

На правах рукописи



КРАСАВЦЕВА ЕВГЕНИЯ АНДРЕЕВНА

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ
РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ РУД НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ
(НА ПРИМЕРЕ ООО "ЛОВОЗЕРСКИЙ ГОК")

Специальность 1.6.21. – «Геоэкология» (технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание
ученой степени кандидата
технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Институте проблем промышленной экологии Севера – обособленном подразделении Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федерального исследовательского центра
«Кольский научный центр Российской академии наук» (ИППЭС КНЦ РАН)

Научный руководитель:

Макаров Дмитрий Викторович, доктор технических наук, директор ИППЭС КНЦ РАН

Официальные оппоненты:

Ксенофонов Борис Семёнович, доктор технических наук, профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Семячков Александр Иванович, доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой «Геоэкология» Уральского государственного горного университета

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ИРНИТУ)

Защита состоится «19» апреля 2022 г. в 12⁰⁰ на заседании диссертационного совета 24.1.096.01 в Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН по адресу: 111020, Москва, Крюковский тупик, 4. Т/факс (095) 360-89-60

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять в адрес совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПКОН РАН и на сайте www.ipkonran.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 202_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор технических наук



Матвеева Т.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена приоритетными задачами в соответствии с Указами Президента РФ № 176 от 19 апреля 2017 г. “О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года”: п. 11 р) устранение негативных последствий для окружающей среды хозяйственной и иной деятельности человека, и № 645 от 26 октября 2020 г. "О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года": п. 15 к) проведение регулярной оценки экологических и социально-экономических последствий антропогенного воздействия на окружающую среду Арктической зоны.

Активное развитие горнодобывающей отрасли приводит к интенсивному росту уровня экологических рисков для окружающей среды Арктической зоны РФ. Для территорий вокруг горных предприятий характерно загрязнение грунтов и водных объектов широким спектром веществ, в том числе тяжелыми и редкоземельными металлами. Дополнительным источником значительного экологического риска является и тот факт, что до настоящего времени основным способом размещения отходов добычи и обогащения во всем мире по-прежнему является заполнение поверхностных хвостохранилищ. Гипергенез дезинтегрированного, увлажненного и смешанного с остатками флотационных реагентов материала хвостов в открытых к атмосфере условиях и пыление хвостов в летний период при возникновении неблагоприятных метеорологических условий способствуют ускорению мобилизации металлов и вторичному загрязнению территории с водными и воздушными потоками. При аэротехногенном переносе частиц наблюдается взаимодействие не только с атмосферными осадками, но и с почвенными органосодержащими растворами. Сложный комплекс взаимодействий растворов органических кислот природного происхождения с тонкодисперсными хвостами обогащения интересен с точки зрения влияния на мобильность загрязняющих веществ: увеличения их подвижности, либо фиксации загрязнителей в почвах. Максимальному выносу подвержены растворимые соединения поллютантов, легко включающиеся в биогеохимические циклы элементов и, в конечном итоге, оказывающие воздействие на биоту и здоровье населения.

Для защиты уникальной природной среды Баренцева Евро-Арктического региона в настоящее время реализуется ряд международных инициатив по различным тематикам, в том числе по проблемам изменения климата, сохранению биоразнообразия и естественных мест обитания, устранению хронического стресса для экосистем, изучению и снижению выбросов загрязняющих веществ и внедрению технологий «зеленого производства».

Актуальность мониторинга состояния компонентов окружающей среды и изучения отходов обогащения редкометалльных руд обусловлена повышенным радиационным фоном добываемого и перерабатываемого сырья и низкой способностью к самовосстановлению экосистем в условиях субарктического климата.

Значительный вклад в изучение влияния горных предприятий на окружающую среду и геоэкологическую оценку их воздействия, ликвидации накопленного ущерба, рекультивации нарушенных территорий внесли российские и зарубежные ученые: акад. В.А. Чантурия, Г.В. Калабин, Т.И. Моисеенко, С.Б. Бортникова, О.Л. Гаськова, Л.Т. Крупская, М.А. Пашкевич, В.Н. Макаров, Д.В. Макаров, О.Л. Качор, Л.А. Иванова, И.П. Кременецкая, И.В. Шадрунова, J.H. Fu, M. Lindsay, B.G. Lottermoser, M. Moncur, P. Thomas и др.

Определение характерных особенностей распространения и предупреждения дальнейшего загрязнения, восстановления техногенно нарушенных земель представляют собой важную научно-практическую задачу.

Цель работы. Выявление особенностей миграции тяжелых металлов (ТМ) и редкоземельных элементов (РЗЭ) из хвостов обогащения лопаритовых руд и оценка состояния компонентов окружающей среды.

Идея работы. Использование комбинации технологий пылеподавления для предупреждения дальнейшего загрязнения и восстановления техногенно нарушенных земель.

Задачи:

- 1) анализ литературы по темам: экологические аспекты влияния хвостохранилищ на окружающую среду, современные методы оценки загрязнения экосистем, способы снижения негативного воздействия, РЗЭ как специфические загрязнители;
- 2) определение инженерно-геологических характеристик и вещественного состава разновозрастных хвостов обогащения лопаритовых руд;
- 3) исследование процессов мобилизации экологически опасных элементов из материала хвостов под действием атмосферных осадков и при попадании пылевых частиц в почву;
- 4) экологическая оценка состояния водных объектов, почв и растений в зоне влияния предприятия;
- 5) обоснование применения связующих реагентов для пылеподавления действующего хвостохранилища;
- 6) подбор способов рекультивации выведенного из эксплуатации хвостохранилища.

Научная новизна:

1. Впервые определены инженерно-геологические характеристики и вещественный состав разновозрастных хвостов обогащения лопаритовых руд, установлено концентрирование РЗЭ, ТМ и радионуклидов в тонкодисперсном материале хвостов.
2. Раскрыты закономерности процессов мобилизации экологически опасных элементов из хвостов обогащения под действием атмосферных осадков и при попадании пылевых частиц в почву.
3. На основе результатов проведенной геоэкологической оценки исследуемых территорий установлены характеристики импактных зон загрязнения компонентов окружающей среды РЗЭ и ТМ вследствие аэротехногенного переноса материала хвостов.
4. Определен оптимальный расход связующего реагента Dustbind (Nalco) для создания прочного полимерного покрытия и закрепления пылящей поверхности действующего хвостохранилища и обосновано применение осадков сточных вод в качестве мелиоранта для фитостабилизации выведенного из эксплуатации хвостохранилища.

Теоретическая значимость работы заключается в получении новых научных знаний об объекте и состоянии компонентов окружающей среды в зоне влияния горнопромышленного предприятия по добыче и обогащению редкометалльных руд, в том числе:

- 1) определении инженерно-геологических характеристик и установлении вещественного состава разновозрастных хвостов обогащения лопаритовых руд;
- 2) выявлении факторов, влияющих на мобилизацию экологически опасных элементов из хвостов обогащения при хранении и попадании пылевых частиц в почву;
- 3) установлении содержаний РЗЭ и ТМ в пробах донных отложений оз.Ильма, почвах и растениях, отобранных в зоне влияния хвостохранилищ.

Практическая значимость работы

Полученные научные результаты могут быть использованы для непосредственного применения рассмотренных способов пылеподавления на предприятии, в качестве базиса для разработок способов переработки хвостов либо для методов рекультивации/консервации хвостохранилищ редкометалльных руд и в учебном процессе на кафедре геоэкологии Мурманского государственного технического университета.

Объекты исследования:

- хвосты обогащения лопаритовых руд;
- пробы воды озер и рек, сточные воды ООО «Ловозерский ГОК»;
- донные отложения (ДО) озер Ильма и Кривое;
- техногенно загрязненные почвы в зоне влияния хвостохранилищ;
- растения видов, широко произрастающих на исследуемой территории: луговик извилистый *Avenella flexuosa* L., ивы: и. филиколистная *Salix phylicifolia*, и. лопарская *S. lapponum*, и. сизая *S. glauca*, отобранные в импактной зоне.

