

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](mailto: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](mailto: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 межледникового [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.

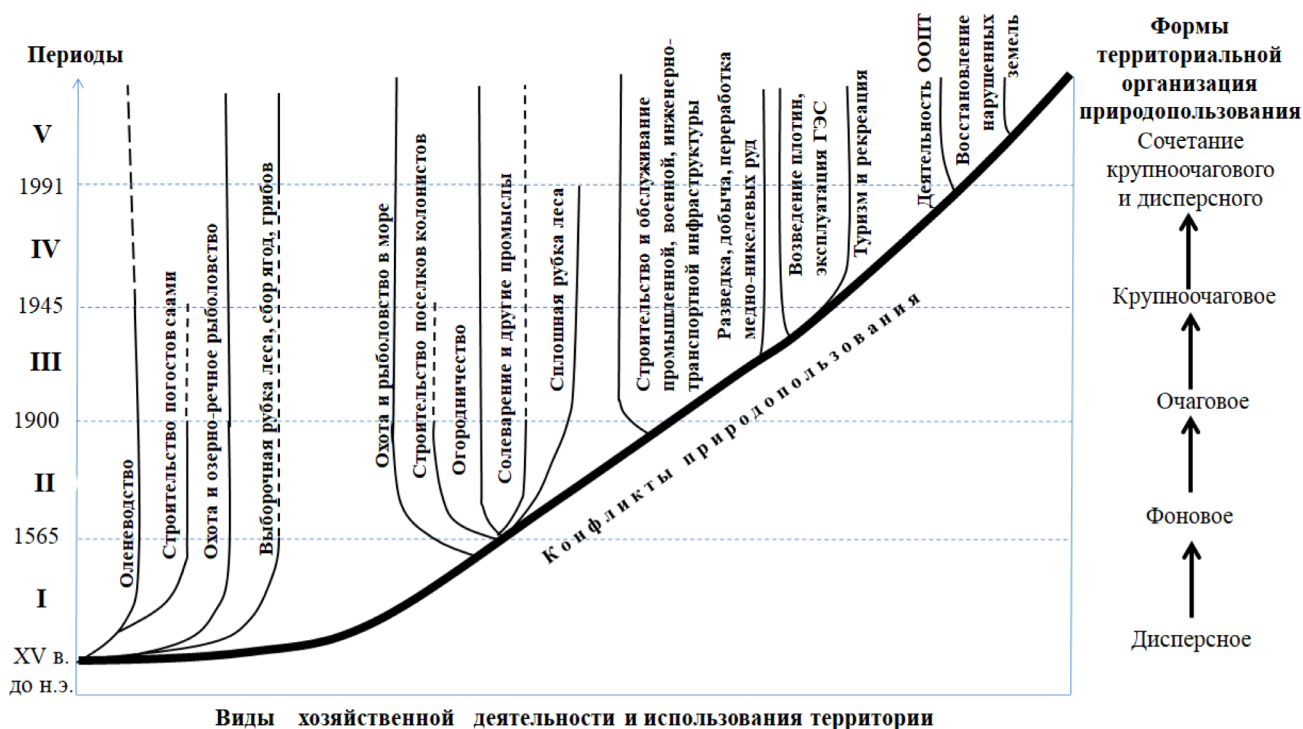


Рис. 1. Основные периоды природопользования на территории Печенгского района Мурманской области [14]

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.

