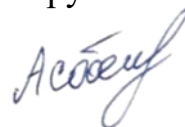


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
«Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук»
(ИГД УрО РАН)

На правах рукописи



Собенин Артем Вячеславович

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ
СТОЧНЫХ ВОД ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ
ПРОЕКТИРОВАНИИ РАЗРАБОТКИ МЕДНОКОЛЧЕДАНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Специальность

2.8.7. «Теоретические основы проектирования горнотехнических систем»

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук
Антонинова Н.Ю.

Екатеринбург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ В СВЯЗИ С ОСОБЕННОСТЬЮ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕДНОКОЛЧЕДАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ.....	12
1.1 Анализ особенностей функционирования горнотехнических систем при разработке медноколчеданных месторождений (на примере Свердловской области).....	12
1.1.1 Современное состояние и перспективы освоения медноколчеданных месторождений.....	12
1.1.2 Источники поступления тяжелых металлов в водные экосистемы: классификация и характеристика основных источников загрязнения	15
1.1.3 Воздействие тяжелых металлов на биологические объекты: анализ последствий и оценка потенциала самовосстановления	19
1.2 Современные технологии и перспективные подходы к очистке сточных вод при проектировании горнотехнических систем.....	21
1.2.1 Анализ опыта проектирования очистных сооружений в связи с особенностями функционирования горнотехнических систем.....	21
1.2.2 Основные методы удаления тяжелых металлов из сточных вод	27
1.2.3 Практический опыт использования отходов производств для создания систем извлечения металлов из водных объектов и очистки сточных вод.....	34
1.3 Выводы к первой главе.....	37
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГОРНОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕДНОКОЛЧЕДАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ.....	39
2.1 Методика проведения исследований	40
2.2 Анализ особенностей функционирования горнотехнической системы при разработке медноколчеданного месторождения как фактора, определяющего экологические последствия и требования к системам водоотведения и водоочистки.....	43
2.2.1 Оценка миграции тяжелых металлов в почво-грунтах района расположения медноколчеданного месторождения	46

2.2.2. Состав, источник формирования и направления потока сточных вод, образующихся на этапе прекращения горных работ.....	49
2.2.3 Изучение тяжелых металлов в сточных водах на возможности самовосстановления биологических растительных ресурсов, произрастающих в границах разработки медноколчеданного месторождения.....	53
2.3 Выводы ко второй главе.....	60
ГЛАВА 3. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИМЕНЕНИЯ ЖМКС И ОГП В КОНТЕКСТЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ВОДООЧИСТКИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕДНОКОЛЧЕДАНЫХ.....	61
3.1 Подготовка ЖМКС и ОГП как материалов для экспериментального обоснования параметров технологии очистки сточных вод при проектировании систем водоотведения и водоочистки.....	61
3.2 Экспериментальное определение и обоснование эффективных параметров применения ЖМКС и ОГП для очистки сточных вод от тяжелых металлов при проектировании систем водоотведения и водоочистки.....	63
3.2.1 Исследование эффективности применения отходов железо-магниевого производства (ЖМКС) для очистки сточных вод.....	65
3.2.2 Исследование эффективности применения отходов производства гуминовых препаратов (ОГП) для очистки сточных вод.....	75
3.3 Выводы к третьей главе	87
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА БЕЗОТХОДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ СИСТЕМ ВОДООЧИСТКИ ПРИ ОСВОЕНИИ МЕДНОКОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ОЦЕНКА ИХ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ	88
4.1 Техничко-технологические рекомендации по очистке высокоминерализованных сточных вод от тяжелых металлов с применением ЖМКС и ОГП	88
4.2 Оценка фитотоксичности доочищенных сточных вод как основа для разработки технико-технологических рекомендаций по их безопасному использованию в хозяйственной деятельности.....	94
4.3 Обоснование параметров внесения вновь образованных материалов в качестве мелиорантов.....	98
4.4 Влияние мелиорантов на рост и развитие растений.....	101

4.5 Оценка экономического эффекта внедрения технологической схемы водочистки с применением производственных отходов.....	105
4.5.1 Оценка капитальных затрат при использовании отходов производств (ЖМКС и ОГП) в качестве материалов для очистки сточных промышленных вод от металлов.....	105
4.5.2 Размер вреда, причиненного водным объектам сбросом загрязняющих веществ	110
4.5.3 Размер вреда, причиненного почвам как объекту окружающей среды.....	113
4.5.4 Экономический эффект от внедрения технико-технологических рекомендаций очистки сточных вод.....	114
4.5.5 Сравнение очистки сточных вод с помощью отходов производств с традиционными методами.....	116
4.6 Выводы к четвертой главе	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ А - СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ БАЗЫ ДАННЫХ № 2024625407 РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ. ВЛИЯНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАСТЕНИЙ <i>CHAMAENERION ANGUSTIFOLIUM</i> (L.) SCOP., ПРОИЗРАСТАЮЩИХ НА ОТРАБОТАННОМ МЕДНО-КОЛЧЕДАННОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ: № 2024625407: ЗАЯВЛ. 29.10.2024: ОПУБЛ. 22.11.2024	140
ПРИЛОЖЕНИЕ Б - СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ БАЗЫ ДАННЫХ № 2023623743 РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ. АДсорбционная ёмкость ЖЕЛЕЗО-МАГНИЕВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО СОСТАВА ПО ОТНОШЕНИЮ К ТЯЖЕЛЫМ МЕТАЛЛАМ (CU 2+, ZN 2+, FE 3+, MG 2+, NI 2+): № 2023623462: ЗАЯВЛ. 20.10.2023: ОПУБЛ. 02.11.2023	141
ПРИЛОЖЕНИЕ В - ПАТЕНТ № 2800460 С1 РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ, МПК В01J 20/04, В01J 20/06, С02F 1/28. ЖЕЛЕЗО-МАГНИЕВЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ СОСТАВ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД: № 2022124852: ЗАЯВЛ. 28.09.2022: ОПУБЛ. 21.07.2023	142
ПРИЛОЖЕНИЕ Г - ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ ОТХОДЫ ГУМИНОВОГО ПРОИЗВОДСТВА ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД: № 2832437; ЗАЯВИТЕЛЬ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ	

ИНСТИТУТ ГОРНОГО ДЕЛА УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК.....	143
ПРИЛОЖЕНИЕ Д – АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ НАУЧНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС ФГБОУ ВО «УГГУ»	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Е – АКТ О ВНЕДРЕНИИ НАУЧНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ В ПРОЕКТНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ НПО УГГУ	146

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Эффективность проектирования подсистемы водоотведения и очистки сточных вод как элемента горнотехнической системы оценивается в соответствии с постановлением Правительства РФ №87 (ред. от 28.12.2024) в разделе «Сведения об инженерном оборудовании, о сетях и системах инженерно-технического обеспечения». Указанные системы инженерно-технического обеспечения ведения горных работ включают в том числе разделы «Водоснабжение» и «Системы водоотведения», в которых обосновываются решения по выбору технологий очистки и нейтрализации сточных вод, составу применяемых для этого реагентов, оборудования и аппаратуры, обеспечивающей контроль качества. Это обусловлено тем, что в сбросах сточных вод содержатся химические вещества, присутствие которых несет риски загрязнения почвы и водных ресурсов. Одним из основных источников формирования загрязненных сточных вод при разработке месторождений являются объекты размещения отходов. Только в Свердловской области в 2023 году образовалось 161 млн тонн отходов, причем значительная их часть (более 90%) приходится на добычу полезных ископаемых. Кроме того, в 2022 году в Свердловской области значительная часть водных объектов характеризовалась как загрязненная: 26% пунктов наблюдения показали класс качества воды как «загрязненный», 57% — «грязный», 13% — «очень грязный», а 4% — «экстремально грязный». Как правило основными загрязнителями сбросов при разработке медноколчеданных месторождений являются цинк, медь и железо, отмечается загрязнение подземных вод с превышением ПДК по кадмию и свинцу. В связи с изложенным возникает необходимость в разработке и совершенствовании технологий водоочистки от тяжелых металлов. При этом все большее распространение получают методы очистки загрязненных вод с применением отходов горнодобывающей промышленности, что подтверждается исследованиями таких ученых, как Кременецкая И.П., Иванов Т.К., Орехова Н.Н., Шадрюнова И.В., Пашкевич М.А., Николаева Л.А., Zhang Y., Harharah R.H., Abdalla G.M.T. Развитие теории проектирования горнотехнических систем нашли свое отражение в трудах Трубецкого К.Н., Каплунова Д.Р., Хохрякова В.С., Яковлева В.Л., Рыльниковой М.В., Корнилкова С.В. Опыт проектирования рассматривается в работах таких авторов, как: Галкин В.А., Галкин Ю. А., Соколовский А.В., Пикалов В.А., Аксенов В.И., Аникин Ю.В.

Содержание диссертации соответствует п.3 паспорта научной специальности 2.8.7. «Теоретические основы проектирования горнотехнических систем».

Научно-практические результаты, полученные в ходе исследования, вносят вклад в совершенствование эффективных и экологически безопасных систем водоочистки, что свидетельствует об актуальности исследований.

Цель работы:

Повышение эффективности извлечения металлов (Cu, Zn, Cd, Fe) из высокоминерализованных сточных вод, позволяющих совершенствовать организацию их отведения и очистки на этапах проектирования ввода в эксплуатацию, реконструкции, консервации и ликвидации горнотехнических систем.

Идея работы:

Эффективность очистки высокоминерализованных сточных вод достигается последовательным применением отходов железо-магниевого производства и гуминовых препаратов.

Предмет: процессы очистки высокоминерализованных сточных вод, образующихся при разработке медноколчеданных месторождений.

Объект: Системы водоотведения и очистки высокоминерализованных сточных вод с учетом особенностей функционирования действующих и проектируемых горнотехнических систем в динамике их развития.

Задачи:

- Анализ существующих методов очистки высокоминерализованных сточных вод от тяжелых металлов;
- Выявление закономерностей изменения эффективности извлечения металлов в зависимости от времени контакта со сточными водами и дозировки отходов железо-магниевого производства и гуминовых препаратов для достижения максимальной эффективности подсистемы водоотведения и очистки как элемента горнотехнической системы;
- Разработка технологии очистки высокоминерализованных сточных вод от металлов с применением отходов железо-магниевого производства (ЖМКС) и гуминовых препаратов (ОГП);
- Обоснование направлений использования в хозяйственных целях материалов, образованных в результате очистки высокоминерализованных сточных вод.

Научная новизна:

- Установлена закономерность функционального роста эффективности извлечения цинка, меди и кадмия из фильтрата сточных вод со временем взаимодействия с отходами производства (ЖМКС и ОГП) до 120–180 минут и их дозировкой 10 г/л, что необходимо учитывать при проектировании горнотехнических систем.

— Обоснованы параметры очистки высокоминерализованных сточных вод от металлов (Cu, Zn, Cd, Fe) при использовании последовательного двухэтапного внесения отходов железо-магниевого производства и гуминовых препаратов.

— Предложена методика расчета параметров технологии очистки сточных вод, обеспечивающей достижение максимальной эффективности подсистемы водоотведения как элемента горнотехнической системы

Методы исследований

В работе для проведения исследований были использованы следующие методы: атомно-абсорбционный метод с применением приборов Varian AA 240 fs для анализа содержания тяжелых металлов, рН-метрии (потенциометрия) с использованием прибора рН-метра/иономера ТАН-2 для измерения рН, и системный анализ существующих методов очистки сточных вод от тяжелых металлов. Обработка и интерпретация данных осуществлялись с помощью метода функционально-факторных моделей и программного обеспечения «Тренды ФСП-1».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработанная технология очистки промышленных сточных вод, позволяет снизить затраты на очистку (с 119,15 руб./м³ до 4,20 руб./м³), что способствует рациональному использованию водных ресурсов и обеспечивает соответствие сточных вод нормативам ПДК.

2. Обоснована возможность использования в качестве мелиорантов вновь образованных в процессе очистки сточных вод материалов.

3. Результаты диссертационной работы подтверждены патентами на изобретение:

Патент № 2800460 С1 Российская Федерация, МПК В01J 20/04, В01J 20/06, С02F 1/28. Железо-магниевый композиционный состав для очистки сточных вод: № 2022124852: заявл. 28.09.2022: опубл. 21.07.2023

Патент на изобретение Отходы гуминового производства для очистки сточных вод: № 2023133123; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук

Реализация основных положений работы:

Результаты диссертационного исследования были использованы при выполнении научно-исследовательских работ:

в рамках Госзадания №075-00412-22 ПР. Тема 2 (2022-2024). Разработка геоинформационных технологий оценки защищенности горнопромышленных территорий

и прогноза развития негативных процессов в недропользовании (FUWE-2022-0002), рег. №1021062010532-7-1.5.1.

Результаты исследований могут быть использованы при разработке проектной документации для строительства, реконструкции объектов в части водоотведения в районах функционирования ГТС, обеспечивая экологическую безопасность и рациональное использование водных ресурсов, а также при подготовке специалистов по специальности «Горное дело» в рамках дисциплины «Основы проектной деятельности».

Положения, выносимые на защиту:

1. На этапе проектирования горнотехнических систем при освоении медноколчеданных месторождений и совершенствовании организации производственных процессов водоотведения и водоочистки предложено учитывать параметры потока кислых (pH 2,33–2,91) высокоминерализованных сточных вод, замедляющих процессы самовосстановления биологических растительных ресурсов в 1,3-1,4 раза.

2. Эффективность извлечения металлов (Cu, Zn, Cd, Fe) до 99,99 % из раствора высокоминерализованных подотвальных кислых (pH 2,33-2,91) вод достигается двухэтапным внесением отходов железо-магниевого производства (ЖМКС) и отходов гуминового производства (ОГП) дозировкой до 10 г/л и временем контакта 120-180 минут

3. Безотходная технология очистки сточных вод с применением ЖМКС и ОГП, основанная на последовательном осаждении и сорбции тяжелых металлов Cu, Zn, Cd, Fe с получением мелиорантов является эффективным природоохранным мероприятием, обеспечивающим совершенствование проектирования системы водоочистки производительностью до 1591 м³/сутки при снижении затрат с 119,15 руб/м³ до 4,20 руб/м³.

Степень достоверности и апробация результатов

Научные положения, выводы и рекомендации, представленные в работе, подкреплены комплексным экологическим мониторингом водных, земельных и растительных объектов в границах горнотехнической системы, сформированной при разработке медноколчеданного месторождения, а также обширным объемом лабораторных исследований проб воды, грунтов и растений. Экспериментальные данные подтверждают закономерности, выявленные в ходе теоретических исследований, что свидетельствует об их достоверности и удовлетворительной сходимости полученных результатов.

Апробация результатов

Основные положения работы неоднократно докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных и научно-технических конференциях: Всероссийская молодежная конференция научно-практическая конференция «Проблемы недропользования», февраль 2024 г. Екатеринбург, г. Апатиты, г. Хабаровск, г. Пермь, г.

Новосибирск и г. Якутск; ГЕОЭКОТЕХ: технологические и экологические проблемы разработки природных и техногенных месторождений. 24.10.2024, г. Екатеринбург; Хэйлунцзянская академия по охране и использованию черноземов г. Харбин (Китай), 16.06.2023; Всероссийская научно-практическая конференция Химия. Экология. Урбанистика 17–19 апреля 2024 года «Трансграничное сотрудничество в области экологической безопасности и охраны окружающей среды», VII Международная научно-практическая конференция ученых, студентов, магистрантов и аспирантов Гомель, 6-7 июня 2024 года; XI Уральский горнопромышленный форум «Технологический суверенитет горного производства» 25 - 27 октября 2023 Екатеринбург; XI Региональную молодежную конференцию имени В.И. Шпильмана «Проблемы рационального природопользования и история геологического поиска в Западной Сибири» 2023, г. Ханты-Мансийск, 30-31 марта; Всероссийская школа-семинар «Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды», г. Пермь, 21-22 апреля 2022 г.; «Рудник Урала» X Уральский Горнопромышленный форум XII Конференция «Рудник Будущего» 22 - 24 ноября 2022 Екатеринбург-ЭКСПО (Экспо бульвар, 2А); Биологическая рекультивация и мониторинг нарушенных земель: Материалы XI Всероссийской научной конференции с международным участием, Сатка, Челябинская обл., 12–16 сентября 2022 года. – Сатка, Челябинская обл.; XXII Уральская горнопромышленная декада 2024 года. Международная научно-техническая интернет-конференция «Проектное управление природно-техногенными комплексами в условиях новых вызовов», 2 апреля 2024, Екатеринбург.

Личный вклад автора заключается в определении целей и задач исследования, проведении экологического мониторинга земельных, водных и растительных ресурсов в зоне влияния изучаемого объекта; выполнении лабораторных исследований для определения сорбционных характеристик и химической эффективности материалов на основе промышленных отходов, используемых для удаления тяжелых металлов из сточных вод; выявлении закономерностей процесса извлечения тяжелых металлов из растворов сточных вод; разработке технологии очистки и оценке ее эколого-экономической эффективности при проектировании подсистемы водоотведения и очистки ГТС.

Публикации

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 10 печатных работах в том числе в 6 статьях – ВАК. Получены 2 патента и 2 базы данных.

Структура диссертации

Диссертация включает в себя: оглавление, введение, 4 главы с выводами к каждой, заключение, список литературы из 197 наименований и 6 приложений. Диссертация,

представленная на 146 страницах машинописного текста, содержит 24 рисунка и 21 таблицу.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность к.т.н. Антониновой Наталии Юрьевне за научное руководство диссертационной работой. За научные консультации автор благодарит д.т.н. Корникова Сергея Викторовича и д.т.н. Антонова Владимира Александровича. Также автор выражает благодарность коллективу лаборатории экологии горного производства Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук за оказанную поддержку и содействие в проведении исследования.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ В СВЯЗИ С ОСОБЕННОСТЬЮ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕДНОКОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ.

Свердловская область один из старопромышленных горнодобывающих регионов РФ, а проблема загрязнения водных ресурсов является достаточно серьезным фактором, существенно влияющим на эффективность комплексного освоения природных ресурсов [1 - 5]. Поэтому крайне важно, чтобы системы водоотведения и водоочистки, проектируемые для предприятий, соответствовали санитарным требованиям и учитывали специфику функционирования горнотехнических систем.

Согласно отчету о состоянии окружающей среды [6, 7] в пяти областях: Свердловской, Мурманской, Московской, Новгородской и Ханты-Мансийском автономном округе, зафиксированы большинство случаев значительного загрязнения, в частности, тяжелыми металлами. Одним из источников формирования высокоминерализованных сточных вод являются объекты размещения отходов [8 - 15]. Только в Свердловской области в 2023 году образовано 161 млн тонн отходов, причем подавляющая их часть (более 90%) приходится на добычу полезных ископаемых. Следовательно, выявление источников загрязнения металлами водных объектов и оценка минерально-сырьевой базы медноколчеданных месторождений необходимы как для разработки природоохранных мероприятий, направленных на защиту водных экосистем [19], так и для проектирования эффективных систем водоочистки и водоотведения на горнопромышленных предприятиях [20, 21, 22].

1.1 Анализ особенностей функционирования горнотехнических систем при разработке медноколчеданных месторождений (на примере Свердловской области)

1.1.1 Современное состояние и перспективы освоения медноколчеданных месторождений

Горно-металлургический комплекс обладает высокой конкурентоспособностью и включает около 60 предприятий, подразделяющихся на горнодобывающие, металлургические, трубные, ферросплавные и предприятия по производству огнеупоров. На предприятиях области сосредоточена треть медеперерабатывающих мощностей России. В недрах региона обнаружены практически все известные общераспространенные полезные ископаемые [23]. По состоянию на 01.01.2024 учтено 24 коренных и 4 техногенных месторождения меди. Разрабатываются 6 коренных и 1 техногенное месторождение. По цинку учтено 12 коренных и 1 техногенное месторождение [24]. Разрабатываются 4 коренных месторождения, включающие 73,2 % запасов цинка кат.

A+B+C1. В 2020 году добыча цинка велась на 2 коренных месторождениях. Кроме того, разрабатывается техногенное месторождение Шлакоотвал медеплавильного производства СУМЗ, цинк из которого не извлекается [24].

Кроме того, учтено 9 медноколчеданных месторождений с запасами кадмия: 1 470,1 т (кат. C1), 1 223,7 т (кат. C2) и 395,4 т (забалансовые). В 2020 году запасы кат. C1 уменьшились на 65,1 т из-за добычи (94,4 т) и потерь при добыче (1,6 т), частично компенсированных эксплуатационно-разведочными работами и переоценкой запасов Сафьяновского месторождения [24]. Запасы кат. C2 сократились на 27,6 т в результате добычи (26,5 т), потерь (0,5 т) и переоценки Сафьяновского месторождения. Забалансовые запасы остались неизменными. В разработке находятся 4 месторождения, и в 2020 году на двух из них (Ново-Шемурское и Сафьяновское) добыто 94,4 т кадмия, что составляет 4,9% от общей добычи кадмия в России [24].

В основном медные руды представлены двумя типами месторождений: медно-колчеданными и скарновыми медно-магнетитовыми. Основной минерал колчеданных руд – пирит (FeS_2), составляющий 50-90% объема руды. Ценные минералы – халькопирит (CuFeS_2) и сфалерит (ZnS) [24].

Приведенные данные демонстрируют динамику развития горнотехнических систем в Свердловской области, ориентированных на добычу меди и цинка. Уменьшение разведанных запасов отражает интенсивность эксплуатации месторождений. Тот факт, что разрабатываются только часть из учтенных месторождений, свидетельствует о различных факторах, таких как экономическая целесообразность, горно-геологические условия, доступность инфраструктуры, или экологические ограничения. При этом, необходимо учитывать особенности формирования этих горнотехнических систем, а именно формирование техногенных потоков компонентов-загрязнителей.

Анализ образования и утилизации отходов в Свердловской области в 2023 году выявил значительное влияние деятельности по разработке месторождений на формирование загрязненных сточных вод. Общий объем образованных отходов производства и потребления составил 161 млн. т, что на 11,3% ниже показателя предыдущего года. При этом, уровень утилизации и обезвреживания отходов остался практически неизменным, составив 41,1% от общего объема [6, 7].

Отходы I–IV классов опасности были утилизированы и обезврежены в полном объеме, что свидетельствует об улучшении обращения с наиболее опасными видами отходов. Однако, объем размещенных отходов, включая временно складированные, достиг 101,6 млн. т. [6, 7].

Основной вклад в образование, утилизацию и накопление отходов вносят горнодобывающие предприятия, АО «Святогор», ООО «Краснотурьинск-Полиметалл» и Артель старателей «Нейва» на их долю приходится значительная часть всех отходов [6, 7].

Анализ качества воды в Свердловской области показал, что в 6 створах государственной наблюдательной сети зафиксировано экстремально высокое загрязнение. За год было отмечено 179 случаев высокого загрязнения и 69 случаев экстремально высокого загрязнения. Основными загрязнителями, определяющими уровень загрязнения, являются медь, цинк и марганец [6, 7]. В 2023 году отведение сточных вод в поверхностные водные объекты на территории Свердловской области осуществляли 296 водопользователей, эксплуатировавших 344 комплекса очистных сооружений. Общая проектная мощность этих сооружений составила 1702,21 млн. куб. м/год, что свидетельствует об увеличении на 3,3% (53,92 млн. куб. м/год) по сравнению с 2022 годом [6, 7].

Однако, несмотря на увеличение общей мощности, нормативную очистку сточных вод обеспечивал лишь 141 комплекс очистных сооружений, что на 6,6% (10 комплексов) меньше, чем в предыдущем году. Доля сооружений, обеспечивающих нормативную очистку, составляет 38,7% от общего числа. Анализ эффективности различных типов очистных сооружений показал, что из 50 физико-химических очистных сооружений нормативно функционируют 29 (58%), а из 144 механических – 70 (48,6%) [6, 7].

Таким образом, предприятия горно-металлургического комплекса Свердловской области оказывают значительное техногенное воздействие на водные ресурсы, проявляющееся в образовании отходов, низком уровне их утилизации, загрязнении водоемов тяжелыми металлами и недостаточной эффективности очистных сооружений.

Полученные данные указывают на необходимость разработки и внедрения усовершенствованных технологий водоочистки, в частности, для удаления тяжелых металлов, с целью повышения эффективности функционирования очистных сооружений и обеспечения соответствия качества сбрасываемых вод нормативным требованиям.

Кроме того, для обеспечения устойчивого развития региона и минимизации техногенного воздействия на окружающую среду, необходимо смещение акцента с исключительно экономических показателей в сторону экологической безопасности. Такой комплексный подход влечет за собой разработку и внедрение экологически ориентированных технологий на всех этапах жизненного цикла горнотехнических систем (ГТС).

Комплексный подход к развитию ГТС, включающий оптимизацию технологических процессов и повышение эффективности использования ресурсов, не может быть

полноценным без разработки и внедрения современных высокоэффективных систем водоочистки. Эти системы должны обеспечивать удаление тяжелых металлов до уровней, безопасных для окружающей среды и здоровья населения. Таким образом совершенствование систем водоочистки сточных вод горнотехнических предприятий являются не только экологической необходимостью, но и важным условием для обеспечения устойчивого развития региона, позволяющим нормализовать экономические интересы и требования охраны окружающей среды.

1.1.2 Источники поступления тяжелых металлов в водные экосистемы: классификация и характеристика основных источников загрязнения

Выявление источников поступления тяжелых металлов в водные объекты играет ключевую роль в разработке эффективных систем водоочистки. Источники поступления металлов в водные объекты, обычно разделяют на две категории [6, 7]. Первая категория — это природные источники, включающие такие естественные процессы, как выветривание и эрозия горных пород, вулканическая активность, атмосферные осадки, а также гомогенное и литогенное происхождение. Вторая категория - антропогенные источники, которые связаны с деятельностью человека, включая добычу полезных ископаемых, сельское хозяйство, легкую и тяжелую промышленности, а также бытовые сточные воды и отходы [21-26].