Методы исследования. В работе использованы следующие методы анализа: рентгенофазовый (дифрактометр ДРОН-2), радионуклидный (сцинтилляционный γ -спектрометр с программным обеспечением «Прогресс»), физико-химические (атомно-абсорбционный спектрометр с пламенной атомизацией, AAnalyst 400 PerkinElmer, масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой, ELAN 9000 PerkinElmer) и другие. Исследования инженерно-геологических характеристик хвостов обогащения лопаритовых руд проводили согласно ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик». Отбор проб хвостов обогащения, озерных и речных вод, донных отложений, почв и надземной части растений проводился в соответствии с утвержденными методиками. В работе использованы данные экспериментальных исследований и результаты анализов отобранных проб. Обработка результатов экспериментов произведена с использованием статистических методов в программных продуктах Microsoft Excel и STATISTICA 10.

Защищаемые положения:

1. Результаты геолого-минералогической оценки опасности складированных отходов ООО «Ловозерский ГОК», определившие наиболее токсичную фракцию, выносимую в атмосферу за счет пыления мелкозернистых хвостов с незакрепленных участков хвостохранилищ, а именно – тонкодисперсный материал (-0.071 мм), который характеризуется повышенным содержанием ТМ, РЗЭ и радионуклидов, относится ко второй категории отходов с расчетным значением удельной эффективной активности свыше 1500 Бк/кг.

2. Механизм и закономерности интенсификации процесса мобилизации экологически опасных элементов из хвостов обогащения лопаритовых руд под действием атмосферных осадков, закисленных путем граничных региональных переносов в атмосфере, и при попадании тонкодисперсных частиц хвостов в почву. При этом, разрушение силикатной матрицы основных минералов хвостов обогащения и переход экологически опасных элементов в растворимые формы резко возрастает: концентрации ТМ превышают контрольные значения до 267 раз, РЗЭ – до 70 раз в слабокислой среде, до 4 и 7 раз для ТМ и РЗЭ соответственно – при увеличении содержания растворенного органического вещества.

3. Снижение негативного воздействия на сопредельные среды, происходящего за счет пыления хвостов, достигается комбинацией мероприятий: нанесением 3%-го раствора связующего покрытия Dustbind (Nalco) с расходом 1 л/м² на действующем хвостохранилище,

а повышение биогенности хвостов выведенного из эксплуатации хвостохранилища – фрагментарным внесением осадков сточных вод общим расходом 2 л/м², способствующих накоплению в надземной части растений основных элементов питания фосфора, калия, кальция, магния при снижении доступности алюминия и железа для растений.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается применением современной приборной базы, апробированных методов анализа и статистической обработки фактического материала, представительностью исходных данных, использованием общепринятых критериев оценки полученных результатов; подтверждается согласованностью выводов теоретического анализа и данных эксперимента, удовлетворительной сходимостью результатов измерений и экспериментальных исследований.

Апробация работы

Основные положения и результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, докладывались на международных совещаниях «Плаксинские чтения» (Иркутск, Апатиты, Владикавказ, 2019, 2020, 2021 г.); всероссийской (с международным участием) Ферсмановской научной сессии (ГИ КНЦ РАН, Апатиты, 2020, 2021 г.); Международной мультидисциплинарной конференции по промышленному инжинирингу и современным технологиям – FarEastCon-2020 (Владивосток, 2020); III и IV Международных конференциях «Агробизнес, экологический инжиниринг и биотехнологии» - «Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies» (AGRITECH-III – 2020, AGRITECH-IV - 2020); XX и XXI научных семинарах «Минералогия техногенеза» (2020, 2021), Международной конференции "Эффективное производство и переработка" (ICEPP-2021), Всероссийской научно-технической конференции «Цифровые технологии в горном деле» (Апатиты, 2021), Международной научно-исследовательской конференции по перспективным исследованиям в науках о Земле «ReEarth» (2021), Конгрессе Международной Ассоциации Шахтных Вод (IMWA 2021).

Личный вклад автора

Анализ современного состояния проблемы влияния хвостохранилищ на окружающую среду и методов снижения их негативного воздействия, постановка цели и задач исследований, обоснование применяемых методик, отбор проб хвостов обогащения лопаритовых руд, воды, почв, растений, организация и проведение экспериментов, обработка и анализ полученных результатов, подготовка публикаций и апробация материалов на конференциях различного уровня выполнены автором лично или при его непосредственном участии.

Публикации

По теме работы опубликовано 19 печатных трудов, в том числе 10 статей в журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России, 1 – в рецензируемом журнале, индексируемом в WoS, Scopus.

Исследование проведено при финансовой поддержке программы Kolarctic CBC 2014-2020, проект № KO1030 «Supporting Environmental, Economic and Social Impacts of Mining Operations».

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников из 225 наименований, содержит 55 рисунков и 25 таблиц, изложена на 126 страницах текста.

Глава 1 посвящена обзору литературы, в котором рассмотрены основные аспекты негативного влияния складированных отходов горнопромышленного комплекса на окружающую среду, в частности, при разработке редкометалльных месторождений, методы оценки состояния компонентов окружающей среды, особенности РЗЭ как загрязнителей.

В Главе 2 приводится краткая характеристика объектов и методов исследований.

В Главе 3 представлены результаты исследования инженерно-геологических характеристик и вещественного состава хвостов обогащения лопаритовых руд.

В Главе 4 приведены результаты экспериментальных исследований процессов мобилизации экологически опасных элементов из хвостов обогащения лопаритовых руд под действием атмосферных осадков и при попадании пылевых частиц хвостов в почву.

В Главе 5 представлены результаты анализа проб воды и донных отложений из озер и рек, дана оценка загрязнения почв и растений, отобранных в районе исследования.

В Главе 6 представлены результаты лабораторных исследований по применению связующих реагентов для пылеподавления действующего хвостохранилища и подбору мелиорантов для фитостабилизации выведенного из эксплуатации хвостохранилища.

Благодарности

Автор выражает признательность научному руководителю, д.т.н. Д. В. Макарову; младшему научному сотруднику ЛПТиТБА ФИЦ КНЦ РАН и ИППЭС КНЦ РАН В. В. Максимовой; старшему научному сотруднику ИППЭС КНЦ РАН, к.г.н. С. С. Сандмирову; ведущему научному сотруднику ИППЭС КНЦ РАН, к.б.н. Т. Т. Горбачевой, ведущему научному сотруднику ИППЭС КНЦ РАН, д.б.н. Л. А. Ивановой, старшему научному сотруднику ГИ КНЦ РАН, к.г.-м.н. Е. А. Селивановой; зав.каф. «Геоэкология» УГГУ, д.г.-м.н. А. И. Семячкову; инженеру ИХТРЭМС КНЦ РАН П. В. Икконену; сотрудникам центра коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН; старшему научному сотруднику, ИППЭС КНЦ РАН, к.т.н. А. В. Светлову, главному научному сотруднику ИППЭС КНЦ РАН, д.т.н. В. А. Маслобеву; заместителю директора ИППЭС КНЦ РАН, к.б.н. Е. А. Боровичеву; студенту АФ МГТУ Н. Л. Алфертьеву; старшему лаборанту ИППЭС КНЦ РАН Н. А. Ильиной; инженеру ИППЭС КНЦ РАН А. В. Тимохину; младшему научному сотруднику ЛПТиТБА ФИЦ КНЦ РАН и ИППЭС КНЦ РАН А. А. Горячеву; ведущему инженеру ИППЭС КНЦ РАН А. А. Черепанову.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Хвостохранилища и их влияние на окружающую среду

Наибольший объем образования отходов производства и потребления в 2019 г. приходился на вид экономической деятельности «добыча полезных ископаемых» – 7.257 млрд т, причем с каждым годом этот объем увеличивается. Прямой выход продукта в технологической цепочке «сырье – целевой продукт» редко превышает 10 %, то есть порядка 90% идет в отходы, что приводит к загрязнению экосферы.

В Мурманской области сосредоточено несколько крупных горнопромышленных предприятий. В процессе их деятельности образуется значительное количество отходов: забалансовые руды, вскрышные породы, хвосты обогащения различных руд и сточные воды. Для вида экономической деятельности «добыча полезных ископаемых» отраслевой сброс на территории Мурманской области за 2020 год составил 304.7 млн т. К настоящему времени накопленный объем твердых отходов превышает 8 млрд т.

