

Зоны интенсивного природопользования в российской Арктике в условиях изменения климата: природные и социальные процессы в долгосрочной перспективе*

*В.А. Маслобоев, Д.В. Макаров, Е.А. Боровичев, Е.М. Ключникова, Л.Г. Исаева, Л.А. Рябова, Д.Б. Денисов,
А.В. Светлов, Е.А. Красавцева, В.В. Максимова, С.И. Мазухина, Т.А. Сухарева, В.В. Еришов, Н.Е. Королева,
Л.В. Иванова, А.В. Лосев*

В статье представлены результаты исследований, выполненных по трем направлениям (блокам).

Блок 1. Исследованы наземные экосистемы в районах интенсивного природопользования. Климатические изменения и антропогенное воздействие приводят к трансформации ландшафтов с нарушенным или полностью уничтоженным растительным покровом. В пресноводных экосистемах выявлены кардинальные



МАСЛОБОВ
Владимир Алексеевич
Федеральный
исследовательский центр
Кольский научный центр РАН



МАКАРОВ
Дмитрий Викторович
Директор Института проблем
промышленной экологии
Севера Кольского научного
центра РАН



БОРОВИЧЕВ
Евгений Александрович
Институт проблем
промышленной экологии
Севера Кольского научного
центра РАН



КЛЮЧНИКОВА
Елена Михайловна
Институт проблем
промышленной экологии
Севера Кольского научного
центра РАН



ИСАЕВА
Людмила Георгиевна
Институт проблем
промышленной экологии
Севера Кольского научного
центра РАН



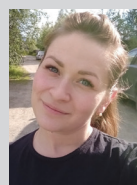
РЯБОВА
Лариса Александровна
Институт экономических
проблем им. г.П. Лузина,
Кольский научный центр РАН



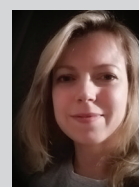
ДЕНИСОВ
Дмитрий Борисович
Институт проблем
промышленной экологии
Севера Кольского научного
центра РАН



СВЕТЛОВ
Антон Викторович
Институт проблем
промышленной экологии
Севера Кольского научного
центра РАН



КРАСАВЦЕВА
Евгения Андреевна
Федеральный
исследовательский центр
Кольский научный центр РАН



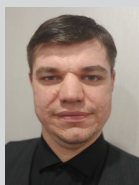
МАКСИМОВА
Виктория Вячеславовна
Федеральный
исследовательский центр
Кольский научный центр РАН



МАЗУХИНА
Светлана Ивановна
Институт проблем
промышленной экологии
Севера Кольского научного
центра РАН



СУХАРЕВА
Татьяна Алексеевна
Институт проблем
промышленной экологии
Севера Кольского научного
центра РАН



ЕРИШОВ
Вячеслав Вячеславович
Институт проблем
промышленной экологии
Севера Кольского научного
центра РАН



КОРОЛЕВА
Наталья Евгеньевна
Полярно-альпийский
ботанический сад-институт
им. Н.А. Аврорина Кольского
научного центра РАН



ИВАНОВА
Людмила Викторовна
Институт экономических
проблем им. г.П. Лузина
Кольского научного центра РАН



ЛОСЕВ
Александр
Вячеславович
Полярный геофизический
институт РАН

перестройки в структурно-функциональной организации от многофакторной антропогенной нагрузки на фоне потепления климата. Получены уникальные данные о долговременной динамике биоразнообразия водных экосистем.

Блок 2. Изучены свойства хвостов обогащения, оценено влияние продолжительности сезона пыления и изменения влажности на валовый выброс пыли, изучено взаимодействие хвостов с почвенными водами. Показана потенциальная экологическая опасность попадания минеральных частиц хвостов в почву. Выполнена оценка потерь цветных металлов в период хранения отходов при различных сценариях изменения климата.

Блок 3. Изучены представления населения об изменениях климата и их социальных последствиях. Выявлено, что проблема изменения климата четко коррелирует с экологическими проблемами. Изучено влияние пандемии COVID-19 на Арктику с учетом изменений климата. Пандемия высветила неустойчивость вахтового метода освоения ресурсов, вахтовые поселки стали очагами эпидемиологической опасности.

Ключевые слова: зоны интенсивного природопользования, Арктика, стратегии адаптации, отходы горно-промышленного комплекса, устойчивое развитие.

**Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №18-05-60142).*

Введение

Стратегические задачи освоения ресурсов российской Арктики диктуют необходимость проведения политики, учитывающей последствия изменения природной среды в этом макрорегионе. В связи с этим возрастает актуальность оценки последствий естественных и антропогенных воздействий, в том числе изменений климата, на природную среду и социально-экономические процессы в зонах интенсивного природопользования в Арктике – регионах и населенных пунктах, где идет активная промышленная ресурсодобывающая деятельность.

Важность исследования определяется, с одной стороны, необходимостью поиска новых методов комплексной оценки природных и антропогенных воздействий, включая изменения климата, в зонах интенсивного природопользования в российской Арктике, а с другой – высокой практической актуальностью разработки научных рекомендаций по формированию превентивных мер и стратегий адаптации к природным и антропогенным воздействиям, в том числе изменениям климата, в арктических промышленных городах.

Отличительной чертой проекта, определяющей его научную новизну, является междисциплинарность. Его реализация осуществлялась на стыке биологии, промышленной экологии, региональной экономики, социологии и североведения. В качестве кейса выбрана Мурманская область – регион наиболее интенсивного природопользования в Арктике. В фокусе исследования были процессы, идущие в наземных экосистемах и отходах горно-металлургического комплекса в районах воздействия крупных предприятий – АО «Кольская горно-металлургическая компания», АО «Апатит» и др., а также социально-экономические процессы в моногородах об-

ласти в их взаимосвязи с текущими и ожидаемыми изменениями климата. Одним из важнейших ожидаемых результатов стала разработка пакета рекомендаций по планированию превентивных мер и формированию адаптационных стратегий к меняющимся природным условиям, в том числе климатическим, как на региональном, так и на муниципальном уровне.

Цель проекта – комплексная междисциплинарная оценка природного и антропогенного воздействия на природную среду в условиях изменения климата и социальные процессы в зонах интенсивного природопользования в российской Арктике и обоснование научных рекомендаций по разработке превентивных мер и стратегий адаптации к изменениям климата в арктических промышленных городах.

В соответствии с поставленной целью и вытекающими из нее задачами исследований были выделены три основные взаимосвязанные направления (блока):

Блок 1. Влияние природных и антропогенных факторов в условиях изменения климата в Арктике: наблюдаемые и ожидаемые последствия для окружающей среды и биоразнообразия в зонах интенсивного природопользования, включая изменения в наземных и водных экосистемах.

Блок 2. Оценка степени влияния изменения климата в Арктике на процессы, происходящие в горно-рудной и горно-металлургической промышленности, техногенных месторождениях, отвалах и хвостохранилищах.

Блок 3. Социальные последствия изменений климата в зонах интенсивного природопользования в российской Арктике (на примере промышленных городов Мурманской области).

Важнейшие результаты, полученные при реализации проекта

Блок 1. Выполнен анализ состава атмосферных выпадений, почв, почвенных вод и хвои деревьев в северо-таежных лесах Мурманской области, подверженных воздушному промышленному загрязнению выбросами комбинатов «Североникель» и «Печенганикель» (АО «Кольская ГМК») [1–3]. Анализ содержания тяжелых металлов за более чем 20-летний период снижения выбросов показал, что в хвое сосны у деревьев разного возраста содержание никеля и меди снизилось в листопадных лесах и техногенном редколесье, а в хвое ели – в непосредственной близости от источника загрязнения, в техногенном редколесье. Состав атмосферных выпадений и почвенных вод, прошедших сквозь древесный полог, отличается высокими концентрациями и выпадениями элементов по сравнению с водами межкрупных пространств, что объясняется их смывом и выщелачиванием из крон деревьев. В еловых лесах концентрации и выпадения большинства элементов выше по сравнению с сосняками, что обусловлено большей поверхностью и наиболее выраженными барьерными функциями крон ели. В атмосферных выпадениях в листопадных лесах и техногенных редколесьях по сравнению с фоновой территорией наблюдается резкое и достоверное увеличение concentra-

ций основных загрязнителей: меди и никеля – до 140 раз, сульфатов – до 7 раз, что наиболее ярко выражено в подкрупных пространствах. В фоновых ельниках и сосняках в дождевых водах обнаружено увеличение концентраций никеля в 2013–2017 гг. как в подкрупных, так и в межкрупных пространствах, что объясняется возрастанием содержания загрязнителей в аэрозолях, распространяющихся на значительные расстояния.