Природные источники

Природные источники поступления металлов в водные экосистемы представляют собой значительную часть общего состава загрязнения водных ресурсов и играют важную роль в формировании качества воды [27, 28, 29]

Исследование авторов [27], направлено на оценку качества окружающей среды отложений 11 патагонских озер с учетом концентраций микроэлементов (As, Br, Cr, Hg, Ni и Zn). В рамках работы было изучено влияние вулканической активности и параметров воды на концентрацию и распределение элементов. Результаты показали, что концентрации As, Cr и Ni в шести из 11 отобранных озер находятся на уровнях, которые считаются вредными для организмов, обитающих в донных отложениях, в соответствии с руководящими принципами северного полушария. Индексы качества окружающей среды указывают на различную степень обогащения и загрязнения в отложениях озер и предоставляют информацию о вредности для организмов, обитающих в донных отложениях.

Работа авторов [30] была проведена с октября 2015 года по июль 2016 года в рамках анализа воды, выбрасываемой из 46 грязевых бассейнов на востоке Тайваня. Основными рассматриваемыми элементами анализа стали содержащиеся в водах микроэлементы,

включая Al, Co, Ni, Cu, Zn, As, Br, Rb, Mo, Sb, I, Cs, Pb и U. Важным фактором, определяющим источник жидкости, отличной от морской, и поведение других элементов, оказался хлорид, в силу его консервативных характеристик. Среднее соотношение Al, Co, Cu, I и Pb к Cl превышало по меньшей мере в десять раз соотношение в морской воде. Это свидетельствует о том, что элементы высвобождались из андезитового фундамента или отложений и указывает на особенности химического состава воды и происхождение микроэлементов в рассматриваемой водной системе [30].

Выветривание горных пород представляет собой процесс разложения и разрушения горных материалов под воздействием физических, биологических и химических факторов. В результате этого процесса могут высвобождаться металлы из минеральных составляющих пород, что в свою очередь может способствовать их присутствию в природной окружающей среде [31].

Донные отложения водных объектов играют важную роль в оценке качества водной среды и ее экологического состояния. Поскольку многие тяжелые металлы могут накапливаться в донных отложениях, изучение содержания металлов в этих отложениях позволяет оценить уровень загрязнения водной среды. Данные об уровне металлического загрязнения в донных отложениях помогают принимать обоснованные решения по регулированию промышленных выбросов и агротехнических мероприятий [32].

Геология, геохимия и рифтовые особенности бассейна озера могут играть ключевую роль в концентрации тяжелых металлов в подземных водах, особенно в связи с вулканическим пеплом, который может служить потенциальным источником тяжелых металлов. Водоем озера Бесека [33]. подвержен загрязнению, которое в основном связано с геологическими свойствами озерной воды.

Лесные пожары также могут способствовать распространению металлов в окружающую среду [34]. В результате пожаров может происходить разложение органического вещества, что в свою очередь может способствовать высвобождению металлов из растительности и почвы, повышая их концентрацию в природной среде.

Таким образом, естественные процессы оказывают влияние на присутствие металлов в окружающей среде.

Антропогенные

Несмотря на то, что естественные процессы, такие как выветривание горных пород, извержения вулканов и лесные пожары могут способствовать наличию металлов в окружающей среде, деятельность человека является основной причиной поступления тяжелых металлов. Некоторые металлы, такие как свинец, ртуть, кадмий, хром и медь,

могут быть особенно распространены из-за промышленных процессов и нерациональным обращения с отходами [35, 36].

Добыча полезных ископаемых играет значимую роль в поступлении металлов в водные объекты, являясь основным источником такого загрязнения. Ртуть, свинец, цинк, кадмий и медь, могут попадать в воду как результат деятельности горнодобывающих предприятий [37]. Обработка и переработка руд также значительно влияет на концентрацию металлов в водных системах. В процессе добычи и обогащения полезных ископаемых могут выщелачиваться токсичные вещества, проникающие в водоемы через стоки, атмосферные выбросы и прямые выбросы в водоемы. Методы обогащения и обработки руд могут способствовать попаданию тяжелых металлов в окружающие водные системы [38].

Вследствие деятельности Акташского горно-металлургического предприятия, в р.Ярлы-Амру, происходило значительное увеличение содержания меди (Cu), кадмия (Cd), ртути (Hg) и селена (Se) в речной воде. Превышения предельно-допустимых концентраций рыбохозяйственного значения для цинка, меди и ртути составляют 4,9; 1,7 и 46 раз. Донные отложения также обогащены значительным содержанием ртути, мышьяка, никеля, тетраоксида сурьмы и селена по сравнению с типичным составом верхней континентальной коры. Ключевыми факторами загрязнения донных отложений и речных вод являются высокий естественный геохимический фон Курайской ртутной зоны с сопутствующей рудной минерализацией и аномалии, вызванные деятельностью Акташского горно-металлургического предприятия. Изменение состояния и качества водоемов (в основном донных отложений) определяется геохимической спецификой района и в зависимости от содержания, в основном, ртути и, в меньшей степени, мышьяка, меди, никеля, селена и тетраоксида сурьмы [37].

В ходе изучения водоемов Кольского полуострова были выявлены водоемы, отличающиеся чрезвычайно высоким (до 10 единиц) и низким (3,7 единицы) водородным индексом, а также низкими значениями окислительно-восстановительных потенциалов поверхностных вод (до -180 мВ) и высокой минерализацией (до 3300 мг л⁻¹). Анализ микроэлементов с использованием метода атомно-абсорбционной спектроскопии показал, что основные загрязняющие вещества, присутствующие в водах Кольского полуострова, включают в себя медь, никель, кобальт, свинец, кадмий, марганец, стронций, алюминий и железо в зонах антропогенного воздействия в сравнении с фоновыми территориями Мурманской области [38].

Оценка выделения четырех микроэлементов (Cr, Co, Mn и Ni) в историческом карьере по производству серпентин-талькового «мыльного камня» в Блэндфорде,

Массачусетс, США приведена в статье [39]. Содержание металлов в основном наблюдалось в слоистых силикатах ультрамафитовых пород, первичных оксидах железа и сульфатах, связанных с процессом выветривания. Биодоступные концентрации металлов оказались невысокими, что указывает на их наличие в нерастворимых формах. Однако значительная доля микроэлементов оказалась экстрагируемой сильными кислотами, подразумевая их мобилизацию в ближайшие десятилетия. Концентрации Mn и Cr в речной воде соответствовали стандартам питьевой воды USEPA и рекомендациям ВОЗ, что указывает на ограниченную миграцию микроэлементов в растворенной форме из источников их выделения [39].

Исследование геохимических особенностей добычи на рудном месторождении *fahlore Cu-Sb (-Ag) Mt. Avanza (Italy)* [40] подтвердило значительные концентрации элементов, связанных с тетраэдритом, богатым (Hg-Zn), в отходах рудника, почвах и донных отложениях ручья. Важным результатом является факт снижения уровня загрязнения в отложениях ручья с увеличением расстояния от месторождения, что свидетельствует об ограниченности области воздействия [40].

Промышленные отходы также являются одним из основных источников тяжелых металлов, проникающих в водные экосистемы. Накопление металлов в воде может значительно варьироваться в зависимости от методов очистки сточных вод, применяемых в промышленности [41, 42, 43]. Металлургическая отрасль [44] широко использует воду на различных этапах своих производственных процессов, включая добычу полезных ископаемых, коксование, выплавку стали и нанесение гальванических покрытий.

Загрязнение воды вследствие недостаточной очистки промышленных сточных вод представляет серьезную проблему в Нигерии. В данном исследовании было проанализировано влияние сточных вод от металлургической промышленности в Абеокуте, Нигерия, на физико-химические характеристики воды, используемой в регионе [45].

Согласно результатам исследований [46-48] выщелачивание тяжелых металлов вследствие горнодобывающих процессов привело к загрязнению водных объектов, о чем свидетельствуют значения индексов загрязнения NPI и HEI.

Таким образом, результаты теоретических исследований подчеркивают необходимость проведения оценки техногенного воздействия, а также эффективности систем водоотведения и очистки высокоминерализованных сточных вод с учетом особенностей функционирования действующих и проектируемых горнотехнических систем в динамике их развития.

1.1.3 Воздействие тяжелых металлов на биологические объекты: анализ последствий и оценка потенциала самовосстановления

Влияние металлов на живые организмы является сложной и многогранной проблемой, существующей в области не только экологии, но и здравоохранения. Некоторые металлы также могут накапливаться в пищевых цепях [49, 50, 51], повышая тем самым вероятность их попадания в организмы высших животных и человека [52, 53].

Тяжелые металлы, такие как цинк (Zn), марганец (Mn), медь (Cu) железо (Fe) и никель (Ni), играют важную роль в биологических системах, необходимы для роста и жизнедеятельности живых организмов, однако их присутствие обычно требуется в малых концентрациях. А при превышении допустимого предела по свинцу (Pb), кадмию (Cd) серебру (Ag), их воздействие может представлять опасность для живых систем посредством изменений физиологических и метаболических процессов [54].

В рамках лабораторных экспериментов [55] изучалось воздействие кадмиевого стресса на рост и физиологические характеристики *Sassafras tzumu* Hemsl. Зафиксирована тенденция к увеличению содержания пролина на 90,76% (при Cd5), 74,36% (при Cd20), 99,73% (при Cd50) и 126,01% (при Cd100) при различных уровнях кадмиевого стресса [55]. Это свидетельствует о том, что растения сассафраса активно синтезируют пролин в ответ на стрессовое воздействие кадмия, используя его для борьбы с осмотическим стрессом, который возникает под воздействием токсичного металла. Также стоит отметить, что уровень содержания хлорофилла в проростках сначала увеличивался, а затем снижался при различных уровнях кадмиевого стресса, что может указывать на защитную реакцию растений на ранних стадиях стресса. Полученные результаты свидетельствуют о том, что наличие кадмия в почве оказывает отрицательное воздействие на рост растений *Sassafras tzumu* Hemsl. Конкретно, кадмий приводит к снижению чистого прироста высоты растения и биомассы его листьев, ветвей и корней. Было выявлено значительное уменьшение биомассы корней на 18,18% (при Cd5), 27,35% (при Cd20), 27,57% (при Cd50) и 28,95% (при Cd100) [55].

Проведенное исследование [56] нацелено на оценку воздействия тяжелых металлов на растения *Vigna radiata* (Маш), выращиваемых в почве с различными уровнями обработки кадмием (Cd) и никелем (Ni). Важно отметить, что оба сорта маша демонстрировали значительные различия в морфофизиологических признаках в ответ на воздействие металлов [56]. Особенно импрессионирующим стало то, что сорт V2 проявил большую устойчивость к обработке кадмием и никелем как по отдельности, так и в комбинации. Кроме того, в работе выявлено замедление роста растений маша в условиях металлического стресса, что сопровождалось значительным подавлением характеристик газообмена.

Авторами [57-59] установлены воздействия кадмия на организмы, которые вызывают окислительный стресс и нарушение клеточных процессов, таких как аутофагия, и что может приводить как к защитным реакциям клеток, так и к их гибели посредством апоптоза, пироптоза или ферроптоза, особенно в нейронах гиппокампа. Эти эффекты, зависящие от дозы кадмия и типа клеток, повышают риск развития неврологических заболеваний и других патологий, негативно влияя на здоровье человека.

Цинк играет ключевую роль в иммунной системе, росте, регуляции аппетита и заживлении ран. Однако, как и многие другие элементы, цинк может стать токсичным при избыточном поступлении в организм [60].

В недавнем исследовании [61] было выявлено, что активная деятельность человека может привести к увеличению содержания цинка в почве, причем это может достигать уровней, опасных для растений. Кроме того, наночастицы ZnO широко применяются в различных областях, включая пищевые добавки и косметику. Исследование посвящено оценке воздействия наночастиц оксида цинка (NPS ZnO) на состояние легких с течением времени после их воздействия на крыс [62]. В ходе работ авторы оценили три типа NPS ZnO (L-серин, цитрат и первичный) после интратрахеальной инстилляций крысам. Результаты показали, что все три типа наночастиц вызвали острую воспалительную реакцию в легких через 24 часа после введения. Повысился уровень лактатдегидрогеназы (ЛДГ) и произошла инфильтрация воспалительных клеток в альвеолах [62]. Особенно при использовании L-серина цитратные NPS ZnO проявили более высокое острое гранулоцитарное воспаление и индукцию общего белка по сравнению с исходными NPS ZnO. Острая воспалительная реакция у крыс восстановилась к 30-му дню с развитием бронхоальвеолярного фиброза. Концентрации IL-4, IL-6, TNF- α и эотаксина в жидкости для бронхоальвеолярного лаважа (BALF) снижались со временем, что соотносится с данными о клетках воспаления и остром воспалении легких от NPS ZnO. Исследование предполагает, что однократное воздействие функционализированных NPS ZnO может вызвать острое повреждение легких с гранулоцитарным воспалением. Хотя воспаление может восстановиться через 30 дней после воздействия, это исследование демонстрирует возможные острые и долгосрочные последствия воздействия наночастиц оксида цинка на легкие [62].

В последние годы наблюдается экспоненциальное возрастание применения меди [63] в промышленных катализаторах, газовых датчиках, электронных материалах и биомедицине. Основной причиной этого роста являются гибкие свойства наночастиц оксида меди, включая их высокое соотношение площади поверхности к объему. Эти материалы обладают способностью обеспечить большую активную поверхность для взаимодействия с другими веществами благодаря своим наномасштабным размерам, что

делает их весьма привлекательными для различных применений [63, 64]. Однако, несмотря на широкий спектр потенциальных плюсов, такое интенсивное использование наночастиц оксида меди может создавать риски для окружающей среды и здоровья людей, связанные с их токсичностью как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе. Выброс этих наночастиц в окружающую среду, будь то в результате производства или утилизации продуктов, привлекает значительное внимание из-за своего потенциального воздействия на экосистемы и здоровье общества [64, 65].

Медь (Cu) играет важнейшую роль в росте и развитии растений, так как является важным минеральным питательным веществом [66]. В процессах, связанных с морфологией, физиологией и биохимией, медь выступает в качестве кофактора во многих ферментах, принимая участие в различных аспектах жизнедеятельности растений. Она играет важную роль в фотосинтезе, дыхании и цепи переноса электронов, а также служит структурным компонентом защитных генов. При этом избыток меди оказывает негативное воздействие на рост и продуктивность растений. Многочисленные исследования подтверждают, что избыток меди неблагоприятно влияет на прорастание, рост, фотосинтез и антиоксидантные реакции сельскохозяйственных культур [66, 67].

Изучение цитотоксичности различных элементов позволяет нам понять их потенциальное воздействие на клетки и организм в целом [68].

Таким образом, сбросы тяжелых металлов в водные, почвенные и воздушные среды представляют серьезную угрозу для экологии и здоровья человека и животных, особенно вблизи горнодобывающих предприятий. Установлено, что основной особенностью функционирования горнотехнических систем является образование сточных вод с высоким содержанием тяжелых металлов, оказывающих негативное воздействие на живые организмы. Следовательно, разработка и внедрение эффективных природоохранных мероприятий и современных систем водоочистки и водоотведения необходимы для минимизации негативного влияния горнодобывающей деятельности на окружающую среду.

1.2 Современные технологии и перспективные подходы к очистке сточных вод при проектировании горнотехнических систем

1.2.1 Анализ опыта проектирования очистных сооружений в связи с особенностями функционирования горнотехнических систем

Проектирование новых и реконструируемых систем водоотведения промышленных объектов должно основываться на утвержденной Правительством РФ стратегии развития минерально-сырьевой базы и учитывать технико-экономическую и санитарную оценку

применяемых реагентов, оборудования и аппаратуры контроля качества, а также возможности их дальнейшего совершенствования.

При выборе системы и схемы водоотведения необходимо учитывать ряд факторов: требования к качеству воды для технологических процессов, количество, состав и свойства сточных вод, возможности сокращения объема загрязненных стоков за счет оптимизации технологических процессов, возможность повторного использования сточных вод в оборотных системах или для нужд производств, не требующих высокой степени очистки [69]. Также следует учитывать целесообразность извлечения и использования ценных веществ из сточных вод, возможность совместного отведения и очистки стоков нескольких предприятий, а также комплексного решения очистки стоков промышленных предприятий и населенных пунктов. Важными факторами являются возможность использования очищенных бытовых сточных вод в технологических процессах, а также производственных стоков для орошения сельскохозяйственных и технических культур [69].

Таким образом, обоснование параметров технологии очистки сточных вод является важным этапом, определяющим экологическую безопасность и устойчивость горнодобывающего предприятия.

Выбор и параметры технологии очистки сточных вод должны основываться на комплексном анализе ряда факторов, к которым относятся:

- Исходный состав сточных вод: необходимо детально изучить состав сточных вод, образующихся в процессе разработки месторождения, определить концентрации и формы нахождения основных загрязнителей, а также их динамику в течение времени. Эта информация является основой для выбора эффективных методов очистки.

- Требования к качеству очищенной воды: необходимо определить требования к качеству воды, сбрасываемой в водные объекты, в соответствии с действующими нормативными документами (ПДК для рыбохозяйственных водоемов), что позволит обосновать степень очистки и выбрать технологию, способную ее обеспечить.

- Объем образующихся сточных вод: объем сточных вод влияет на выбор мощности очистных сооружений и, соответственно, на капитальные и эксплуатационные затраты, следовательно, необходимо определить объем сточных вод, поступающих на очистные сооружения.

- Экономическая целесообразность: технология очистки должна быть экономически оправданной. Необходимо учитывать капитальные затраты на строительство очистных сооружений, эксплуатационные затраты (реагенты, электроэнергия, обслуживание), а также затраты на утилизацию образующихся отходов.

— Экологические аспекты: Разработанная технология очистки не должна приводить к дополнительному загрязнению окружающей среды. Необходимо учитывать образование отходов, их токсичность и способы утилизации. Разработка технологии, должна решать проблемы с регенерацией и утилизацией отходов и отработанных материалов.

С учетом вышеуказанных факторов, для очистки сточных вод от тяжелых металлов при разработке медноколчеданных месторождений могут быть применены различные методы, такие как:

- Реагентные методы: Осаждение тяжелых металлов с использованием реагентов;
- Сорбционные методы: Использование сорбентов для извлечения тяжелых металлов из воды;
- Мембранные методы: Использование мембранных технологий (обратный осмос, ультрафильтрация) для разделения воды и загрязнителей;
- Флотационный методы очистки загрязненных стоков.

Рассмотренные исследования [69] обобщают опыт очистки сточных вод от тяжелых металлов, сульфатов и других загрязнений, включая проектирование и совершенствование очистных систем и их внедрение на горнопромышленных предприятиях.

В статье [69] представлены результаты практического применения системы водоочистки сточных вод на горнодобывающем предприятии. Авторами разработана комплексная технология очистки сточных вод предприятий, занимающихся добычей и переработкой руд цветных металлов и угля, от тяжелых цветных металлов, сульфатов, нефтепродуктов, органических соединений, аммонийного азота и взвешенных веществ. Технология характеризуется стабильно высокой эффективностью, достигаемой за счет применения отстойников-флокуляторов и других технологических приемов, компенсирующих колебания качества и расхода сточных вод. Предлагаемая технология включает две основные стадии. Первая стадия предполагает реагентную обработку сточных вод с последующим флокуляционным перемешиванием и тонкослойным отстаиванием в отстойниках-флокуляторах. Благодаря оптимизации процессов смешивания, флокуляционного перемешивания и отстаивания, а также применению высокоэффективного оборудования, обеспечивается глубокая очистка стоков от взвешенных веществ, нефтепродуктов, тяжелых металлов и железа. Кроме того, происходит частичное удаление сульфатов и аммонийного азота [69].

Вторая стадия предусматривает доочистку осветленной воды одним из двух методов: фильтрованием (через зернистую загрузку или перегородку – ультрафильтрация)

или биологическим методом (на биопрудах и биологических плато). Биологический метод демонстрирует высокую эффективность в доочистке сточных вод от тяжелых металлов, нефтепродуктов и взвешенных веществ [69].

Промышленные установки, использующие разработанное специализированное водоочистное оборудование [69], успешно функционируют на Сибайском месторождении медно-цинковых руд (до 400 м³/сутки) и на угольной шахте «Увальная» Кузнецкого угольного бассейна (пусковой комплекс – 450 м³/час).

Авторами [70] проведена серия исследований, направленных на разработку эффективной и экономичной технологии очистки сточных вод горнодобывающих предприятий, характеризующихся высоким содержанием сульфатов и тяжелых металлов. Изучены различные варианты нейтрализации, осаждения и применения флокулянтов для интенсификации процесса очистки. Предложена оптимальная технология, включающая ступенчатую нейтрализацию подотвальных вод (сначала до pH 9,0 для осаждения тяжелых металлов, затем до pH 12,0 для образования гипса), одноступенчатое известкование шахтных вод до pH 9,0 и добавление затравки из оборотного осадка для ускорения кристаллизации гипса в обоих типах стоков [70].

Предлагаемый способ получения оксидов магния и бария [71] основан на последовательном удалении металлов, магния и сульфатов, а также кальция из шахтной воды представлен на рисунке 1.

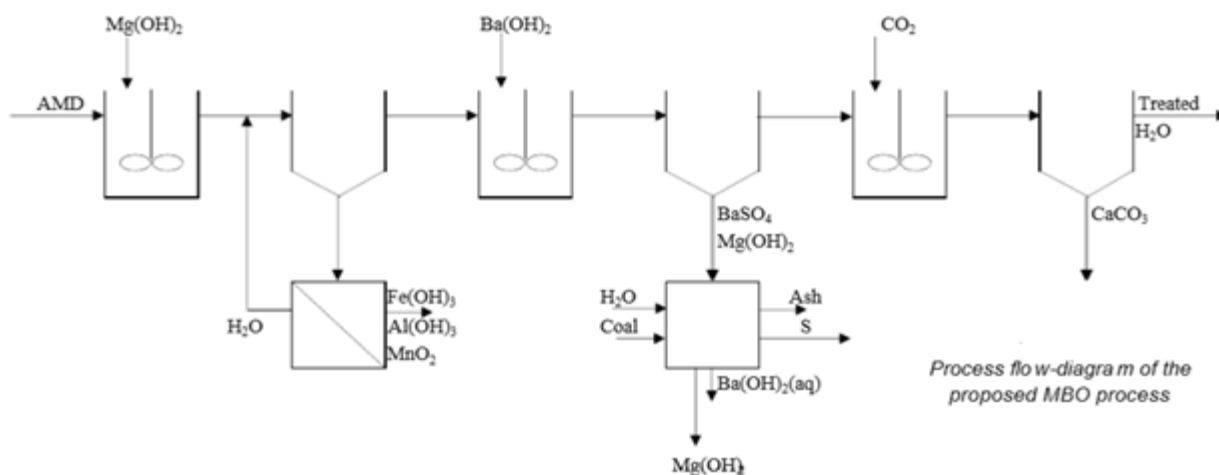


Рис. 1 - Технологический процесс предлагаемого способа очистки

Металлы удаляются гидроксидом магния $Mg(OH)_2$, магний и сульфаты - гидроксидом бария $Ba(OH)_2$, а кальций - углекислым газом CO_2 . При этом, гидроксид магния и гидроксид бария регенерируются из образующихся шламов $BaSO_4$ и $Mg(OH)_2$, содержание металлов в которых незначительно. Исследования показали, что данный метод

позволяет снизить содержание железа до уровня менее 20 мг/л, а содержание сульфатов - до менее 25 мг/л. Концентрация сульфата зависит от дозировки $\text{Ba}(\text{OH})_2$. В процессе дозирования CO_2 , CaCO_3 осаждается до уровня насыщения [71].

Предложена технологическая схема комплексной селективной переработки кислых рудничных вод, содержащих медь, железо и марганец [72], рисунок 2.

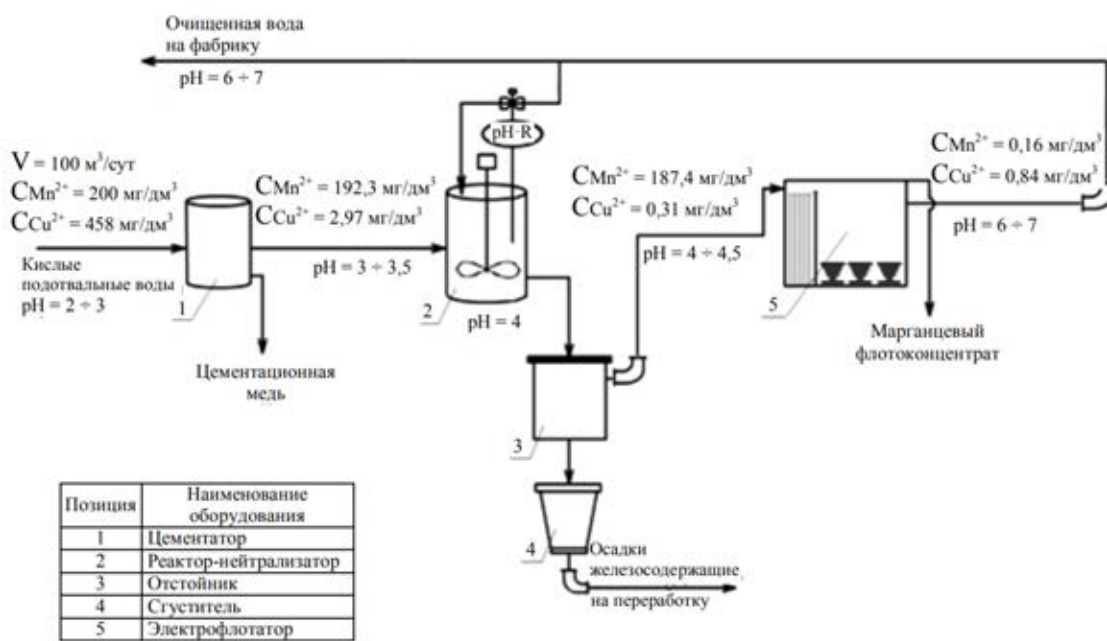


Рис. 2 - Технологическая схема комплексной переработки кислых рудничных вод

На первой стадии кислая вода (pH 1-3) поступает в цементатор с железной стружкой для осаждения меди [72]. Затем вода направляется в реактор-нейтрализатор, где при pH до 4,5 осаждаются ионы железа (II и III) в виде дисперсной фазы $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Окисление железа (II) до железа (III) и его осаждение происходят благодаря добавлению обратной воды (pH 1-2), обогащенной кислородом и образующейся после электрофлотации. Осадок $\text{Fe}(\text{OH})_3$ поступает в отстойник, где отделяется от водного раствора, затем в сгуститель для накопления и уплотнения, и далее на переработку для получения товарного продукта. Осветленный раствор (pH 4,5-5,0) из отстойника подается на электрофлотацию для селективного извлечения марганца. Электроокисление ионов марганца происходит соединениями активного хлора (в первой камере электрофлотатора), образующимися при электрообработке хлоридсодержащих растворов. Образующаяся дисперсная фаза марганца извлекается методом электрофлотации (во второй камере электрофлотатора). Марганцевый флотоконцентрат удаляется скребком в сборник. Осветленный раствор из электрофлотатора направляется в систему обратного водоснабжения и частично в

реактор-нейтрализатор. pH очищенной воды варьируется от 1 до 2. Разработанная технология апробирована на водах Бурибаевского ГОКа, и исследования позволили установить оптимальные параметры извлечения меди, железа и марганца [72].