Изучение материала хвостов обогащения лопаритовых руд

В данной главе приведены результаты исследования инженерно-геологических характеристик и физико-химических свойств хвостов обогащения лопаритовых руд, отобранных на двух полях хвостохранилищ горнопромышленного предприятия.

Горнорудное предприятие ООО «Ловозерский ГОК» приурочено к месторождению в Ловозерских тундрах редкометалльных руд цериевой группы, ниобия и тантала. На руднике «Карнасурт» производится добыча и обогащение руды с получением лопаритового и эвдиалитового концентратов.

Обогащение лопаритовых руд происходит в три этапа: гравитационное получение черного концентрата, флотационная перемешка и доводка концентрата электростатической и электромагнитной сепарацией.

За период эксплуатации первого поля хвостохранилища (1951-1985 гг.) накопленный предприятием объем хвостов обогащения составил 6.7 млн т. С декабря 1985 г. по настоящее время сброс хвостовой пульпы осуществляется на второе поле хвостохранилища. Примерный объем отходов второго поля составляет 11 млн т с ежегодным приращением в 400-450 тыс. т.

Схема точек опробования представлена на рисунке 1. Пробы отбирали методом режущего кольца с поверхностного слоя и глубины 0.3 м. В ряде точек были пройдены шурфы до 1.5 м.

На основе результатов анализа гранулометрического состава отобранных проб установлены преобладающие фракции в пробах обоих полей – $-0.5+0.25$ мм и $-0.25+0.1$ мм, можно сделать вывод об отнесении их к мелко- и среднезернистым пескам.

Отмечено закономерное увеличение значения плотности материала хвостов с ростом влажности (коэффициент корреляции достаточно высок – 0.6-0.8). Обратная корреляционная зависимость характерна для плотности и пористости – 0.93-0.98.

По величине коэффициента пористости (ε) пробы варьируют от плотных до несвязных грунтов, что указывает на вероятность возникновения пыления в условиях сухой ветреной погоды.



Рисунок 1. Схема отбора проб хвостов обогащения лопаритовых руд

Преобладающими минералами являются: нефелин, полевой шпат, эгирин (рис.2). Среднее содержание лопарита в хвостах обогащения составляет 0.64-0.98%, эвдиалита – 0.01-0.09%.

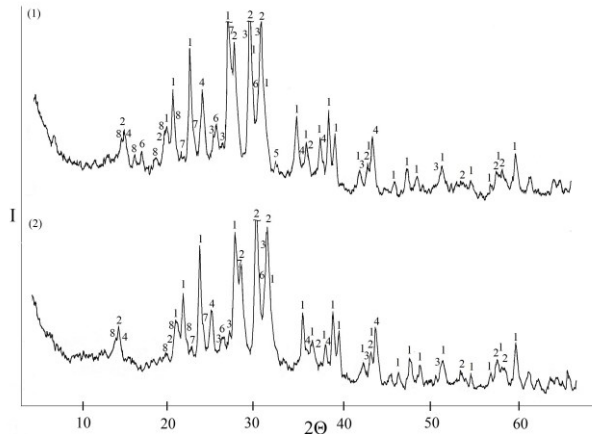


Рисунок 2. Рентгенограммы проб хвостов: (1) – тонкая фракция, (2) – средняя проба. Рефлексы: 1 – нефелин, 2 – эгирин, 3 – микроклин, 4 – содалит, 5 – лопарит, 6 – анальцит, 7 – альбит, 8 – натролит

Выявлена неоднородность вещественного состава и содержаний ценных компонентов. Проведенный химический анализ расситованных фракций установил, что содержание РЗЭ легкой группы во фракции -0.071 мм в 1.5-2 раза превышает содержания элементов в средней пробе (рис. 3).

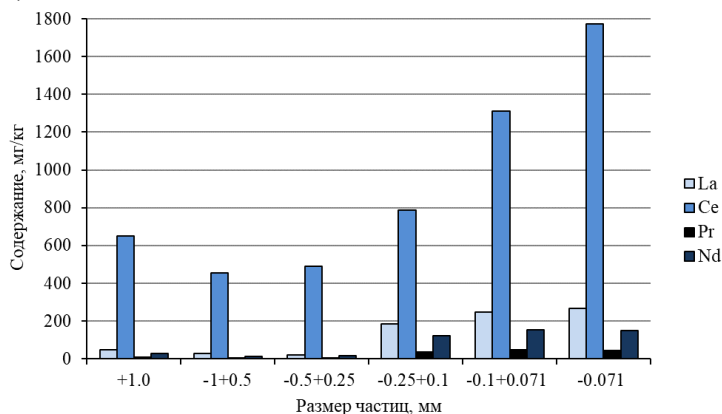


Рисунок 3. Содержание РЗЭ в материале хвостов обогащения в зависимости от размера частиц, мг/кг

Анализ, проведенный на более широкий набор элементов, установил концентрирование в тонкодисперсном материале не только РЗЭ, но и других элементов, в частности: Mn, Sr, Zn, Zr, U, Th, Ta (рис. 4).

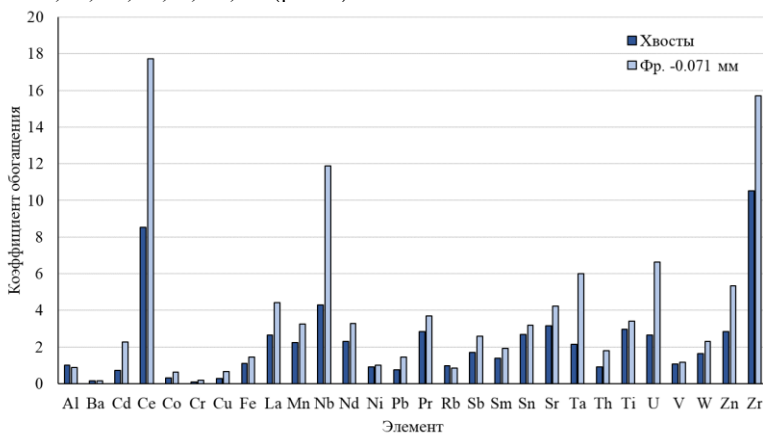


Рисунок 4. Коэффициенты обогащения хвостов элементами

Данный факт позволяет предположить загрязнение компонентов окружающей среды вышеуказанными элементами.

Установлен радио-ториевый характер радиоактивности хвостов. На основании расчета значений удельных активностей ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K хвосты обогащения отнесены к первой категории отходов, строительным материалам II класса и I классу минерального сырья (рис. 5).

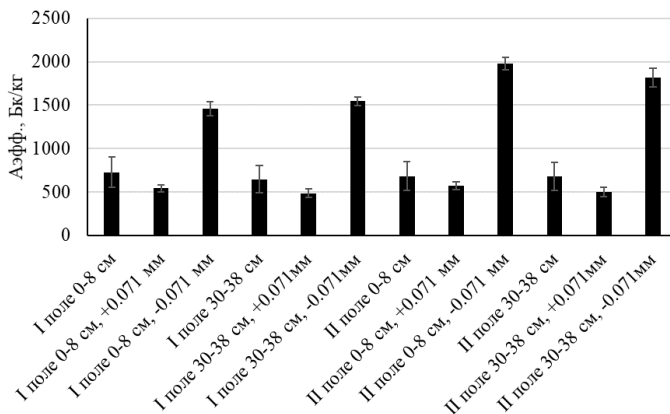


Рисунок 5. Удельная эффективная активность хвостов обогащения лопаритовых руд, Бк/кг

Отделенные тонкодисперсные отходы (-0.071 мм) характеризуются повышенным расчетным значением эффективной удельной активности. Данный материал относится ко второй категории отходов, III и IV классам строительных материалов и II классу минерального сырья.

Методом элюатного фитотестирования экспериментально подтвержден V класс опасности исследуемых отходов, установлено токсическое действие водной вытяжки отделенной тонкой фракции хвостов обогащения лопаритовых руд на рост и развитие высших растений.

