаются массивы березы, ивы и осины за счет мелких легких семян, распространяемых ветром с больших расстояний, массово развиваются травянистые растения, иван-чай, осоки, злаки и другие, семена которых также распространяются ветром на большие расстояния. На протяжении лета вплоть до зимы флора остается зеленой, хорошо развивается, наблюдается заметный рост. Это свидетельствует о минимизации уровня загрязнений, критичных для произрастания лесных массивов. В то же время сухие и обугленные стволы свидетельствуют о произрастании ранее на данной территории сосен и елей. В настоящее время сложились условия, позволяющие произрастать этим лесным культурам, но материнские растения, являющиеся источниками семян, находятся на значительном удалении, что не позволяет быстро начаться процессу самовосстановления лесов, даже несмотря на сильные ветры различных

направлений. Стала очевидна необходимость искусственного восстановления лесных насаждений различными методами. В настоящее время в приоритете является метод высадки сеянцев различного размера, этот метод является эффективным на ограниченных площадях, поскольку требует значительных затрат на этапе выращивания сеянцев в специальных питомниках, изъятия нарушенной почвы, завоза чистой подготовленной почвы. В нашем эксперименте на первом этапе работ мы провели отсев пробной территории площадью 2,1 га. Были получены положительные результаты: несмотря на крайне засушливое лето, осенью 2024 года на экспериментальном участке были получены всходы сосны обыкновенной в необходимом количестве, на некоторых участках до 50–60 шт. на 1 м². Наиболее подходящими для всходов оказались грунты с высоким содержанием торфа, положительный эффект был получен на участках без внесения дополнительных грунтов.

Таким образом, получив положительные результаты на пробном участке, стало очевидно, что работу возможно масштабировать и провести сев хвойных культур большей площади, с применением современных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Был проанализирован мировой опыт применения БПЛА для целей сева различных культур, выбрана подходящая платформа. Отобраны участки, нуждающиеся в аэросеве с различным типом рельефа, разработаны проекты лесовосстановления, заготовлены семена сосны и ели, проведен аэросев семян на 10 участках сева общей площадью более 150 га. В ходе мониторинговой экспедиции была изучена всхожесть семян высаженных хвойных пород на различных экспериментальных участках, оценена эффективность метода аэросева семян хвойных пород с применением БПЛА.

Материалы и методы

В ходе работы для проведения аэросева было заготовлено 271,4 кг семян сосны обыкновенной, которые были упакованы в 10 мешков фасовкой по 25,4 кг вместе с упаковкой и 1 мешок весом 21,4. Каждый мешок был тщательно запакован и перенесен на хранение в холодное темное помещение зимой 2024–2025 гг. Заготовка семян производилась на Северо-Западе России, в Лесосеменном районе 1 (ЛСР 1),

что позволяет перебрасывать семена в Мурманскую область. Также было приобретено 2 кг семян ели обыкновенной: из-за засухи 2024 г. на Северо-Западе России шишка ели не уродилась, в результате удалось приобрести ограниченное количество семян ели подходящего ЛСР 1 из запасов 2023 г.

В эксперименте по аэросеву применялся БПЛА DJI Agras T10 (рис. 1), учетный номер 0899e55, максимальной взлетной массой 24,8 кг, грузоподъемностью 8 кг со стандартным программным обеспечением DJI Agras. Всего было проведено более 70 полетов в снаряженном состоянии общей продолжительностью более 1000 минут. Для полетов использовалось разрешение администрации города Мончегорска №01-028-2094 от 15.05.2025, а также администрации Печенгского муниципального округа Мурманской области № 19 от 10.06.2025 г.

Для заряда батарей применялся бензогенератор Konnen&Sohnen KS10000E ATS мощностью 8 кВт в сочетании с зарядной станцией для DJI Agras T10. Всего в работе использовалось 3 стандартных аккумулятора DJI Intelligent Flight Battery T10 емкостью 9500 мАч.

Для распределения семян использовался бункер для разбрасывания сухих гранул — система разбрасывания T10 Spreading System 3.0 (рис. 1), производительность от 0,5 до 100 кг/га.