Проведен сравнительный анализ уровней выпадений загрязнителей из атмосферы на объектах исследований с установленным в международной практике критическим уровнем, с учетом меж- и внутрибиогеоценотического варьирования. Выпадения тяжелых металлов и сульфатов в атмосферных выпадениях под кронами деревьев превышали годовые критические уровни (до 4 раз) уже в фоновых условиях. Наиболее высокие превышения наблюдаются в листопадных лесах и техногенных редколесьях, максимальные превышения уровня критических нагрузок выпадений сульфатов – до 7 раз и тяжелых металлов – до 600 раз. Выявлены закономерности, связанные с видовыми различиями в поглощении элементов питания растениями, и реакция биоты на техногенное воздействие в зонах интенсивного природопользования Мурманской области. В элементном составе различных видов растений и лишайников выявлен ряд сходных изменений под воздействием на лесные экосистемы газовоздушных выбросов горно-металлургических предприятий (дисбаланс в содержании макро- и микроэлементов, аккумуляция загрязнителей). Установлено, что накапливающиеся в листьях и плодах тяжелые металлы (Ni, Cu, Co, Cd, Pb) делают непригодными их использование в качестве пищевого и лекарственного сырья. Показано значительное пространственное варьирование химического состава растений и лишайников, которое определяется типом растительного сообщества, внутрибиогеоценотическим (парцелярным) варьированием и степенью техногенной трансформации лесных экосистем. Проведена оценка состояния зеленых насаждений в зонах интенсивного природопользования в районе расположения комбинатов «Печенганикель» и «Североникель» (пгт. Никель и г. Мончегорск Мурманской области). Промышленными выбросами в различной степени повреждены почти все деревья и кустарники урбанизированных территорий. В зоне воздействия комбината «Печенганикель» сохраняется высокая степень техногенной нагрузки на урбанизированные территории и лесные экосистемы, что подтверждается негативными изменениями в химическом составе березы в разные периоды наблюдений (1991, 2000, 2004, 2019 гг.). Концентрации Ni и Cu в листьях березы пгт. Никель значительно превышают таковые в г.

Мончегорске. На городской территории содержание тяжелых металлов (ТМ) в ассимилирующих органах березы превышают не только значения регионального фона, но и уровни, выявленные в лесных экосистемах по градиенту атмосферного загрязнения от комбината «Печенганикель». Изучена растительность, ценофлора сосудистых растений и выполнен анализ территориальной охраны природы городских и антропогенно нарушенных территорий гг. Кировск, Апатиты, Полярные Зори. Выделены растительные сообщества. Преобладание в долготном спектре видов с циркум- и космополитным ареалами характеризует практически все ценофлоры антропогенных местообитаний умеренного климатического пояса. Группы видов с космополитным и широким интродукционным ареалом (большинство из них входят в европейские и американские списки интродуцированных и инвазивных видов, Global Register of Introduced and Invasive Species) составляют самую большую группу в городской флоре. Высокая доля травянистых многолетников сближает флору городов с флорами пойменных и залежных лугов Мурманской обл. Около 20% от общего количества редких и исчезающих видов в Мурманской области зарегистрировано в Хибинах и на прихлебинской равнине, преимущественно в границах 11 особо охраняемых природных территорий (ООПТ) общей площадью 123 220 га. Некоторые редкие виды осваивают антропогенно преобразованные территории. Наиболее критичными для утраты биоразнообразия в Хибинских горах являются развитие горнодобывающей промышленности, вырубка лесов и лесные пожары. Площадь открытых карьеров, лишенных растительности отвалов, дорог и других сопутствующих нарушений составляет 5% от площади всего горного массива, что сопоставимо, например, с долей еловых лесов в Хибинах. Условием существования и развития промышленно освоенного региона является охрана природного компонента в виде крупной ООПТ, в противном случае происходит антропогенная трансформация даже его удаленных участков, снижение биоразнообразия и фрагментация ландшафта [4].

В водных экосистемах наибольшую опасность представляет массовое развитие цианопрокариот [5], особенно в водоемах питьевого назначения, а также явление «Didymo», деформирующее условия обитания в арктических реках, разрушающее нерестилища лососевых рек. Повсеместно отмечается снижение доли ценных промысловых видов рыб на фоне увеличения малоценных короткоциклового представителей ихтиофауны. Установлено, что одним из факторов устойчивости планктонных организмов к токсической нагрузке может быть достаточное количество биогенных элементов. Зарегистрированы базы данных об альгоценозах (№2018621734) и сообще-

ствах зоопланктона (№2020621361) Евро-Арктического региона.

Блок 2. Исследования были сфокусированы на проблеме переработки бедных руд и техногенных отходов геотехнологическими методами кучного и бактериального выщелачивания, включая объекты кучного выщелачивания цветных и благородных металлов в районах с арктическим и субарктическим климатом с отрицательными среднегодовыми температурами. Показаны возможности применения этих приемов при организации геотехнологической переработки сульфидных руд цветных металлов [6–9]. Впервые высказано предположение о возможности применения метода пассивного выщелачивания для переработки забалансовых медно-никелевых руд и техногенного сырья. Повышение среднегодовых и сезонных температур в районах арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ), в частности, Мурманской области, увеличение количества осадков будет способствовать усилению негативного воздействия на окружающую среду техногенных объектов – отходов горнодобывающей промышленности. Вместе с тем, изменение климата окажет и положительное влияние на горную промышленность, связанное с повышением рентабельности гидрометаллургических технологий, например, кучного биовыщелачивания.

Исследованы инженерно-геологические свойства и вещественный состав хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд АО «Апатит». По литологической классификации хвосты поверхностных слоев могут быть отнесены к мелко- и среднезернистым пескам. По величине пористости хвосты соответствуют пескам в условиях естественного залегания (пористость 25–45%), пористость проб свежееуложенных хвостов соответствует глинистым грунтам в условиях естественного залегания (пористость 30–60%). Все исследованные пробы хвостов по плотно-

сти сложения относятся к рыхлым грунтам (коэффициент пористости 0.76–1.31). Минеральный и химический состав отобранных проб достаточно однороден. Преобладающим минералом хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд является нефелин, содержание которого составляет 52–65%, а также эгирин (18–22%), полевые шпаты (8–11%), вторичные минералы по нефелину – натролит, аннит, лепидомелан и либнерит (3–4%), апатит (2–3%), титанит (5–6%), магнетит, слюды. Усредненный химический состав проб хвостов, %: SiO_2 – 39.04; Al_2O_3 – 23.10; TiO_2 – 2.42; Na_2O – 11.94; K_2O – 5.00; Fe_2O_3 – 6.13; FeO – 3.20; CaO – 5.00; MgO – 1.09; P_2O_5 – 1.21; SO_3 – 0.15; потери при прокаливании – 1.10. Эффективная удельная активность природных радионуклидов исследованных проб находится в диапазоне значений $102 \pm 11 \div 238 \pm 18$ Бк/кг. По величине удельной активности природных радионуклидов в соответствии с НРБ-99/2009 пробы отнесены к строительным материалам I класса, которые могут использоваться без ограничений. Хвосты обогащения представляют интерес как техногенное месторождение – сырье для получения глинозема, поташа, соды, редкоземельных элементов. Из хвостов могут быть выделены также эгириновый, сфеновый и полевошпатовый концентраты, получены различные строительные материалы.

Исследован вещественный состав хвостов обогащения комплексных руд. (АО «Ковдорский ГОК»). Хвосты поверхностных слоев II поля отвала относятся к мелко- и среднезернистым пескам. Пористость проб хвостов составила от 25.5 до 42.7%, что соответствует песчаным грунтам в условиях естественного залегания. Коэффициент пористости проб хвостов варьировал в диапазоне 0.34–0.74. Большинство проб хвостов по плотности сложения соответствует грунтам средней плотности, две пробы – рыхлым грунтам. В соста-

ве хвостов обогащения комплексных руд основным минералом является оливин, содержание которого составляет 28–32%, в заметных количествах представлены полевые шпаты и эгирин, присутствуют также карбонаты (кальцит, доломит), слюды, апатит и магнетит. Усредненный химический состав проб хвостов, %: SiO_2 – 27.5; MgO – 19.2; CaO – 18.6; Fe_2O_3 – 6.9; Al_2O_3 – 3.4; Na_2O – 1.3; K_2O – 1.4; MnO – 0.2; TiO_2 – 0.4; P_2O_5 – 2.0; SO_3 – 0.5; CO_2 – 12.0; потери при прокаливании – 6.1. Эффективная удельная активность природных радионуклидов исследованных проб находится в диапазоне значений $83 \pm 8 \div 156 \pm 13$ Бк/кг. В соответствии с НРБ-99/2009 пробы отнесены к строительным материалам I класса, которые могут использоваться в строительстве без ограничений. Техногенный минеральный объект представляет интерес с точки зрения доизвлечения апатита и магнетита, хотя содержания этих минералов в составе хвостов существенно ниже, чем в хвостах I поля, а также в качестве сырья для получения различных строительных материалов, в частности, конструкционных и теплоизоляционных керамических.

По инженерно-геологическим характеристикам и вещественному составу хвосты обогащения как апатитонефелиновых, так и комплексных руд склонны к пылению. В этой связи прогнозируемое потепление климата на территории АЗРФ, в частности, в Мурманской области, и связанное с этими процессами увеличение продолжительности бесснежного периода и рост температур летних месяцев способствует повышению негативного воздействия объектов на атмосферу и гидросферу, что требует разработки новых способов безопасного хранения (пылеподавления) хвостов обогащения.