Изучение процессов, происходящих при хранении хвостов обогащения лопаритовых руд

В данной главе приведены результаты изучения процессов мобилизации экологически опасных элементов из хвостов обогащения лопаритовых руд под действием атмосферных осадков и при попадании минеральных пылевых частиц в почву при различных температурах.

1. Мобилизация экологически опасных элементов из хвостов обогащения лопаритовых руд под действием атмосферных осадков

Моделирование химического выветривания минералов под воздействием атмосферных осадков проводили, исследуя взаимодействие частиц хвостов обогащения лопаритовых руд с дистиллированной водой и слабым раствором серной кислоты. Объектом исследования являлись хвосты, отобранные непосредственно на фабрике из зумпфа до разгрузки на хвостохранилище. Ввиду длительности природных процессов гипергенных изменений минералов эксперимент проводили в ускоренном режиме. Пробы хвостов ($m = 70$ г) помещали в термостатируемые ячейки ($t = 50$ °C). Образцы ежедневно увлажняли 0.002N раствором серной кислоты в объеме 25 мл/сутки в течение 20, 40 и 60 суток. В контрольной

серии опытов выщелачивающим агентом выступала дистиллированная вода. По окончании эксперимента высушенные пробы обрабатывали дистиллированной водой в соотношении Т:Ж = 1:10, полученные растворы фильтровали через мембранный фильтр МФАС ОС-2 (размер пор 0.45 мкм) и передавали на анализ.

Концентрации ТМ в результирующих растворах через 60 суток эксперимента при увлажнении материала хвостов разбавленным раствором серной кислоты многократно превысили предельно допустимые для водных объектов рыбохозяйственного значения (рис. 6). В частности, ПДК_{рбхз} превышены по меди и стронцию – в пять раз, по цинку – в семнадцать раз, по марганцу – в 448 раз.

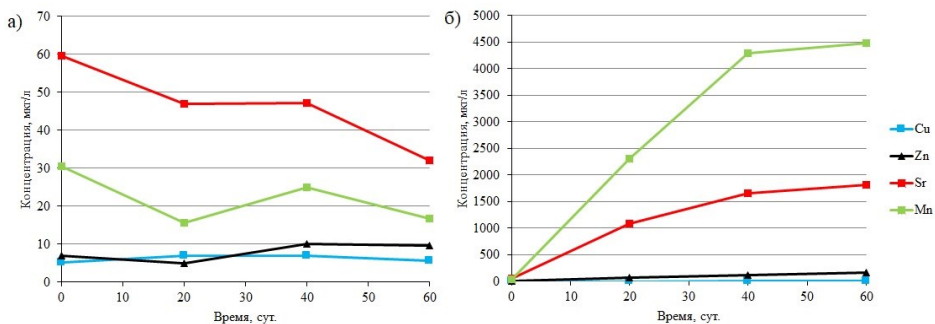


Рисунок 6. Концентрации ТМ в результирующих растворах при взаимодействии с водой (а) и серной кислотой (б)

Отмечен интенсивный переход в раствор РЗЭ легкой группы. В частности, концентрации лантана и церия в результирующих растворах по окончании эксперимента превышают аналогичные показатели в контроле (увлажнение дистиллированной водой) в 45 и 60 раз соответственно (рис. 7).

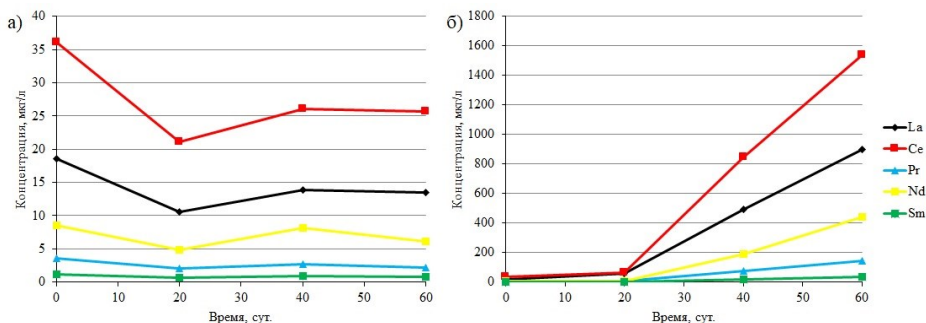


Рисунок 7. Концентрации РЗЭ в результирующих растворах при взаимодействии с водой (а) и серной кислотой (б)

Взаимодействие поликомпонентных хвостов обогащения со слабым раствором серной кислоты приводит к интенсификации перехода ТМ и РЗЭ в растворимую, а значит наиболее биодоступную форму.

Результаты проведенного исследования мобилизации экологически опасных элементов из хвостов обогащения лопаритовых руд текущего производства под действием атмосферных осадков показали многократное увеличение скорости химического выветривания в условиях, моделирующих воздействие кислотных дождей. Интенсивность разрушения силикатной матрицы основных минералов хвостов и перехода ТМ и РЗЭ в растворимые формы в слабокислой среде резко возрастает.

2. Исследование взаимодействия хвостов обогащения лопаритовых руд с почвенными водами

В лабораторных условиях были проведены эксперименты по мобилизации экологически опасных элементов из тонкой фракции хвостов при взаимодействии с модельными растворами, имитирующими почвенные воды, в разных температурных режимах.

Для определения влияния растворенного органического вещества на процесс мобилизации ТМ и РЗЭ из материала хвостов использовали водные органосодержащие растворы с содержанием $C_{\text{общ}}$ 50 и 100 мг/л. В качестве источника водорастворимого органического вещества использовали фрезерный торф верхового типа (ГОСТ Р 52067-2003). В другой серии экспериментов варьировали температуру. В качестве модельного раствора использовали водную вытяжку почвы, отобранной на удалении 20 км от предприятия. Содержание органического углерода в вытяжке составило порядка 40 мг/л, что сопоставимо со средним содержанием $C_{\text{орг}}$ в подзолистых почвах Кольского полуострова по литературным данным. Эксперименты проводили в термостате ТСО-1/80 СПУ при выбранных температурах – 5 и 15°C, соответствующих средним температурам весенне-осеннего и летнего периодов на Кольском полуострове. Время взаимодействия составляло 1, 3 и 5 часов при непрерывном перемешивании. В качестве контроля аналогичные серии экспериментов проводили с дистиллированной водой.

На рисунках 8, 9 представлены концентрации ТМ и РЗЭ в растворах по окончании экспериментов в зависимости от температуры и присутствия растворенного органического вещества.

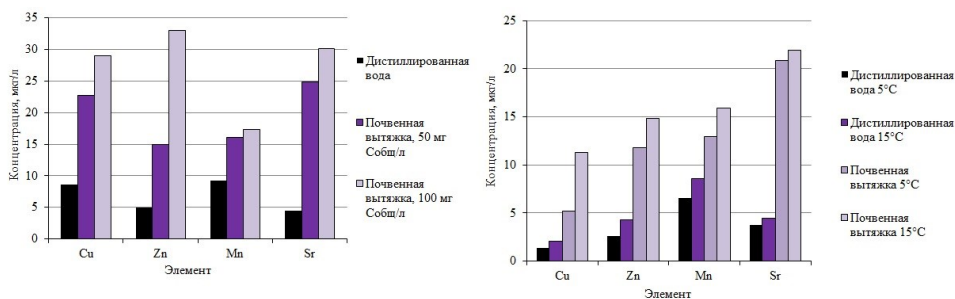


Рисунок 8. Концентрации ТМ в результирующих растворах после пяти часов взаимодействия хвостов обогащения лопаритовых руд с дистиллированной водой и водными вытяжками почв

Внесение растворенного органического вещества приводит к интенсификации перехода ТМ в растворенную форму. С увеличением количества органики концентрации ТМ в результирующих растворах закономерно повышаются. Также отмечено снижение рН растворов, тем сильнее, чем больше растворенного органического вещества внесено.