Предложенная технологическая схема [73] очистки карьерных вод рудника использует типовые реагенты и оборудование. Для утилизации меди и цинка осуществляется дробное осаждение железа при pH 4,5.

В работе авторов [74] проведены укрупнённые испытания гальванокоагуляционного извлечения меди и цинка из техногенных вод Сибайского рудника. Использовалась вода из объединенного потока карьеров и шахт и модельные растворы. Технологическая схема включала две стадии обработки гальванопарой железо-углерод с последующим отстаиванием и доочистку на геохимическом барьере из цеолитсодержащей породы и известняка. Время обработки в поле гальванопары составляло 5 и 15 минут, скорость фильтрации – 10 м/ч. Метод оказался эффективным, снизив концентрацию меди в 1,7 раза и цинка в 220 раз. Суммарное извлечение металлов составило 50,9% для меди и 99,9% для цинка. Массовая доля металлов в осадках зависит от аэрированности, исходной концентрации, pH и продолжительности обработки. Продукты первой и второй стадии содержат большое количество железа и соответствуют требованиям к пигменту жёлтому железистоокисному. Продукт первой стадии может быть использован при выплавке медистого чугуна или на медеплавильном заводе. Отработанный сорбент геохимического барьера можно использовать в качестве флюса в металлургии меди и цинка. Гальванокоагуляция подходит для извлечения меди из низкоконтрированных вод, а двухстадиальная схема позволяет получать железистоокисные продукты с преобладанием меди или цинка, утилизируемые в металлургии [74].

В работе [75] представлены результаты испытаний сорбционного метода очистки многокомпонентных сточных вод сернокислотного цеха, содержащих мышьяк и тяжелые металлы. Использовались природный и модифицированный брусит, а также псиломелан. Варьируя расход брусита от 1 до 7 г/л и время контакта в 60 минут, удалось добиться раздельного выделения элементов из раствора и очистки стока до санитарных норм по мышьяку ($ПДКА_s = 0,01$ мг/л). Анализ осадков подтвердил возможность получения мышьяк-содержащего концентрата, пригодного для захоронения, и осадков с ценными металлами для дальнейшей переработки. Так, при добавлении 2-3 г/л брусита, в осадок переходит практически весь мышьяк и железо. Испытания псиломелана показали его высокую эффективность в извлечении мышьяка, позволяя удалить около 80% As за одну ступень [75].

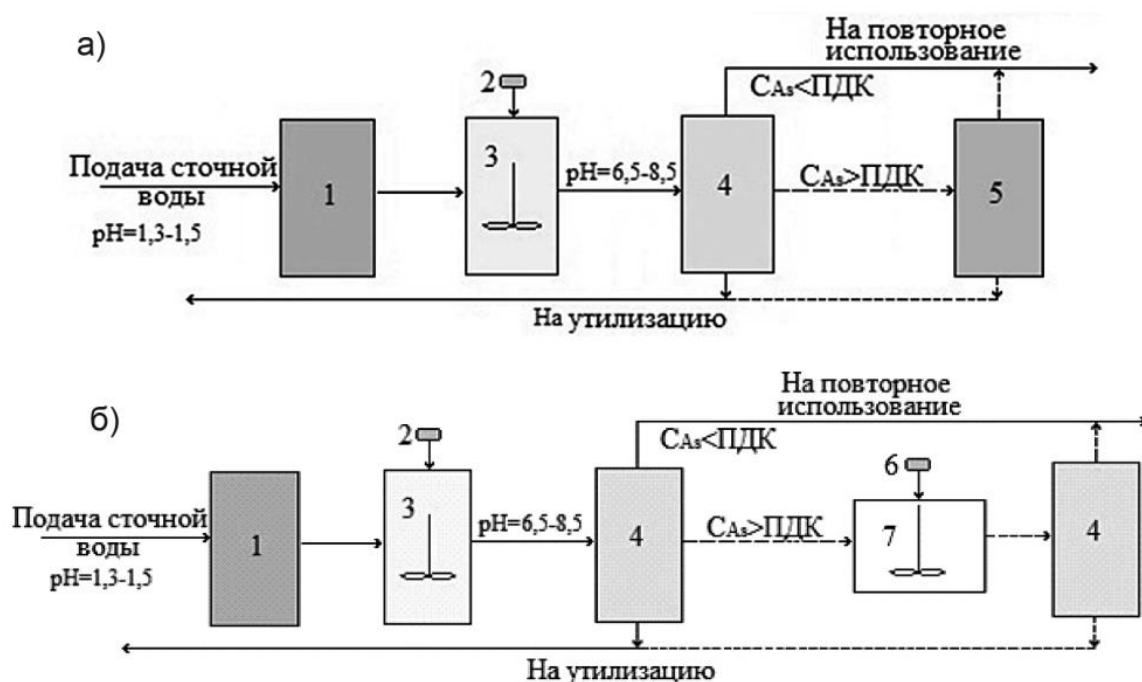


Рис. 3 - Схема сорбционной очистки сточных вод от мышьяка бруситом и псиломеланом: (а) – в динамических условиях, (б) – в статических условиях. (б): 1 – усреднитель; 2 – дозатор брусита; 3 – камера нейтрализации; 4 – отделение осадка; 5 – сорбционный фильтр, загруженный бруситом или фильтр окислитель, загруженный псиломеланом; 6 – дозатор брусита или псиломелана; 7 – резервуар с перемешивающим устройством

На основе полученных данных разработаны технологические схемы очистки (рисунок 3), позволяющие не только удалять токсичные вещества, но и получать ценные продукты для утилизации и повторного использования. Разработанный метод может быть рекомендован для внедрения на горно-перерабатывающих предприятиях с целью повышения экологической безопасности [75].

Таким образом можно сделать следующие выводы:

1. Необходима разработка и внедрение усовершенствованных технологий водоочистки для удаления тяжелых металлов с целью повышения эффективности очистных сооружений и обеспечения соответствия качества сбрасываемых вод нормативным требованиям и экономической целесообразности проектов ГТС.

2. При проектировании и реконструкции систем водоотведения ГТС необходимо учитывать технико-экономические и химические параметры применяемых реагентов и оборудования, возможности сокращения объема загрязненных стоков за счет оптимизации технологических процессов, возможность повторного использования сточных вод и отработанных материалов в хозяйственной деятельности.

1.2.2 Основные методы удаления тяжелых металлов из сточных вод

Очистка сточных вод является неотъемлемой частью технологического процесса, направленной на снижение уровня загрязнения воды до санитарно-гигиенических норм [76-81]. При очистке сточных вод от тяжелых металлов важно устранить их токсичность и снизить негативное воздействие на окружающую среду до допустимых уровней.

Существуют различные методы удаления тяжелых металлов из сточных вод. Один из них - ионный обмен, основанный на замещении ионов между твердой и жидкой фазами. В ходе этого процесса ионы тяжелых металлов из сточных вод замещаются ионами материала, используемого для очистки [82]. Другой метод – флотация, позволяет перевести тяжелые металлы в состояние, когда они прилипают к пузырькам газа. Пузырьки поднимаются к поверхности, образуя пену с металлами, которая собирается в специальные емкости [83]. Также, для удаления металлов из сточных вод применяются сорбенты, которые классифицируются как природные и синтетические [84].

Одними из наиболее применяемых методов являются химическое осаждение и коагуляция. Эти методы основаны на добавлении определенных химических реагентов, которые способствуют образованию осадка, содержащего тяжелые металлы [85].

Фильтрация с применением мембран, которые эффективно улавливают частицы также показывает хорошие результаты в удалении тяжелых металлов (ТМ), особенно в виде коллоидов [86].

Другая группа методов – электрохимические, включающие электроосаждение, электрофлотацию и электросорбцию. В основе технологий лежит использование электрической энергии для извлечения ТМ из загрязненной воды [87, 88]. Выбор конкретного метода или их комбинации зависит от характеристик сточных вод, уровня их загрязнения и требуемой степени очистки.

Химическое осаждение предполагает преобразование растворенных ионов металлов в нерастворимые соединения посредством добавления специальных осаждающих реагентов [89, 90]. Эффективность определяется рядом факторов, включая тип присутствующих металлов, уровень загрязнения и условия окружающей среды, в которой происходит процесс [89 - 91].

Исследования, проведенные группой ученых [89], показали перспективность использования гидроксокарбоната магния в качестве осадителя для удаления тяжелых металлов (ТМ) из сточных вод. Эксперименты показали, что оптимальная дозировка для эффективного процесса очистки составляет 0,30 г на 50 мл сточной воды (эквивалентно 6000 мг/л). Примечательно, что реакции осаждения завершались в течение 20 минут, обеспечивая при этом эффективность удаления ТМ, превышающую 99,9%. Образовавшийся осадок, содержащий преимущественно вещества, такие как Fe_2O_3 , V_2O_5

и Cr_2O_3 , может быть, в дальнейшем переработан и использован в качестве вторичного сырья в металлургической отрасли [89].

В исследовании [90] авторы продемонстрировали эффективность удаления тяжелых металлов (ТМ) путем осаждения их в виде гидроксидов и сульфидов. Оптимизация условий, включающих pH и дозировку реагентов, проводилась с использованием "jar test". В рамках эксперимента были изучены два варианта химического осаждения: с применением гидроксида натрия (NaOH) для осаждения гидроксидами и с использованием сульфида натрия (Na_2S) для осаждения сульфидами. Результаты показали, что оптимальное значение pH для удаления Cr, Cu и Ni при осаждении гидроксидами составляет 8,5, в то время как для осаждения сульфидами этот показатель равен 10. Дозировка используемого материала (хлорида железа = FeCl_3) в обоих случаях составляла 0,8 мл. В результате эксперимента установлено, что при осаждении гидроксидами степень удаления ТМ составила: Cr = 98,65%, Cu = 2,81% и Ni = 99,90%. При использовании метода осаждения сульфидами были получены следующие результаты: Cr = 91,29%, Cu = 99,99% и Ni = 99,97%. Таким образом, осаждение сульфидами оказалось более эффективным для удаления хрома, меди и никеля по сравнению с осаждением гидроксидами, поскольку сульфиды способны удалять ТМ в более широком диапазоне значений pH [90].

В исследовании [91] изучалось химическое осаждение для одновременного удаления меди и цинка из промышленных сточных вод. Эксперименты с известью, каустической и кальцинированной содой показали, что увеличение дозировки осадителей (10-400 мг/л) повышает эффективность очистки (более 90%). Очистка наиболее эффективна при высоком pH (8-10), при этом медь удаляется немного лучше цинка. Образуется осадок из гидроксидов цинка и меди, что подтверждено анализом. Использование кальцинированной соды дает более крупный осадок, что упрощает сушку и снижает затраты [91].

Таким образом, химическое осаждение является одним из ключевых методов для удаления тяжелых металлов из водной среды.

Ионная флотация — это метод извлечения металлов из сточных вод, основанный на использовании поверхностно-активных веществ (ПАВ). ПАВ концентрируют ионы металлов на поверхности воды, формируя пену, которую затем удаляют, эффективно извлекая металлы из раствора [83]. Исследование [92], проведенное с использованием трубки Халлимонта, было направлено на оптимизацию условий флотации ионов Zn(II) . Результаты показали, что можно достичь удаления более 92% ионов Zn(II) . Эффективность удаления зависит от скорости перемешивания и времени флотации. Присутствие других ионов соли в растворе отрицательно сказывается на процессе, снижая удаление и постоянную скорость флотации ионов Zn(II) [92].

Статья в «Journal of Environmental Health Science and Engineering» (2013) [93], посвящена оптимизации ионной флотации для удаления кадмия (Cd) из сточных вод в лабораторных условиях. Исследование продемонстрировало высокую эффективность процесса, позволившую достичь удаления Cd на уровне 84%. Ключевыми параметрами, обеспечивающими такой результат, стали концентрация этанола 0,4% в соотношении 3:1 и оптимальный расход реагента, равный 150 мл/мин [93].

Следовательно, ионная флотация представляет собой перспективный метод очистки сточных вод, обладающий рядом значительных преимуществ. К ним относятся низкое энергопотребление, небольшие требования к занимаемой площади, малый объем образующегося осадка и возможность избирательного извлечения определенных веществ.

Мембранное разделение представляет собой современный метод очистки воды. Он основан на фильтрации воды через полупроницаемые мембраны, которые обладают определенными свойствами, такими как размер пор или электрический заряд. Благодаря этим свойствам мембраны пропускают молекулы воды, задерживая при этом растворенные ионы металлов [94, 95].

В статье [94] описывается создание фотокаталитической мембраны на основе графитного углерода (g-C₃N₄). Эта мембрана обладает высокой удельной поверхностью, хорошей гидрофильностью, наличием функциональных групп и фотокаталитической активностью. При фильтрации сточных вод, содержащих ионы меди, мембрана g-C₃N₄ толщиной около 310 нм продемонстрировала эффективность, превышающую показатели коммерческих аналогов. Средняя водопроницаемость составила 47,82 л/м²чбар, а средний коэффициент отбраковки при концентрации ионов меди 2500 мг/л достиг 98,03%. Авторы выявили три ключевых фактора, влияющих на скорость удаления ионов тяжелых металлов: адсорбцию за счет функциональных аминогрупп -C₃N₄, электростатическое отталкивание и стерический эффект [94].

Ультрафильтрация — это специализированный процесс фильтрации, в котором мембрана используется для отделения тяжелых металлов, крупных молекул и взвешенных твердых частиц. Движущей силой этого процесса могут быть давление или градиенты концентрации. Отличительной чертой ультрафильтрации является работа на более тонком уровне по сравнению с обычной фильтрацией. Размер пор в ультрафильтрационных мембранах обычно варьируется от 5 до 20 нанометров [95].

Исследование Chi-Wang Li и соавторов [96] посвящено влиянию pH и органических лигандов (ЭДТА, NTA и лимонная кислота) на удаление и извлечение Cd(II) в процессе ультрафильтрации с применением полиэлектролита (PEUF). В качестве хелатирующего полимера использовался полиэтиленмин (PEI), способный взаимодействовать с ионами

металлов посредством координационного связывания и с отрицательно заряженными комплексами лиганд-металл за счет электростатического притяжения. Результаты показали, что удаление и извлечение Cd существенно зависят от химического состава органических лигандов и уровня pH раствора, определяющего распределение комплексов Cd-лиганд. В присутствии ЭДТА преобладают отрицательно заряженные комплексы $\text{Cd}(\text{ЭДТА})_2^-$ и $\text{CdH}(\text{ЭДТА})^-$, взаимодействующие с PEI посредством электростатического притяжения, что слабо зависит от pH. В системах с НТА и лимонной кислотой влияние pH аналогично системе без органических лигандов, поскольку в кислой среде преобладают свободные ионы Cd [96].

Наночильтрация — это эффективный метод очистки под давлением, используемый в химической, биотехнологической и других отраслях промышленности. Наночильтрация занимает промежуточное положение между ультрафильтрацией и обратным осмосом. Мембраны для наночильтрации обычно изготавливаются из синтетических полимеров и могут иметь положительный или отрицательный заряд на поверхности. Это способствует диссоциации и удалению тяжелых металлов благодаря электростатическому взаимодействию между мембраной и ионами металлов [97].

В исследовании Yaoyao Jiao и соавторов [97] представлена новая положительно заряженная наночильтрационная (NF) мембрана, созданная путем совместного осаждения дубильной кислоты (ТА) и поливиниламина (PVAM) на поверхности. Комбинация Fe^{3+} и H_2O_2 ускорила процесс формирования мембраны и позволила регулировать структуру её поверхности. Мембрана продемонстрировала высокие показатели удержания ионов тяжелых металлов (Cr^{3+} , Fe^{3+} , Cu^{2+} и Ni^{2+}) и редкоземельных металлов (Ce^{3+}) [97].

Осмоз — это физико-химический процесс, наблюдаемый при наличии полупроницаемой мембраны, пропускающей молекулы растворителя (например, воды), но задерживающей растворённые вещества. Процесс продолжается до достижения равновесия концентраций. Обратный осмос представляет собой обратный процесс. Мембраны обратного осмоса имеют поры размером от 0,1 до 1,0 нм и традиционно используются для опреснения. В настоящее время обратный осмос все шире применяется для очистки сточных вод от тяжелых металлов, хотя требует высоких энергозатрат и давления [88]. Эффективность мембраны обратного осмоса зависит от её материала и характеристик, а также от pH, температуры и давления. Для предотвращения загрязнения мембраны часто проводят предварительную обработку сточных вод для удаления коллоидных частиц [98, 99].

Для очистки модельных растворов сточных вод, загрязненных ионами меди (II), авторы [98] применили метод обратного осмоса, используя мембранный тестер SEPA

CF042-TFC BW30XFR. Исследование показало, что поток пермеата и количество удаляемого Cu (II) прямо пропорциональны рабочему давлению и температуре подачи, но обратно пропорциональны концентрации исходного сырья. Скорость подачи оказала незначительное влияние на эти параметры. На основе полученных данных были разработаны математические модели для потока пермеата и удаления Cu (II). Модель потока пермеата хорошо соответствовала экспериментальным данным, в то время как модель удаления Cu (II) показала менее точное соответствие [98].

Электрохимические методы очистки воды включают электрокоагуляцию, электрофлокуляцию и электроосаждение. Электрокоагуляция основана на генерации коагулянтов в воде с помощью электрического тока. Образовавшиеся коагулянты вызывают агломерацию ионов металлов и их осаждение в виде флокул. Преимуществом является отсутствие необходимости в дополнительных реагентах, поскольку коагулянт образуется непосредственно при электрическом растворении расходующихся электродов. Образовавшийся осадок стабилен и легко удаляется. Недостаток метода заключается в необходимости периодической замены расходующегося анода [88].

Исследование Chen X. и соавторов [99] посвящено изучению влияния различных параметров на эффективность удаления ионов цинка электрокоагуляцией, включая плотность тока, концентрацию и pH. Авторы обнаружили, что полное удаление ионов цинка достигается при определенном сочетании этих параметров, при этом время и энергопотребление зависят от начальной концентрации. Исследование также выявило, что при высоких концентрациях ионов цинка, электрохимическое восстановление на катоде играет важную роль в процессе удаления [99].

Электрофлокуляция – метод удаления ионов тяжелых металлов из сточных вод, использующий электрохимическую коагуляцию и образование флокулянтов под действием электрического тока. Ключевую роль в формировании этих коагулянтов играют алюминиевые или железные электроды, часто применяемые в данном процессе [88].

В работе Brahmi K. et al. [100] оценивалась эффективность электрофлокуляции с балластированием (BEF) для удаления кадмия и цинка из сточных вод горнодобывающей отрасли с использованием алюминиевых электродов. BEF сочетает в себе микропорошок и полимер, что увеличивает массу хлопьев и ускоряет их осаждение. Авторы установили, что скорость потока и плотность тока оказывают наибольшее влияние на качество очищенной воды [100].

Электроосаждение – это метод очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов, который использует электрический ток для стимуляции осаждения загрязняющих веществ [88].

В работе Wu C. et al. [101] предложили метод очистки сточных вод от кадмия с использованием мультikonцентрического цилиндрического электродно-вращающегося слоя (MCCE-RB), который создает поля высокой силы тяжести. При оптимальных условиях, включая плотность тока, скорость циркуляции, концентрацию NaCl, pH и начальную концентрацию Cd²⁺, эффективность удаления кадмия достигла 99,4% после 120 минут электроосаждения [101].

Сорбционные методы используют специальные материалы (сорбенты) для извлечения ионов металлов из водных растворов и очистки сточных вод. Сорбенты бывают как природными (глины, торф, цеолиты, растительные и животные отходы), так и синтетическими (полимеры, углеродные адсорбенты, оксиды металлов, функциональные сорбенты), причем последние разрабатываются специально для удаления тяжелых металлов [102-104].

Исследование Huang Y. et al., [105] показало, что пористые адсорбенты ZIF-8 и ZIF-67 обладают высокой адсорбционной способностью к ионам свинца (1119,80 и 1348,42 мг/г, соответственно) и меди (454,72 и 617,51 мг/г). Использование избыточного количества ZIF-8 и ZIF-67 позволило удалить более 99,4% Pb²⁺ и 97,4% Cu²⁺ из сточных вод, при этом адсорбционное равновесие достигалось всего за несколько десятков минут [105].

Alasadi A., Khaili F., Awwad A [106] разработали способ получения нанокаолинита из песчаных отложений и использовали его как адсорбент для удаления ионов Cu(II), Zn(II) и Ni(II) из водных растворов. Термодинамические параметры показали, что адсорбция является эндотермической и более эффективна при высоких температурах. Кинетика адсорбции ионов меди, никеля и цинка на нанокаолините лучше всего описывается уравнением псевдо-второго порядка [106].

Ghasemi N. и др., [107] синтезировали магнитный наноадсорбент DOP-TETA-MNP для эффективного удаления ионов цинка (Zn(II)) из водных растворов, который легко отделяется с помощью магнитной сепарации. Адсорбция ионов Zn(II) хорошо описывается изотермой Ленгмюра, с максимальной сорбционной способностью 24,21 мг/г при 333 К. Термодинамический анализ показал, что процесс адсорбции является экзотермическим и самопроизвольным, что указывает на его эффективность и термодинамическую целесообразность [107].

Принимая во внимание потенциальные негативные последствия воздействия тяжелых металлов на экосистемы и ограниченность возможностей самовосстановления биологических ресурсов, выбор метода очистки должен базироваться на тщательном анализе. Адсорбция и химические методы, такие как осаждение, имеют свои преимущества,

но требуют учета конкретных условий и ограничений, включая концентрацию загрязнителей и возможные побочные эффекты [102-104].

Особо перспективным направлением является использование промышленных отходов в качестве реагентов и сорбентов [108, 109], что позволяет одновременно решать задачи утилизации отходов и очистки сточных вод, обладая как экологическими, так и экономическими преимуществами. Однако, для успешного внедрения этой технологии необходимо решать существующие пробелы в исследованиях, касающиеся неоднородности отходов, необходимости предварительной обработки и, главное, проверить эффективность и адаптировать методы в реальных производственных условиях, а не только в модельных растворах. Исследования и разработки, направленные на оптимизацию и совершенствование технологий водоочистки с использованием промышленных отходов, являются ключевым фактором для обеспечения устойчивого развития горнодобывающей отрасли Свердловской области и минимизации негативного воздействия на окружающую среду.

1.2.3 Практический опыт использования отходов производств для создания систем извлечения металлов из водных объектов и очистки сточных вод

Несмотря на существование разнообразных методов водоочистки, актуальность исследований по разработке технологий, использующих доступные материалы на основе вторичных ресурсов (включая производственные отходы), остается высокой. Современные подходы к проектированию систем водоотведения и водоочистки все чаще ориентированы на использование вышеуказанных материалов [22, 35].

Зола-уноса, представляющая собой существенную часть отходов, образуемых ТЭС и ГРЭС, часто размещается в золоотвалах без последующего применения, что негативно влияет на состояние окружающей среды [108].

Исследование Lu Y. et al. и соавторов [109] посвящено использованию модифицированной ультразвуком золы-уноса от твердых бытовых отходов (MSWI) для адсорбции ионов меди Cu(II), систематически изучая влияние pH, времени адсорбции, начальной концентрации и температуры. Авторы выявили повышенную адсорбционную способность при низких значениях pH и использовали псевдо-кинетическую модель второго порядка и модель Ленгмюра для оценки и прогнозирования адсорбционных свойств модифицированной золы-уноса [109].

В статье Astuti W. [110] с коллегами исследовали эффективность модифицированного NaOH зольного остатка угля (MCFA) в адсорбции ионов свинца (II) и цинка (II) из смешанного раствора. Модификация позволила увеличить пористость адсорбента более чем в 10 раз - с 0,021 до 0,223 см³/г, что способствовало практически

полному удалению свинца (до 100%) и значительному удалению цинка (97%) при оптимальном pH 3 и времени контакта в 240 минут [110].

В работе [111] Zhao, H. и другие авторы представили новый адсорбент SHM-FA на основе низкотемпературной летучей золы, модифицированной гидроксидом натрия, для эффективного удаления ионов Cd^{2+} из загрязненной воды. Исследования выявили пористую структуру и высокую удельную поверхность SHM-FA, а также растворение Si–O и Al–O связей, что значительно повысило адсорбционную способность материала. Эффективность удаления кадмия существенно зависела от дозировки адсорбента, pH, концентрации Cd^{2+} и температуры, что делает SHM-FA перспективным и экономичным решением для очистки сточных вод [111].