Предварительно была подготовлена карта расположения участков (рис. 2). Проектной организацией была предложена концепция по выбору участков, включающая использование нескольких участков на территории города Мончегорска, нескольких участков в буферной зоне между Промплощадкой Кольской ГМК и Мончегорском и несколько участков на территории Промплощадки Кольской ГМК. Участок 1 относится к территории Мончегорска, имеет площадь 27 га, Участки 2, 3 и 8 находятся в буферной зоне, между городом и Промплощадкой, имеют суммарную площадь 53 га. Участки 4 и 6 находятся на территории Промплощадки Кольской ГМК, имеют площадь 14 га. Участки 5 и 7 находятся за пределами Промплощадки Кольской ГМК, здесь грунты носят каменистый характер, их выбрали в качестве экспериментальных, чтобы проверить, прорастут ли здесь семена и как будут чувствовать



Рис. 1. БПЛА DJI Agras T10 (<https://www.rusgeocom.ru/>, Ефремов Д.А.)

Fig. 1. DJI Agras T10 UAV (<https://www.rusgeocom.ru/>, photos taken by D.A. Efremov)

себя семена на скальных грунтах. Площадь участков — 7 га. Участки 9 и 11 являются резервными, их суммарная площадь — 348 га, они были выбраны на случай невозможности проведения эксперимента на территориях участков 1–8 из-за возможных ограничений полетной зоны или иных причин. Следует отметить, что участок 7 (рис. 2) был исключен администрацией Мончегорска в связи с тем, что он уже включен в зону рекультивируемых земель. Высвободившиеся из 271,4 кг сосны были распределены на дополнительные площади, в том числе на 9-й и 11-й резервные участки.

Семена для засева были привезены в мешках. При наполнении бункера БПЛА семенами делали смесь семян минимум из 2 мешков сосны и мешка ели, чтобы обеспечить максимальную эффективность перемешивания семян, добиться высева семян из разных партий заготовки. Весь объем семян был распределен на участках засева.

При аэрозасеве с учетом сложного рельефа местности, наличия препятствий и непригодных для произрастания областей (дороги, водоемы, дренажные канавы) для каждого участка непосредственно на месте строился свой план автоматического полета в режиме сева на базе программного обеспечения БПЛА DJI. Некоторые крупные участки, «изрезанные» линиями ЛЭП, разбивались на сектора с учетом охранной зоны ЛЭП 25 м, в границах которой запрещены полеты. Также в этой зоне нецелесообразно проводить сев, поскольку после подъема леса насаждения будут срублены бригадами косарей и вальщиков для сохранения охранной просеки. Точный план полета на открытых участках, без ЛЭП, столбов, заборов, высоких одиночных деревьев возможно строить на основе встроенной в программное обеспечение карты спутниковых снимков, используя в качестве ориентиров береговую линию озер, канав, дорог и др. Данный способ планирования полетов



Рис. 2. Общая карта-схема предварительно подобранных участков для искусственного лесовосстановления (источник <https://yandex.ru/maps>)

Fig. 2. General map of pre-selected plots for artificial reforestation (source: <https://yandex.ru/maps>)

хорошо работал 21–23 мая. После 24 мая, с потеплением, началось интенсивное таяние снега, ручей Кумужий наполнился паводковой водой, в результате чего области на участке 3 попали в зону затопления, которая не отображалась на летних спутниковых снимках. В итоге план полетов строился с помощью пульта управления БПЛА и модуля RTK, обеспечивающего точность позиционирования до одного метра. Аналогичный способ построения использовался в зонах ЛЭП, что позволяло построить схему участка, исключая возможность залета в охранную зону. Крайняя точка подлета ставилась на расстоянии не ближе 1 метра от таблички «Охранная зона ЛЭП». В случае сильного ветра часть семян могла попадать в эту зону за счет сноса, но в этих случаях делали поправку на ветер и точку полета строили несколько дальше от таблички.

Фактическая работа по аэросеву проводилась с 23 мая по 6 июня 2025 г. в соответствии с полетным планом и предоставленной полетной зоной, на каждый день — новая полетная зона. С учетом погодных условий — ветер, осадки и т. п. — некоторые участки засеивали за один подход, некоторые — за 2 дня. Перед высевом семян производилась калибровка автоматической системы распределением с заданным параметром 1,0, или 1,5, или 2,0 кг семян на 1 га. Полет осуществлялся преимущественно в автоматическом режиме с заранее заданными параметрами. Скорость полета — 7–8 м/с, расстояния между транссектами на участке — 7–9 м в зависимости от силы ветра, высота полета — 8–15 м. Минимальная высота задавалась на участке без древесных культур, максимальная — на участках с холмистой местностью и насаждениями из осин и берез, в районе участка 8. Направление транссекта определялось в соответствии с направлением ветра так, чтобы БПЛА двигался на ветер или по ветру, в этом режиме наблюдалась максимальная экономия энергии.