В результирующих растворах после пяти часов взаимодействия хвостов с почвенными вытяжками наблюдается значительное превышение ПДК_{рбхз} по ряду элементов: медь превышает ПДК_{рбхз} (0.001 мг/л) от 23 до 29 раз, цинк (ПДК_{рбхз} = 0.01 мг/л) – от 1.5 до 3.3 раз, марганец (ПДК_{рбхз} = 0.01 мг/л) – от 1.6 до 1.7 раз при содержании в почвенной вытяжке 50 и 100 мгС_{общ}/л соответственно. Стронций активно переходит в растворенную форму, однако предельно допустимую концентрацию не превышает.

Повышение температуры во второй серии экспериментов также оказывает интенсифицирующее действие на процесс мобилизации ТМ из тонкодисперсного материала хвостов.

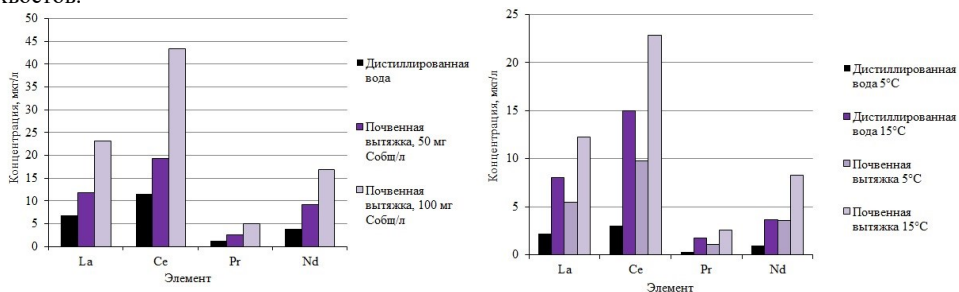


Рисунок 9. Концентрации РЗЭ в результирующих растворах после пяти часов взаимодействия хвостов обогащения лопаритовых руд с дистиллированной водой и водными вытяжками почв

Внесение органического вещества приводит к резкому ускорению процесса перехода РЗЭ в раствор. Общее увеличение количества растворенных РЗЭ пропорционально увеличению внесенного органического вещества. Процесс идет интенсивнее для лантана, церия, неодима.

Наблюдаемое увеличение перехода ТМ и РЗЭ в раствор при внесении органического вещества, по-видимому, связано с интенсивным разрушением минеральной матрицы гуминовым веществом. Сочетание наличия водорастворимых органических веществ почв в растворе с повышением температуры закономерно приводит к интенсификации перехода в раствор катионов, к числу которых помимо основных катионов породообразующих минералов относятся ТМ и РЗЭ.

Установлено, что переход экологически опасных элементов – как ТМ, так и РЗЭ – в растворенную форму усиливает повышение температуры, увеличение количества внесенного органического вещества и снижение рН растворов.

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о потенциальной экологической опасности хвостов обогащения лопаритовых руд.

Оценка влияния хвостов обогащения лопаритовых руд на окружающую среду

В данной главе приведены результаты исследований водных объектов, почв и растений в зоне влияния ООО «Ловозерский ГОК».

1. Современное состояние водных объектов в зоне влияния ООО «Ловозерский ГОК»

Были отобраны и проанализированы пробы поверхностных вод и ДО озер в районе исследования. Схема отбора проб представлена на рис. 10. За последние 35 лет деятельности горнорудного предприятия ООО «Ловозерский ГОК» гидрохимический состав воды близлежащих озер не претерпел значительных изменений. Отмечено снижение водородного показателя и минерализации для озер Ильма, Кривое и Ревдозеро и повышение минерализации для оз. Ловозеро.

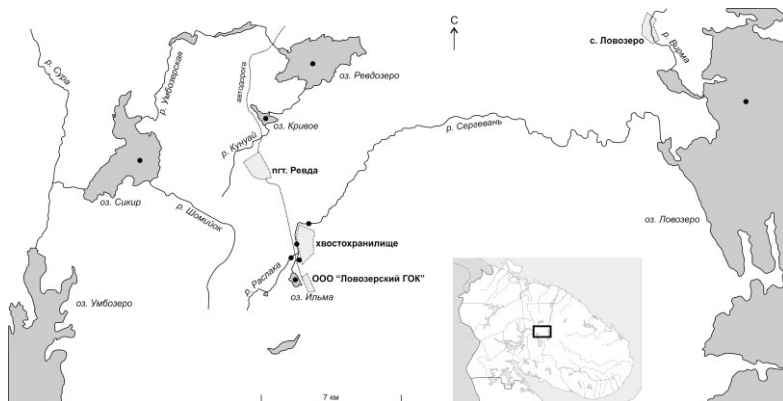


Рисунок 10. Схема отбора проб поверхностных вод и ДО озер

Проведенный химический анализ ДО озер Ильма и Кривое позволил установить значительное превышение содержаний стронция, цинка и марганца в ДО оз. Ильма по отношению к фоновым значениям (рис. 11).

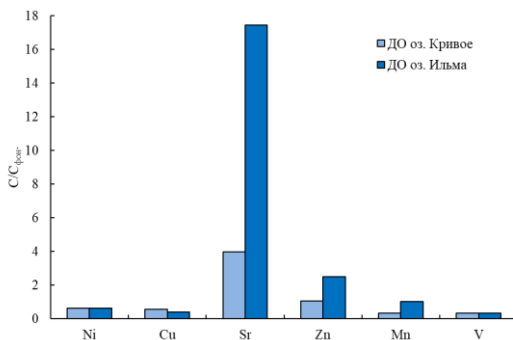


Рисунок 11. Отношение содержания ТМ в ДО озер Ильма и Кривое к фоновым значениям

На основе сравнения содержания РЗЭ в пробах ДО двух озер со средними содержаниями в земной коре, пределами содержаний в ДО пресноводных экосистем и ДО оз. Имандра, подверженного техногенному загрязнению предприятия, добывающего и перерабатывающего апатито-нефелиновые руды, выявлено значительное загрязнение ДО оз. Ильма элементами, входящими в состав хвостов обогащения лопаритовых руд (табл. 1).

Таблица 1. Содержание РЗЭ в ДО озер и других объектах, мг/кг

Элемент	ДО оз. Ильма	ДО оз. Кривое	Кларки элементов в земной коре	Пределы содержаний в ДО пресноводных экосистем	ДО оз. Имандра
La	200.06	15.11	30.00	19.5-100	103.00
Ce	408.79	27.79	50.00	43-100	172.00
Pr	42.49	3.29	5.00	8-8.3	21.00
Nd	126.10	10.51	23.00	19-44	79.00
Sm	19.99	1.75	6.50	3.3-30	12.00
Eu	5.45	0.43	1.00	0.07-12.2	3.10
Gd	15.58	1.37	6.50	5.0-6.0	12.00
Tb	2.29	0.21	0.90	0.3-1.1	1.20
Dy	13.23	1.13	4.50	1.8-4.5	6.70
Ho	2.37	0.21	1.00	0.9-1.0	1.10
Er	6.19	0.56	2.50	2.6-3.0	3.00
Tm	0.81	0.08	0.25	0.40	0.37
Yb	5.29	0.51	3.00	1.4-4.4	2.30
Lu	0.70	0.07	0.70	0.2-0.5	0.29

Сточные воды ООО «Ловозерский ГОК» не выпускаются в оз. Ильма, а значит, возможными путями загрязнения озера могут являться: аэротехногенный перенос пылевых частиц с незакрепленных участков хвостохранилищ, дренажные воды и процессы выщелачивания подстилающих пород.

О негативном влиянии предприятия на загрязнение р. Сергевань недостаточно очищенными сточными водами убедительно говорят результаты анализа проб воды, отобранные в реках Раслака и Сергевань до и после выпуска сточных вод. По В.В. Шабанову рассчитаны коэффициент предельной загрязненности (КПЗ) (рис. 12) и индекс загрязнения вод (ИЗВ).

По классификационной шкале после приема сточных вод река от класса «очень чистая» ($ИЗВ \leq 0.2$) переходит в класс «очень грязная» ($ИЗВ \geq 6$). В числе приоритетных загрязняющих веществ: взвешенные вещества, ионы алюминия, железа, цинка, марганца, фториды и фосфаты.