Процесс выплавки стали в различных печах приводит к образованию шлаков, содержащих оксиды CaO, SiO₂, FeO, Al₂O₃, MgO и другие компоненты. Объемы образующегося шлака создают проблему утилизации, хотя он потенциально пригоден для строительства. Работа [112] подчеркивает актуальность исследований по переработке стального шлака, в частности, его использование в качестве добавки при производстве строительных материалов или цемента.

В исследовании [113] Changalvaei, Morteza и соавторы изучали применение модифицированного шлака электродуговой печи для удаления никеля и цинка из промышленных стоков. Экспериментальные и термодинамические оценки показали эффективность адсорбции в зависимости от различных факторов, таких как температура, время контакта, концентрация ионов металла, количество и размер частиц адсорбента и pH. Кинетические данные указывают на соответствие адсорбции псевдопервопорядковой модели и модели Фрейндлиха [113].

В работе [114] Latorrata, Saverio и коллеги исследовали щелочно-активированные шлаки металлургической промышленности для создания монолитных пен, эффективно улавливающих ионы металлов. Монолиты показали высокую эффективность (80-100% для одноионных и 98-100% для многоионных растворов) при улавливании Cu(II), Fe(III), Ni(II) и Mn(II) в имитированных шахтных сточных водах. Механизм улавливания основан на осаждении металлов в нейтральной форме на поверхности и удержании их в пористой структуре монолита [114].

В исследовании [115] Czech B., Hojamberdiev M., Bogusz A. изучали влияние термической обработки (500-1000 °C) трех типов шлаков (SA, SN и SF) на удаление кадмия из воды. Термическая обработка привела к формированию кристаллических фаз, таких как SiO₂, клинопироксен и другие, изменив характеристики шлака. Адсорбция Cd(II) имела сложный механизм, включающий химическую адсорбцию (псевдовторого порядка) и

диффузию внутри частиц, и описывалась моделями Ленгмюра, Темкина или Фрейндлиха [115].

Красные шламы, образующиеся как отход при производстве алюминия из бокситов, содержат большое количество оксидов железа. Благодаря этому свойству, они перспективны для применения в экологических технологиях, в частности, для очистки сточных вод [116].

В работе [116] представлен метод улучшения хемосорбции Cd(II) с использованием композитов на основе красного шлама и полиакриловой кислоты, исследованных с помощью различных методов анализа. Максимальная адсорбционная способность композитов составила 96,15 мг/г, скорость адсорбции увеличивалась с температурой, следуя кинетике псевдвторого порядка и изотерме Ленгмюра, что указывает на монослойный механизм адсорбции. Это делает композиты RM/ПАА эффективными и недорогими адсорбентами для удаления кадмия из воды [116].

В работе [117] Pang, Y., Zhao, C., Li, Y. и другие использовали модифицированный перманганатом калия красный шлам (MRM) для удаления ионов кадмия из воды, исследуя влияние различных факторов на адсорбцию. Модификация увеличила удельную поверхность MRM до 38,91 м²/г и объем пор до 0,02 см³/г, что привело к увеличению равновесной адсорбционной способности Cd²⁺ почти втрое - до 46,36 мг/г. Кинетика адсорбции лучше описывалась моделью псевдо-второго порядка, а изотерма адсорбции соответствовала модели Ленгмюра с максимальной емкостью 103,59 мг/г, указывая на спонтанный и теплопоглощающий монослойный процесс [117].

Работа [118] посвящена проблеме отделения красного шлама после адсорбции из воды и предлагает гидротермальный метод переработки в качестве альтернативы центрифугированию и фильтрации. Анализ показал, что красный шлам состоит из андрадита, мусковита, гематита и канкринита, а гидротермальная обработка при 200°C превращает андрадит в магнетит и моримотоит, создавая магнитный адсорбент P-200 с намагниченностью насыщения. P-200 показал в 8 раз большую адсорбционную способность по Zn²⁺ (89,6 мг/г) по сравнению с необработанным шламом, соответствуя модели Ленгмюра и катионному обмену, что делает его практичным адсорбентом для реальных задач [118].

Анализ литературы показывает, что каждый метод удаления металлов имеет свои достоинства и недостатки. Выбор оптимального способа очистки сточных вод от тяжелых металлов определяется совокупностью факторов, включая стоимость, концентрацию металлов, экологичность, pH, используемые реагенты, эффективность и экономическую выгоду.

Адсорбция является перспективным методом очистки сточных вод от тяжелых металлов благодаря простоте, универсальности, высокой скорости удаления и возможности повторного использования материалов. Для эффективности адсорбции важны недорогие материалы с высокой поглощающей способностью и эффективные методы регенерации адсорбентов для продления срока службы и снижения затрат.

Химические методы, особенно химическое осаждение, часто считаются экономически эффективными, так как их результативность зависит от типа реагента, а не от дополнительных факторов, однако они приводят к образованию большого количества осадка, требующего дальнейшей обработки.

Использование отходов производства для очистки воды обладает рядом преимуществ, таких как экологическая устойчивость за счет сокращения отходов и экономическая эффективность благодаря снижению затрат на материалы и логистику, что способствует безотходному производству. К недостаткам относятся непостоянный состав и свойства отходов, затрудняющие их широкое применение, а также увеличение трудоемкости и затрат из-за необходимости предварительной обработки или модификации.

Несмотря на большое количество исследований по очистке сточных вод от тяжелых металлов, существует недостаток информации об эффективном удалении компонентов загрязнений из реальных сточных вод, так как большинство исследований проводится на модельных растворах с одним или несколькими металлами.

1.3 Выводы к первой главе

1. Анализ минерально-сырьевой базы Свердловской области подчеркивает взаимосвязь между функционированием горнотехнических систем (ГТС) и экологической устойчивостью горнодобывающих регионов. В текущей модели, экстенсивная разработка месторождений приводит к истощению ресурсов, снижению эффективности ГТС и, как следствие, к интенсивному накоплению отходов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду. Интеграция экологических принципов в проектирование ГТС является необходимым условием для обеспечения долгосрочной устойчивости горнодобывающей промышленности и сохранения экологического благополучия региона.

2 Загрязнение водных объектов тяжелыми металлами обусловлено как природными процессами (выветривание, эрозия, вулканизм), так и, в значительной степени, антропогенной деятельностью (промышленность, сельское хозяйство, добыча полезных ископаемых). При этом антропогенные источники вносят более значительный вклад в загрязнение.

3 Тяжелые металлы, такие как кадмий, цинк и медь, представляют опасность для живых организмов из-за их способности накапливаться в тканях, вызывая токсические

эффекты и нарушения физиологических процессов. Несмотря на то, что некоторые металлы необходимы в малых количествах для биохимических процессов, их избыток, особенно вызванный антропогенным загрязнением, приводит к серьезным экологическим и санитарно-гигиеническим проблемам, включая трофический перенос и аккумуляцию в пищевых цепях.

4 Выбор метода очистки сточных вод от тяжелых металлов должен быть комплексным и зависеть от множества факторов, таких как стоимость, концентрация загрязнений, воздействие на окружающую среду и эффективность удаления. Хотя адсорбция и химические методы, в частности осаждение, обладают преимуществами, их применение требует учета специфических условий и ограничений.

5 Использование промышленных отходов в качестве сорбентов для удаления тяжелых металлов является перспективным направлением, обладающим как экологическими, так и экономическими преимуществами, но требует решения проблем, связанных с их неоднородностью и необходимостью предварительной обработки. Кроме того, существует пробел в исследованиях по применению этих методов в реальных условиях, а не в модельных растворах.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГОРНОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕДНОКОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Особенности функционирования горнотехнических систем неизбежно приводят к образованию сточных вод, загрязненных тяжелыми металлами. Для минимизации негативного воздействия необходима разработка и внедрение эффективных природоохранных мероприятий [119, 120], включая проектирование систем водоотведения и водоочистки, адаптированных к особенностям ГТС и использующих промышленные отходы в качестве реагентов и сорбентов. В связи с этим, проведение натурных исследований, направленных на детальную оценку характеристик сточных вод ГТС (состава, концентрации тяжелых металлов, их миграционной способности), а также их влияния на биологические объекты и потенциала последних к самовосстановлению, является актуальным [21, 110, 111].

В данной главе представлен анализ горнотехнической системы (ГТС) как потенциального источника загрязнения окружающей среды [131]. Горнотехническая система (ГТС) – это совокупность горных конструкций и технологических подсистем во взаимодействии с вмещающими их участками недр [121]. Понимание её структуры, принципов функционирования и взаимосвязей между её элементами является ключевым фактором для оценки и минимизации негативного воздействия на окружающую среду.

С точки зрения экологии, важно учитывать состав горных пород, в частности наличие потенциально токсичных элементов, таких как тяжелые металлы и их влияние на качество воды и земельных ресурсов. Не менее важны и гидрогеологические условия, включая наличие и характер водоносных горизонтов, в том числе образующиеся сточные воды, определяющие пути миграции тяжелых металлов. Необходимо принимать во внимание нарушение ландшафта, которое выражается в изменении рельефа, эрозии почвы, образовании отвалов пустой породы, что, в свою очередь, влияет на биоразнообразие и эстетическую ценность территории. В дополнение ко всему вышеперечисленному, необходимо изучить влияние загрязняющих веществ, таких как тяжелые металлы, на растительные ресурсы. Анализ полученных данных позволит выявить закономерности и взаимосвязи между характеристиками сточных вод, состоянием биообъектов и особенностями функционирования ГТС. Эти сведения критически важны для обоснования оптимального выбора и оценки экономической целесообразности различных подходов к проектированию систем водоотведения и водоочистки сточных вод медноколчеданных месторождений.

2.1 Методика проведения исследований

Отбор проб и пробоподготовка к химическому анализу

Почво-грунты

Для оценки качества почвенного грунта и контроля за его загрязнением проводился отбор проб в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84 «Отбор проб почвы для химического анализа». Согласно этому стандарту, точечные пробы отбирались на участке с использованием метода конверта на глубину до 20 см. После этого эти точечные пробы смешивались для создания единой пробы, общая масса которой превышала 1 кг точки отбора проб приведены на рисунке 4.

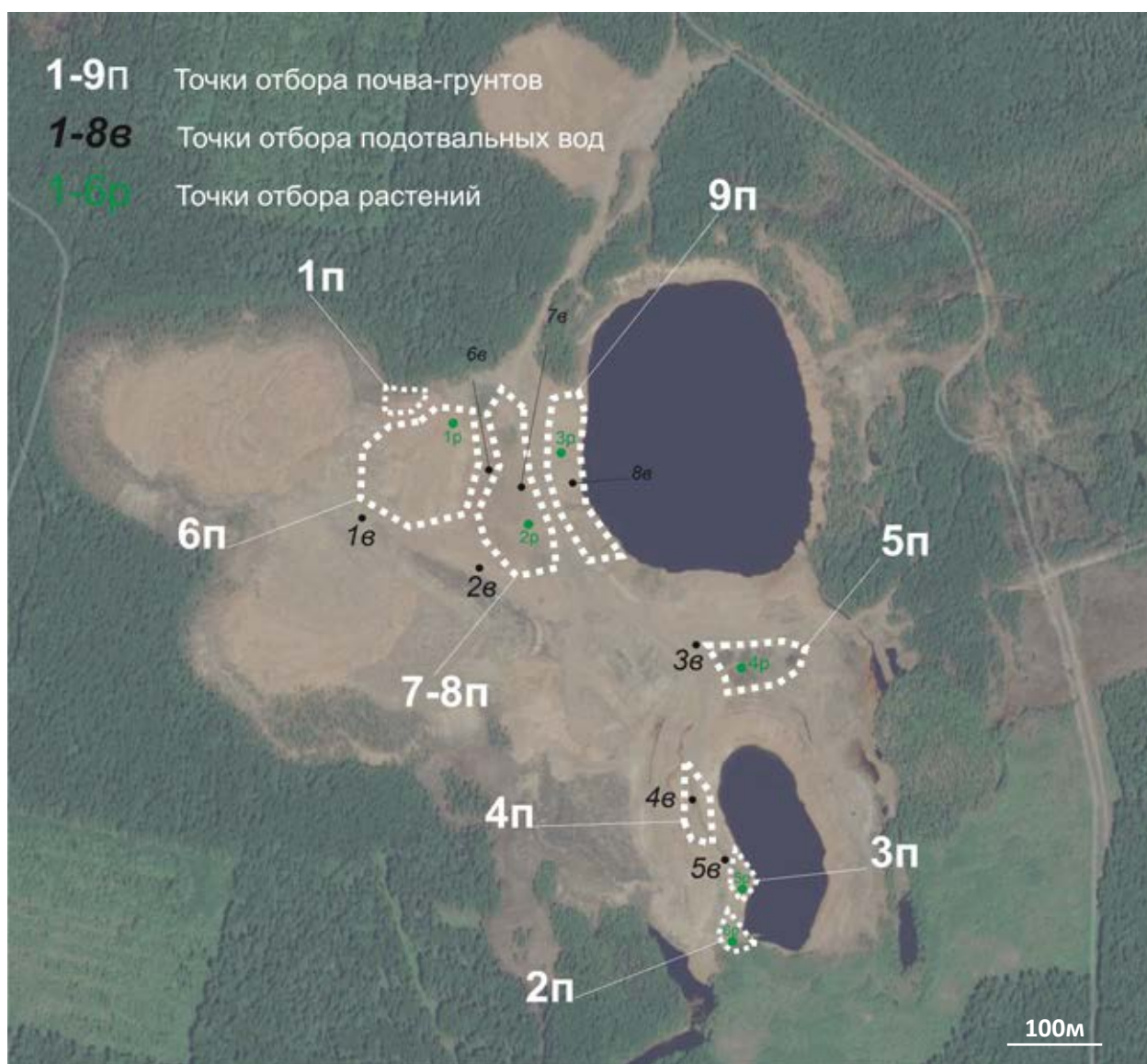


Рис. 4 - Точки отбора проб растений, грунтов и сточных вод на территории отработанного медно-колчеданного месторождения Кабан-1

В рамках исследования отобранные пробы почво-грунтов были обработаны следующим образом. Сначала, чтобы усреднить состав проб, они были подвергнуты процедуре квартования. Пробы измельчили с использованием лабораторных сит и фарфоровой ступки с пестиком, чтобы получить однородную текстуру, необходимую для дальнейших испытаний. Обработанные пробы сушили в сушильном шкафу ШС-80-01-СПУ (ООО «ПриборУфа», Россия), [22, 151]. Это оборудование позволяет осуществить контролируемую и равномерную сушку материала, что важно для аналитической работы с почвенными образцами.

Сточные воды

Для подготовки образцов сточных промышленных вод к элементному анализу была проведена следующая последовательность действий. Сначала отобранные пробы воды были помещены в 5-литровые емкости из полиэтилена, предварительно промытые дистиллированной водой, чтобы избежать возможного загрязнения образцов. Далее пробы были отфильтрованы с помощью фильтров «синяя лента» для удаления крупных твердых частиц и отложений. Для сохранения стабильности образцов и предотвращения их изменений, пробы были помещены в холодильник и хранились там в течение 24 часов. Данная процедура помогает сохранить начальное состояние образцов и минимизировать возможные изменения состава воды во время подготовки и анализа.

Минерализация образцов

Для выполнения процедуры озоления образцов применялась микроволновая система MARS 5 (производство CEM Corporation, США) в соответствии с методом EPA 3052 [22, 151]. Подготовка проб состояла в смешивании 0,5 г образца с 9 мл азотной кислоты (HNO_3) и 3 мл плавиковой кислоты (HF), после чего смесь тщательно перемешивали и оставляли на 15 минут перед герметизацией в специальных сосудах EasyPrep. Условия озоления включали, нагрев до 180 °C за 6 минут, поддержание этой температуры в течение 10 минут и мощность 1800 Вт. По завершении процесса и разбавления до объема 50 мл были получены прозрачные растворы без цвета и осадка [22, 151].

Элементный анализ

Для анализа содержания металлов в сточных водах и минерализованных образцах использовался метод атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС). Исследования проводились на спектрофотометре Varian AA 240 FS, выпущенном компанией Varian Australia Pty Ltd (Австралия) [22, 151].

Для различных элементов использовались следующие длины волн: Cd – 228,8 нм; Zn – 213,9 нм; Cu – 324,7 нм; Fe – 248,3 нм [22, 151];

Определение пределов обнаружения элементов в растворе имело следующие значения: Cd – 1,5 мкг/л; Zn – 1,6 мкг/л; Cu – 1,2 мкг/л; Fe – 7,3 мкг/л [22, 151];

Измерение pH

Для измерения pH и температуры использовался прибор pH-метр/иономер ТАН-2 от компании ООО «НПП Томьаналит» (Россия). Процедура определения уровня pH в водной вытяжке проводилась в соответствии с требованиями ГОСТ 26423-85, где масса навески и дистиллированной воды поддерживалась в соотношении 1:5, [22, 151].

Морфометрические показатели

По завершении всех экспериментов проводили измерение длины корней и определение процентного соотношения проросших семян, а также исследование содержания изучаемых химических элементов в растениях. В результате были рассчитаны значения относительной всхожести семян (RGP) и относительного роста корней (RRG) [22, 151]:

$$RGP (\%) = (Gs / Gc) * 100 \quad (1)$$

где Gs — количество проросших семян в исследуемой пробе, а Gc - количество проросших семян в контрольной группе.

$$RRG (\%) = (Ls / Lc) * 100 \quad (2)$$

где Ls - длина корня проросшего семени в пробе, а Lc - длина корня проросшего семени в контрольной группе (дистиллированная вода).

Обработка и интерпретация полученных результатов

Для определения оптимальных параметров применения отходов производств для очистки сточных вод от тяжелых металлов, а также для построения моделей регрессии и выявления закономерностей, была применена методика функционально-факторных моделей, с использованием программного обеспечения Трендс ФСП-1 [122]. Суть метода заключается в разложении сложного процесса на значимые факторы, такие как параметры процесса (pH, время контакта, концентрация загрязнителей, дозировка отходов), и характеристики сточной воды (концентрация тяжелых металлов). Далее, устанавливаются функциональные зависимости между этими факторами и эффективностью очистки, описываемые математическими уравнениями. На основе экспериментальных данных строятся регрессионные модели, позволяющие определить численные коэффициенты,

проверить адекватность модели и количественно оценить влияние каждого фактора, включая их взаимодействие.

Методика помогает выявить закономерности, определить оптимальные значения параметров для максимальной эффективности очистки, спрогнозировать результаты при различных условиях и, таким образом, оптимизировать процесс очистки сточных вод от тяжелых металлов с использованием отходов производств [123]. Это обеспечивает системный, математически точный подход, позволяющий эффективно находить оптимальные условия и снижать затраты при разработке новых технологий очистки.

Оптимальные условия рассчитаны по формуле [123]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} (1 - e^{-\frac{t}{\lambda}}) \quad (3)$$

ε – это значение некоторой величины (название переменной не указано, но может быть, например, эффективность, или что-то другое в зависимости от контекста).

- ε_{∞} – это постоянный коэффициент, который является максимальным значением, к которому приближается ε .
- e – это математическая константа, основание натурального логарифма (примерно 2,71828).
- t – это переменная, от которой зависит величина ε .
- λ – это постоянный коэффициент в показателе экспоненты (время релаксации), определяющий скорость изменения ε . Чем меньше λ , тем быстрее происходит приближение к асимптоте.

2.2 Анализ особенностей функционирования горнотехнической системы при разработке медноколчеданного месторождения как фактора, определяющего экологические последствия и требования к системам водоотведения и водоочистки

Добыча полезных ископаемых, особенно в сфере медноколчеданных месторождений, оказывает серьезное негативное воздействие на окружающую среду [120].

Помимо этого, в результате горнодобывающей деятельности образуются большие объемы отходов и сточные воды, содержащие опасные тяжелые металлы, включая Cu, Zn и Cd [131]. Эти металлы очень токсичны и могут накапливаться в организме, что приводит к угрозе для здоровья человека и экосистем [51, 124, 125, 126].

Особую опасность представляет образование кислых вод, которые образуются при взаимодействии сульфидных минералов, таких как пирит, халькопирит и сфалерит, с водой и воздухом. Эти воды содержат растворенные металлы, которые загрязняют почву и водоемы [124].

Проблема загрязнения окружающей среды, вызванная добычей медноколчеданных руд, требует серьезного внимания и разработки эффективных технологий для предотвращения и минимизации ее негативного влияния.

Объект исследований

Горнотехническая система (ГТС) — это совокупность горных конструкций и технологических подсистем во взаимодействии с вмещающими их участками недр [121, 127].

В исследовании рассматривается Горнотехническая система (ГТС) «Кабан-1», расположенная на территории Верхнетуринского городского округа Свердловской области (рисунок 5). ГТС представляет собой отработанное медноколчеданное месторождение, которое в настоящее время оказывает значительное влияние на окружающую среду. Геологически оно расположено в рамках обширной зоны эффузивных пород зеленокаменной толщи на восточном склоне Уральского хребта.

Месторождение «Кабан-1» представляет собой техногенно нарушенную территорию площадью более 80 гектаров, включающую два затопленных карьера, отвалы и обедненную растительность, при этом 11 гектаров занято водной поверхностью [22, 131, 151]. Расположенное на восточном склоне Среднего Урала, в 15 км от водораздельного хребта и в 190 км от Екатеринбурга, месторождение находится вблизи города Верхняя Тура (13 км), а также недалеко от промышленных городов Красноуральск (36 км) и Кушва (30 км). Неподалеку от месторождения «Кабан 1» проходит автомобильная дорога, соединяющая Верхнюю Туру с Качканаром. Ближайшие водные объекты - реки Малая Именная (1,7 км) и Черная (2 км) [22, 131, 151].

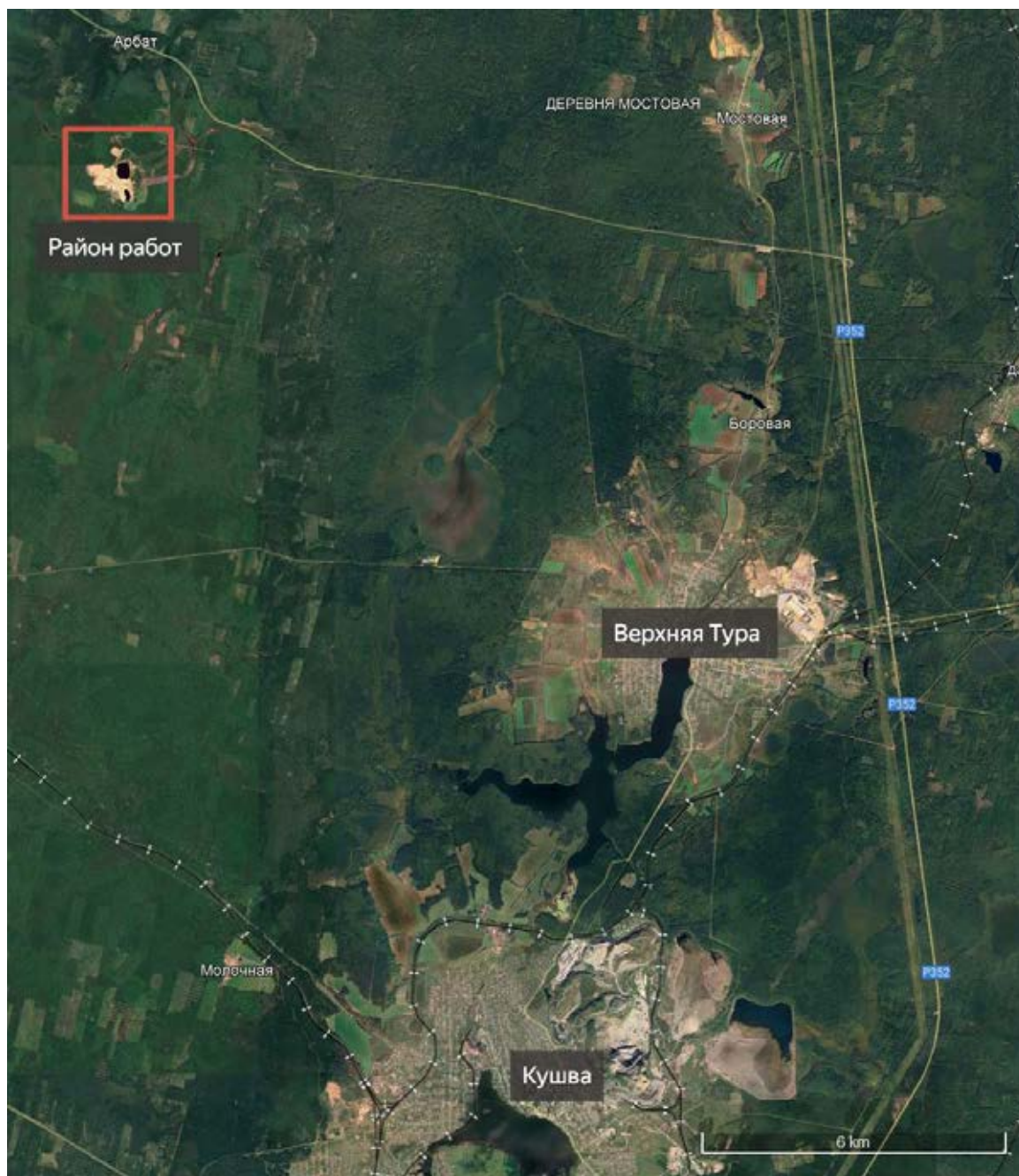


Рис. 5 - Спутниковый снимок расположения района работ

По данным Государственного баланса РФ на 1 января 2022 года, на месторождении Кабан-1 числятся следующие запасы меди, предназначенные для открытой добычи (согласно ТКЗ 2012г. №243):

- Категории А+В+С1: руда — 142 тысячи тонн (среднее содержание — 1,41%), содержащая медь — 2 тысячи тонн,
- Категория С2: руда — 1260 тысяч тонн, содержащая медь — 11,3 тысяч тонн,
- Забалансовые: руда — 351 тысяча тонн, содержащая медь — 1,5 тысячи тонн.