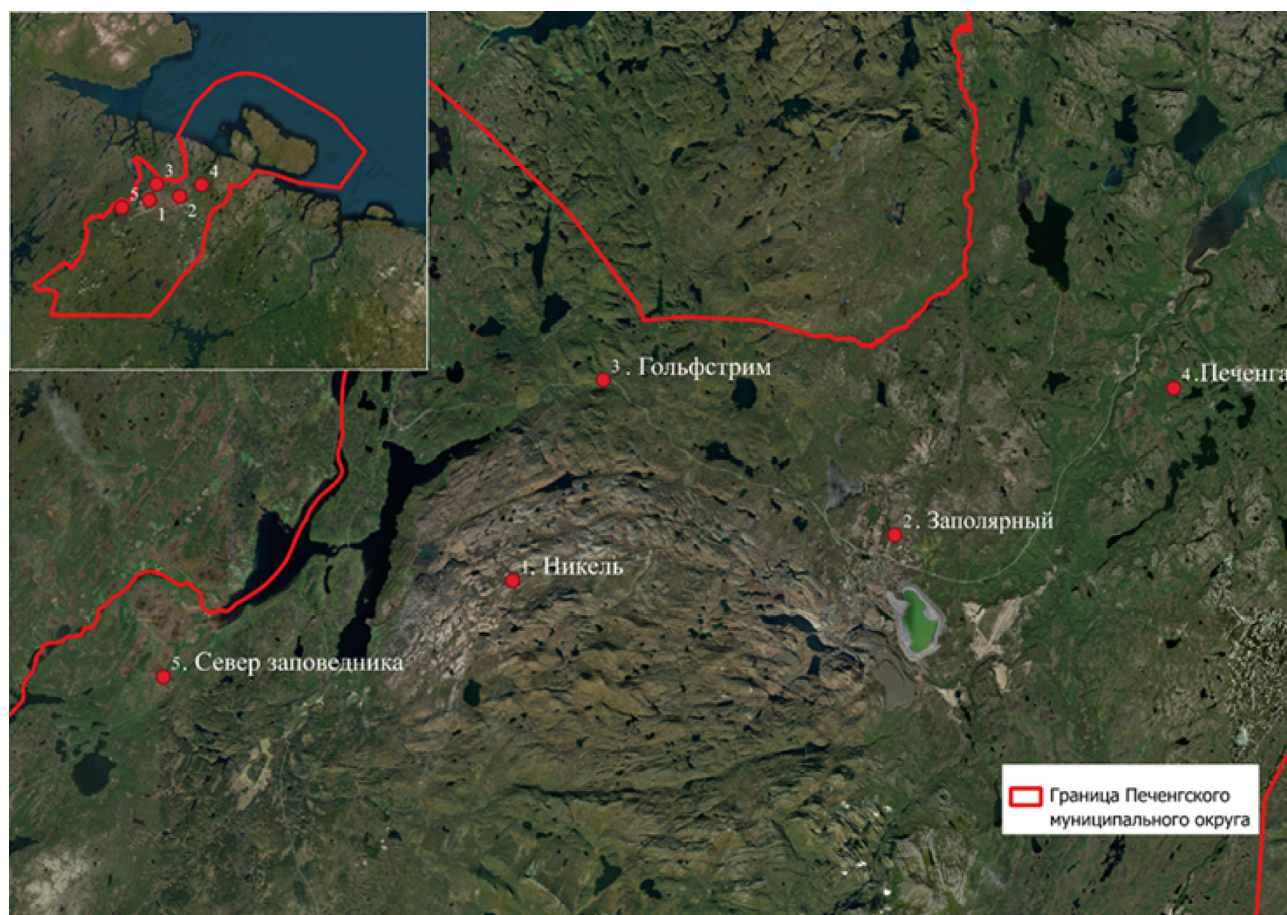
Для анализа экологического состояния техногенно преобразованных ландшафтов Никель — Заполярный были рассмотрены материалы научных отчетов последнего десятилетия XX в., целью которых было исследование накопленного загрязнения и трансграничного переноса [25, 26]. В 2003–2006 гг. проводились масштабные 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 км<sup>2</sup> общей площадью 45 км<sup>2</sup>, 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