Для оценки всхожести семян хвойных пород была применена оригинальная методика. На каждом участке засева выбирали 3–9 точек в случайном порядке, на которых с помощью рулетки (5 м), вымеряли квадрат площадью 2 × 2 метра и на нем пересчитывали все обнаруженные семена хвойных пород. Также проводили описание участка, учитывали тип грунта, увлажнение, наличие древесных остатков, индивидуальные осо-

бенности. Суммарная всхожесть для каждого участка рассчитывалась на основе среднего показателя со всех промеренных точек участка. Далее делали пересчет средней всхожести для изученного участка. Количество семян каждого отдельного участка суммировали и получали итоговую цифру со всех участков. Идентификацию саженцев по видам не проводили, в показателе «всхожесть» показана информация суммарно для сосны и ели. Идентификация саженцев будет производиться на более поздних этапах мониторинга, после формирования полноценных растений.

Работа по изучению всхожести участков проводилась на протяжении 4 дней в различные даты. Участки 0, 1, 2, 3, 4 и 6 обследовали 25 сентября, участки 5, 8, 11 и 9 провели 15 октября, участок 1 — 16 октября, все участки были обследованы до выпадения снега. Следует учесть, что процедура по обследованию занимает много времени, в условиях короткого светового дня следует закладывать дополнительные дни на пешие маршруты на обследование участков в будущем.

Результаты и обсуждение

Выбор дрона DJI Agras T10 для эксперимента был сделан неслучайно. Технические расчеты, включающие объем бункера (до 8 кг), скорость полета до 10 м/с, объем сева 1,5–3,0 кг/га, показали, что наиболее подходящим и энергоэффективным для полетов является именно этот БПЛА. За время полета (около 12 минут и 2–3 минуты на возврат) дрон успевает облететь около 3 га с заданным шагом 7–9 метров между транссектами, при этом распределив до 5 кг семян сосны и ели. С учетом низкой плотности семян сосны бункер вмещает около 5,5 кг семян сосны. В результате ко времени опустошения бункера батарея разряжалась на 80 % и процедура очередной загрузки бункера совпадала со временем замены батареи. Также к моменту замены батареи успевала зарядиться очередная батарея. В результате циклическое использование трех батарей позволяло осуществлять непрерывный посев семян. 1 батарея постоянно находилась на зарядке, одна была установлена на дроне, а одна находилась близ точки посадки дрона и очередного пополнения бункера. Применение дрона большей массы, такого

как DJI Agras T20 с грузоподъемностью 20 кг или аналогов, окажется энергетически неэффективным. Дрон с большей массой в воздухе может находиться не более 15 минут, за это время он сможет посеять не более 5 кг из возможных 15. После разряда батареи будет необходим возврат на точку старта для замены батареи с неопустошенным бункером. В итоге дрон будет возможно загружать лишь на треть от его возможностей и его применение будет нецелесообразным.

При первичной проработке проекта объем высева семян взяли из нормативов СССР для аэросева с расчетной величиной 2,5 кг/га, были выбраны участки для засева планируемой общей площадью 100 га с резервными площадями до 200 га. Также дополнительно к ним включили еще один участок близ п. Заполярный площадью 5 га. Заготовку семян произвели исходя из первичных данных. После подготовки проекта лесовосстановления инженерами были рассчитаны нормы высева от 1 до 2 кг семян сосны на 1 га. В результате избыточные объемы семян в ходе работы распределили на резервных площадях, которые были заранее запланированы и утверждены. В результате итоговая площадь засева в районе Мончегорска составила 150,5 га.

Всего в ходе работы с помощью дрона DJI Agras T10 было засеяно 150,5 га экспериментальных площадей. На них было

суммарно распределено 245,8 кг семян сосны обыкновенной и 1,8 кг ели европейской ЛСР 1. Это составило суммарно более 38 000 000 семян. Работа была начата 23 мая и завершена 6 июня 2025 г. Основные сложности в работе представляли погодные условия, разрешительная документация (ограниченное время согласованных полетов) и форсмажорные обстоятельства.