Группа Кабанских колчеданных месторождений находится на западной полосе Тагило-Магнитогорской зоны Среднего Урала. Это месторождение связано с риолит-базальтовой формацией. Главными минералами из являются пирит и халькопирит, а иногда также встречаются сфалерит, арсенопирит, теннантит и галенит. Также замечено наличие так называемых редких минералов, таких как гипогенный борнит, «оранж-борнит» и энаргит. Кроме того, на месторождении Кабан-1 наблюдается зона окисления, проявляющая типичную для колчеданных месторождений зональность [128].

2.2.1 Оценка миграции тяжелых металлов в почво-грунтах района расположения медноколчеданного месторождения

Добыча полезных ископаемых представляет собой важнейшую отрасль промышленности, однако этот процесс сопровождается образованием различных видов отходов, которые могут иметь существенное воздействие на окружающую среду. На протяжении процесса добычи и переработки минерального сырья возникают вскрышные породы – экономически невостребованные горные материалы, извлекаемые в результате открытой добычи полезных ископаемых, таких как уголь, руды цветных металлов и другие. В случае шахтной добычи полезных ископаемых, вмещающие породы, или обломочные породы, также представляют собой вид отходов. Эти породы образуются в результате разработки и обработки залежей, и могут содержать мелкие куски полезных ископаемых, которые трудно или нецелесообразно извлекать с основной массой [129].

После извлечения полезных ископаемых, вскрышные породы обычно складировуются на отвалах – специально предназначенных участках для хранения различных материалов, включая вскрышные породы и другие виды отходов, полученных в результате горных работ. Отвалы играют важную роль в управлении отходами горной деятельности и защите окружающей среды в ходе добычи полезных ископаемых. Предназначенные для размещения пород и отходов в специально отведенных местах, отвалы максимально снижают их воздействие на окружающую природную среду. Таким образом, они способствуют безопасному и эффективному управлению отходами горной деятельности, что способствует сохранению природной среды в процессе добычи полезных ископаемых [130, 131].

В качестве объекта техногенного воздействия, продолжающегося на протяжении долгого времени, приводится группа Кабанских медно- и серноколчеданных месторождений, где добыча началась более 70 лет назад. Минеральный состав руд месторождения включает пириты, халькопириты, сфалериты, кварцы и серицит [21, 128, 129]. Месторождение «Кабан 1» было разработано открытым способом, и после окончания работ остались нерекультивированные отвалы вскрышных пород и атмосферные воды с

кислотным уровнем (до 2,33 pH), которые продолжают влиять на окружающую среду через подотвальные стоки поверхностных вод.

Кабанское месторождение занимает большую территорию, преимущественно покрытую отвалами рыхлой вскрыши и крупнообломочными вмещающими породами. Окружающий ландшафт в значительной степени состоит из техногенных грунтов (рисунок 6). объект исследования находится в Северо-Среднеуральском округе и относится к различным типам почв, таким как подзолистые, буротаёжные иллювиально-гумусовые почвы, а также горные лесолуговые почвы. По данным Национального атласа почв Российской Федерации, почвы в точке отбора проб, обозначенной как «Фон», относятся к типу торфяно-подзолисто-глеевых. Эти почвы характеризуются наличием торфянистого горизонта мощностью до 30 см. В верхнем горизонте содержание гумуса высокое (до 10–20% и более), но по мере спуска вниз по профилю его содержание резко снижается. Кроме того, реакция водной суспензии отмечается как очень кислая по всему профилю. Это указывает на низкую степень насыщенности основаниями в данной почве [130].



Рис. 6 - Фрагмент промплощадки отработанного месторождения «Кабан-1»

В контексте изучения динамики техногенной трансформации природных экосистем [131, 132] в окрестностях функционирования ГТС Кабан-1, были отобраны пробы почво-грунта для определения концентраций тяжелых металлов. Учитывая особенности рельефа, растительности и степень антропогенного воздействия, для исследования выбраны следующее расположение точек отбора проб (рисунок 4). Точки с 1п по 4п, а также с 6п по 8п представляют собой отвалы рыхлых вскрышных пород с крупными каменистыми включениями. Точка 5п — это участок, расположенный между двумя карьерными

выемками. Точка 9п находится на борту карьерной выемки. Результаты химического анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Содержание химических элементов в пробах почва-грунта месторождения «Кабан-1»

№ точки	Содержание химических элементов, мг/кг					pH
	Cu	Zn	Cd	Fe	ОДК* (Cu/Zn/Fe/Cd)	
1п	295,87±6,14	201,25±3,11	2,45±0,21	43794,51±1504,12	132/23/-/2	4,29±0,10
2п	277,75±5,04	138,75±2,49	2,10±0,18	82526,50±2548,35		3,64±0,08
3п	185,37±3,57	80,00±1,42	2,14±0,19	44352,50±1657,19		3,64±0,08
4п	423,75±8,99	142,50±3,82	2,18±0,21	38603,00±1367,15		2,80±0,07
5п	264,55±5,21	58,30±1,23	2,65±0,16	41965,50±1298,34		6,29±0,12
6п	703,75±11,33	168,75±3,94	2,51±0,15	107753,50±3582,85		5,35±0,11
7п	814,83±12,95	131,11±3,12	2,22±0,15	102743,00±3338,64		4,37±0,10
8п	386,50±7,28	105,00±3,01	3,32±0,27	59422,50±1791,18		4,50±0,11
9п	365,48±6,82	85,83±1,92	3,25±0,25	57913,00±1668,93		4,59±0,11
Фон	154,92±2,15	29,01±1,02	1,00±0,15	30111,03±1119,01		5,29±0,12

*СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

Исследование [131] содержания металлов в отобранных пробах почва-грунта на месторождении «Кабан-1» показало значительную вариабельность. Концентрация меди (Cu) варьировала от 185,37 до 814,83 мг/кг, цинка (Zn) - от 58,30 до 201,25 мг/кг, и железа (Fe) - от 38603,00 до 107753,50 мг/кг. Максимальные значения для меди и железа были зафиксированы в точках отбора проб под номером 6п и 7п, а для цинка - в точке 1п. Минимальные показатели для меди и железа были наблюдаемы в точках 3п и 4п соответственно, а для цинка - в точке 5п, (рисунок 7), [131].

Следует отметить, что в каждой точке, где были взяты пробы почвы, было зафиксировано превышение ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) для меди и цинка, установленных в соответствии с требованиями СанПиН 1.2.3685-21 [131]. Это означает, что содержание меди и цинка в почве превышает установленные стандарты, что может представлять опасность для окружающей среды и здоровья человека. При этом превышение ОДК для меди находится в диапазоне от 1,4 до 6,17 раз, а для цинка этот показатель варьируется от 2,5 до 8,8 раз. Это свидетельствует о значительном превышении установленных нормативов, что требует повышенного внимания и дополнительных мер по снижению содержания этих металлов в исследуемом объекте. В целом, этот анализ говорит

о серьезной проблеме, требующей комплексного подхода для контроля и уменьшения загрязнения экосистем медью и цинком [131].

Изучение миграции и накопления химических элементов в природных территориальных комплексах является важным аспектом экологических исследований в техногенно-нарушенных объектах. Миграция и накопление химических элементов в зоне гипергенеза зависят от сочетания природных и антропогенных факторов, которые генерируют поток химических элементов структуре ландшафта. Интенсивность указанных процессов определяется погодными условиями, химическими характеристиками природной воды, почвы и растительности [133].

РН почвы играет очень важную роль и считается ключевым фактором, определяющим доступность питательных веществ и процессы реминерализации, то есть восстановления минеральных соединений в почве [134]. В данном исследовании рН почвы был проанализирован в вытяжках почво-грунтовых образцов девяти точках, показатель варьировал в пределах от 2,8 до 6,29, со средним значением в 4,39. Также отмечено, что самый низкий уровень рН (2,8) был зарегистрирован на отвале рыхлых вскрышных пород в точке 4п. С другой стороны, на участке между двумя карьерными выемками самый высокий уровень рН зафиксирован в точке 5п и был близок к нейтральному значению – 6,29 [131].

В итоге исследование [131] содержания меди (Cu), цинка (Zn) и железа (Fe) в пробах почвы-грунта месторождения «Кабан-1» выявило значительную пространственную вариабельность концентраций металлов. Были зафиксированы превышения ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) для меди и цинка, установленных СанПиН 1.2.3685-21, во всех точках отбора проб, а также низкие значений рН, что говорит о факте закисления почв-грунтов. Сочетание превышения ОДК по меди и цинку, а также закисление почвы свидетельствует о серьезной антропогенной нарушенности территории месторождения «Кабан-1» [131].

2.2.2. Состав, источник формирования и направления потока сточных вод, образующихся на этапе прекращения горных работ

Современное общество сталкивается с серьезной проблемой загрязнения воды тяжелыми металлами, что влечет широкие последствия для окружающей среды и здоровья человека. Одним из основных источников поступления тяжелых металлов в водные системы является обширная промышленная деятельность, включая добычу полезных ископаемых [135]. Это может включать в себя этапы обработки, такие как окисление, флотация и гидрометаллургическая обработка, что способствует появлению тяжелых металлов в водных ресурсах [136]. Подобные источники загрязнения подчеркивают

необходимость строгого контроля и мониторинга выбросов тяжелых металлов, а также разработки и внедрения современных технологий для совершенствования систем водоочистки и предотвращения загрязнения водных ресурсов этими тяжелыми металлами [137].

Проблема загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами в промышленных сточных водах имеет серьезное значение с точки зрения экологии. Именно поэтому крайне важно разработать экономически и экологически эффективные подходы к проектированию систем водоочистки при разработке медноколчеданных месторождений [138].

После завершения добычи на территории месторождения «Кабан-1» образовались две карьерные выемки, наполненные кислыми водами. Анализ показал, что содержание различных тяжелых металлов в этих выемках довольно высокое, например, цинк – 50,12 мг/л, кобальт – 1,73 мг/л, кадмий – 0,20 мг/л, медь – 78,10 мг/л, железо – 147,71 мг/л, а также большое количество магния – 322,50 мг/л (таблица 2) [22, 35].

Таблица 2 - Элементный состав сточных вод месторождения «Кабан-1»

Химический элемент	Подотвальные воды «Кабан-1», мг/л	ПДК, мг/л ¹	ПДК, мг/л ²
Cu	78,10±2,94	0,001	1
Mg	322,50±5,98	40	50
Fe	147,71±3,94	0,1	0,3
Zn	50,12±1,14	0,01	5
Cd	0,20±0,01	0,005	0,001
Co	1,73±0,01	0,01	0,1
Ni	0,23±0,01	0,01	0,02
Ca	33,20±0,99	180	-
K	5,26±0,96	50	-

¹ Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 (ред. от 10.03.2020) «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

² СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде питьевой системы централизованного, в том числе горячего, и нецентрализованного водоснабжения, воде подземных и поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, воде плавательных бассейнов, аквапарков.

Оценка химического состава сточных вод месторождения «Кабан-1» представляет важность с точки зрения изучения влияния существующих отвалов горных пород, представляющих собой элементы ГТС, на миграцию тяжелых металлов и формирование техногенного потока. Это имеет критическое значение для понимания и минимизации экологического воздействия, вызванного такими стоками в окружающей среде и проектирования систем водоочистки при разработке медноколчеданных месторождений.

В процессе проведения полевых исследований [131] наблюдались места расположения и направления потока подотвальных вод, которые обусловлены дождево-капельной эрозией. Этот вид эрозии приводит к образованию корки на поверхности почвы, существенно снижающей ее инфильтрационные свойства и стимулирующей появление стоков [139], (рисунок 7). Такая корка, по сути, является результатом процессов, происходящих на поверхности почвы под воздействием дождевой воды. Она может значительно замедлить процесс проникновения воды в грунт, что в свою очередь способствует образованию стоков, так как вода, не имея возможности проникнуть в глубину, начинает стекать по поверхности. Это наблюдение позволяет лучше понять процессы, происходящие в окружающей среде, и может быть важным для разработки проектов систем водоотведения и водоочистки. Эти воды подвержены воздействию подотвальных стоков, обладающих низким уровнем pH в диапазоне от 2,33 до 3,20 [131]. По пути продвижения эрозийного техногенного потока были отобраны пробы воды для химического анализа (таблица 3). По результатам анализа видно, что в отобранных пробах подотвальных вод содержание тяжелых металлов варьирует для меди (Cu) - от 331,48 до 472,62 мг/л; для цинка (Zn) – от 252,80 до 352,52 мг/л; для кадмия (Cd) – от 0,421 до 0,499 мг/л; и для железа (Fe) – от 25467,00 до 33341,88 мг/л [131].

Из карт на рисунке 7 становится очевидным, что наиболее высокие значения исследуемых тяжелых металлов (медь, цинк, железо) сконцентрированы в отвалах вскрышных пород, что соответствует точкам отбора проб под номерами с 6п по 8п [131]. При сопоставлении значений концентраций тяжелых металлов в почвах-грунтах и отобранных пробах сточных подотвальных вод, находящихся на примерно одном уровне пространственного распределения (точки 1в, 2в, 6в и 7в), становится ясно, что показатели значений исследуемых металлов в этих точках существенно не изменяются. Аналогичную тенденцию наблюдаем для точек 3в–5в вдоль пути потока сточных вод (таблица 3). Интересно заметить, что именно в этих областях образцы почво-грунта содержат меньшее количество металлов по сравнению с общей площадью (точки 2п–5п) [131].

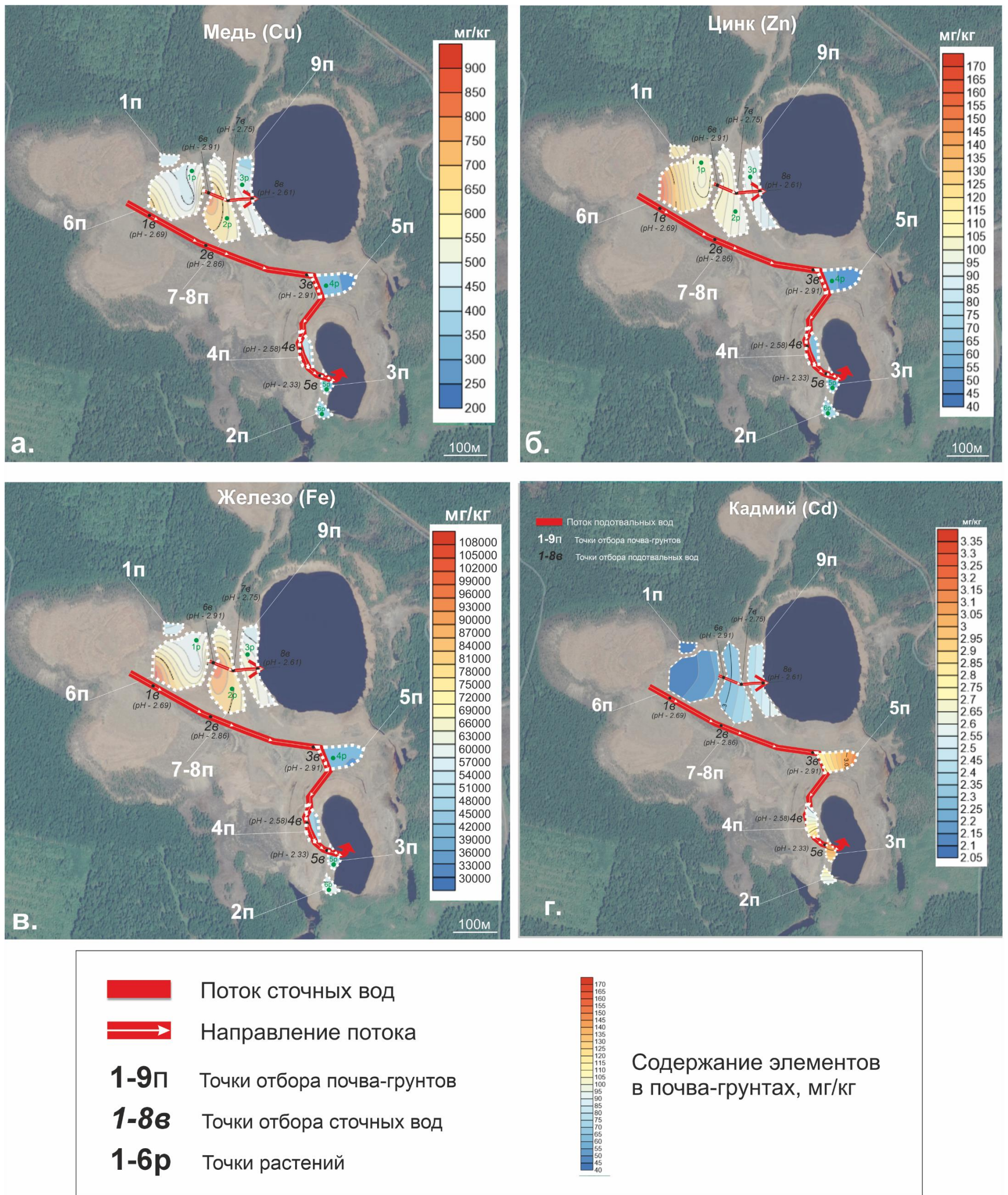


Рис. 7 - Схема направления и параметры потока сточных, образующихся при освоении медноколчеданных месторождений. Распределение тяжелых металлов по направлению потока кислых сточных вод
а). Медь (Cu), б). цинк (Zn), в). Железо (Fe), г). Кадмий (Cd)

На основании этих данных сделан вывод о том, что миграция тяжелых металлов на промплощадке отработанного месторождения «Кабан-1» происходит следующим образом: из-за избыточного количества атмосферных осадков и последующего воздействия дождево-капельной эрозии, исследуемые тяжелые металлы с отвалов вскрышных пород передаются потоком подотвальных вод в направлениях, указанных на рисунке 5, то есть к карьерным выемкам, при этом не увеличивая своих значений в почва-грунтах по мере движения потока сточных вод. По всей видимости такой безбарьерный перенос металлов из одной точки в другую связан с низкими значениями pH (2,33-2,91), имея такую среду, поток кислых подотвальных вод не оказывает заметного влияния на растворимость и осаждение металлов [131, 140]. Другими словами, максимальные значения содержания тяжелых металлов в отобранных почвах были зафиксированы на отвалах вскрышных пород и непосредственно на бортах карьерной выемки. Тяжелые металлы, сконцентрированные в отвалах вскрышных пород и превышающие допустимые концентрации, переносятся кислыми подотвальными водами, беспрепятственно распространяясь, поскольку на их пути отсутствуют биогеохимические барьеры, способные остановить их миграцию и локализовать в определенном месте [131]. Исходя из этого на территории площадки отработанного месторождения «Кабан-1» необходимы дальнейшие исследования, направленные на поиск естественных биогеохимических барьеров и зон самовосстановления биологических растительных ресурсов. Также необходимо изучить растения, способные выживать в условиях техногенного загрязнения и высокой концентрации тяжелых металлов в почве и в сточных водах [131].

2.2.3 Изучение тяжелых металлов в сточных водах на возможности самовосстановления биологических растительных ресурсов, произрастающих в границах разработки медноколчеданного месторождения.

Исследования [131] показали, что тяжелые металлы, превышающие допустимые концентрации переносятся в пространстве вместе с кислыми подотвальными водами [131]. Отсутствие биогеохимических барьеров, способных задерживать загрязняющие вещества, приводит к их распространению на значительные территории.

С целью оценки биоаккумуляции тяжелых металлов растениями и их способности к самовосстановлению в условиях техногенного загрязнения, на территории отработанного месторождения Кабан-1 были отобраны отдельные экземпляры Иван-чая узколистного [131, 141].

На рисунке 8 показаны точки отбора особей иван-чая узколистного [131].

Концентрация химических элементов в растениях зависит от совокупности биологических факторов, наличия физиологических барьеров (например, между корневой

системой и стеблем) и уровня содержания элементов в почве [142, 143]. Различные виды растений характеризуются специфическими свойствами, определяющими их способность к поглощению и аккумуляции химических веществ [52, 53, 144]. Для оценки накопления кадмия, цинка, железа и меди в растительных тканях использовались коэффициенты накопления (КН) и корневого барьера (ККБ) [131]. КН отражает эффективность аккумуляции элементов, выражаясь отношением их концентрации в надземной части растения к содержанию в почве, тогда как ККБ характеризует барьерную функцию корней, ограничивающую переход элементов в надземные органы [131].

Таким образом, коэффициенты накопления и корневого барьера позволяют оценить способность растений к самовосстановлению и их участие в создании биогеохимических барьеров, предназначенных для локализации тяжелых металлов в районах ГТС [131].



Рис. 8 - Особь растения Иван-чай узколистный (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.) на территории площадки отработанного месторождения «Кабан-1», точка отбора - 3р

В рамках исследования были проанализированы растения Иван-чай узколистный. Определены их морфологические показатели, а также взяты образцы сухой биомассы для проведения элементного анализа (рисунок 8, таблица 4.).

Таблица 3 - Содержание Cu, Zn, Fe, Cd в сточных водах месторождения «Кабан-1» по пути продвижения потока

№ точки	Содержание химических элементов, мг/л				pH
	Cu	Zn	Cd	Fe	
1в	331,48±31,05	253,14±22,15	0,421±0,091	27151,14±3145,16	2,69±0,09
2в	345,70±33,14	252,80±20,18	0,429±0,083	28754,15±3254,34	2,86±0,11
3в	354,85±34,15	264,31±24,98	0,436±0,090	27846,75±3648,17	2,91±0,15
4в	404,35±28,19	300,12±33,01	0,486±0,11	28014,87±3521,24	2,58±0,09
5в	472,62±41,35	325,52±35,17	0,499±0,15	33341,88±3916,18	2,33±0,07
6в	362,15±25,55	287,31±24,39	0,400±0,10	25467,00±3001,54	2,91±0,13
7в	369,48±26,34	288,14±24,48	0,415±0,16	26044,84±3454,19	2,75±0,11
8в	376,25±25,32	291,65±26,16	0,451±0,16	27145,15±3657,94	2,61±0,09

Таблица 4 - Морфологические показатели и содержание Cu, Zn, Fe, Cd в корнях и побегах особей Иван-чай узколистый (*Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop.,)

№ точки	Корень/ Побег				
	Длина, см	Cu, мг/кг	Zn, мг/кг	Fe, мг/кг	Cd, мг/кг
1р	50,00±7,31	285,15±21,57	71,48±2,25	335,11±21,05	1,00±0,20
	120,11±15,14	72,15±3,81	12,15±0,77	818,18±36,00	1,00±0,20
2р	39,48±5,12	280,64±24,22	71,47±5,74	451,83±36,11	1,55±0,19
	115,26±9,98	94,12±4,33	15,66±1,99	1153,43±91,64	<0,0015
3р	40,47±5,58	210,25±15,03	50,33±4,95	305,19±22,18	1,25±0,11
	105,15±10,48	72,17±6,84	11,20±0,87	853,48±76,94	1,05±0,10
4р	48,86±8,83	220,45±16,83	44,35±3,42	295,66±19,00	<0,0015
	102,19±10,98	70,11±4,33	7,81±1,20	671,53±56,17	<0,0015
5р	47,54±5,76	243,95±12,66	47,38±2,13	319,10±28,18	1,35±0,15
	95,45±8,34	72,17±6,84	9,00±0,88	773,08±53,13	1,00±0,20
6р	50,00±5,55	250,65±67,45	52,31±3,63	285,11±19,11	1,30±0,10
	90,33±7,98	81,15±4,28	9,20±1,11	859,75±57,10	1,00±0,20
Ср. значения	48,56	248,52	56,22	332,00	1,08
	104,91	75,97	9,80	854,90	1,00
Фон	70,00±2,38	44,07±5,39	7,74±1,37	150,66±24,00	<0,0015
	141,22±18,45	14,23±2,32	2,55±0,32	421,00±32,46	<0,0015

Для расчета коэффициента накопления были использованы данные об элементном составе почвы на территории месторождения «Кабан-1», которые приведены в таблице 4.