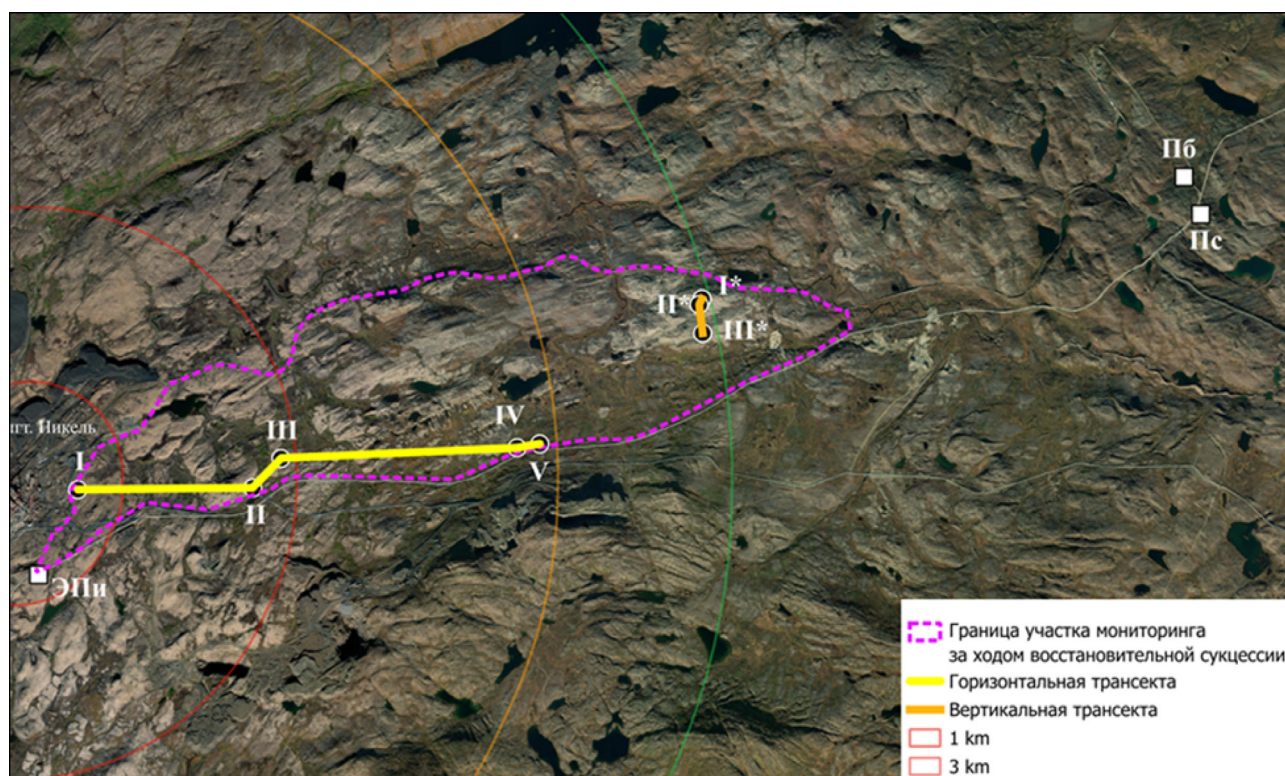
увеличивалась из-за поступления новых объемов аэротехногенных выбросов и переноса загрязненных частиц с эродированных поверхностей, лишенных растительного покрова. Полученные в ходе мониторинговых исследований 2006–2025 гг. данные о состоянии почв, накоплении загрязняющих веществ в растениях, состоянии 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.

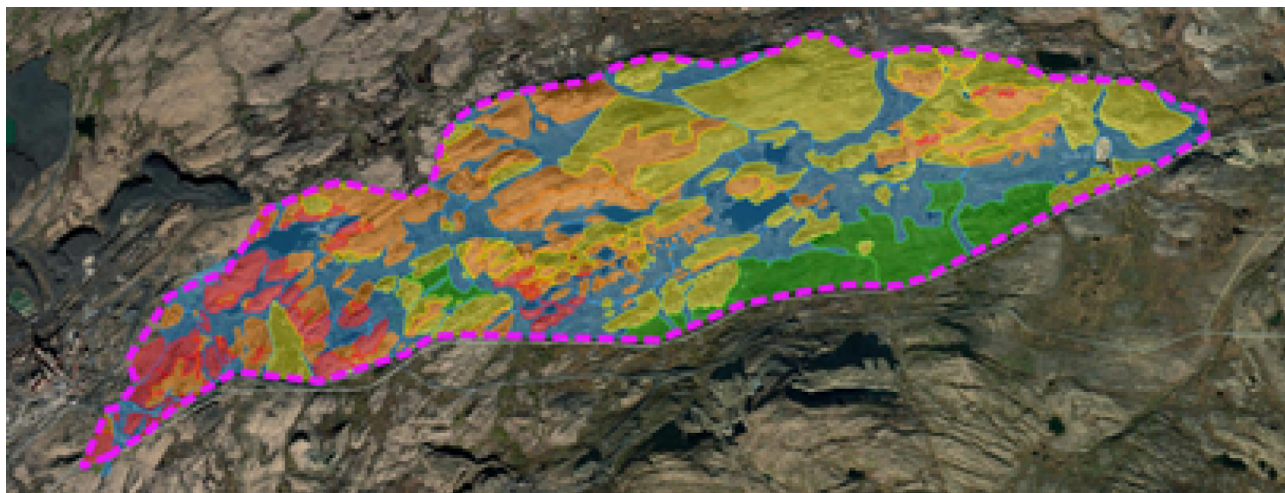
На мониторинговых площадках проводилось изучение химического загрязнения почв и растений, был выявлен видовой состав и проективное покрытие растительности с использованием ландшафтных описаний ключевых участков (15 площадок общей площадью 8000 м<sup>2</sup>), оформлением ландшафтно-экологических трансект, 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 м<sup>2</sup>). 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 м<sup>2</sup> 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: Pazoni 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](mailto: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](mailto: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.