В целом функциональность агродрона DJI Agras T10 позволила полностью выполнить запланированные показатели в срок и перевыполнить их. Дополнительные площади были засеяны за счет высвободившегося объема семян в результате снижения нормы высева семян с 2,5 до 1,5 кг на 1 га в среднем.

В ходе осенней работы был осуществлен мониторинг результатов сева 9 участков в районе Мончегорска. Практически на всех участках удалось обнаружить сеянцы сосны разной стадии развития (рис. 3).

На участке засева 1 средняя всхожесть сеянцев сосны составила 3 шт. на 4 м² с учетом засеянной площади 27,6 га и распределенных 8 550 447 семян сосны обыкновенной и ели, всхожесть составила 215 800 сеянцев, эффективность прорастания семян составила 2,5 %. Следует отметить, что первоначальная всхожесть в июне была значительно выше, 25–27 сеянцев, на 4 м², но далее произошла гибель сеянцев и уже 10 августа на том же участке присутствовали

Таблица 1. Результаты засева участков в окрестностях Мончегорска (Д.А. Ефремов)

Table 1. Results of sowing plots around Monchegorsk (D.A. Efremov)

Участок сева	S, га план.	S, га факт.	к-во семян сосны, кг	к-во семян сосны, шт.	к-во семян ели, кг	к-во семян ели, шт.
1	27	27,6	55,2	8 492 308	0,35	58 140
2	5	12,1	24,2	3 723 077	0,15	24 917
3	28	22,7	34	5 230 769	0,25	41 528
4	13	10,7	16	2 461 538	0,15	24 917
5	5	5,5	8,2	1 261 538	0,05	8 306
6	1	0,7	1	153 846	0,05	8 306
7	–	–	–	–	–	–
8	22	20	30,5	4 692 308	0,2	33 223
резерв 9	–	29,8	44,7	6 876 923	0,35	58 140
резерв 11	–	21,4	32	4 923 077	0,25	41 528
Всего Мончегорск	101	150,5	245,8	37 815 385	1,8	299 003



Рис. 3. Участок засева 3, сеянцы сосны (Ефремов Д.А.)

Fig. 3. Sowing plot 3, pine seedlings (photos taken by D.A. Efremov)

погибшие, сухие сеянцы и свежие проросшие. В ходе мониторинга 16 октября июньские сеянцы с хорошо сформированными настоящими иглками отмечены нами только в одной мониторинговой точке У 1.2, она является самой северной, находится на северо-востоке участка в приозерной торфяной низменности. Визуально эта точка находится за пределами шлейфа завода, протянувшегося в северо-западном направлении, остальные же точки мониторинга располагаются в пятне рельефа с минимальным уровнем самовосстановившейся зелени. Предположительно, причиной гибели сеянцев стал период июльского тепла на протяжении 11 дней и 6 дней в августе, а также, вероятно, накопленные в торфе загрязнители. На остальных точках обнаружены сеянцы, которые проросли вторично после обильных ливней в августе и сентябре, некоторые сеянцы все еще сохраняли иглки внутри семенной кожуры.

Эффективность сева на участке 1 оказалась довольно низкой и не превысила 2,5 %, в то же время было получено 215 800 сеянцев сосны обыкновенной и ели. Данный сев в значительной степени стал мониторинговым, позволил оценить различные почвы в разных секторах участка, что позволит сформировать эффективную программу лесовосстановления на данном участке в будущем.

Средняя эффективность сева на участке 11 составила 11,2 сеянца на 4 м², с учетом площади участка 21,4 га из 4 964 605 распределенных семян взошли 599 200 сеянцев на всем участке. Эффективность всхожести составила 12 %, это лучший показатель, которого удалось добиться в окрестностях Мончегорска. На обследованном участке 11 преимущественно хорошо обводненные участки, на них обнаружены июньские сеянцы с хорошо развитыми настоящими

иголками, на участках с недостатком влаги обнаружены как июньские, так и августовские сеянцы, взошедшие после обильных ливней в августе. На участке минимальная всхожесть наблюдалась в точках, возвышающихся над болотами, где проявляется недостаток влаги; есть участки с «коркой» условно живого мха, не позволяющей эффективно прорасти и закрепиться сеянцам хвойных пород деревьев на торфе.

В целом эффективность работ по аэросеву на данном участке оказалась наилучшей среди экспериментальных площадок близ Мончегорска, была достигнута эффективность всхожести сеянцев 12 %, было получено около 600 000 сеянцев сосны обыкновенной и ели, которые в основном хорошо сформировались, имеют развитую розетку настоящих иголок.