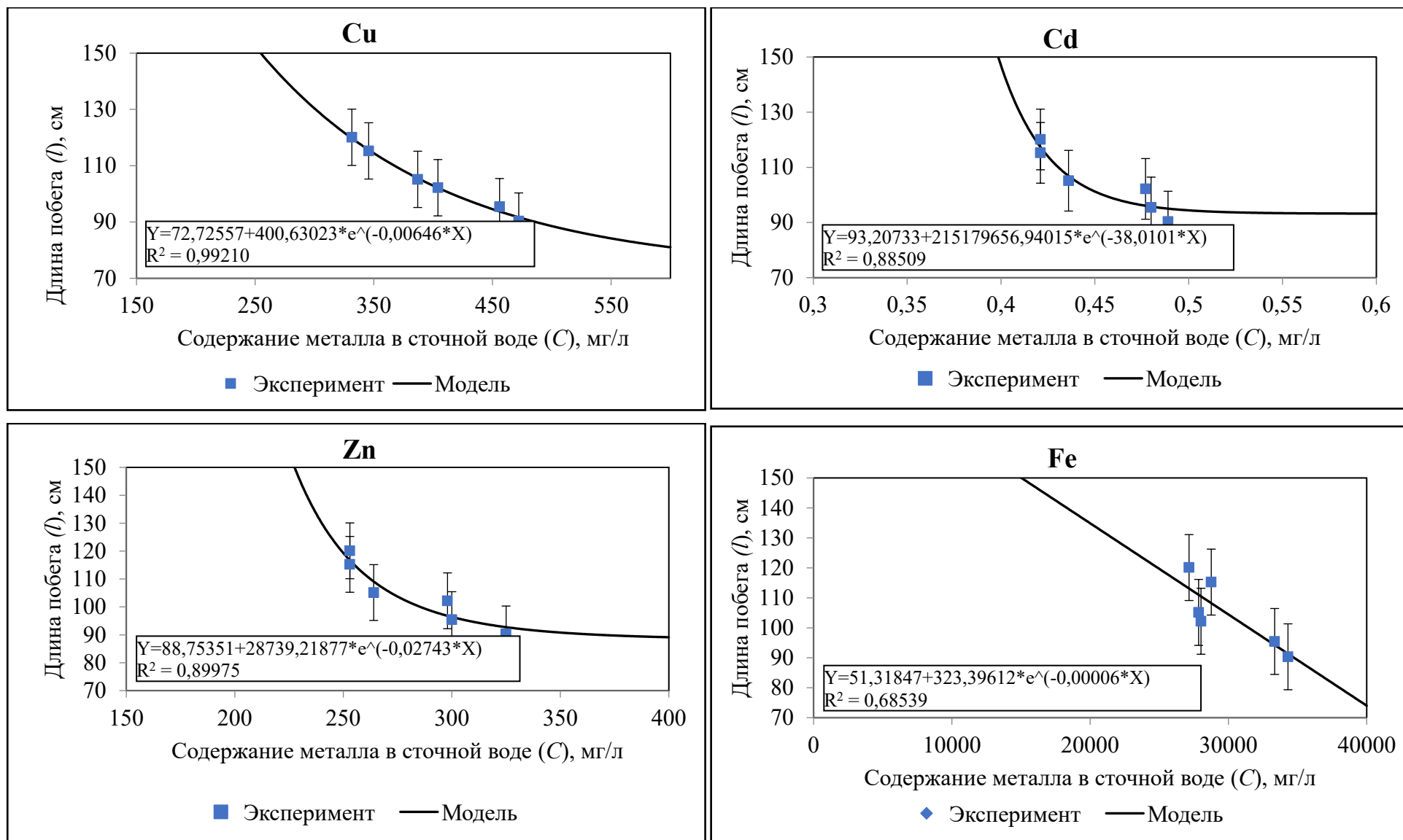


Рис. 9 - Влияние тяжелых металлов в сточных водах на морфологические показатели растений Иван-чай узколистный *Chamaenerion angustifolium* L. Scop.

Результаты исследования [131], проведенного на месторождении «Кабан-1», свидетельствуют о выраженном негативном влиянии геохимических аномалий на фитоценоз, связанных с повышенным содержанием тяжелых металлов. Обнаружено статистически значимое уменьшение биомассы надземной (в 1,3 раза) и подземной частей 1,4 раза растений, сопровождающееся аккумуляцией меди (в 5,3 раз), цинка (в 3,8 раз) и железа (в 2,0 раза) в растительных тканях по сравнению с фоном [131]. При этом, концентрации металлов в корневой системе существенно также превышает фоновые по меди (в 5,6 раз), цинка (в 7,7 раз) и железа (в 2,1 раза), что указывает на активный механизм поглощения и транслокации тяжелых металлов из почвы в растения. Данные факты позволяют констатировать состояние токсического стресса у исследуемых растений и необходимость проведения комплексных мероприятий по экологическому мониторингу [131], (рисунок 9).

Растения на месторождении «Кабан-1» демонстрируют барьерный тип накопления большинства микроэлементов в корнях, о чём свидетельствуют высокие коэффициенты корневого барьера, за исключением железа (таблица 5), [131].

Таблица 5 - Значения показателей ККБ и КН в точках отбора проб на территории месторождения «Кабан-1»

№ точки	ККБ				КН			
	Cu	Zn	Fe	Cd	Cu	Zn	Fe	Cd
1р	3,95	5,88	0,41	1,00	0,10	0,07	0,01	0,40
2р	2,98	4,56	0,39	0,00	0,12	0,11	0,01	0,00
3р	2,91	4,49	0,36	1,19	0,20	0,09	0,01	0,32
4р	3,14	5,68	0,44	0,00	0,27	0,13	0,02	0,00
5р	3,38	5,26	0,41	1,35	0,39	0,10	0,02	0,47
6р	3,08	5,56	0,33	1,30	0,27	0,06	0,01	0,48
Фон	3,09	3,03	0,35	3,09	0,09	0,08	0,01	-

В результате обработки полученных данных и с применением методике функционально факторных моделей были установлены зависимости и выявлены закономерности влияний концентраций тяжелых металлов в сточных водах (х) на длину растений иван-чая узколистый (у):

— Увеличение концентрации (С) меди (Cu) в сточной воде (х) >472,14 мг/л приводит к экспоненциальному снижению морфологических показателей (l) растений иван-чая (у), приближаясь к минимальной высоте около 90,33 см.

— Установлено, что длина побегов (l) иван-чая узколистого (у) экспоненциально уменьшается с повышением концентрации (С) цинка (Zn) в сточной воде

(х). Концентрации (Zn), превышающие 325,0 мг/л ингибируют рост растений, при этом длина побегов не превышает 90,33 см.

— Длина побегов (*l*) иван-чая узколистного (*y*) экспоненциально снижается с увеличением концентрации (*C*) кадмия (Cd) в сточной воде (*x*). Концентрации кадмия, превышающие 0,48 мг/л, угнетают рост растений, при этом их длина составляет 90,33 см.

— При концентрации (*C*) железа (Fe) в сточной воде (*x*) свыше 34310,00 мг/л наблюдается экспоненциальное снижение морфологических показателей (*l*) иван-чая (*y*), при этом высота растений приближается к минимальному значению около 90,33 см.

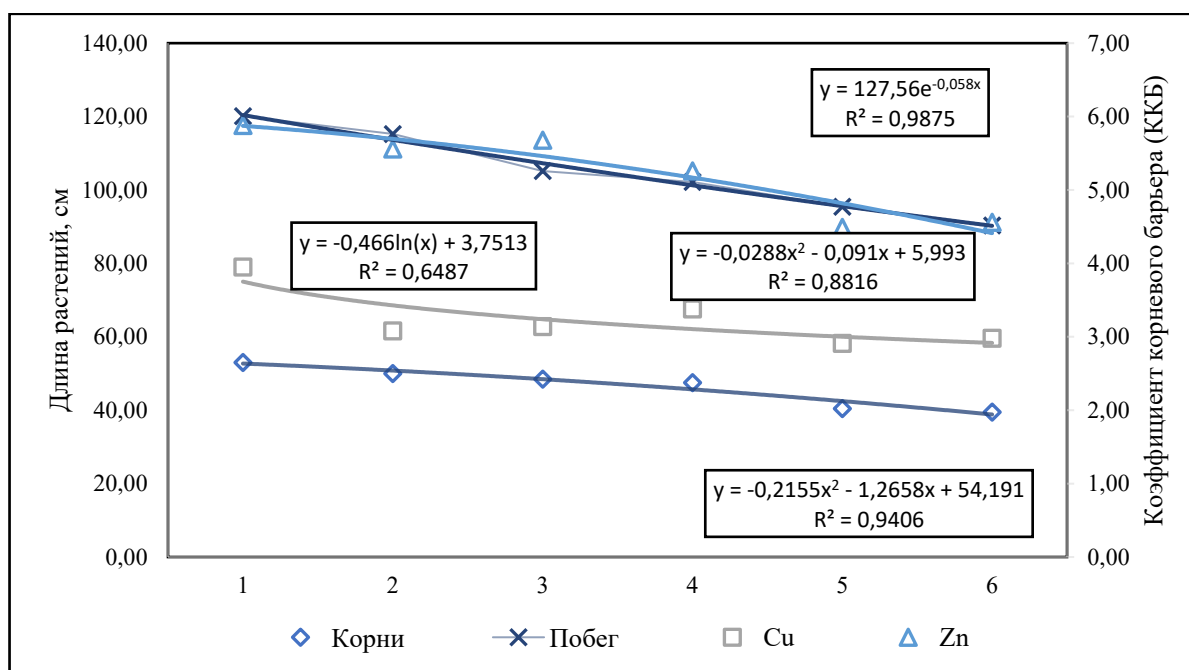


Рис. 10 - Зависимость длины корней и побега растений Иван чай *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop узколистный от показателей корневого барьера (ККБ)

Растения иван-чая узколистного *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop, произрастающие на отработанном медноколчеданном месторождении Кабан-1, демонстрируют вариабельность по длине корневой системы, которая варьирует от 39,48 до 53,00 см и длине надземной части от 90,33 до 120,11. Параллельно с этим, анализировались показатели корневого барьера для меди и цинка, которые составили от 2,91 до 3,95 для меди и от 4,49 до 5,88 для цинка (таблица 5) [131].

Важно отметить, что исследование выявило зависимость между показателями корневого барьера и морфологическими характеристиками растений (Рисунок 10). Было установлено, что снижение значений корневого барьера для цинка сопровождается уменьшением длины побега с корневой системой и, вероятно, общей жизнеспособности

растений. При этом, растения экспериментальной группы с показателями корневого барьера для цинка от 5 и выше демонстрируют наиболее схожую длину побега и корневой системы с контрольной группой, взятой из фонового участка [131].

Растения с более высоким значением корневого барьера (ККБ) эффективнее блокируют поступление цинка в корни, что позволяет им поддерживать нормальный размер и развитие даже на загрязненных почвах. Высокий ККБ делает растение устойчивым к загрязнению почвы токсичными веществами. Однако, чтобы растение эффективно очищало почву от загрязнения (фиторемедиация), оно должно не только препятствовать накоплению вредных веществ, но и активно поглощать их. Идеальным кандидатом для фиторемедиации станет растение с высоким ККБ и низким коэффициентом накопления (КН). Такое растение способно поглощать токсичные вещества из почвы, но не накапливать их в своих тканях. Это делает его безопасным для использования в качестве корма или пищи [131].

Результаты анализа коэффициентов корневого барьера и накопления демонстрируют, что растения как на промышленной площадке, так и на фоновом участке используют схожие механизмы барьерного накопления элементов. Схожесть значений ККБ указывает на общие физиологические процессы, ограничивающие транспорт тяжелых металлов из корней в надземные органы. В связи с этим, учет ККБ и КН является важным при разработке эффективных природоохранных мероприятий, направленных на локализацию тяжелых металлов в почвах и техногенных грунтах посредством биогеохимических барьеров, поскольку позволяет оптимизировать выбор видов растений и стратегию управления для создания устойчивых и функциональных ГТС [131].

Установлено, что образующиеся подотвальные воды создают техногенный поток, стимулирующий миграцию тяжелых металлов [131]. Анализ результатов выявил общую тенденцию к увеличению валовых форм металлов по мере продвижения техногенного потока. Во всех отобранных пробах почво-грунтов наблюдается превышение ОДК по исследуемым металлам. Растения, произрастающие на территории месторождения «Кабан-1» и на фоновом участке, имеют барьерный тип накопления элементов. Зафиксировано превышение меди в особях Иван чай узколистый *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop в 5 раз, цинка в 7 раз, а железа в 2 раза относительно фона. Установлено, что длина корней растений Иван чай узколистый *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop в 1,4 раза меньше относительно фоновых значений, а длина побега 1,3 раза меньше и зависит от концентрации металлов в сточных водах [131].

В результате обработки были установлены зависимости и выявлены закономерности влияния концентраций тяжелых металлов (Cu, Zn, Cd и Fe) в сточных водах на длину растений иван-чая узколистый (Приложение А).

2.3 Выводы ко второй главе

1. Анализ почво-грунтов выявил значительное превышение ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) для меди (185,37 – 814,83 мг/кг) и цинка (58,30 – 201,25 мг/кг) согласно СанПиНу 1.2.3685-21, что подтверждает наличие существенного загрязнения тяжелыми металлами.

2. Исследование сточных вод на отработанном месторождении «Кабан-1» показало, что образующиеся воды формируют техногенный поток, стимулирующий миграцию тяжелых металлов. Концентрации металлов в этом потоке варьируются: медь (331,48-472,62 мг/л), цинк (252,80-352,52 мг/л), кадмий (0,421-0,499 мг/л) и железо (25467,00-33341,88 мг/л). Миграция происходит по направлению к карьерным выемкам, при этом низкие значения pH (2,33-2,91) сточных вод способствуют переносу металлов без значительного увеличения их концентрации в почво-грунтах по пути.

3. Исследование влияния тяжелых металлов в сточных водах на рост и развитие иван-чая узколистного показало, что увеличение концентрации меди (более 472,14 мг/л), цинка (более 325,0 мг/л), кадмия (более 0,48 мг/л) и железа (более 34310,00 мг/л) приводит к экспоненциальному снижению морфологических показателей растений, включая уменьшение длины побегов до минимального значения около 90,33 см. Это указывает на угнетающее воздействие высоких концентраций тяжелых металлов на рост растений в условиях техногенно нарушенной территории.

4. Растения иван-чая узколистного, произрастающие на территории месторождения «Кабан-1», демонстрируют барьерный тип накопления тяжелых металлов, при этом концентрации меди, цинка и железа в их тканях превышают фоновые значения в 5, 7 и 2 раза, соответственно. Кроме того, длина корней и побегов иван-чая на загрязненной территории уменьшена в 1,4 и 1,3 раза соответственно по сравнению с фоновыми значениями, что подтверждает ингибирующее воздействие тяжелых металлов на рост растений и обратную экспоненциальную зависимость между концентрацией металлов в сточной воде и высотой растений.

Таким образом результаты исследований подтверждают прямую связь между формированием потока сточных вод, с высоким содержанием тяжелых металлов в районе медноколчеданного месторождения и негативным воздействием на рост и соответственно на возможность самовосстановления растительности. Полученные данные об ингибирующем воздействии тяжелых металлов на развитие растений будут использованы для обоснования выбора оптимальных параметров технологии водоочистки, а также для разработки природоохранных мероприятий.

ГЛАВА 3. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИМЕНЕНИЯ ЖМКС И ОГП В КОНТЕКСТЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ВОДООЧИСТКИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ МЕДНОКОЛЧЕДАНЫХ

3.1 Подготовка ЖМКС и ОГП как материалов для экспериментального обоснования параметров технологии очистки сточных вод при проектировании систем водоотведения и водоочистки

Многочисленные исследования посвящены применению промышленных отходов для очистки сточных вод от металлов [147, 148, 149]. В частности, доказана эффективность магнезиально-силикатного реагента для многоступенчатой очистки [149]. Термоактивированные серпентиновые минералы обладают способностью нейтрализовать и очищать растворы. Этот процесс включает в себя осаждение железа, алюминия, меди и никеля, а также адсорбцию и соосаждение меди, цинка и никеля на поверхности материала [149].

В одном из исследований [150] предложен шлам щелочного выщелачивания (AWRS) как экономичный и действенный сорбент для удаления ионов меди (Cu^{2+}) и никеля (Ni^{2+}) из сточных вод. Эксперименты показали, что AWRS, прокаленный при 700 °C, обладает наилучшими показателями по удалению указанных ионов, что делает его перспективным материалом для очистки промышленных стоков благодаря низкой стоимости и высокой эффективности [150].

Отходы, использованные в настоящем исследовании, получены при производстве гуминовых препаратов (ОГП) [151] и оксида магния из серпентинита – отходы железо-магниевого производства (ЖМКС) [22, 35].

Отходы железо-магниевого производства

Это пастообразное вещество красно-коричневого цвета с высоким содержанием химических элементов (магния, меди, железа). Получен в результате переработки серпентинита с целью получения оксида магния (рисунок 11).



Рис. 11 - Отходы железо-магниевого производства (ЖМКС)

Пример способа получения оксида магния из серпентинита указан в патенте [152]. Для получения оксида магния из серпентинита материал сплавляют с сульфатом аммония при температуре 250–400 °С. Полученный сплав выщелачивают водой, а раствор нейтрализуют. Затем с помощью фильтрации отделяют осадки примесей металлов в виде гидроксидов. Из фильтрата сначала осаждают гидроксид магния ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) аммиаком при pH 10,0–10,5, а затем карбонат магния карбонатом аммония при pH 11,0–11,5. Оба осадка промывают, чтобы удалить сульфат-ион, а после подвергают термической обработке при 750 °С, в результате чего получают оксид магния. Раствор сульфата аммония, полученный на стадии осаждения гидроксида магния, упаривают и направляют на стадию спекания с серпентинитом. Выделившийся на этой стадии аммиак улавливают и используют для осаждения $\text{Mg}(\text{OH})_2$ [152].

Отходы гуминовых препаратов

В работе [151] рассматриваются отходы производства гуминовых препаратов (ОГП) в качестве потенциального материала для очистки сточных вод. Производство гуминовых препаратов основано на смешивании верхового торфа, сапропеля, диатомита и KOH в определенных пропорциях (рисунок 12).



Рис. 12 - Отходы производства гуминовых препаратов (ОГП)

Отходы производства гуминовых препаратов (ОГП) — это пастообразное вещество темно-серого цвета. Они образуются в процессе отделения твердой фазы от целевого продукта с помощью центрифугирования. В процессе центрифугирования происходит разделение компонентов смеси на твердую и жидкую фазу под действием центробежных сил. Твердая фаза, являющаяся ценным источником питательных веществ и представляющая собой отход производства, извлекается для последующего использования [151].

Подготовка отходов

Отходы, полученные из производств, были подвергнуты двум основным этапам обработки для подготовки их к дальнейшему использованию. На первом этапе отходы подвергались сушке при температуре 95 градусов Цельсия с помощью сушильного шкафа модели ШС-80-01-СПУ, произведенного российской компанией ООО «ПриборУфа». Этот процесс позволил удалить избыток влаги и стабилизировать состояние отходов [151].

Отходы были подготовлены для дальнейшего использования путем измельчения. Для получения фракции размером 1 мм использовались лабораторные сита и фарфоровая ступка с пестиком. Процесс измельчения позволил получить однородный и готовый к применению материал в виде порошка [151].

3.2 Экспериментальное определение и обоснование эффективных параметров применения ЖМКС и ОГП для очистки сточных вод от тяжелых металлов при проектировании систем водоотведения и водоочистки

Эксперименты по перераспределению металлов в системе «сточные воды – отходы»

Для изучения возможности удаления тяжелых металлов из сточных вод проводились эксперименты [22, 35, 151] с использованием промышленных отходов. Анализировалось влияние массы отходов, начальной концентрации металлов и времени контакта на эффективность удаления. В качестве модельного раствора использовались сточные воды из карьерной выемки Кабанского месторождения (таблица 6).

Таблица 6 - Элементный состав исследуемых материалов (валовое содержание)

Химический элемент	Отходы железо-магниевого производства, мг/кг	Отходы гуминовых препаратов, мг/кг	ПДК/ОДК, мг/кг*	Сточные воды «Кабан- 1», мг/л	ПДК, мг/л**
Cu	41,25±1,14	0,81±0,10	3/132	78,10±2,94	0,001
Mg	175000,00±3498,32	1504,31±354,07	-	322,50±5,98	40
Fe	52000,00±1984,29	2485,93±548,14	-	147,71±3,94	0,1
Zn	77,70±1,84	4,38±0,97	23/220	50,12±1,14	0,01
Cd	<1,00	<1,00	-/2	0,20±0,01	0,005
Co	119,75± 1,41	0,20±0,09	5/-	1,73±0,01	0,01
Ni	3083,00±48,13		4/80	0,23±0,01	0,01
Ca	43211,00±581,45		-	33,20±0,99	180
K	30140,00±787,40	36540,38	-	5,26±0,96	50

*СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

**Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 (ред. от 10.03.2020) «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

Определение оптимального времени контакта, и дозировки для удаления ионов металлов из раствора.

Эксперименты проводились с разными навесками отходов (0,1-2 г), которые смешивались с промышленными сточными водами и перемешивались в течение определенного времени (5-180 мин). Полученные растворы фильтровались. Для изучения влияния концентрации ионов Cd, Zn, Cu, Co на очистку, создавались растворы с разными концентрациями (10-1000 мг/л). Эффективность процесса оценивалась по статической обменной емкости и степени извлечения загрязнителя [22, 35, 151]:

$$q_e (\text{COE}) = (C_i - C_e) \times V/m \quad (4)$$

$$E = (C_i - C_e)/(C_i) \times 100\% \quad (5)$$

C_i – исходная концентрация металлов в растворе, мг/л;

C_e – равновесная концентрация металлов в фильтрате, мг/л;

V – объем раствора, добавленного к отходам, л;

m – масса навески, г.

3.2.1 Исследование эффективности применения отходов железо-магниевого производства (ЖМКС) для очистки сточных вод

Исследовалась [22] возможность применения отходов железо-магниевого производства для очистки сточных вод от металлов, анализируя влияние концентрации загрязнителей, времени контакта, дозировки отходов и pH среды [153, 154, 155]. Анализ отходов показал высокое содержание ионов Cu, Mg, Zn и Co, а промышленные сточные воды характеризовались кислой средой и высокой концентрацией металлов, включая Cu, Zn, Co и Cd [22], (Приложение Б). Элементный состав исследуемых материалов приведен в таблице 6.

Влияние начальной концентрации ионов металлов на очистку сточных вод

Начальная концентрация металлов (C , мг/л) играет важную роль в процессе переноса металлов из раствора в исследуемые материалы, что подтверждается исследованиями [156, 157]. Влияние этого фактора изучалось в диапазоне 10–1000 мг/л для Cd, Zn, Co и Cu при pH 2,3–2,5, (рисунок 13), а для имитации загрязнения сточных вод использовался модельный раствор, полученный из ГСО и соответствующих реактивов [22].

Результаты исследований демонстрируют, что количество извлеченных металлов (Q_e , мг/г) возрастает при увеличении начальной концентрации ионов металлов в диапазоне от 10,00 мг/л до 500,00 мг/л. Однако, дальнейшее повышение концентрации до 1000,00 мг/л не приводит к заметному увеличению эффективности процесса извлечения (рисунок 13). Коэффициенты корреляции (R^2) для исследованных ионов показали высокую степень соответствия, составив 0,9984 для Cu, 0,9949 для Zn и 0,9837 для Cd [22].

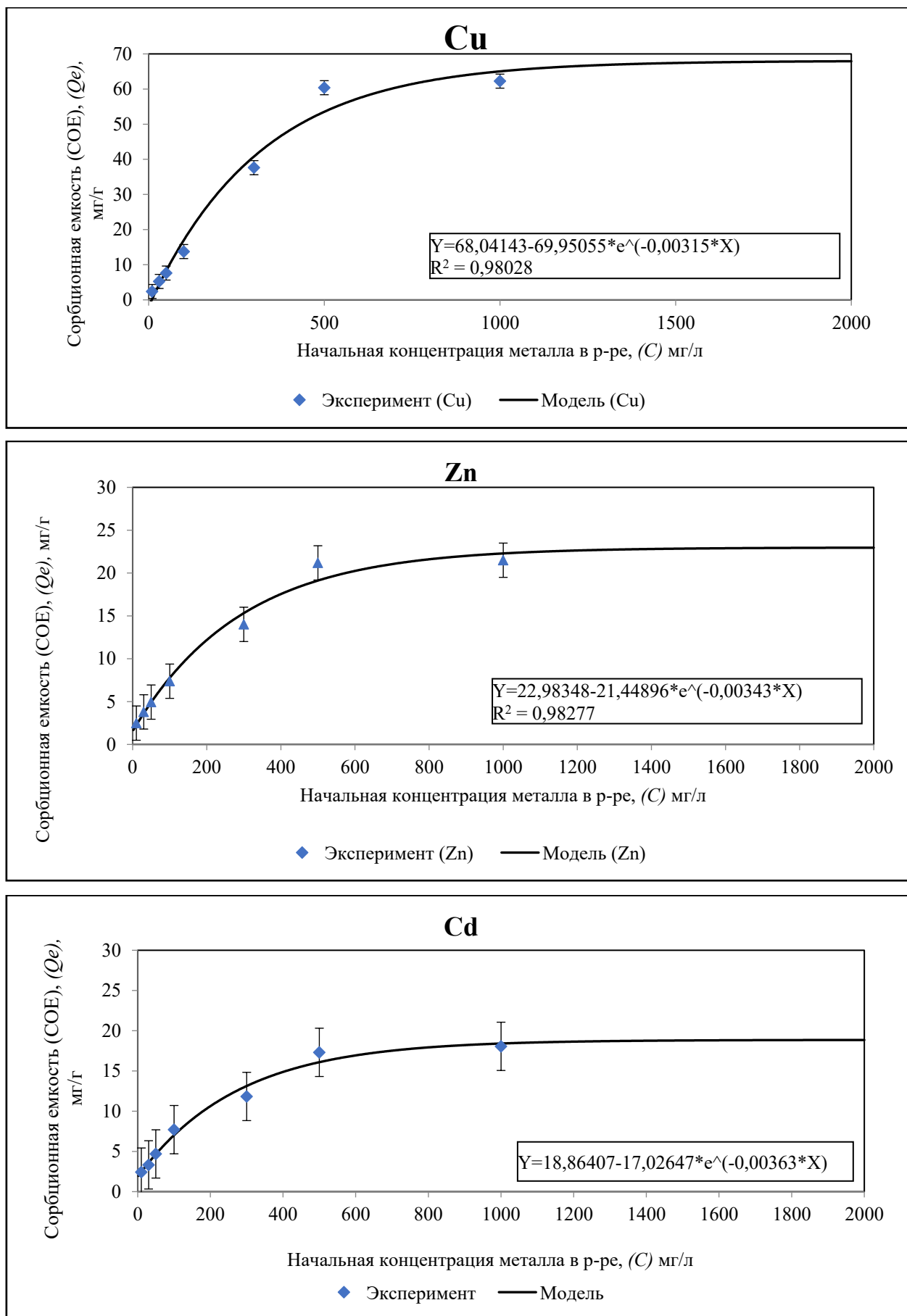


Рис. 13 - Влияние начальной концентрации ионов металлов в растворе на процесс очистки сточных вод отходами железо-магниевого производства

Зависимость эффективности очистки на начальном этапе объясняется наличием свободных активных центров на ЖМКС, способных взаимодействовать с частицами металлов [22]. Однако, при увеличении концентрации металлов выше 1000 мг/л происходит насыщение этих центров, что не приводит к дальнейшему повышению эффективности [156, 157, 158]. Это подчеркивает необходимость разработки методов селективного удаления элементов, например, путем создания каскада биологических прудов с различными составами, адаптированными к каждому конкретному элементу.