Выполнена оценка связи метеорологических параметров теплого периода и интенсивности пыления хвостов обогащения апатитонефелиновых руд за период 2001–2019 гг. Установлено, что наиболее часто превышение наблюдалось при среднесуточной температуре воздуха в интервале 10–15 °C, влажности 60–80% и скорости ветра 2–4 м/с. Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что для превышения ПДК достаточно кратковременных порывов ветра в районе хвостохранилища. Наибольшее число случаев приходится на ветры северо-западного направления. Анализ метеорологических параметров теплого периода показал, что в последнее десятилетие наблюдается существенное, более чем на 2 °C, повышение среднемесячной температуры в мае. С этим связан более ранний сход снежного покрова и увеличение продолжительности потенциальной возможности пыления хвостов. В летние месяцы (за исключением июня) и в сентябре зафиксировано незначительное повышение среднемесячной температуры. Средние

скорости ветра и влажность за это период существенно не изменились. Сопоставление изменения влажности проб хвостов, отобранных на одной и той же площади, показало, что уже через 10–15 дней после схода снежного покрова при отсутствии атмосферных осадков даже в случае среднесуточной температуры ниже 5–8 °С возникает опасность пыления.

В статических условиях проведены эксперименты по мобилизации экологически опасных элементов из материала хвостов обогащения апатитонефелиновых и комплексных руд при различных температурах и взаимодействии с органическим веществом. В качестве источника водорастворимого органического вещества были использованы почвенные вытяжки с содержанием углерода $C_{\text{общ}}$ 50 и 100 мг/л. Температурный режим был выбран в соответствии со средними температурами весеннего и летнего периодов на Кольском полуострове. Хвосты апатитонефелиновых руд умеренно сильно обогащены Nb, Sr, Ti, V, умеренно обогащены Co, Cu, Mn, Ta и LREE. Хвосты комплексных руд сильно обогащены Co, умеренно сильно обогащены Cu, Ni, Sr, умеренно обогащены Mn, Nb. Установлено, что переход в подвижные формы экологически опасных элементов, как ТМ, так и РЗЭ, усиливает повышение температуры, увеличение внесенного органического вещества и снижение pH растворов. В зависимости от распределения форм существования элементов, внесенное органическое вещество может как снизить экологическую опасность хвостов обогащения, так и, наоборот, увеличить концентрацию поллютанта в жидкой фазе, повышая миграционную способность. Результаты исследований целесообразно учитывать при проведении рекультивационных работ на хвостохранилищах, так как для биологического этапа характерно увеличение содержания органического вещества и увеличение кислотности грунтов, что может приводить к изменению миграционной способности загрязнителей.

Исследованы гипергенные процессы, протекающие в отвалах Аллареченского месторождения, хвостах обогащения медно-никелевых руд и отвалах шлаков медно-никелевого производства в условиях различных температур и режимов увлажнения. Для физико-химического моделирования гипергенных процессов минералов шлаков применен программный комплекс «Селектор» [10, 11]. В лабораторных опытах образцы рудного материала массой 100 г помещали в коническую колбу, в которую заливали дистиллированную воду ($pH=5.9$). Отношение Т:Ж составляло 2:3. Эксперимент продолжали 160 суток при периодическом перемешивании раствора. Периодически измеряли pH раствора и концентрации никеля и меди. Установлено, что основными

катионами поровых растворов рассмотренных систем являются ионы магния, кальция, алюминия, никеля и меди, преобладающими анионами – сульфат-, гидросульфат- и гидрокарбонат-ионы. Концентрации ионов при температурах 3 и 20 °С отличаются незначительно. Результаты лабораторных экспериментов свидетельствуют о том, что модель корректно описывает протекающие изменения водородного показателя и ионного состава систем. Для ионов никеля установлено, что с усилением степени взаимодействия металл интенсивнее выщелачивается при более низкой температуре. Основными новообразованными фазами являются гетит, глинистые алюмосиликаты, алунит. При малых степенях взаимодействия фиксируется гиббсит, при увеличении степени взаимодействия и количества воды в системе образуются гипс, кремнезем, сульфаты никеля. Результаты моделирования показывают, что повышение среднесезонных температур, длительности безморозного периода приведет к интенсификации гипергенных процессов при хранении отходов горно-металлургического комплекса и увеличению негативного воздействия на компоненты окружающей среды прилегающих территорий [12–15].

Рассчитаны максимальный разовый и валовый выбросы пыли с поверхности хранилища отходов обогащения апатитонефелиновых руд за период май – сентябрь 2013–2018 гг. Установлено, что ежегодный выброс пыли с поверхности хвостохранилища АНОФ-2 варьировал от 2 805 до 4 026 т. Для расчета приземных концентраций пыли использована единая программа расчета загрязнения атмосферы УПРЗА «Эколог» (версия 4.60), разработанная компанией «Интеграл». В программе реализованы методики проведения оценки воздействия на окружающую среду, утвержденные Минприроды России. Скорость выброса пыли рассчитывали с помощью програм-

мы «Горные работы» версии 1.30.11 от 10.08.2019. Метеорологические данные были получены в ФГБУ «Мурманское УГМС». Для расчета также использованы данные метеорологических характеристик территории хвостохранилища (данные метеостанции Апатитовая, Россия, №22213 по классификации Всемирной метеорологической организации), информацию о текущей погоде с международного сервера обмена данными NOAA, США, в форматах SYNOP и METAR. Из полученного массива данных о метеорологических условиях в районе исследования выбирали дни без осадков; вели расчеты отдельно для каждого из ветровых диапазонов 5–7 м/с, 8–9 м/с, 10 м/с и более. С учетом того, что рассредоточенный намыв хвостовой пульпы производится по секторам и по окончании намыва участок закрепляют связующим реагентом, территория хвостохранилища была разделена на двенадцать условных участков, являющихся потенциальными источниками пылевых выделений. Расчеты вели для одного условного участка площадью 210 000 м². Расчеты рассеивания показывают, что атмосферный ореол пылевого загрязнения хвостохранилища АНОФ-2 распространяется на десятки километров. При скорости ветра около 8 м/с концентрация взвешенных веществ на границе санитарно-защитной зоны предприятия многократно превышает ПДК, наблюдается превышение и в жилой зоне г. Апатиты – до 2.9 ПДК. Результаты моделирования согласуются с данными о случаях превышения ПДК взвешенных веществ в атмосферном воздухе в г. Апатиты, полученными от ФГБУ «Мурманское УГМС». Выполнена оценка возможного влияния изменений климатических условий региона на пыление хвостохранилища [16, 17]. На основе анализа и статистической обработки данных о метеорологических условиях был рассчитан прирост валового выброса пыли неорганической

20–70% SiO₂ при условии возможного потепления, схода снежного покрова и более раннего наступления периода пыления хвостов, изменения влажности материала верхних слоев хвостов. В среднем, метеорологические условия, благоприятствующие пылению хвостов (низкая влажность атмосферного воздуха, отсутствие осадков, скорость ветра более 5 м/с), суммарно наблюдались в течение 72 часов в месяц (выгруженные данные метеостанции Апатитовая №22213 содержат показатели за каждые 3 часа). Установлено, что при увеличении сезона пыления на неделю в зависимости от влажности хвостов можно ожидать увеличения поступления пыли с поверхности хвостохранилища в атмосферу на величину от 72 (при влажности хвостов 9–10%) до 358 т (при влажности 5–7%), а при увеличении на четыре недели – от 286 до 1 432 т. Таким образом, полученные результаты показывают, что пыль с поверхности хвостохранилища вносит значительный вклад в загрязнение окружающей среды. Влияние изменений климатических условий региона на пыление хвостохранилищ необходимо учитывать для разработки превентивных мер по пылеподавлению.

Применение бактериального кучного выщелачивания для отходов сульфидных медно-никелевых руд преследует две цели: снизить экологическую опасность хвостов длительного хранения и получить дополнительные объемы цветных металлов. Эксплуатация объектов кучного выщелачивания цветных и благородных металлов в районах с арктическим и субарктическим климатом, в том числе Мурманской области, сопряжена с большими техническими сложностями и экономическими затратами. Поэтому актуальной является проверка возможности применения метода пассивного выщелачивания для переработки некондиционных медно-никелевых руд и техногенного сырья. Способ подразумевает предварительную сернокислотную агломерацию материала в присутствии активаторов окисления сульфидов, сооружение рудного штабеля, его хранение в холодный период года и последующее выщелачивание в теплый период. Если показатели выщелачивания цветных металлов за сезон оказываются технологически и экономически приемлемы, то рентабельность процесса существенно увеличивается. В этой связи в лабораторных условиях выполнены исследования по агломерации, последующему хранению и выщелачиванию техногенного сырья, в качестве которого использованы хвосты обогащения медно-никелевых руд текущего производства.