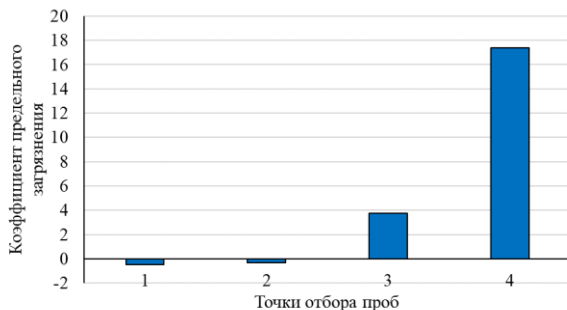


Рисунок 12. КПЗ поверхностных вод: 1 – р. Раслака; 2 – р. Сергевань до выпуска сточных вод; 3 – р. Сергевань после выпуска сточных вод; 4 – р. Сергевань ниже хвостохранилища

На данный момент очистка стоков производится за счет разделения потоков шахтных вод, гравитационного осаждения взвесей в шахтных выработках, которые выведены из эксплуатации, и последующем смешивании с условно чистыми водами. Усовершенствование системы очистки стоков и закрепление пылящих участков хвостохранилища позволят снизить экологическую нагрузку на окружающую среду.

2. Оценка химического загрязнения почв и растений в зоне влияния хвостохранилищ

Объектом исследования являлась территория промышленной зоны предприятия в непосредственной близости от полей хвостохранилищ и технологических транспортных магистралей (рис. 13).



Рисунок 13. Карта-схема отбора проб грунтов и растений

По результатам анализа отобранных проб грунтов установлены превышения ПДК по марганцу и ванадию до 1.5 и 2.6 раз соответственно. Для цинка выявлено превышение ОДК в 2.2 раза.

На основе расчета суммарного показателя загрязнения (СПЗ) по Ю.Е. Сауту для большей части отобранных проб установлена допустимая категория загрязнения, однако по ряду направлений грунты могут быть отнесены к умеренно опасной категории (расчет производили только для ТМ). Расчетные значения СПЗ для оценки загрязнения территории РЗЭ варьировали от 14.8 (допустимая категория загрязнения) до 65.7 (опасная категория загрязнения).

Методом радиальной экстраполяции в программе ArcGIS 10 были получены ореолы загрязнения ТМ и РЗЭ (рис. 14).

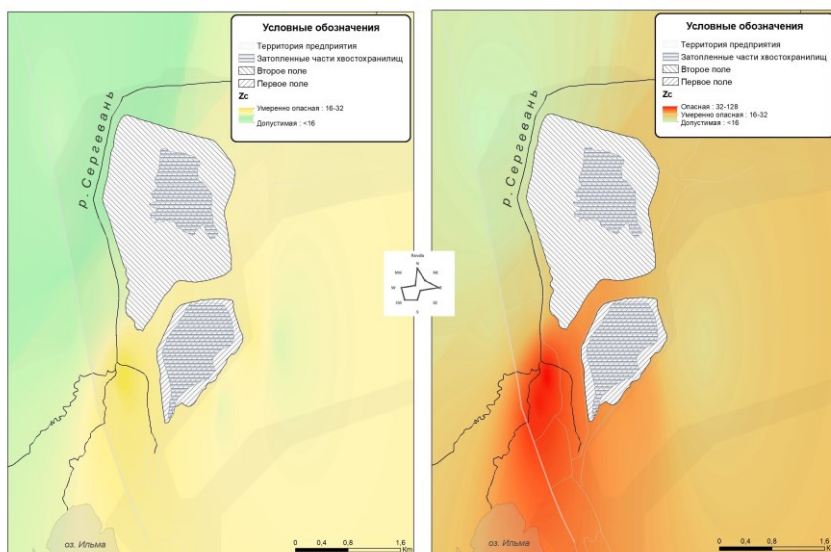


Рисунок 14. Схемы ореолов загрязнения проб грунтов на основе расчета Zc (слева – ТМ, справа – РЗЭ)

Наибольшее значение СПЗ определено для юго-западной площадки и совпадает с направлением максимальной повторяемости ветра. Данный результат может свидетельствовать о загрязнении участка вследствие аэротехногенного переноса частиц с поверхности хвостохранилища.

Выявлено существенное обогащение грунтов элементами, входящими в состав минералов разрабатываемого месторождения нефелин-сиенитовых пегматитов Ловозерского массива и хвостов, в том числе Та, Се, La, Zr, Nb. При этом содержание основных элементов питания растений, в частности Са и Mg снижено по сравнению с кларковыми значениями.

При существовании растений в условиях дефицита элементов питания растений, таких как Са, Mg, Mn, ярко выражено накопление как ивами, так и луговиком Al, Th, U, V, Zr,

Zn, Sr, PЗЭ легкой группы по сравнению с территориями их произрастания на севере Европы (рис. 15).

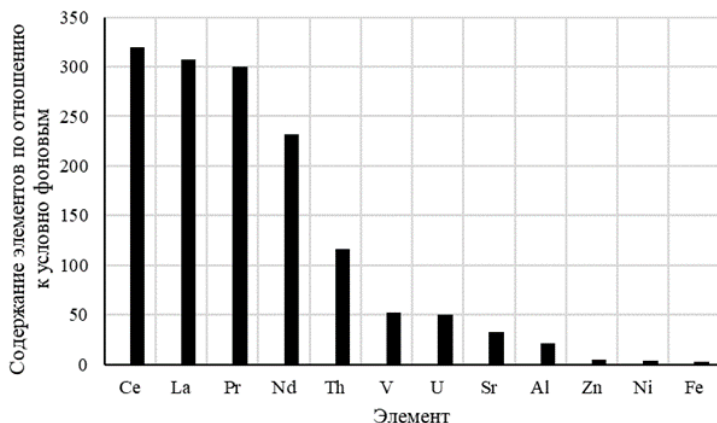


Рисунок 15. Коэффициент обогащения луговика элементами

Значения коэффициентов биологического поглощения большинства рассмотренных элементов составляют менее 1, что указывает на низкое содержание биодоступных форм. Предположительно, этот факт может быть связан с грубодисперсностью грунта и устойчивостью входящих в его состав минералов к выветриванию, в том числе под действием корневых выделений растений. Для *Salix spp.* зафиксирована аномально высокая аккумуляция цинка в вегетативных органах (содержание в пределах 560.2–856.6 мг/кг), что позволяет отнести эти древесные породы к группе биологического накопления элемента. Максимальные значения коэффициента биологического поглощения отмечены для ивы лопарской (*S. lapponum*).

С целью индикации сухого осаждения пылевых частиц на растениях был проведен корреляционный анализ связи содержания элементов с Al как реперным элементом. Тесная связь отмечена для PЗЭ, Zr и Nb, что позволяет предположить преимущественно аэротехногенное поступление элементов и осаждение и на надземных частях растений.

Изученные виды, максимально распространенные на обследуемой территории, характеризуются низким накоплением основных и сопутствующих элементов, входящих в состав отходов обогащения, что позволяет рекомендовать их для создания устойчивого растительного покрова на нарушенной территории.

Технологические предложения для снижения негативного воздействия хвостохранилищ на окружающую среду

В главе представлены результаты лабораторных исследований применения полимерных покрытий для действующего хвостохранилища и ремедиационных мероприятий для поля, выведенного из эксплуатации.

1. Подбор оптимального расхода связующего реагента для закрепления поверхности действующего хвостохранилища

Гранулометрический и минералогический состав лопаритовых хвостов в целом схож с ранее изученными хвостами обогащения апатито-нефелиновых руд, поэтому в качестве предлагаемого реагента был выбран связующий реагент Dustbind, показавший лучшие результаты в ходе испытаний и рекомендованный к применению на предприятии КФ АО «Апатит».

Опыт по определению глубины проникновения иглы проводился на пенетрометре М-984 ПК. Измерения производились в течение 10 дней. Далее, для оценки устойчивости полимерных пленок к низким температурам, пробы помещали на 18 часов в морозильную камеру (-15 °С), затем образцы оттаивали в течение 5 часов. Цикл «замораживание-оттаивание» повторяли 10 раз. Для каждой пробы измерение повторялось два раза, далее вычислялось среднее значение глубины проникновения иглы, которое принимали обратно пропорциональным условной прочности (рис. 16).