После обработки полученных данных были установлены зависимости и выявлены закономерности влияния концентраций тяжелых металлов (C) в растворах на сорбционную емкость (Q_e) ЖМКС:

— Сорбционная емкость (X) химических элементов (меди, цинка и кадмия) выраженная в (Q_e) мг/г, по мере роста начальной концентрации (C) их в растворе (Y) функционально увеличивается от нулевого значения по экспоненте с коэффициентом детерминации $\sim 0,98$. Процесс приближается асимптотически к максимальному значению сорбционной емкости, специфичному для каждого металла (68,04 для меди, 22,98 для цинка и 18,86 для кадмия).

Влияние времени контакта

Время достижения равновесия является важным фактором в очистке сточных вод [159, 160, 161]. Изучалось [22] поглощение ионов Cd, Zn, Cu отходом железо-магниевого производства в зависимости от времени контакта [162, 163]. Анализ фильтратов (таблица 7) показал снижение концентрации исследуемых элементов со временем и отсутствие вторичного загрязнения. Удаление элементов возрастает после 30 минут и достигает равновесия к 120 минуте (рисунок 14). Высокая эффективность в начале обусловлена наличием свободных активных центров на поверхности отхода [22, 164, 165].

Таблица 7 - Результаты химического анализа полученных фильтратов (50 мл, навеска 0,2 г), мг/л, [22]

№	Время контакта, мин	Содержание химических элементов в фильтрате, мг/л							pH
		Cd	Zn	Co	Mg	Cu	Fe	Ni	
1	5	0,19±0,001	43,01±1,09	1,06±0,003	530,88±14,03	43,19±1,32	1,55±0,030	0,23±0,011	4,05±0,012
2	10	0,18±0,001	39,48±0,98	1,03±0,003	539,84±13,12	19,18±1,01	0,03±0,003	0,22±0,010	4,10±0,014
3	15	0,17±0,001	38,48±0,67	1,03±0,003	558,40±12,05	17,85±0,78	0,09±0,002	0,21±0,009	4,33±0,011
4	30	0,18±0,001	37,52±0,70	1,03±0,003	604,24±15,09	16,85±0,81	< 0,0073	0,13±0,014	4,78±0,015
5	60	0,04±0,007	10,62±0,79	1,02±0,004	1076,88±21,87	6,74±0,77	< 0,0073	0,05±0,001	4,89±0,011
6	120	0,03±0,007	9,61±0,91	1,03±0,001	979,04±4,94	5,25±0,76	< 0,0073	< 0,0058	4,99±0,014
7	180	0,03±0,007	9,05±0,68	1,03±0,001	980,00±5,19	5,20±0,86	< 0,0073	< 0,0058	5,01±0,012

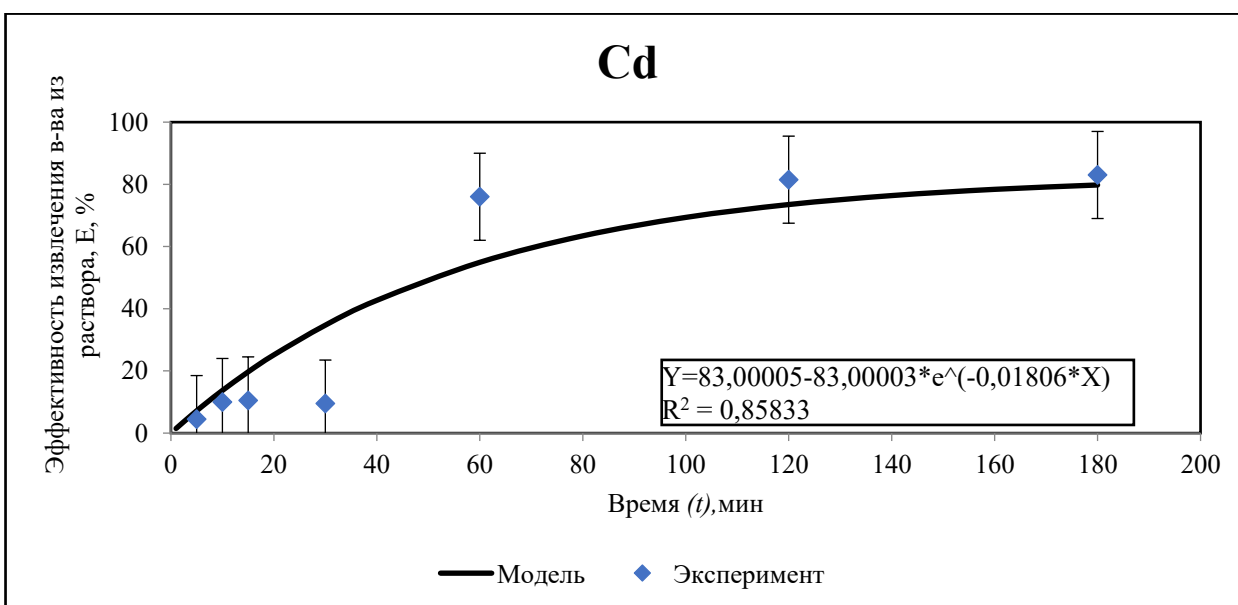
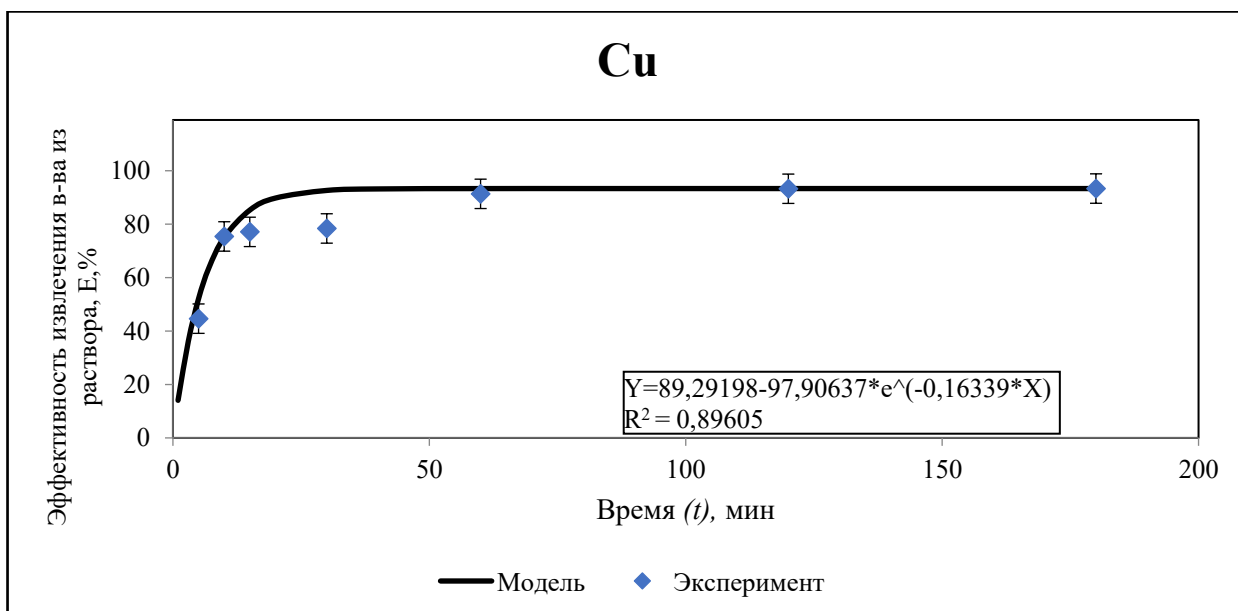
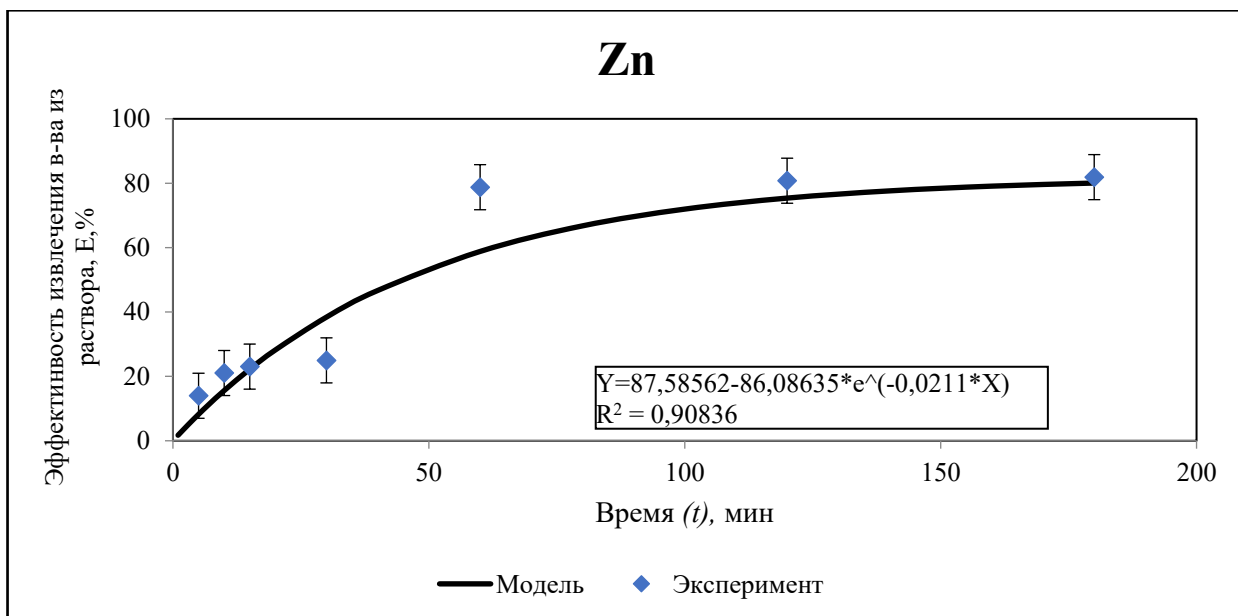


Рис. 14 - Влияние времени контакта на степень извлечения металлов из раствора.

После обработки полученных данных были установлены зависимости и выявлены закономерности влияния времени контакта (t), мин на эффективность извлечения тяжелых металлов (ϵ), % из сточных вод:

— Эффективность извлечения ϵ химического элемента меди (Cu) из фильтрата сточных вод горного производства, выраженная в %, по мере роста времени их взаимодействия с извлекающим отходом железо-магниевого производства (ЖМКС) функционально вогнуто увеличивается от нулевого значения по экспоненте с допустимой среднеквадратической погрешностью 5,6 % и коэффициентом детерминации 0,89, приближаясь асимптотически с временным интервалом релаксации 6,1 мин к максимальному значению 93,33 %.

— Эффективность извлечения ϵ химического элемента цинка (Zn) из фильтрата сточных вод горного производства, выраженная в %, по мере роста времени их взаимодействия с извлекающим отходом железо-магниевого производства (ЖМКС) функционально вогнуто увеличивается от нулевого значения по экспоненте с допустимой среднеквадратической погрешностью 4,0 % и коэффициентом детерминации 0,90, приближаясь асимптотически с временным интервалом релаксации 47,4 мин к максимальному значению 81,89 %.

— Эффективность извлечения ϵ химического элемента кадмия (Cd) из фильтрата сточных вод горного производства, выраженная в %, по мере роста времени их взаимодействия с извлекающим отходом железо-магниевого производства (ЖМКС) функционально вогнуто увеличивается от нулевого значения по экспоненте с допустимой среднеквадратической погрешностью 14,4 % и коэффициентом детерминации 0,85, приближаясь асимптотически с временным интервалом релаксации 55,4 мин к максимальному значению 83,00%.

Также определены оптимальные показатели $t_{\text{опт}}=3\lambda$ применения ЖМКС для извлечения тяжелых металлов из раствора сточных вод:

- Медь (Cu) – 18,3 мин.
- Цинк (Zn) – 142,2 мин.
- Кадмий (Cd) – 166,5 мин.

« $t_{\text{опт}}=\lambda$ » обозначает скорость процесса, при которой достигается эффективное и быстрое удаление основной части загрязнителя из раствора, а также наиболее быстрое приближение к максимальной степени очистки. Эти значения служат отправной точкой для разработки систем водоочистки сточных вод медноколчеданных месторождений, определяя начальные параметры для эффективного удаления металлов. Иными словами,

установленные показатели «топт= λ », полученные на основе выявленных закономерностей, формируют научную базу для разработки технологии проектирования систем водоочистки. Они определяют минимальный предел использования материалов для эффективной очистки сточных вод от металлов. В то время как максимальный (оптимальный) предел задается разработанными технико-технологическими рекомендациями, учитывающими особенности функционирования горнотехнических систем.

Результаты химического анализа полученных фильтратов при времени контакта 120 минут приведены в таблице 8.

Таблица 8 - Результаты химического анализа полученных фильтратов, мг/л (50 мл, 120 минут), [22]

№	Навеска, г	Содержание химических элементов в фильтрате, мг/л				pH
		Cd	Zn	Mg	Cu	
1	0,1	0,20±0,006	42,11±1,34	429,80±8,91	36,83±1,29	4,06±0,01
2	0,2	0,019±0,005	10,24±0,94	642,60±13,04	5,98±0,81	4,52±0,01
3	0,5	0,001±0,0007	0,12±0,011	849,60±14,01	0,09±0,005	5,87±0,01
4	1	< 0,0015	0,10±0,009	1176,20±22,01	0,08±0,04	6,76±0,01
5	1,5	0,005±0,002	0,09±0,003	1539,27±19,23	0,08±0,003	7,37±0,01
6	2	0,008±0,002	0,10±0,001	2153,00±34,41	0,08±0,004	8,01±0,01

Влияние pH и дозировки отходов

pH среды является важным фактором, влияющим на химический состав раствора и эффективность очистки [166, 167], а дозировка исследуемого материала также играет ключевую роль в извлечении металлов [165, 166]. Оптимизация массы отходов важна для эффективного извлечения загрязнителей, так как количество отходов влияет на этот процесс при заданной начальной концентрации загрязнителей [168, 169, 170]. Исследования проводились [22] с массой отходов от 0,1 до 2 г в 50 мл раствора, при постоянной скорости перемешивания (99 об/мин) и комнатной температуре в течение 120 минут (таблица 8). Результаты показали влияние навески отходов на удаление ионов тяжелых металлов, (рисунок 15), [22].

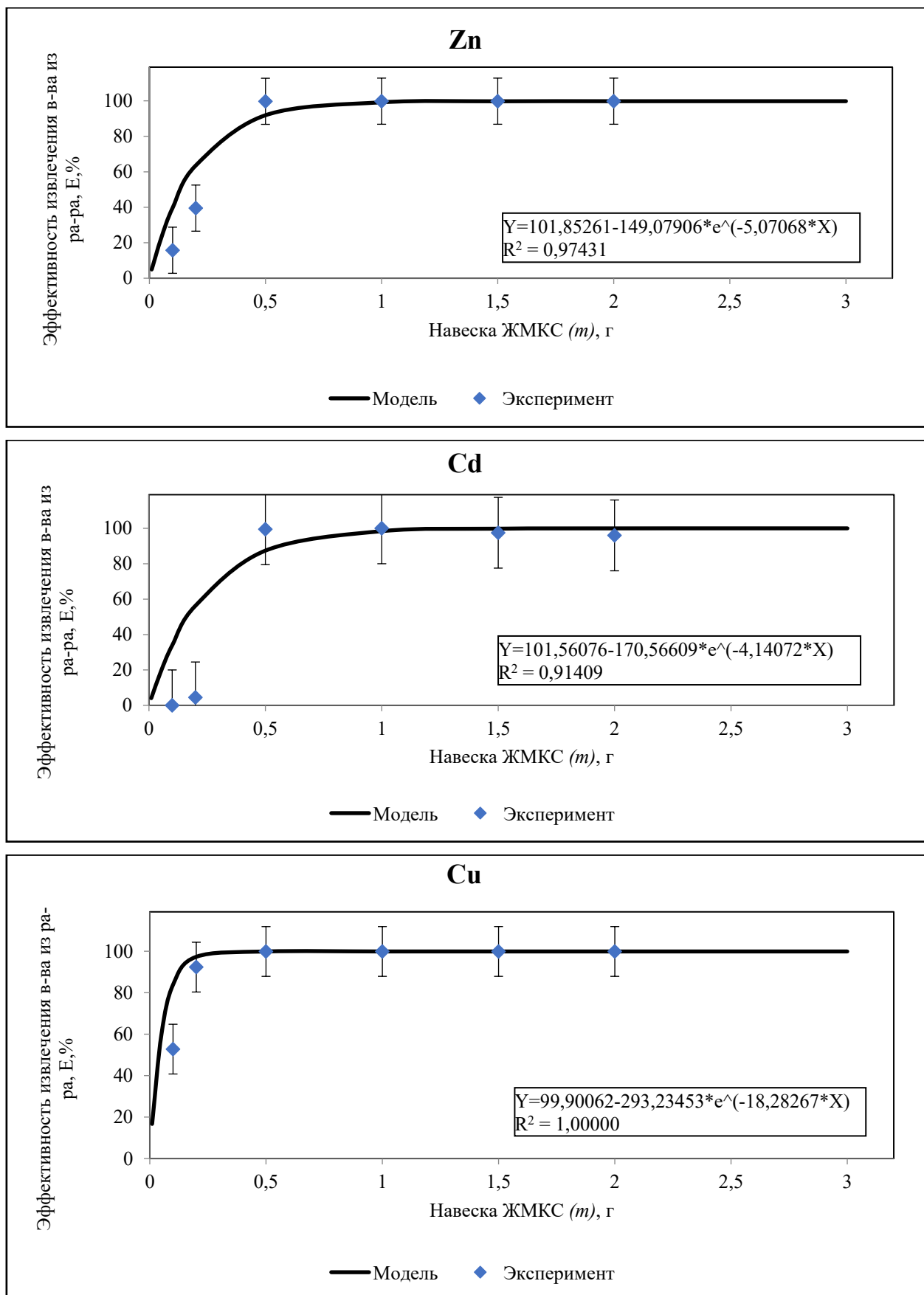


Рис. 15 - Влияние дозировки отходов на степень извлечения ионов из раствора

Увеличение дозировки исследуемого материала [22] приводит к значительному повышению эффективности удаления ионов тяжелых металлов (кадмия, цинка и меди) из раствора (рисунок 15). При минимальной дозировке отходов (0,1 г) наблюдается низкий процент удаления, особенно для кадмия (0%). Однако, при увеличении дозировки до 0,5 г, эффективность удаления для всех трех металлов резко возрастает и приближается к 100%, что свидетельствует о насыщении материала. Наблюдаемая тенденция подтверждается визуальным анализом графиков (рисунок 14, рисунок 15), демонстрирующих четкую зависимость эффективности удаления ионов тяжелых металлов от дозировки используемого материала. Кроме того, на концентрацию ионов магния в фильтрате влияет как pH, так и масса навески исследуемого материала (рисунок 16), [22].

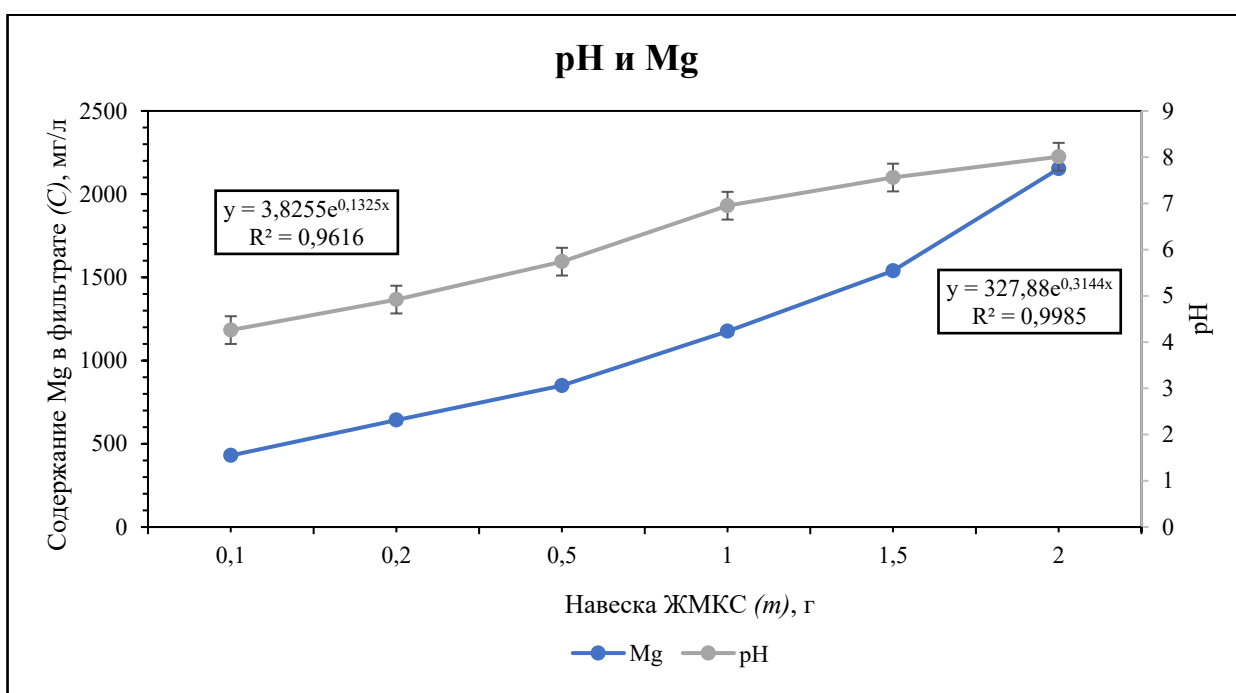


Рис. 16 - Изменение pH фильтратов относительно концентрации Mg в растворе

Наблюдается увеличение pH фильтратов с ростом массы навески испытуемого материала (таблица 8), так как отходы железо-магниевого производства имеют щелочной pH (8,7) из-за высокого содержания магния, что приводит к нейтрализации кислых подотвальных вод с начальным pH 2,33 [22]. Эта взаимосвязь между массой навески и pH фильтрата показана на рисунке 16.

После обработки полученных данных были установлены зависимости и выявлены закономерности влияния дозировки ЖМКС (m), г, на эффективность извлечения тяжелых металлов (ϵ), % из сточных вод:

— Эффективность извлечения ϵ химического элемента меди (Cu) из фильтрата сточных вод горного производства, выраженная в %, по мере роста дозировки (m), z . извлекающего отхода железо-магниевого производства (ЖМКС) функционально вогнуто увеличивается от нулевого значения по экспоненте с допустимой среднеквадратической погрешностью 12,4 % и коэффициентом детерминации 1,00, приближаясь асимптотически с временным интервалом релаксации 0,1 г. к максимальному значению 99,99 %.

— Эффективность извлечения ϵ химического элемента цинка (Zn) из фильтрата сточных вод горного производства, выраженная в %, по мере роста дозировки (m), z . извлекающего отхода железо-магниевого производства (ЖМКС) функционально вогнуто увеличивается от нулевого значения по экспоненте с допустимой среднеквадратической погрешностью 13,8 % и коэффициентом детерминации 0,97, приближаясь асимптотически с временным интервалом релаксации 0,2 г. к максимальному значению 99,80 %.

— Эффективность извлечения ϵ химического элемента кадмия (Cd) из фильтрата сточных вод горного производства, выраженная в %, по мере роста дозировки (m), z . извлекающего отхода железо-магниевого производства (ЖМКС) функционально вогнуто увеличивается от нулевого значения по экспоненте с допустимой среднеквадратической погрешностью 19,8 % и коэффициентом детерминации 0,91, приближаясь асимптотически с временным интервалом релаксации 0,2 г. к максимальному значению 99,99 %.

— Увеличение дозировки (m), z ЖМКС с 0,1 до 2 г. экспоненциально влияет на содержание (C) магния (Mg), вызывая рост до 2153,00 мг/л и pH фильтрата до 8,01.

Также определены оптимальные показатели $m_{opt}=2,5\lambda$ применения ЖМКС для извлечения тяжелых металлов из раствора сточных вод:

— Медь (Cu) – 0,25 г.

— Цинк (Zn) – 0,5 г.

— Кадмий (Cd) – 0,5 г.

Элементный анализ отходов

Результаты элементного анализа, представленные в таблица 9, демонстрируют способность отходов железо-магниевого производства к извлечению ионов металлов из модельного раствора промышленных сточных вод. Количественные данные, отраженные в таблице 9, позволяют оценить эффективность извлечения различных металлов отходами. Данный факт указывает на потенциал использования этих отходов в качестве материалов для очистки промышленных сточных вод, содержащих аналогичные концентрации загрязнителей [22].