В ходе эксперимента хвосты гранулировали с помощью экспериментального гранулятора ФЛ015-1К-02, использовали 20 или 30%-й раствор H₂SO₄, соотношение Т:Ж варьировали от 4:1 до 9:1. Полу-

ченные гранулы орошали 0.5%-м раствором серной кислоты, содержащим окислитель в количестве 2 г/л, соотношение гранул и окислителя составляло при этом 5:1. Изучались два окислителя – трехвалентное железо (Fe^{3+}) и нитрит-ион (NO_2^-). Образование нитрит-иона достигалось опосредованно путем добавления в раствор серной кислоты нитрита натрия. Использование нитрита натрия также подразумевает образование более реакционноспособной формы – азотистой кислоты. С целью определения возможности формирования рудного штабеля, длительного хранения в условиях отрицательных температур и последующего выщелачивания измеряли физические характеристики гранул после приготовления – предел прочности при сжатии и слеживаемость. После этого была проведена оценка влияния отрицательных температур на физические свойства гранул и кинетику извлечения металлов при выщелачивании. Одну часть гранул хранили в течение 180 суток при температуре $+19^\circ\text{C}$, другую – в морозильной камере при температуре -15°C . После хранения гранулы загружали в перколяторы и подвергали водному, а затем сернокислотному выщелачиванию. Масса загрузки рудного материала составляла 200 г. Режим водного выщелачивания: подача воды 1 раз в сутки, суточный объем воды 50 мл, время выщелачивания 20 суток. Режим сернокислотного выщелачивания: концентрация кислоты 1%, подача кислоты 1 раз в сутки, суточный объем кислоты 50 мл, время выщелачивания 20 суток. Процесс вели без оборота раствора. В ходе водного выщелачивания хвостов, гранулированных с использованием Fe^{3+} в качестве окислителя, в раствор извлечено 28.2% никеля и 0.3% меди. При последующем выщелачивании раствором серной кислоты извлечения металлов составили: никеля 27.9% и меди 4.5%. Таким образом, за 40 суток эксперимента суммарно извлечено 56.1% никеля и 4.8% меди. При использовании в качестве окислителя NO_2^- средняя концентрация металлов в растворе составила 79.3 мг/л никеля и 3.6 мг/л меди. В процессе водного выщелачивания гранул с использованием NO_2^- в продуктивный раствор извлечено 15.0% никеля и 1.4% меди, а при кислотном выщелачивании – 30.2% никеля и 9.0% меди. Итого суммарно извлечено 45.2% никеля и 10.0% меди. По окончании водного выщелачивания гранул, приготовленных с использованием Fe^{3+} в качестве окислителя и хранившихся при -15°C , в раствор извлечено 27.5% никеля и 3.4% меди. При выщелачивании раствором серной кислоты к концу эксперимента удалось извлечь 16.9% никеля и 5.5% меди. За 40 суток выщелачивания в раствор извлечено 44.4% никеля и 8.9% меди. В процессе водного выщелачивания гранул, приготовленных с исполь-

зованием NO_2^- и хранившихся при -15°C , в продуктивный раствор извлечено 38.5% никеля и 6.8% меди. В процессе последующего сернокислотного выщелачивания достигнуты извлечения: никеля 30.8% и 9.1% меди. Суммарно извлечено 69.3% никеля и 15.9% меди. Таким образом показано, что хранение гранулированного рудного материала в условиях отрицательной температуры не приводит к существенному снижению механических свойств гранул. Грануляция с использованием в качестве активатора окисления сульфидных минералов нитрит-ионов способствует более интенсивному извлечению металлов в продуктивный раствор при последующем выщелачивании.

Смоделировано прогнозируемое потепление климата и выполнена оценка того, как увеличение продолжительности теплого периода и повышение среднесуточных температур скажется на условиях процесса выщелачивания никеля и меди из некондиционных медно-никелевых руд. Для проведения лабораторных экспериментов по кучному биовыщелачиванию был использован психротолерантный железокисляющий штамм микроорганизмов ацидофилов – *Acidithiobacillus ferrivorans* NO-37, выделенный из подотвальной воды Аллареченского ТМ медно-никелевых руд. Характерной особенностью штамма является температурный диапазон окисления сульфидных минералов от 4 до 37°C , с оптимумом $20-30^\circ\text{C}$. Руду Аллареченского техногенного месторождения (ТМ) измельчали до крупности 5 ± 2 мм, после чего пробу массой 800 г загружали в стеклянные перколяторы и на протяжении 50 суток орошали бактериальным раствором, приготовленным с использованием минеральной питательной среды, содержащей соли азота и фосфора, с исходной численностью микроорганизмов около 10^8 кл/мл. Объем подаваемого раствора составил 200 мл. Продуктивный раствор разбавляли

на 2/3 свежим бактериальным раствором и снова подавали на верх рудного слоя, поддерживая значение *pH* на уровне 2.0 путем подкисления с использованием 2%-го раствора серной кислоты. Для установления влияния температуры окружающей среды на извлечение металлов кучное выщелачивание производили при различных температурах (5, 10, 15 и 20 °C) с использованием термостата. По концентрации металлов в жидкой фазе рассчитывали степень извлечения цветных металлов.

В ходе биовыщелачивания при температуре 20 °C средняя концентрация никеля в растворе составила 424.5 мг/л, меди – 97.1 мг/л. К окончанию эксперимента извлечено 15.9% никеля и 7.4% меди. При температуре 15 °C средняя концентрация металлов в растворе была несколько ниже по сравнению с предыдущим опытом: никель – 395.1 мг/л, медь – 68.3 мг/л. Извлечение никеля составило 14.2%, меди – 5.2%. Снижение температуры до 10 °C привело к уменьшению извлечения меди в раствор. Извлечение никеля практически не изменилось. Так, средняя концентрация никеля в растворе на протяжении эксперимента составила 393.9 мг/л, меди – 52.5 мг/л. Извлечение металлов к концу эксперимента составило: никель – 14.3%, медь – 4.1%. В процессе биовыщелачивания при температуре 5 °C концентрация никеля в продуктивных растворах составила в среднем 340.1 мг/л. Средняя концентрация меди в растворе была 39.1 мг/л, что существенно ниже по сравнению с экспериментами при более высоких температурах. К концу эксперимента из руды удалось извлечь 12.3% никеля и 3.1% меди. Таким образом, при снижении температуры окружающей среды процессы биовыщелачивания начинают протекать менее интенсивно, что проявлялось уже в первой половине экспериментов.

Были получены зависимости извлечений цветных металлов (%) от продолжительности процесса (t_p ,

диапазон 1–50 суток) и температуры (t_2 , диапазон 5–20 °C):

$$\text{Извлечение никеля} = 1.7535 + 0.3944 \cdot t_1 - 0.0356 \cdot t_2 - 0.004 \cdot t_1^2 + 0.0038 \cdot t_1 \cdot t_2 + 0.0034 \cdot t_2^2,$$

$$\text{Извлечение меди} = 0.0042 + 0.1342 \cdot t_1 - 0.0318 \cdot t_2 - 0.0022 \cdot t_1^2 + 0.0047 \cdot t_1 \cdot t_2 + 0.0053 \cdot t_2^2.$$

Эти зависимости позволяют оценить прирост извлечений металлов в продуктивные растворы при увеличении продолжительности теплого периода и повышении среднесуточных температур. Так, средняя температура двух декад мая и июня в районе отвала Аллареченского месторождения составляет 8.02 °C. Извлечение в продуктивный раствор никеля за 50 суток в этот период составит 12.93%. При повышении температуры до 10 °C извлечение возрастет до 13.36%. Средняя температура двух декад июля и августа составляет 12.92 °C. Извлечение никеля при повышении температуры до 15 °C возрастет до 14.55%, а при 17 °C до 15.08%.