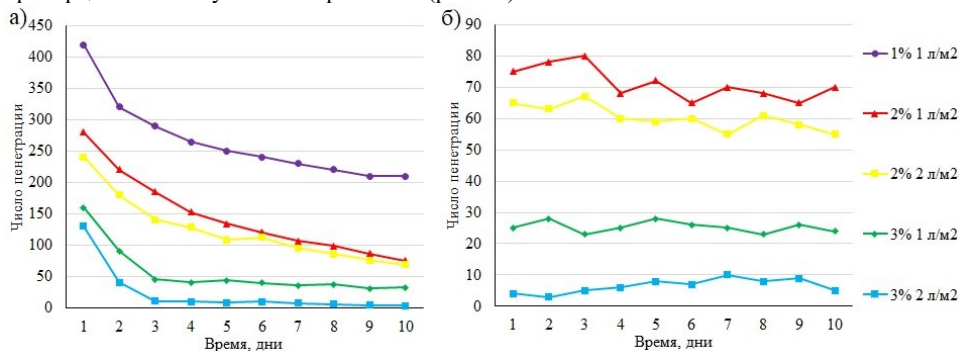


Рисунок 16. Изменение условной прочности покрытия: а) – в течение 10 суток с момента нанесения раствора реагента; б) – в течение 10 циклов «замораживание – оттаивание»

Кинетика набора прочности защитными покрытиями схожа для всех проб. Число пенетрации закономерно уменьшалось с течением времени и увеличением расхода действующего реагента. Исследуемые покрытия показали хорошую устойчивость к циклическому воздействию отрицательных температур. Лучшие результаты были достигнуты с применением 3%-го раствора связующего реагента с удельным расходом 1 и 2 л/м². Разница в показателе условной прочности незначительна, поэтому для испытаний на опытных площадках на хвостохранилище можно рекомендовать 3%-ый раствор (1 л/м²).

2. Лабораторные эксперименты по рекультивации хвостов обогащения лопаритовых руд

Проведенная предварительная оценка пригодности техногрунта к рекультивации согласно ГОСТ 17.5.1.03-86 «Охрана природы (ССОП). Земли. Классификация вскрышных и вмещающих пород для биологической рекультивации земель» показала, что отходы обогащения лопаритовых руд обладают неблагоприятными характеристиками как для естественного возобновления растительного покрова, так и для биологической рекультивации.

Схема лабораторного опыта включала внесение в грунт осветленных коммунальных стоков (ОКС), осадков сточных вод (ОСВ), смеси ОСВ с опоккой и контрольный вариант (рис. 17, 18). Для формирования сеяного фитоценоза в лабораторном эксперименте применяли семена овсяницы луговой (*Festuca pratensis* Huds.).

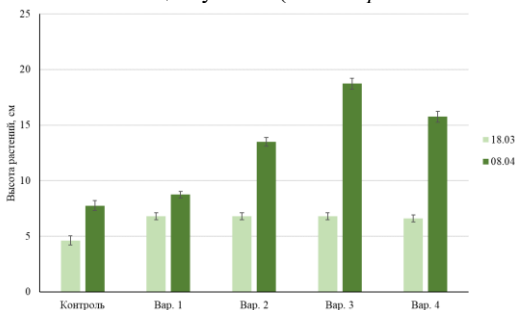


Рисунок 17. Влияние мелиорантов на высоту травостоя

Примечание. Вар.1 – ОКС (однократное орошение грунта в начале эксперимента, далее полив талой водой), вар. 2 – ОКС (однократное орошение грунта в начале эксперимента, далее полив только ОКС в течение всего эксперимента), вар. 3 – ОСВ (8 фрагментов по поверхности, полив только талой водой), вар. 4 – ОСВ + опока (смесь ОСВ:опока 2:1 по объему, 8 фрагментов по поверхности, полив только талой водой), контроль – без мелиорантов, полив только талой водой.

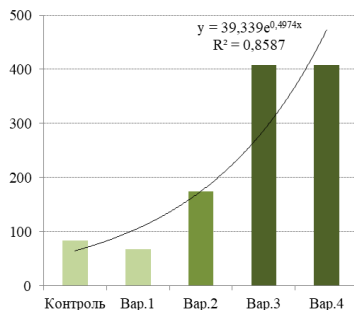


Рисунок 18. Наземная зеленая биомасса (г/м²) по окончании опыта

Внесение мелиорантов оказало стимулирующий эффект на высоту травостоя и прирост наземной биомассы при формировании фитоценоза в лабораторных условиях. Результаты листовой диагностики подтвердили эффективность внесения добавок органической природы на отходы обогащения лопаритовых руд (табл. 2).

Таблица 2. Валовое содержание элементов в исходном грунте и наземной биомассе растений, мг/кг

Элемент	Исходный грунт	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3	Вар. 4	Контроль
Na	78726	17707	10680	3906	3469	10085
Mg	2291	676	791	1232	1209	742
Al	96437	18072	5073	486	141	6436
Si	224640	453	373	147	123	363
P	3575	4095	4663	5350	5738	4460
K	36686	13177	14989	17168	17244	12677
Ca	12155	1061	662	1295	1276	647
Fe	41381	530	152	90	50	204

Отмечено активное накопление всех основных элементов питания (фосфора, калия, кальция, магния) в наземной части растений одновидового фитоценоза. Внесение ОСВ, особенно совместно с кремнистой породой (опокой), позволило снизить доступность Al и Fe для растений, доводя их содержание в наземной биомассе до фоновых значений.

В условиях лабораторного опыта с имитацией поверхностного внесения подтвержден стимулирующий эффект нетрадиционных мелиорантов (ОКС, ОСВ и его композиции с кремнистой породой (опокой)) на питательный режим рекультивируемых хвостов обогащения. Исследуемые материалы могут быть признаны пригодными для мелиорации отходов обогащения редкометалльной промышленности без проведения затратных работ по землеванию.

Заключение

В диссертации на основании выполненных автором исследований решена актуальная задача геоэкологической оценки влияния хвостов обогащения лопаритовых руд на компоненты окружающей среды и предложены технологические решения по снижению негативного воздействия отходов.

Изучены инженерно-геологические характеристики и вещественный состав хвостов обогащения. Установлено, что хвосты склонны к пылению в условиях сухой ветреной погоды. Выявлена неоднородность содержания ценных компонентов, концентрирование ТМ и РЗЭ в тонкодисперсном материале хвостов. Среднее содержание лопарита в хвостах составляет 0.64-0.98%.

На основании радионуклидного анализа установлен радио-ториевый характер радиоактивности. В отличие от средней пробы хвостов с расчетным значением удельной эффективной радиоактивности, не превышающей 1500 Бк/кг, тонкодисперсный материал хвостов характеризуется повышенным содержанием радионуклидов, относится ко второй категории отходов.

Исследованы возможные варианты процессов мобилизации экологически опасных элементов, происходящие при хранении и пылении хвостов. Установлено, что переход РЗЭ, как и ТМ в растворенную, а значит, биодоступную, форму происходит интенсивнее при снижении рН и увеличении содержания растворенного органического вещества и температуры. Результаты проведенных экспериментов, моделирующих взаимодействие хвостов с атмосферными осадками, попадание минеральных частиц в почву в результате пыления и переход экологически опасных элементов в подвижные формы свидетельствуют о потенциальной экологической опасности хвостов обогащения лопаритовых руд.

Проведенная оценка химического загрязнения компонентов окружающей среды выявила повышенные содержания ТМ (Sr, Zn, Mn) и РЗЭ легкой группы в ДО оз. Ильма, пробах почв и растений, отобранных в импактной зоне. Содержание РЗЭ в ДО оз. Ильма превышает средние содержания элементов не только в земной коре и ДО пресноводных экосистем, но и в ДО оз. Имандра, ранее охарактеризованного как загрязненное РЗЭ.

На основе расчета СПЗ для большей части отобранных проб грунтов установлена допустимая категория загрязнения ТМ, однако некоторые пробы могут быть отнесены к умеренно опасной категории (Zс до 21.6). Рассчитанное значение Zс для РЗЭ легкой группы в ряде точек отбора проб доходит до 65.7 (опасная категория загрязнения).