Аналогичный детальный анализ был сделан для всех участков и исследованных точек на них, все результаты в данную публикацию не вошли. Обобщенные данные результатов со всех точек мониторинга приведены в таблице 2. В 2025 году удалось суммарно учесть на 9 экспериментальных площадках 1 639 375 сеянцев сосны, преимущественно июньские всходы, с хорошо сформированными настоящими иголками, в то же время на участках присутствовали сеянцы, проросшие в августе и сентябре, после на-

чала осенних дождей. Средняя всхожесть и приживаемость для Мончегорска составила 4 сеянца на 4 м², или 4,1 % от количества распределенных семян. Наибольшая эффективность засева была получена на участке 11 — 12 % на Восточном берегу озера Нудъявр, наихудшая — 0% — в районе участка 2, близ железной дороги и ручья Кумужий.

Промежуточный мониторинг на участке 1 в конце июня показал высокие результаты всхожести, до 25–27 экз./4 м², тогда как 10 августа на том же участке присутствовали полностью высохшие июньские всходы и начали прорасти новые сеянцы, но в меньшем остаточном количестве. Участки восстановления леса и флоры в окрестностях Мончегорска следует рассматривать как сухие пустыни и применять технологии, позволяющие сохранить влагу и дополнительно внести ее. Требуется орошение участков, мульчирование песчаных грунтов, затенение, посадка саженцев на большую глубину с более развитой корневой системой. По возможности отсыпка песчаных участков привозным торфом.

Наиболее сложным для лесовосстановления являются склоны горы Сопчуайвенч, здесь наблюдается значительная эрозия почвы, старые пни будто висят в воздухе с оголенными корнями, склоны потеряли

Таблица 2. Результаты всхожести и приживаемости сеянцев сосны и ели в окрестностях города Мончегорска (Ефремов Д.А.)

Table 2. Germination and survival rates of pine and spruce seedlings around Monchegorsk (D.A. Efremov)

Участок сева / год сева	S, га факт.	Кол-во семян сосны и ели, кг	Кол-во семян сосны и ели, шт.	Всхожесть сеянцев, шт./4 м ²	Всхожесть сеянцев, %.	Всего сеянцев, шт.
У0 / 2024	2,2	5	710 000	8	4	28850
У1 / 2025	27,6	55,2	8 550 447	3	2,5	215 800
У2 / 2025	12,1	24,2	3 747 994	0	0,0	1000
У3 / 2025	22,7	34	5 272 297	7	7,5	397 250
У4 / 2025	10,7	16	2 486 455	6	6,5	160 500
У5 / 2025	5,5	8,2	1 269 844	3,2	3,5	41 250
У6 / 2025	0,7	1	62 152	1,5	1,6	2 625
У7 / 2025	–	–	–	–	–	–
У8 / 2025	20	30,5	4 725 530	3,0	2,4	110 000
резерв 9 / 2025	29,8	44,7	6 935 063	1,5	1,6	111 750
резерв 11 / 2025	21,4	32	4 964 605	11,2	12,0	599 200
Мончегорск	150,5	245,8	38 114 388	4	4,2	1 639 375

почву и грунт до 20–25 см в результате выветривания и смывания водой. В то же время на склонах горы, где сохраняется сток ручьев, сформированы своеобразные оазисы, в которых флора хорошо произрастает, на расстоянии не более 1,9 км от Промплощадки КГМК под кронами берез и елей растут черника, брусника и багульник. Есть следы жизнедеятельности лосей.

Заключение

В ходе работы был успешно апробирован агротехнический БПЛА DJI Agras T10 с максимальной взлетной массой 24,7 кг, грузоподъемностью 8 кг. В мае и июне 2025 г. успешно проведена работа по аэрозасеву 9 участков в районе города Мончегорска, всего 150,5 га. На них было успешно распределено 248,5 кг семян сосны обыкновенной и 1,8 кг ели европейской ЛСР 1, 1-й класс всхожести, это составило около 38 114 000 семян.

Осенью 2025 г. проведена мониторинговая работа по эффективности прорастания и приживания семян сосны обыкновенной и ели, посаженной методом имитации аэрозасева. Всего на 11 участках было получено около 1 800 000 семян хвойных пород, средняя эффективность всхожести составила 4,2 %. В окрестностях Мончегорска на наилучшем участке была достигнута всхожесть на уровне 12 %.