Хвостохранилище обогатительной фабрики АО «Кольская ГМК» в г. Заполярный Мурманской области эксплуатируется с 1965 г. по настоящее время, занимает площадь около 600 га и является одним из крупнейших техногенных объектов цветной металлургии России. Рудные минералы хвостов представлены сульфидами: пирротин, пентландитом и халькопиритом, а также магнетитом. Преобладающими нерудными минералами являются серпентины. Присутствуют также амфиболы, пироксены, тальк, хлориты, карбонаты. В процессе хранения хвостов вследствие гипергенных процессов происходит переход цветных металлов в растворимую форму и их элиминирование в нижние слои хвостохранилища, либо в окружающую среду. При этом часть металлов осаждается химически активными нерудными минералами, в частности, серпентинами, хлоритами и карбонатами. При последующей переработке хвостов, в частности, с использованием флотации, цветные металлы в составе силикатов и карбонатов будут неизвлекаемыми. Была выполнена оценка потерь цветных металлов в период хранения отходов горно-металлургического комплекса в отвалах при различных сценариях изменения климата на примере хвостов обогащения медно-никелевых руд. Продолжительность бесснежного периода в районе расположения хвостохранилища в среднем составляет 153 суток. В расчетах принимали среднесуточное количество осадков за этот период, равное 1.7 мм. Учитывали средние концентрации никеля и меди в поровых растворах проб хвостов текущего производства, полученных фильтрацией дистиллированной воды в перколяторах. В результате расчетов было установлено, что потери ценных компонентов из поверхностного слоя хво-

стов за бесснежный сезон (май – сентябрь), в среднем составят: никеля – 54.14 т, меди – 11.60 т. Для оценки возможных последствий изменения климата результаты эксперимента были аппроксимированы на увеличение бесснежного периода на 1, 2, 3 и 4 недели. Также были рассмотрены варианты влияния изменения влажности – в расчетах варьировали количество выпадающих осадков ± 5 и 10%. Как видно, с увеличением продолжительности бесснежного периода потери цветных металлов за счет элиминирования в нижние слои хвостохранилища либо в окружающую среду закономерно возрастают. Так, потери никеля растут с 57.12 т при увеличении продолжительности бесснежного периода на 1 неделю до 64.62 т при увеличении на 4 недели, меди с 12.24 до 13.85 т соответственно. При уменьшении количества выпадающих осадков потери металлов снижаются. Так, при уменьшении количества осадков на 10% потери никеля составят 51.41 и 58.16 т, меди 11.02 и 12.46 т для 1 и 4 недель увеличения продолжительности бесснежного периода соответственно. Наоборот, увеличение количества осадков приведет к росту потерь. Например, при увеличении количества осадков на 10% потери никеля составят 62.83 и 71.08 т, меди 13.46 и 15.23 т для 1 и 4 недель. На основе произведенных расчетов можно сделать вывод о том, что увеличение длительности бесснежного периода и рост количества осадков в этот период будет способствовать более интенсивному выносу в нижние слои хвостохранилища и сопредельные среды цветных металлов, переходящих в растворенные формы.

Блок 3. Выполнено сравнительное исследование изученности в российском и зарубежном научном дискурсе проблемы социальных последствий изменения климата в Арктике [18]. Установлено, что в зарубежной научной литературе тема социальных последствий изменения климата в Арктике (результатов климатических колебаний, влияющих на благополучие населения) – одна из самых обсуждаемых. В российской науке приоритет отдается изучению самих климатических изменений и их биолого-экологических эффектов. Наибольшие пробелы в знаниях существуют в вопросах социальных последствий изменения климата для коренных и местных сообществ российской Арктики, влияния климатических изменений на социальные процессы в зонах интенсивного промышленного освоения, в том числе в промышленных городах АЗРФ, разработки мер по смягчению последствий и адаптации на местном и региональном уровне. Определены приоритетные направления отечественных научных исследований по изучению социальных последствий изменения климата в Арктике: сбор и анализ первичной инфор-

мации о наблюдаемых изменениях в арктических экосистемах и стратегиях адаптации местных жителей и коренного населения к этим изменениям, об изменениях в зонах интенсивного промышленного освоения, на промышленных предприятиях и в моногородах АЗРФ; разработка сценарных прогнозов будущих изменений с использованием местных знаний [19, 20].

Проведено исследование представлений населения об изменениях климата и их социальных последствиях в зонах интенсивного промышленного освоения в Арктике на примере Мурманской области на основе качественных методов (2018 г., метод глубинного интервью). Проведено 20 интервью по 50 вопросов с жителями промышленных городов, критерий отбора респондентов – проживание на Севере не менее 30 лет. Вопросы касались субъективного восприятия тенденций изменения климата на территории проживания; изменения биоразнообразия; практик природопользования, их возможной связи с изменениями климата и адаптации к изменившимся условиям; влияния климата на физическое и психическое здоровье; информированности в отношении проблемы изменения климата и ее осознанности; предполагаемых причин изменения климата и необходимых действий.

Выявлено, что субъективное восприятие климатических изменений жителями городов области в большинстве случаев соответствует объективным данным о температурных и других изменениях. Если в начале интервью большинство респондентов отрицали изменения климата и их влияние на условия жизни и личное благополучие, то в ходе интервью климатические изменения и их последствия осознавались и заинтересованно обсуждались. Опрошенные жители отмечают изменения климата на протяжении трех последних десятилетий. Часть наблюдений респондентов за изменениями кли-

мата и биологическими объектами совпадает с выводами ученых. Особое внимание населения привлекают изменения в водных экосистемах – ухудшение качества воды, уменьшение количества и снижение качества рыбы, что влияет на практики природопользования, характерные для населения городов, расположенных вблизи водоемов, в некоторых случаях делая невозможным лов рыбы в традиционных местах.

Многие из опрошенных отмечали появление новых болезней растений и вредителей, видов животных и растений, ранее не известных в регионе, и то, что это влияет на практики природопользования, в том числе на дачных участках. Научные данные подтверждают, что в последние десятилетия в Мурманской области фиксируется продвижение на север несвойственных насекомых, болезней растений. В связи с изменением климата появились два новых вида бабочек-пядениц, повреждающих леса. С начала 2000-х гг. увеличилась активность грибов – возбудителей болезней древесных и кустарниковых пород – ржавчины, антракноза и др. Респонденты ощущают изменения в сфере здоровья, связывая их с климатическими колебаниями. Высказывались мнения о том, что «сезоны сдвинулись» и увеличились периоды межсезонья, возросло число экстремальных погодных явлений, а сезонные заболевания стали носить более затяжной и тяжелый характер. Разрушений инфраструктуры из-за изменений климата (обрушения или повреждения зданий, дорог, энергетической инфраструктуры) в промышленных городах Мурманской области не отмечено. Выявлено, что адаптационные стратегии на личном уровне включают изменения в повседневных практиках (например, более легкая одежда в зимний период, выращивание новых видов культур на дачных участках). Большинство респондентов считают, что решения по формированию стратегий адаптации должны приниматься

согласованно на всех уровнях управления, включая муниципальный.

Исследовано, как изменение климата, его влияние и причины воспринимаются и интерпретируются населением и каким образом формируются общественные представления об изменении климата (2021 г., метод структурированного интервью). Опрошено 40 респондентов по категориям: ученые, студенты, журналисты. Данные категории выбраны как наиболее влияющие на общественные представления о проблеме.

Большинство респондентов (до 80%) уверены, что климат в Арктике, а именно в Мурманской области, становится мягче и теплее. Респонденты расценивают это как положительный фактор, повышающий качество жизни за Полярным кругом. Выявлено, что существует выраженная дифференциация по возрасту в вопросе об антропогенных причинах изменения климата. Молодые люди (моложе 30 лет) в большей степени уверены в том, что человеческая деятельность существенно влияет на климатическую систему. Исправить ситуацию можно, в первую очередь, решив проблему с отходами – как коммунальными, так и промышленными. Это показывает, что проблема изменения климата в представлениях людей четко коррелирует с экологическими проблемами, важнейшей из которых является недружественный к окружающей среде способ обращения с отходами. Большинство респондентам не доверяют СМИ в вопросах изменения климата, предпочитают научные статьи или же мнение известных неправительственных организаций. В вопросах доверия к информации от зарубежных и российских ученых большинство респондентов не делают разницы, обращая внимание лишь на логичность и доказательность приводимых аргументов. Подавляющее большинство респондентов затруднились ответить на вопрос о том, как изменение климата отражается на их жизни и экономике Мурманской области. К положительным моментам многие отнесли будущую возможность более интенсивного использования Северного морского пути (для экономики) и повышение комфортности проживания за Полярным кругом при росте средних температур (для себя лично). К негативным моментам отнесли учащение опасных погодных явлений (гололедицы, метели, резкий частый переход температуры через отметку «0 °С», засуха). Также было отмечено, что более поздние сроки установления снежного покрова в условиях наступления полярной ночи сильно уменьшают видимость на дорогах и возможность распознавания пешеходов без светоотражателей, что повышает риск аварий. Это необходимо учитывать при разработке стратегий адаптации к изменению климата.

Сделан вывод, что актуальность вопросов социальных последствий изменения климата для населения городов российской Арктики в зонах интенсивного промышленного освоения возрастает. Такие города чувствительны к изменениям климата. В них плотность населения и инфраструктуры высока, и колебания температуры вместе с экстремальными погодными явлениями сильно влияют на качество воздуха и воды, здоровье и другие составляющие благополучия людей.

Проведены исследования и ряд научно-практических семинаров по созданию сценариев будущего развития регионов российской Арктики в условиях изменения климата, учитывающих знания различных групп местных и внешних экспертов.

Организован междисциплинарный исследовательский семинар «Сценарии развития Мурманской области в условиях глобальных неопределенностей и изменений климата» (12 декабря 2018 г. в г. Апатиты на базе Кольского научного центра РАН, 32 участника – представителя различных научных дисциплин). Сделаны тематические доклады, определены основные движущие силы будущих изменений и разработаны четыре оригинальных сценария развития одного из регионов российской Арктики в условиях изменения климата на период до 2050 г.

Важным результатом явилось расширение опыта междисциплинарного взаимодействия ученых из различных областей науки (экологов, биологов, экономистов, математиков, медиков и др.) на площадке Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук».