Анализ отобранных проб растений и сопоставление содержаний некоторых элементов со среднеевропейскими значениями позволили установить накопление ивами и луговиком Al, Th, U, V, Zr, Zn, Sr по сравнению с условно «фоновыми» европейскими территориями их

произрастания. Обнаружено многократное превышение содержания РЗЭ легкой группы в пробах *Avenella flexuosa* L. – от 230 до 320 единиц. Отмечена аномальная аккумуляция цинка ивовыми *Salix spp.*, что позволило отнести эти древесные породы к группе биологического накопления элемента. Наиболее высокая степень аккумуляция цинка установлена для ивы лопарской *S. lapponum* с КБП 4.31.

Повышенные содержания ТМ и РЗЭ в точках отбора проб, совпадающих с «розой ветров», позволяют предположить, что основной причиной загрязнения является пыление незакрепленных поверхностей хвостохранилищ.

В качестве мер, предлагаемых для снижения негативного воздействия, опробованы:

1. использование полимерного покрытия для пылеподавления пылящих участков действующего хвостохранилища.

2. применение ОСВ и его композиции с кремнистыми природными материалами для мелиорации выведенного из эксплуатации поля хвостохранилища.

Проведенные натурные эксперименты подтвердили эффективность предлагаемых путей решения проблемы пыления. Целью дальнейших исследований является поиск и оценка эффективности сорбентов на основе местного минерального сырья либо отходов горнопромышленного комплекса для очистки загрязненных территорий.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Красавцева, Е. А. Результаты исследований свойств и состава хвостов обогащения лопаритовых руд / Е. А. Красавцева, Д. В. Макаров, Е. А. Селиванова, П. В. Икконен, В. В. Максимова // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2021. – №3. – С. 190-198.

2. Горячев, А. А. Оценка экологической опасности и возможности переработки хвостов обогащения лопаритовых руд / А. А. Горячев, Е. А. Красавцева, В. В. Лащук, П. В. Икконен, А. А. Смирнов, В. В. Максимова, Д. В. Макаров // Экология и промышленность России. – 2020. – Т. 24. – № 12. – С. 46-51.

3. Максимова, В. В. Исследование влияния горнопромышленных отходов мурманской области на рост и развитие высших растений / В. В. Максимова, Е. А. Красавцева // Проблемы региональной экологии. – 2020. – № 4. – С. 21-26.

4. Красавцева, Е. А. Мобилизация экологически опасных элементов из хвостов обогащения лопаритовых руд под действием атмосферных осадков / Е. А. Красавцева, Д. В. Макаров, Е. А. Селиванова, В. В. Максимова, А. В. Светлов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2021. – № 3. – С. 69-79.

5. Красавцева, Е. А. Моделирование взаимодействия тонкой фракции хвостов обогащения лопаритовых руд с почвенными водами / Е. А. Красавцева, В. В. Максимова, В. А. Маслобоев, Д. В. Макаров, Т. Т. Горбачева // Экология и промышленность России. – 2021. – Т. 25. – № 4. – С. 28-33.

6. Максимова, В. В. Исследование растворимости пылевых частиц в почвенном растворе при различных температурах (на примере хвостов обогащения лопаритовых руд) / В. В. Максимова, Е. А. Красавцева, В. А. Маслобоев, Д. В. Макаров // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2021. – Т. 24. – № 1. – С. 107-117.

7. Красавцева, Е. А. Состояние водных объектов в зоне влияния горно-перерабатывающих предприятий на примере ООО «Ловозерский ГОК» / Е. А. Красавцева, С. С. Сандмиров // Вода и экология: проблемы и решения. – 2021. – №2. – С. 3-13.

8. Красавцева, Е. А. Оценка химического загрязнения грунтов и растений в зоне влияния хранилища отходов обогащения лопаритовых руд / Е. А. Красавцева, В. В. Максимова, Т. Т. Горбачева, Д. В. Макаров, Н. Л. Алфертьев // Маркшейдерия и недропользование. – 2021. – № 2 (112). – С. 52-58.

9. Красавцева, Е. А. Подбор оптимального расхода связующего реагента для закрепления поверхности хранилища хвостов обогащения лопаритовых руд / Е. А. Красавцева, Д. В. Макаров, В. В. Максимова, А. В. Светлов // Маркшейдерия и недропользование. – 2021. – № 4 (114). – С. 9-14.

10. Красавцева, Е. А. Коммунальные стоки в опытах по рекультивации отходов обогащения лопаритовых руд / Е. А. Красавцева, Т. Т. Горбачева, Л. А. Иванова, В. В. Максимова // Вода и экология: проблемы и решения. – 2021. – №3. – С. 44-55.

Рецензируемые издания (Scopus и Web of Science):

1. Krasavtseva, E. Conditions Affecting the Release of Heavy and Rare Earth Metals from the Mine Tailings Kola Subarctic / E. Krasavtseva, V. Maksimova, D. Makarov // *Toxics*. – 2021. – Vol. 9 (7). – P. 163.

Материалы международных, всероссийских и региональных конференций:

1. Красавцева, Е. А. Оценка влияния хранилищ отходов обогащения лопаритовых руд на окружающую среду и технологическое решение по снижению негативного воздействия / Е. А. Красавцева, Д. В. Макаров // Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения - 2021), Владикавказ, 04–08 октября 2021 года. – Владикавказ: Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет). – 2021. – С. 520-523.

2. Maksimova, V. V. Study of organic matter influence on environmentally hazardous elements transition from the fine fraction of tailings / V. V. Maksimova, E. A. Krasavtseva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies, Volgograd, Krasnoyarsk, 18–20 November 2020. – Volgograd, Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited. – 2021. – Vol. 677. – P. 42088.

3. Krasavtseva, E. A. Geoecological Assessment of Aged Tailings of Loparite Ore Enrichment / Environmental Assessment of Recycling of Loparite Ore Tailings / E. A. Krasavtseva, A. A. Goryachev, V. V. Maksimova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International science and technology conference "Earth science", Vladivostok, 8-10 December 2020. — IOP Publishing Limited. – 2021. – Vol. 666 (4). – P. 042095.

4. Максимова, В. В. Изучение взаимодействия тонкой фракции хвостов обогащения лопаритовых руд с водорастворимыми органическими соединениями торфа / В. В. Максимова, Е. А. Красавцева, В. А. Маслобоев // Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения - 2020) : Материалы международной конференции, Апатиты, 21–26 сентября 2020 года. – Апатиты: Кольский научный центр Российской академии наук. – 2020. – С. 318-320.

5. Krasavtseva, E. A. Application of the phytotesting method to assess the environmental impact of the waste of Lovozersky GOK LLC / E. A. Krasavtseva, V. V. Maksimova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: III International Scientific Conference: AGRITECH-III-2020: Agribusiness, Environmental Engineering and Biotechnologies, Volgograd, Krasnoyarsk, 18–20 June 2020. – Volgograd, Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited. – 2020. – Vol. 548 – P. 62063.

6. Krasavtseva, E. A. Environmental hazard of loparite ore dressing tailings / E. A. Krasavtseva, V. V. Maksimova, D. V. Makarov // 4th International Conference on Sustainability Science (CSS2020), Online, Edited by Smyatskaya, Y.; Aktar, T.; E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 247. – P. 01044.

7. Горячев, А. А. Геоэкологическая оценка современного состояния разновозрастных хвостохранилищ рудника Карнасурт / А. А. Горячев, В. В. Лашук, Е. А. Красавцева, Н. Л. Алфертьев, Д. В. Макаров // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. – 2020. – №17. – С. 128-132.

8. Горячев, А. А. Исследования хвостов обогащения лопаритовых руд / А. А. Горячев, Е. А. Красавцева, В. В. Лашук, П. В. Икконен, А. А. Смирнов, Д. В. Макаров, В. А. Маслобоев // Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в 21 веке (Плаксинские чтения - 2019): Материалы Международного совещания, Иркутск, 09–14 сентября 2019 года. – Иркутск: Репроцентр А1. – 2019. – С. 433-434.