Косвенным результатом работы по аэрозасеву стал мониторинг участков с различным типом грунта, уклонов, рельефа. Были выявлены негативные факторы, влияющие на прорастание семян хвойных пород, и других видов флоры. При восстановительных мероприятиях следует рассматривать засеваемые участки как пустыни. Отсутствие растительного покрова, шлаковые и песчаные грунты, большие уклоны, сильный ветер, полярное солнце, отсутствие тени и влагоудерживающей дерновины в своей

результатирующей сумме дают эффект пустыни, особенно в жаркие июльские и августовские дни. Влага от дождей просачивается в песок или скатывается по склонам, в случае затяжных сухих периодов более 7 дней происходит гибель молодых ростков, в результате не удается восстановить растительный покров.

Дополнительным негативным для прорастания фактором стало присутствие на торфяных участках «корки» из условно живого мха: данное естественное образование не позволяет семенам растений закрепиться в минеральном слое, это покрывало имеет темно-зеленый или черный свет, что при интенсивном солнце приводит к ускоренному процессу иссушивания семян.

На экспериментальном участке 0, засеянном в 2024 г., спустя два летних сезона и одной зимовки было учтено 28 850 семян сосны, итоговая цифра приживаемости семян составила 4 % от первоначально распределенных семян на 2,2 га в среднем. 3 участка с подготовкой грунта по разным причинам остались практически без семян. На неподготовленном участке на площади 1,2 га эффективность приживания составила 12 %. Сеянцы преимущественно прижились на хорошо обводненных заболоченных участках и вдоль ручьев.

В целом работа по аэрозасеву позволила отработать уникальную инновационную методику лесовосстановления, позволив засеять в ограниченный сроки порядка 150,5 га пустующих земель. Мониторинговые мероприятия позволили выявить причины отсутствия процессов самовосстановления лесов на некоторых участках вокруг Мончегорска, на некоторых локациях удалось достичь высоких показателей всхожести и приживаемости семян сосны и ели. Данную методику можно рекомендовать в арктических условиях Северо-Запада России.

Литература

1. Шугаев Г. (ред). «Норникель» ввел в эксплуатацию систему газоочистки на Кольской площадке. Lenta.ru [интернет]; 25 авг. 2025. Режим доступа: <https://lenta.ru/news/2025/08/25/nornikel-vvel-v-ekspluatatsiyu-sistemu-gazochistki-na-kolskoy-ploschadke/>

References

1. Shugaev G. (ed.). Norilsk Nickel has commissioned a gas cleaning system at its Kola site. Lenta.ru [internet]; 25 August 2025. Available at: <https://lenta.ru/news/2025/08/25/nornikel-vvel-v-ekspluatatsiyu-sistemu-gazoochistki-na-kolskoy-ploschadke/>. (In Russ.).

Сведения об авторе

Ефремов Денис Александрович — кандидат биологических наук, директор ООО «Промрыбвод». Россия, 185034, Республика Карелия, Петрозаводск, 3-й Сайнаволоцкий пер., д. 9а
Тел.: +7 (911) 410-31-05
E-mail: denisefremov@list.ru

Author information

Denis A. Efremov — Cand. Sci. (Biol.), Director, Promrybvod LLC. Russia, 1850343, Republic of Karelia, Petrozavodsk, 3rd Sainavolokskiy per., 9A
Tel.: +7 (911) 410-31-05
E-mail: denisefremov@list.ru

Вклад автора

Автор подтверждает единоличную ответственность за концепцию и дизайн исследования, сбор и анализ данных, интерпретацию результатов, а также подготовку рукописи.

Author contribution statement

The author confirms his sole responsibility for the concept and design of the study, data collection and analysis, interpretation of results, and preparation of the manuscript.

Благодарности

Финансовое обеспечение работ осуществлялось за счет средств АО «Кольская ГМК» (г. Мончегорск), договор КГМК/720 от 16.05.2023 г., при содействии Министерства природных ресурсов Мурманской области и администрации города Мончегорска, выражаем им особую благодарность.

Acknowledgments

The work was funded by Kola MMC JSC (Monchegorsk) under Contract No. KGMK/720 dated May 16, 2023, with the assistance of the Ministry of Natural Resources of the Murmansk Region and the Monchegorsk City Administration, to whom we would like to express our special gratitude.