Также был организован семинар «Будущее народа саами в условиях глобальных изменений» (1–4 ноября 2019 г. в г. Апатиты на базе Кольского научного центра РАН, 52 участника из Апатитов, Ловозера, Мончегорска, Ёны, Оленегорска, Ковдора, Мурманска, Санкт-Петербурга и Москвы) с участием представителей народа саами (более 30 человек, что составило около 70% участников). В ходе обсуждений на семинаре была собрана информация об основных проблемах коренных малочисленных народов Севера, проживающих в зонах интенсивного природопользования в российской Арктике, о факторах, которые представители саамского народа считают главными для обеспечения благополучия своего народа в условиях изменения климата, и практиках адаптации. Также были разработаны сценарии будущего Мурманской области до 2025 г., основанные на знаниях представителей саамского сообщества.

Было выявлено, что наиболее важным фактором благополучия своего народа в условиях меняющегося климата саами считают взаимодействие с регио-

нальной властью в целях справедливого расширения прав коренных малочисленных народов на пользование природными ресурсами. Большая часть саами в Мурманской области живет в сельской местности (около 70%) и использует для обеспечения жизнедеятельности различные виды традиционного хозяйствования, сохраняя сильную зависимость от состояния окружающей природной среды.

Вторым по важности фактором, влияющим на благополучие коренных народов в Арктике, была названа экологическая политика. Природа является для саами непреложной ценностью, и любое загрязнение, любые ущербы и изменения, в том числе климатические, подвергающие угрозе окружающую среду, воспринимаются саами как фактор, негативно влияющий на будущее этого народа и территории, на которой он проживает.

Замыкает тройку главных факторов, оказывающих значительное влияние на будущее саами как коренного народа Севера, развитие человеческого потенциала. Саами под развитием человеческого потенциала понимают прежде всего повышение качества образования человека и доступности качественной медицины. Кроме того, существенный вклад в человеческий потенциал вносит знание и использование традиционных знаний и традиционной культуры в профессиональной и частной жизни. Такой фактор, как миграционный отток, являющийся значимым для большей части населения Мурманской области, для саами не является значимым. Они не видят угрозы будущему развитию региона даже при массовом оттоке населения из области.

В ходе исследовательской сессии по сценарному прогнозированию развития Мурманской области в условиях изменения климата «Будущее народа саами в условиях глобальных изменений» был создан набор сценариев развития области до 2050

года. Было выявлено, что наиболее желательным для представителей саамского сообщества является сценарий, обеспечивающий устойчивое неразрушающее развитие региона, сохранение коренных народов и их традиционной культуры и практик жизнедеятельности, успешную адаптацию к изменениям климата.

Важным обобщающим итогом работы по созданию сценариев будущего развития регионов российской Арктики в условиях изменения климата, учитывающих знания различных групп экспертов, стала публикация двух монографий [21, 22].

В первый же месяц пандемии COVID-19, в конце второго года реализации проекта, были начаты исследования по направлению «Прогнозирование влияния последствий глобальной пандемии COVID-19 на будущее развитие российской Арктики, учитывая аспекты, связанные с изменением климата». 15 апреля 2020 г. участники проекта выступили на заседании дискуссионного клуба Лаборатории устойчивого развития Проектного офиса развития Арктики (ЛУР ПОРА) на тему «Настоящее и будущее Мурманской области в эпоху возрастающей неопределенности (региональной и глобальной)». В условиях ограничений и самоизоляции заседание прошло в режиме видеоконференции. В качестве экспертов выступили биологи, экономисты, политологи, экологи, местные жители, представители коренных народов. Из 12 экспертов четверо являлись исполнителями проекта №18-05-60142 «Арктика», финансируемого РФФИ.

Эксперты отметили, что пандемия COVID-19 высветила неустойчивость вахтового метода освоения арктических ресурсов, поскольку во многих вахтовых поселках образовались обширные очаги заражения при отсутствии возможности эффективно проводить профилактические мероприятия и отсутствии медицинской инфраструктуры для оказания своевременной помощи. Были вы-

сказаны мнения, что практики вахтового освоения ресурсов Арктики должны быть пересмотрены.

Цифровая экономика показала свою жизнеспособность, данные практики приживаются и активно развиваются. В условиях изменения климата их роль будет возрастать. Большие изменения произойдут в сфере малого бизнеса, услуг, здравоохранения. Туризм претерпит драматические изменения: будут переориентированы туристические потоки, повышение эпидемиологической безопасности передвижения людей потребует введения специальной системы мер, мобильность населения станет более «защищенной». В самый острый период рекреационная нагрузка на арктические экосистемы снизится, а затем, по мере выхода из пандемии, усилится. По причине экономического спада часть разведанных месторождений в ближайшие годы разрабатываться не будет. Таким образом, давление человека на арктическую природу в целом может несколько снизиться. Это благоприятно отразится на состоянии природы, которая сможет адаптироваться к изменениям климата, не испытывая дополнительного антропогенного стресса. Однако данные изменения, скорее всего, не будут носить долгосрочного характера. Обсуждение показало исключительно высокую актуальность и научно-практическую востребованность дальнейших исследований в направлении исследования влияния глобальной пандемии COVID-19 на будущее развитие российской Арктики в условиях изменения климата.

Разработаны подходы и сформирован комплекс научно-практических рекомендаций по разработке превентивных мер и стратегий адаптации к изменениям климата в зонах интенсивного промышленного освоения и промышленных городах российской Арктики.

На завершающем этапе проекта, в связи с утверждением в мае 2021 г. Министерством экономического развития Российской Федерации ряда важных документов – Методических рекомендаций по оценке климатических рисков, Методических рекомендаций по ранжированию адаптационных мероприятий по степени их приоритетности и др., особое внимание было уделено анализу новых законодательных документов, их оценке как методического инструмента для подготовки планов адаптации разного уровня и их учету в рекомендациях.

Сделан вывод, что в последние несколько лет в Российской Федерации был совершен прорыв в разработке нормативных законодательных документов федерального уровня по вопросам, связанным с изменением климата, и законодательно закреплён «арктический императив» в отношении разработки превентивных мер и стратегий адаптации к изменениям

климата. Принятый в мае 2021 г. пакет нормативных документов является первым в России системным методическим инструментом для подготовки отраслевых, региональных и корпоративных планов адаптации и может быть успешно использован на территориях зон интенсивного промышленного освоения в российской Арктике.

В то же время необходима дальнейшая работа по усилению в российском климатическом законодательстве регионального и, особенно, местного подхода к разработке превентивных мер и стратегий адаптации, базирующегося на системах знаний местного населения, коренных народов. Правомерность данного вывода подтверждает тот факт, что в последних законодательных документах, например, в Методических рекомендациях по ранжированию адаптационных мероприятий по степени приоритетности и Методических рекомендациях по формированию отраслевых, региональных и корпоративных планов адаптации к изменениям климата, утвержденных 13 мая 2021 г., муниципальный уровень практически не рассматривается.

Заключение

С учетом результатов, полученных в ходе междисциплинарных исследований, сформулированы следующие основные рекомендации по разработке превентивных мер и стратегий адаптации к изменениям климата в зонах интенсивного промышленного освоения и промышленных городах российской Арктики:

1. В области законодательства и реализации политики по предотвращению рисков и адаптации к изменениям климата:

- обеспечить на региональном уровне в арктических субъектах Российской Федерации полное выполнение решений, предусмотренных в нормативно-правовых документах федерального уровня, связанных с вопросами изменения климата и адаптации;
- в связи с высокой дифференциацией арктических территорий Российской Федерации по природно-климатическим, социально-экономическим и другим условиям ускорить разработку на региональном уровне нормативно-правовой базы по разработке превентивных мер и адаптации с учетом специфики различных территорий, в том числе внутри одного региона, с выделением зон интенсивного промышленного освоения;
- усилить внимание к разработке на муниципальном уровне нормативно-правовых документов по вопросам адаптации к изменениям климата, особенно в зонах интенсивного промышленного освоения в Арктике.

2. В институциональной сфере:

- развивать институциональный потенциал для поддержки или создания эффективных структур по адаптации к изменению климата в российской Арктике на национальном и региональном уровнях, в том числе путем укрепления существующих или создания новых органов для разработки превентивных мер и стратегий адаптации к изменениям климата, а также создания межотраслевых/межсекторных структур (комиссии, рабочие группы) для обеспечения большей координации и взаимодействия, особенно в зонах интенсивного промышленного освоения в Арктике.

3. В области повышения информированности и наращивания информационного потенциала:

- разрабатывать меры по созданию системы непрерывного мониторинга изменений и адекватного реагирования на происходящие изменения. Система мониторинга должна быть широкоохватной и постоянно действующей, охватывать не только природные, но и социально-экономические процессы, обеспечивать информацию для прогнозирования их развития в среднесрочной и долгосрочной перспективе, предоставлять достоверную информацию для принятия управленческих решений;
- для мониторинга целесообразно задействовать методы гражданской науки (citizen science), подразумевающей привлечение к проведению научных исследований и ведению наблюдений добровольцев, не имеющих специального образования. В России гражданская наука находится в начальной фазе развития, и одним из перспективных направлений региональных и местных адаптационных стратегий в российской Арктике может стать организация работы «сети народно-

- го мониторинга» за последствиями изменения климата;
- обеспечить доступ к информации на уровне местных сообществ и широкой общественности с целью повышения уровня информированности в обществе. Разработать меры по наращиванию информационного потенциала для различных уровней и партнеров, чтобы обеспечить их актуальной информацией и результатами исследований, особенно в области социальных последствий изменения климата, а также использовать современные средства коммуникации для расширения аудитории.
4. В направлении усиления регионального и местного подходов к разработке превентивных мер и стратегий адаптации:
- продвигать региональный и особенно местный подход к разработке стратегий адаптации к изменению климата, базирующийся на системах знаний местного населения, коренных народов Севера, включая обмен данными и информацией, развитие методологии научных исследований и мониторинга по вопросам изменения климата, координацию мероприятий на местах;
 - наращивать кадровый потенциал на региональном и местном уровнях, развивая подготовку компетентных специалистов, владеющих знаниями в области изменения климата и адаптивных технологий;
 - развивать институциональный потенциал региональных и местных органов власти по вопросам адаптации к изменению климата на основе создания на региональном и муниципальном уровнях межсекторных комиссий, экспертных и рабочих групп, включающих представителей органов региональной и муниципальной власти, представителей промышленных компаний, коренных народов Севера и НКО, ученых.
- Основные положения разработанных рекомендаций были предложены для рассмотрения и учета в работе ряда экспертных групп и комиссий, в том числе в ходе экспертно-аналитического мероприятия Счетной палаты Российской Федерации на тему «Анализ деятельности органов государственной власти по обеспечению национальных интересов в сфере охраны окружающей среды и экологической безопасности в Арктической зоне Российской Федерации в 2018–2020 годах и истекшем периоде 2021 года» (эксперты – Маслобоев В.А., Рябова Л.А.).
- По теме проекта опубликованы 58 научных работ, включая три монографии, семь статей, включенных в базу WoS, 14 статей, включенных в базу Scopus, 25 статей в журналах, включенных в перечень ВАК.

Литература

1. В.В. Ершов, Л.Г. Исаева, Т.А. Сухарева, г.П. Урбанавичюс, Е.А. Иванова, Е.А. Белова
Вестник Кольского научного центра РАН, 2021, 13(2), 34.
DOI: 10.37614/2307-5228.2021.13.2.004.
2. В.В. Ершов, Н.В. Лукина, М.А. Данилова, Л.Г. Исаева, Т.А. Сухарева, В.Е. Смирнов
Экология, 2020, №4, 265. DOI: 10.31857/S0367059720040058.
3. Т.А. Сухарева, В.В. Ершов, Л.Г. Исаева, М.А. Шкондин
Цветные металлы, 2020, №8, 33. DOI: 10.17580/tsm.2020.08.05.
4. Е.А. Боровичев, В.Н. Петров, О.В. Петрова, Н.Е. Королева
Арктика и Север, 2018, №32, 107.
DOI: 10.17238/issn2221-2698.2018.32.107.
5. A.N. Sharov, D.B. Denisov
B Lake Water: Properties and Uses (Case Studies of Hydrochemistry and Hydrobiology of Lakes in Northwest Russia), Ser. Climate Change and its Causes, Effects and Prediction, Eds L.S. Shirokova, O.S. Pokrovsky, T.Y. Vorobyeva etc., USA, NY, New York, Nova Sci. Publ., Inc., 2021, pp. 153–191.
6. V.A. Masloboev, A.V. Svetlov, D.V. Makarov, S.G. Seleznev
Minerals, 2018, 8(10), 436. DOI: 10.3390/min8100436.6.
7. A.V. Svetlov, P.V. Pripachkin, V.A. Masloboev, D.V. Makarov
J. Mining Sci., 2020, 56(2), 275. DOI: 10.1134/S1062739120026757.
8. Д.В. Макаров, Е.А. Боровичев, Е.М. Ключникова, В.В. Маслобоев
Вестник МГТУ, 2020, 23(1), 63.
DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-1-63-71 9.
9. В.А. Маслобоев, Д.В. Макаров, Е.М. Ключникова
Устойчивое развитие горных территорий, 2021, 13(2), 188.
DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-188-200.
10. К.В. Чудненко
Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение приложения, РФ, Новосибирск, Академ. изд. «Гео», 2010, 287 с.
11. С.И. Мазухина, В.В. Максимова, К.В. Чудненко, В.А. Маслобоев, С.С. Сандимиров, С.В. Дрогобужская, П.С. Терещенко, В.И. Пожиленко, А. В. Гудков
Качество вод Арктической зоны Российской Федерации: физико-химическое моделирование формирования вод, формы миграции элементов, влияние на организм человека, РФ, Апатиты, Изд. Кольского научного центра РАН, 2020, 158 с.
DOI: 10.37614/978.5.91137.437.2.
12. С.И. Мазухина, В.А. Маслобоев, Д.В. Макаров
Химия в интересах устойчивого развития, 2021, 29(1), 69.
DOI: 10.15372/KhUR2021279.

13. E. Krasavtseva, V. Maksimova, D. Makarov, E. Potorochin
Minerals, 2021, 11(10), 1077.
DOI: 10.3390/min11101077.
14. E. Krasavtseva, V. Maksimova, D. Makarov
Toxics, 2021, 9(7), 163.
DOI: 10.3390/toxics9070163.
15. S. Mazukhina, E. Krasavtseva, D. Makarov, V. Maksimova
Minerals, 2021, 11(9), 996. DOI: 10.3390/min11090996.
16. O. V. Suvorova, E. A. Selivanova, J. A. Mikhailova,
V. A. Masloboev, D. V. Makarov
Appl. Sci. (Switzerland), 2020, 10(10), 3515.
DOI: 10.3390/app10103515.
17. Д.В. Макаров, А.В. Светлов, А.А. Горячев, О.Т. Коница,
В.А. Маслобоев
Горный информационно-аналитический бюллетень, 2021, №5,
122.
DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_122.
18. Л.А. Рябова, Е.М. Ключникова
Север и рынок: формирование экономического порядка, 2018,
№3, 91. DOI: 10.25702/KSC.2220-802X.3.2018.59.91-111.
19. Л.А. Рябова, Е.М. Ключникова, Е.А. Боровичев,
В.А. Маслобоев
Север и рынок: формирование экономического порядка, 2020,
№3, 40. DOI: 10.37614/2220-802X.2.2020.69.003.
20. А.В. Маслобоев, В.А. Маслобоев
Надежность и качество сложных систем, 2021, №3, 98
(на англ.).
DOI: 10.21685/2307-4205-2021-3-13.
21. Д.Б. Денисов, Л.В. Иванова, Л.Г. Исаева, Е.М. Ключникова,
Д.В. Макаров, В.А. Маслобоев, Л.А. Рябова
*Сценарии развития Мурманской области в условиях
глобальных неопределенностей и изменений климата*, под
ред. В.А. Маслобоева, Л.А. Рябовой, Е.М. Ключниковой, РФ,
Апатиты, Изд. Кольского научного центра РАН, 2019, 52 с.
DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-394-8.
22. *Природа и коренное население Арктики под влиянием
изменения климата и индустриального освоения:
Мурманская область*, под ред. Е.А. Боровичёва,
Н.В. Вронского, РФ, Москва, Изд. Дом «Графит», 2020, 180 с.
DOI: 10.25702/KSC.978.5.902643.46.3.

English

Areas of Intensive Nature Management in the Russian Arctic under Climate Change Conditions: Natural and Social Processes in the Long Term*

Masloboev Vladimir Alexeevitch
Federal Research Center
Kola Science Center, RAS
14 Fersman Str., Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
v.masloboev@ksc.ru

Makarov Dmitriy V. Director of
Institute of North Industrial Ecology
Problems,
Kola Science Centre, RAS
14 Fersman Str., Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
d.makarov@ksc.ru

Eugene A. Borovichev
Institute of North Industrial Ecology
Problems, Kola Science Centre, RAS
14A Akademgorodok, Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
e.borovichev@ksc.ru

Elena M. Klyuchnikova
Institute of North Industrial Ecology
Problems, Kola Science Centre, RAS
14A Akademgorodok, Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
e.klyuchnikova@ksc.ru

Ludmila G. Isaeva
Institute of North Industrial Ecology
Problems, Kola Science Centre, RAS
14A Akademgorodok, Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
l.isaeva@ksc.ru

Larisa A. Riabova
Luzin Institute for Economic Studies,
Kola Science Centre, RAS
24A Fersman Str., Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
larissar@iep.kolasc.net.ru

Dmitrii B. Denisov
Institute of North Industrial Ecology
Problems, Kola Science Centre, RAS
14A Akademgorodok, Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
proffessuir@gmail.com

Anton V. Svetlov
Institute of North Industrial Ecology
Problems, Kola Science Centre, RAS
14A Akademgorodok, Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
a.svetlov@ksc.ru

Eugenia A. Krasavtseva
Federal Research Center
Kola Science Center, RAS
14 Fersman Str., Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
Vandeleur2012@yandex.ru

Victoria V. Maksimova
Federal Research Center
Kola Science Center, RAS
14 Fersman Str., Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
v.maksimova@ksc.ru

Svetlana I. Mazukhina
Institute of North Industrial Ecology
Problems, Kola Science Centre, RAS
14A Akademgorodok, Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
simazukhina@mail.ru

Tatyana A. Sukhareva
Institute of North Industrial Ecology
Problems, Kola Science Centre, RAS
14A Akademgorodok, Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
t.sukhareva@ksc.ru

Vyacheslav V. Ershov
Institute of North Industrial Ecology
Problems, Kola Science Centre, RAS
14A Akademgorodok, Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
slavo91@gmail.com

Natalia E. Koroleva
Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden-
Institute, Kola Science Centre, RAS
18A Akademgorodok, Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
flora012011@yandex.ru

Ludmila V. Ivanova
Luzin Institute for Economic Studies,
Kola Science Centre, RAS
24A Fersman Str., Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
ludmila_ivanova@mail.ru

Alexander V. Losev
Polar Geophysical Institute, RAS
26A Akademgorodok, Apatity, 184209,
Murmansk region, Russia
aleksandrthelosev@gmail.com

Abstract

The work summarizes the results of investigations carried out in three directions (blocks).

Block 1. Terrestrial ecosystems in areas of intensive nature management are investigated. Climatic changes and anthropogenic impact result in transformation of landscapes with disturbed or completely destroyed vegetation cover. In freshwater ecosystems cardinal changes in the structural and functional organization from the multifactorial anthropogenic load against the background of a warming climate were revealed. We obtained unique data on the long-term dynamics of biodiversity in aquatic ecosystems.

Block 2. Enrichment tailings properties were studied, the influence of the dusting season duration and humidity changes on the gross dust emission was assessed; interaction of tailings with soil waters was studied. The potential ecological danger of tailings mineral particles getting into the soil was shown. The losses of non-ferrous metals during the period of waste storage under different climate change scenarios were estimated.

Block 3. People's perceptions of climate change and its social consequences have been studied. The problem of climate change clearly correlates with ecological problems. The impact of the COVID-19 pandemic on the Arctic in the context of climate change was studied. The pandemic highlighted the unsustainability of the rotational method of resource development, with rotational camps becoming focal points of epidemiological hazards.

Keywords: natural resource intensive areas, Arctic, adaptation strategies, mining waste, sustainable development.

*The work was financially supported by RFBR (project 18-05-60142).

References

1. V.V. Ershov, L.G. Isaeva, T.A. Sukhareva, G.P. Urbanavichus, E.A. Ivanova, E.A. Belova
Herald of the Kola Science Centre of RAS, 2021, 13(2), 34 (in Russian). DOI: 10.37614/2307-5228.2021.13.2.004.
2. V.V. Ershov, N.V. Lukina, M.A. Danilova, L.G. Isaeva, T.A. Sukhareva, V.E. Smirnov
Rus. J. Ecology, 2020, 51(4), 319.
DOI: 10.1134/S1067413620040050.
3. T.A. Sukhareva, V.V. Ershov, L.G. Isaeva, M. A. Shkondin
Tsvetnye Metally [Non-Ferrous Metals], 2020, №8, 33 (in Russian).
DOI: 10.17580/tsm.2020.08.05.
4. E.A. Borovichev, V.N. Petrov, O.V. Petrova, N.E. Koroleva
Arctic and North, 2018, №32, 107 (in Russian).
DOI: 10.17238/issn2221-2698.2018.32.107.
5. A.N. Sharov, D.B. Denisov
In Lake Water: Properties and Uses (Case Studies of Hydrochemistry and Hydrobiology of Lakes in Northwest Russia), Ser. *Climate Change and its Causes, Effects and Prediction*, Eds L.S. Shirokova, O.S. Pokrovsky, T.Y. Vorobyeva etc., USA, NY, New York, Nova Sci. Publ., Inc., 2021, pp. 153–191.
6. V.A. Masloboev, A.V. Svetlov, D.V. Makarov, S.G. Seleznev
Minerals, 2018, 8(10), 436. DOI: 10.3390/min8100436.
7. A.V. Svetlov, P.V. Pripachkin, V.A. Masloboev, D.V. Makarov
J. Mining Sci., 2020, 56(2), 275. DOI: 10.1134/S1062739120026757.
8. D.V. Makarov, E.A. Borovichev, E.M. Klyuchnikova, V.A. Masloboev
Vestnik of MSTU, 2020, 23(1), 63 (in Russian).
DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-1-63-71.
9. V.A. Masloboev, D.V. Makarov, E.M. Klyuchnikova
Sust. Develop. Mountain Territor., 2021, 13(2), 188 (in Russian).
DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-2-188-200.
10. K.V. Chudnenko
Thermodynamic Modeling in Geochemistry: Theory, Algorithms, Software Applications [Termodinamicheskoe modelirovanie v geokhimii: Teoria, algoritmy, programmnnoe obespechenie prilozheniya], RF, Novosibirsk, Academic Publ. House "Geo", 2010, 287 pp. (in Russian).
11. S.I. Mazukhina, V.V. Maksimova, K.V. Chudnenko, V.A. Masloboev, S.S. Sandimirov, S.V. Drogobuzhskaya, P.S. Tereshchenko, V.I. Pozhilenko, A.V. Gudkov
Water Quality in the Arctic Zone of the Russian Federation: Physical and Chemical Modeling of Water Formation, Forms of Element Migration, Impact on the Human Body: Monograph [Kachestvo vod Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii: fizikokhimicheskoe modelirovanie formirovaniya vod, formy migratsii elementov, vliyaniye na organizm cheloveka: monografiya], RF, Apatity, RAS Kola Sci. Centre Publ. House, 2020, 158 pp. (in Russian).
DOI: 10.37614/978.5.91137.437.2.
12. S.I. Mazukhina, V.A. Masloboev, D.V. Makarov
Chem. Sustain. Develop., 2021, 29(1), 68.
DOI: 10.15372/CSD2021279.
13. E. Krasavtseva, V. Maksimova, D. Makarov, E. Potorochin
Minerals, 2021, 11(10), 1077. DOI: 10.3390/min11101077.
14. E. Krasavtseva, V. Maksimova, D. Makarov
Toxics, 2021, 9(7), 163. DOI: 10.3390/toxics9070163.
15. S. Mazukhina, E. Krasavtseva, D. Makarov, V. Maksimova
Minerals, 2021, 11(9), 996.
DOI: 10.3390/min11090996.
16. O.V. Suvorova, E.A. Selivanova, J.A. Mikhailova, V.A. Masloboev, D.V. Makarov
Appl. Sci. (Switzerland), 2020, 10(10), 3515.
DOI: 10.3390/app10103515.
17. D.V. Makarov, A.V. Svetlov, A.A. Goryachev, O.T. Konina, V.A. Masloboev
MIAB. Mining Inf. Anal. Bull., 2021, №5, 122 (in Russian).
DOI: 10.25018/0236_1493_2021_5_0_122.
18. L.A. Ryabova, E.M. Klyuchnikova
Sever i rynok: formirovanie ekonomicheskogo poryadka [The North and the Market: Forming the Economic Order], 2018, №3, 91 (in Russian).
DOI: 10.25702/KSC.2220-802X.3.2018.59.91-111.
19. L.A. Ryabova, E.M. Klyuchnikova, E.A. Borovichev, V.A. Masloboev
Sever i rynok: formirovanie ekonomicheskogo poryadka [The North and the Market: Forming the Economic Order], 2020, №3, 40 (in Russian).
DOI: 10.37614/2220-802X.2.2020.69.003.
20. A.V. Masloboev, V.A. Masloboev
Reliability & Quality of Complex Systems, 2021, №3, 98.
DOI: 10.21685/2307-4205-2021-3-13.
21. D.B. Denisov, L.V. Ivanova, E.M. Klyuchnikova, D.V. Makarov, V.A. Masloboev, L.A. Riabova
Development Scenarios of the Murmansk Region under the Conditions of Global Uncertainties and Climate Change [Sitenarii razvitiya Murmanskoy oblasti v usloviyakh globalnykh neopredelennostey i izmeneniy klimata], RF, Apatity, RAS Kola Sci. Centre Publ. House, 2019, 52 pp. (in Russian).
DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-394-8.
22. *Nature and Indigenous People of the Arctic under the Influence of Climate Change and Industrial Development: Murmansk Oblast [Priroda i korennoye naselenie Arktiki pod vliyaniem izmeneniya klimata i industrialnogo osvoeniya: Murmanskaya oblast]*, Eds E.A. Borovichev, N.V. Vronsky, RF, Moscow, Graf Publ. House, 2020, 180 pp. (in Russian).
DOI: 10.25702/KSC.978.5.902643.46.3.