Таблица 9 - Результаты элементного анализа отходов после взаимодействия со сточным водами, мг/кг (Валовое содержание), [22]

№	Время контакта, мин	Содержание химических элементов в отходе, мг/кг					
		Cd	Zn	Co	Mg	Cu	Fe
1	5	1,20±0,03	120,54±1,23	100,00±1,75	10021,32±1948,24	351,21±25,04	61819,25±2948,47
2	10	1,25±0,03	127,50±1,41	131,75±2,37	16822,50±2821,52	407,75±21,48	73386,34±3645,75
3	15	2,21±0,09	615,54±29,47	135,11±2,04	28983,21±3948,63	885,37±36,94	64528,73±3562,74
4	30	3,00±0,14	844,04±41,22	140,25±3,17	32430,64±4958,01	3354,01±138,04	68945,50±3465,39
5	60	3,75±0,02	1035,09±28,98	169,24±4,08	27562,21±4756,06	4137,50±241,10	69746,25±2547,05
6	120	3,78±0,16	1041,66±21,84	154,32±5,19	24842,30±2484,05	3775,32±194,90	61207,93±2567,93
7	180	3,54±0,17	663,99±17,38	96,22±2,28	17594,54±1875,75	1499,55±53,10	62641,50±2857,05

Результаты исследований [22] демонстрируют увеличение количества частиц металлов в отходах со временем, достигая максимума при 120 минутах контакта, после чего наблюдается снижение концентраций (таблица 9). Анализ состава отходов железо-магниевого производства после взаимодействия со сточными водами выявил увеличение концентраций Cd, Zn, Fe и Cu по сравнению с исходными образцами при увеличении времени контакта с 5 до 120 минут, а также значительное снижение содержания Mg [22].

Отходы железо-магниевого производства демонстрируют выраженную эффективность в удалении ионов кадмия (Cd), цинка (Zn), кобальта (Co) и меди (Cu) из промышленных сточных вод. Эффективность процесса очистки существенно зависит от оптимизации ключевых параметров, таких как дозировка отходов, время контакта, начальная концентрация ионов металлов и pH среды. Оптимальные условия для очистки достигаются при времени контакта 120-180 минут, дозировке отходов в диапазоне 4-10 г/л и ограничении начальной концентрации металлов (Cd, Zn, Cu) величиной не более 500 мг/л [22]. Выявленные зависимости подчеркивают необходимость тщательного контроля и оптимизации параметров процесса для достижения максимальной эффективности очистки промышленных сточных вод с использованием отходов железо-магниевого производства [22].

3.2.2 Исследование эффективности применения отходов производства гуминовых препаратов (ОГП) для очистки сточных вод

Проведенное исследование [151] направлено на оценку пригодности отходов гуминовых препаратов (ОГП) для доочистки сточных вод, загрязненных ионами металлов. В рамках работы изучалось влияние ключевых факторов, таких как начальная

концентрация металлов, время контакта ОГП с водой, дозировка ОГП и pH среды, на эффективность процесса очистки [171, 172, 173]. Анализ влияния этих факторов позволит определить оптимальные условия для использования ОГП в качестве материала для очистки сточных вод от металлов. Положительные результаты данного исследования послужат обоснованием для применения ОГП, являющихся по сути промышленными отходами, в качестве эффективного и экологически безопасного материала для очистки и доочистки сточных вод. В конечном итоге, это может способствовать разработке эффективных мероприятий по экологической реабилитации водных объектов, снижая антропогенную нагрузку на окружающую среду и улучшая качество водных ресурсов [151].

Влияние начальной концентрации ионов металлов на очистку сточных вод

На эффективность удаления ионов металлов из воды существенно влияет их начальная концентрация [174]. Проведено исследование для оценки этого влияния и определения оптимальных концентраций для эффективного удаления металлов. Результаты, представленные на рисунке 17, демонстрируют зависимость статической обменной емкости отходов гуминовых препаратов (ОГП) по отношению к меди, цинку, кадмию и магнию от их начальной концентрации в растворе [151].

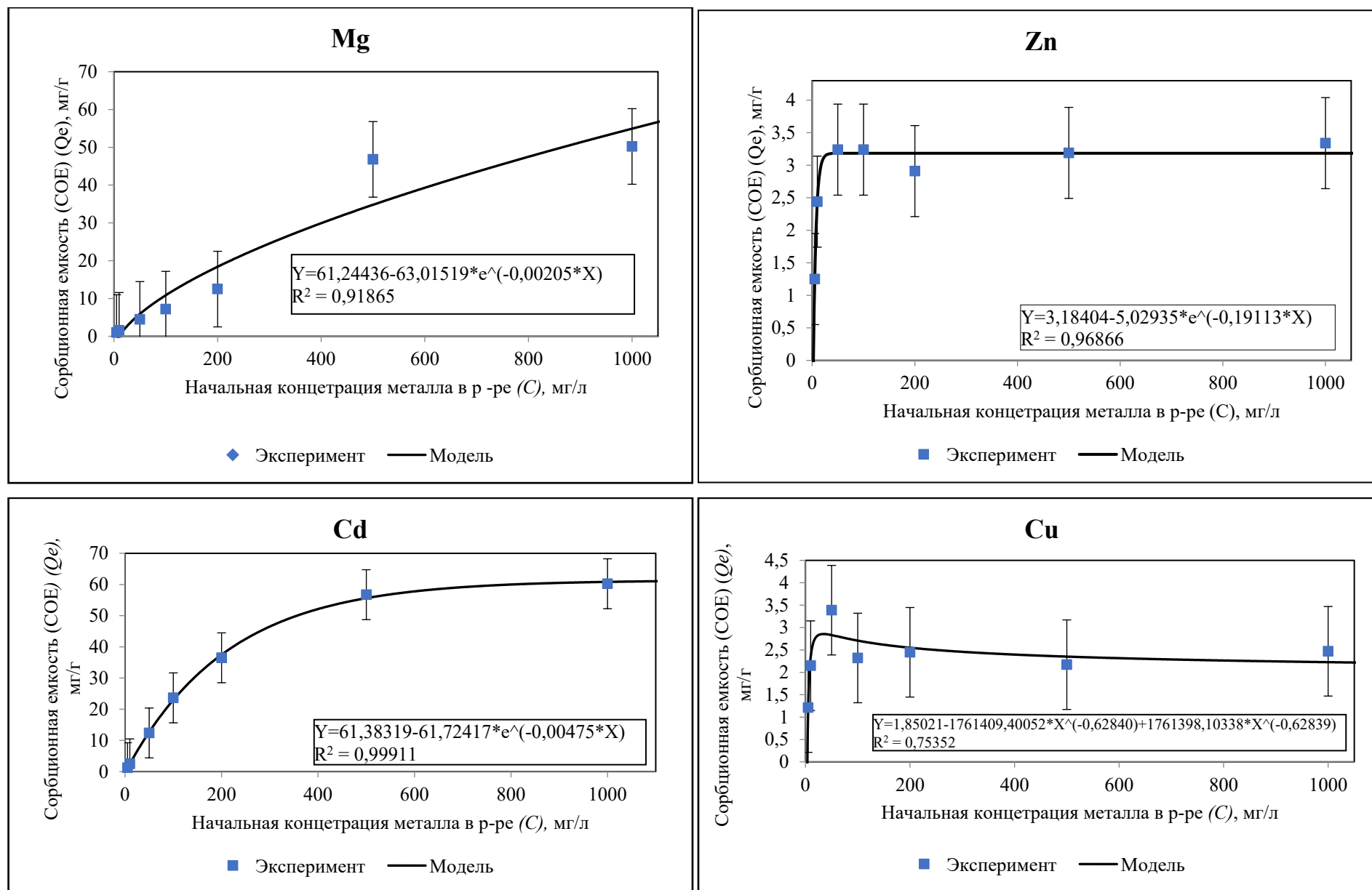


Рис. 17 - Влияние начальной концентрации металлов в растворе на сорбционную емкость ОГП

Динамика удаления металлов отходами гуминовых препаратов (ОГП) различна (рисунок 17): для меди и цинка быстрое извлечение наблюдается при 5-50 мг/л, затем скорость снижается, а при концентрациях выше 500 мг/л наступает равновесие, тогда как для магния и кадмия поглощение возрастает с концентрацией [88, 90, 91]. Это значит, что ОГП неэффективны при высокой концентрации Cu и Zn (более 50 мг/л), но пригодны для доочистки до уровня ПДК. Механизм включает пленочную диффузию и проникновение ионов металлов в структуру материала [151].

После обработки полученных данных были установлены зависимости и выявлены закономерности влияния концентраций тяжелых металлов (C) в растворах на сорбционную емкость (Q_e) ОГП:

Сорбционная емкость (Q_e), мг/г материала ОГП (y) возрастает (до 3,38 – Cu и до 3,34 мг/г - Zn) с увеличением начальной концентрации (C) Cu и Zn (x) в растворе, приближаясь к насыщению при концентрациях > 50 мг/л.

Сорбционная емкость (Q_e), мг/г материала ОГП (y) для кадмия и магния описывается экспоненциальной зависимостью от начальной концентрации (C) металлов (x), приближаясь к асимптотическому значению при высоких концентрациях > 500 мг/л для Cd – 60,24 и Mg – 50,25 мг/г.

Влияние времени контакта и дозировки

Процесс извлечения металлов из водного раствора исследовался в лабораторных условиях путем варьирования массы отходов (от 0,1 г до 2 г) в 50 мл раствора. Эксперимент проводился при постоянной концентрации металлов, скорости перемешивания 99 об/мин и комнатной температуре в течение 120 минут. В качестве модельного раствора, имитирующего сточные воды, использовались карьерные воды, предварительно обработанные отходами железо-магниевого производства с месторождения Кабан-1. Полученные результаты [151], характеризующие зависимость извлечения металлов от массы отходов, представлены в таблице 10 и на рисунке 18.

Таблица 10 - Результаты химического анализа полученных фильтратов, мг/л
(Обработанные сточные воды Кабан-1; 50 мл; 120 минут)

№	Навеска, г	Содержание химических элементов в фильтрате, мг/л				pH
		Cd	Zn	Mg	Cu	
1	0,1	0,007±0,001	0,15±0,02	953,14±55,16	0,073±0,01	6,25±0,01
2	0,2	0,003±0,001	0,1±0,02	857,11±47,21	0,039±0,01	6,78±0,01
3	0,5	< 0,0015	< 0,0016	931,10±45,24	< 0,0012	7,03±0,01
4	1	< 0,0015	< 0,0016	932,05±43,42	< 0,0012	6,99±0,01
5	1,5	< 0,0015	< 0,0016	946,41±40,56	< 0,0012	6,9±0,01
6	2	< 0,0015	< 0,0016	992,94±44,15	< 0,0012	6,78±0,01

Проведенные исследования продемонстрировали прямую зависимость между дозировкой отходов гуминовых препаратов (ОГП) и эффективностью удаления металлов из водного раствора. Увеличение дозировки ОГП приводит к росту степени очистки, вплоть до достижения практически полного (100%) удаления металлов. Данный эффект объясняется увеличением количества доступных активных центров на поверхности ОГП, способных связывать ионы металлов, что, в свою очередь, повышает общую сорбционную способность системы и обеспечивает более эффективное удаление металлов из раствора [151, 176, 177]. Таким образом, для достижения максимальной эффективности очистки рекомендуется использовать оптимальную дозировку ОГП, определяемую с учетом характеристик конкретного стока и требуемой степени очистки. После достижения определенной дозировки, увеличение количества ОГП не приводит к дальнейшему повышению эффективности удаления меди, кадмия и цинка из раствора. При взаимодействии ОГП со сточными водами образуются практически нерастворимые соединения, что связано с наличием кремнезема в диатомите, используемом в качестве исходного сырья для производства гумата калия [151].

После обработки полученных данных были установлены зависимости и выявлены закономерности влияния дозировки ОГП (m), г, на эффективность извлечения тяжелых металлов (ϵ), % из сточных вод:

— Эффективность извлечения ϵ химического элемента меди (Cu) из фильтрата сточных вод горного производства, выраженная в %, по мере роста дозировки (m), г, извлекающего отходов гуминовых препаратов (ОГП) функционально вогнуто увеличивается от нулевого значения по экспоненте с допустимой среднеквадратической

погрешностью 10,1 % и коэффициентом детерминации 0,99, приближаясь асимптотически с временным интервалом релаксации 0,1 г. к максимальному значению 99,99 %.

— Эффективность извлечения ε химического элемента цинка (Zn) из фильтрата сточных вод горного производства, выраженная в %, по мере роста дозировки (m), *г*р извлекающего отходов гуминовых препаратов (ОГП) функционально вогнуто увеличивается от нулевого значения по экспоненте с допустимой среднеквадратической погрешностью 9,8 % и коэффициентом детерминации 0,98, приближаясь асимптотически с временным интервалом релаксации 0,2 г. к максимальному значению 99,99 %.

— Эффективность извлечения ε химического элемента кадмия (Cd) из фильтрата сточных вод горного производства, выраженная в %, по мере роста дозировки (m), *г*р извлекающего отходов гуминовых препаратов (ОГП) функционально вогнуто увеличивается от нулевого значения по экспоненте с допустимой среднеквадратической погрешностью 11,6 % и коэффициентом детерминации 0,99, приближаясь асимптотически с временным интервалом релаксации 0,1 г. к максимальному значению 99,99 %.

Также определены оптимальные показатели $m_{\text{опт}}=2,5\lambda$ применения ЖМКС для извлечения тяжелых металлов из раствора сточных вод:

- Медь (Cu) – 0,25 г.
- Цинк (Zn) – 0,5 г.
- Кадмий (Cd) – 0,25 г.

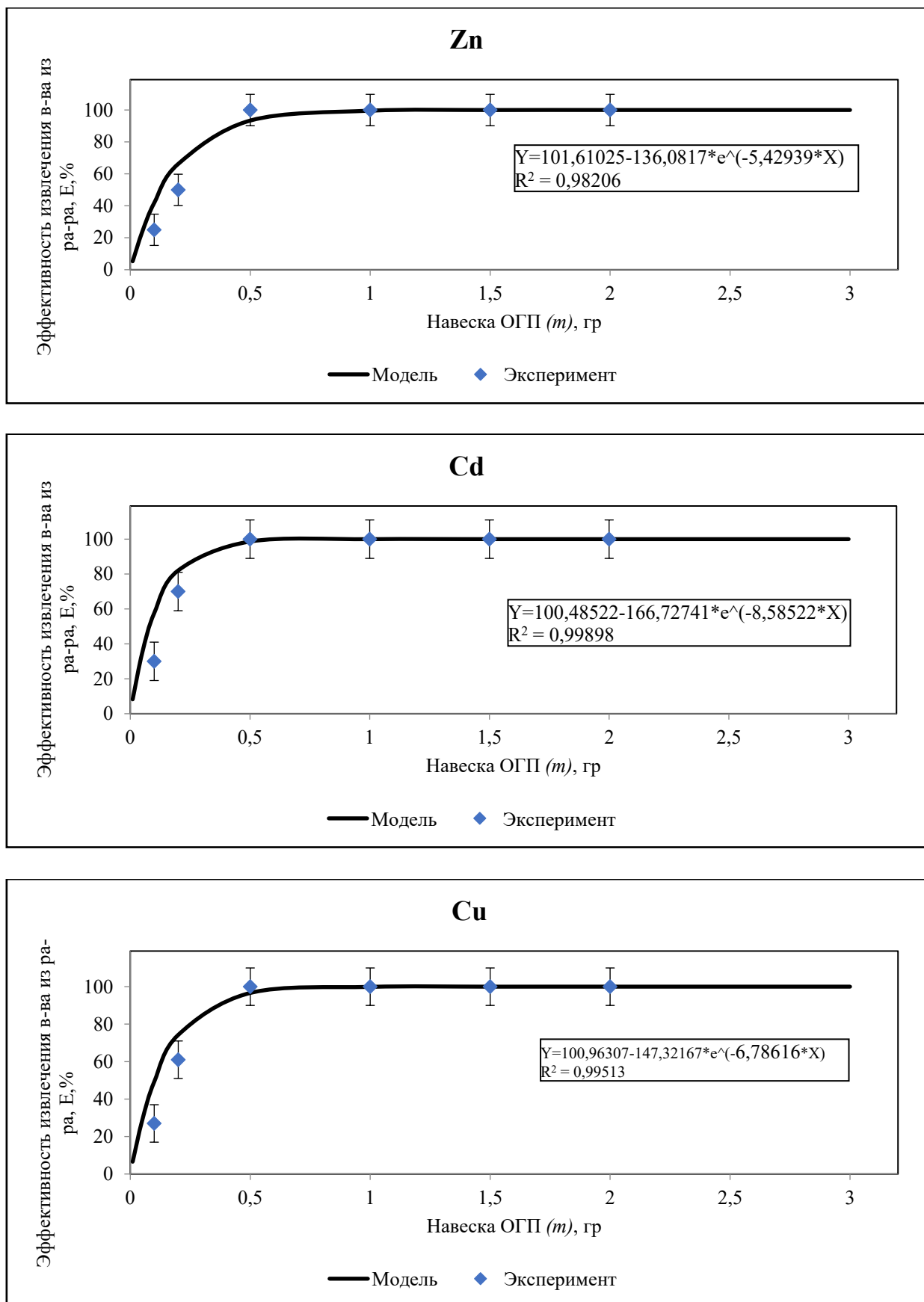


Рис. 18 - Влияние дозировки ОГП на степень извлечения металлов из раствора
 (Обработанные сточные воды Кабан-1)

Следующим этапом исследования стало изучение влияния времени контакта между ОГП и сточными водами на эффективность удаления ионов металлов для определения оптимального времени достижения уровня ПДК [151]. Оптимизация времени контакта необходима для достижения максимальной эффективности очистки при минимальных затратах времени и энергии: слишком короткое время может привести к неполному удалению загрязнителей, а слишком длинное – к неоправданным затратам [151]. Оптимальное время контакта напрямую влияет на экономическую эффективность процесса, снижая затраты и повышая производительность. Экспериментальное исследование проводилось при постоянной концентрации раствора (таблица 11) с варьированием времени контакта от 5 до 180 минут при комнатной температуре (рисунок 19), [151].

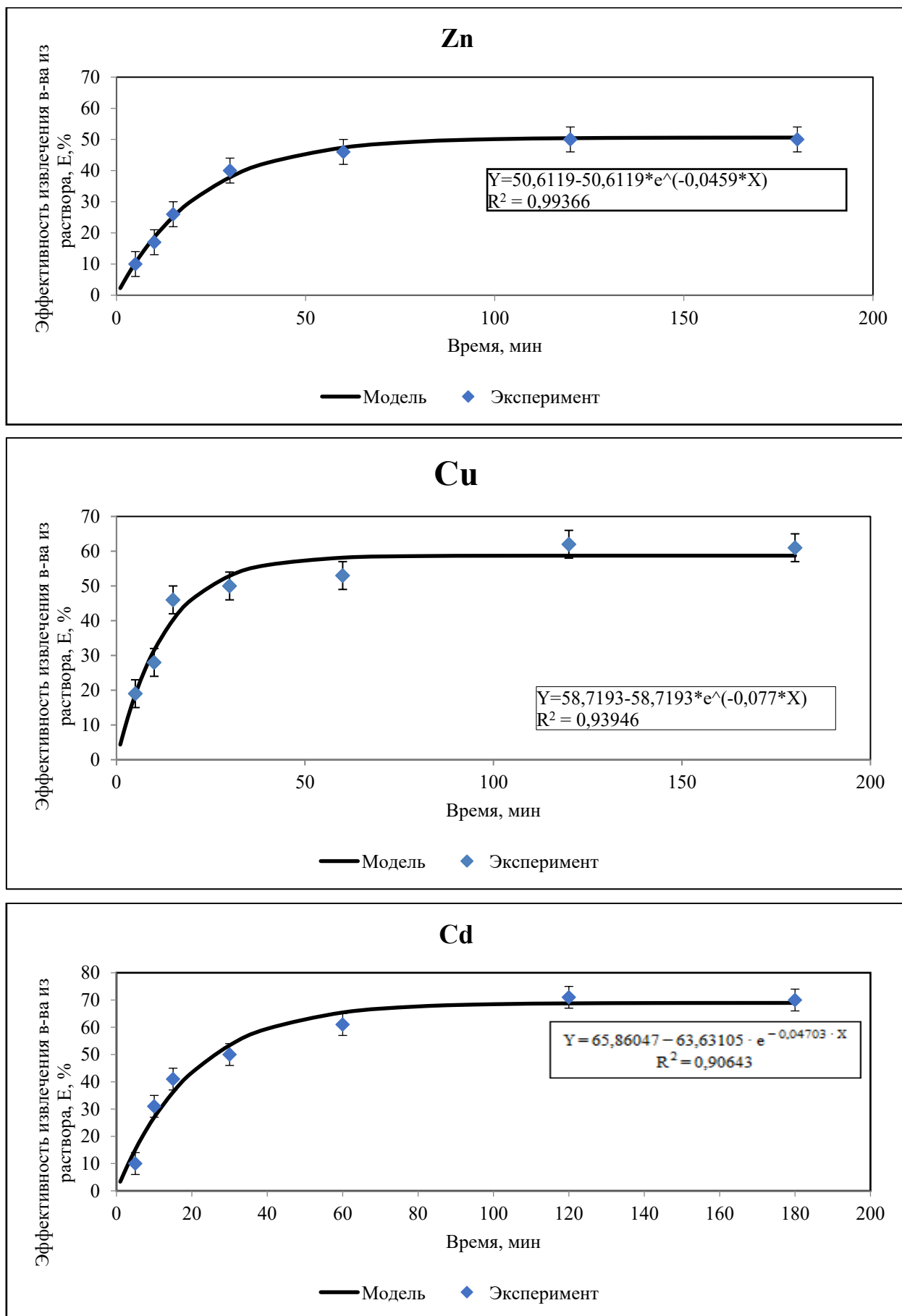


Рис. 19 - Влияние времени контакта на степень извлечения металлов из раствора.
 (Обработанные сточные воды Кабан-1)

После обработки полученных данных были установлены зависимости и выявлены закономерности влияния времени контакта (t), мин на эффективность извлечения тяжелых металлов (ϵ), % из сточных вод:

— Эффективность извлечения ϵ химического элемента меди (Cu) из фильтрата сточных вод горного производства, выраженная в %, по мере роста времени их взаимодействия с извлекающим отходом гуминовых препаратов (ОГП) функционально вогнуто увеличивается от нулевого значения по экспоненте с допустимой среднеквадратической погрешностью 4,0 % и коэффициентом детерминации 0,93, приближаясь асимптотически с временным интервалом релаксации 13 мин к максимальному значению 58,72 %.

— Эффективность извлечения ϵ химического элемента цинка (Zn) из фильтрата сточных вод горного производства, выраженная в %, по мере роста времени их взаимодействия с извлекающим отходом гуминовых препаратов (ОГП) функционально вогнуто увеличивается от нулевого значения по экспоненте с допустимой среднеквадратической погрешностью 1,3 % и коэффициентом детерминации 0,99, приближаясь асимптотически с временным интервалом релаксации 21,8 мин к максимальному значению 50,61 %.

— Эффективность извлечения ϵ химического элемента кадмия (Cd) из фильтрата сточных вод горного производства, выраженная в %, по мере роста времени их взаимодействия с извлекающим отходом гуминовых препаратов (ОГП) функционально вогнуто увеличивается от нулевого значения по экспоненте с допустимой среднеквадратической погрешностью 4,1 % и коэффициентом детерминации 0,97, приближаясь асимптотически с временным интервалом релаксации 20,2 мин к максимальному значению 68,95%.

Также определены оптимальные показатели $t_{\text{опт}}=3\lambda$ применения ОГП для извлечения тяжелых металлов из раствора сточных вод:

- Медь (Cu) – 39 мин.
- Цинк (Zn) – 65,4 мин.
- Кадмий (Cd) – 60,6 мин.

Анализ элементного состава фильтратов, полученных после обработки сточных вод ОГП, демонстрирует значительное изменение концентраций исследуемых металлов (Cd, Zn, Mg, Cu) в зависимости от времени контакта [151]. Наблюдаемые колебания концентраций (Cd: 0,009-0,003 мг/л, Zn: 0,18-0,10 мг/л, Mg: 995,45-854,55 мг/л, Cu: 0,08-0,04 мг/л) указывают на динамический характер процессов химического взаимодействия

между ОГП и компонентами сточных вод. Полученные данные существенны для оптимизации процесса очистки, так как позволяют определить оптимальное время контакта ОГП со сточными водами для достижения максимально эффективного снижения концентрации загрязняющих веществ до уровня, соответствующего предельно допустимым концентрациям (ПДК), (таблица 11), [151].

Таблица 11 - Результаты химического анализа полученных фильтратов, (Обработанные сточные воды Кабан-1; 50 мл; 0,2 г.) мг/л

№	Время контакта,	Содержание химических элементов в фильтрате, мг/л				pH
		Cd	Zn	Mg	Cu	
1	5	0,009±0,001	0,18±0,03	995,45±52,14	0,08±0,02	6,05±0,01
2	10	0,007±0,001	0,17±0,02	994,51±54,21	0,07±0,02	6,11±0,01
3	15	0,006±0,001	0,15±0,02	854,25±56,12	0,05±0,02	6,25±0,01
4	30	0,005±0,001	0,12±0,02	966,32±50,11	0,05±0,02	6,52±0,01
5	60	0,005±0,001	0,11±0,01	854,55±56,87	0,04±0,01	6,70±0,01
6	120	0,003±0,001	0,10±0,02	857,11±47,21	0,03±0,01	6,78±0,01
7	180	0,003±0,001	0,10±0,02	905,84±67,14	0,04±0,01	6,82±0,01

Таким образом, максимальная эффективность удаления меди, кадмия и цинка достигается в промежутке 120-180 минут, и дальнейшее увеличение времени контакта не приводит к значимым улучшениям [151]. Важно отметить, что концентрация магния в фильтратах оказалась выше исходного уровня в сточной воде, что указывает на менее эффективное удаление ионов магния из реальных сточных вод по сравнению с модельными растворами. Это подчеркивает необходимость проведения дополнительных исследований с различными составами сточных вод для совершенствования систем водоочистки при разработке медноколчеданных месторождений [151].

Для оценки риска повторного загрязнения после использования ОГП был проведен химический анализ образцов, контактировавших со сточными водами [151]. Этот анализ позволил определить состав загрязнителей, перешедших из ОГП в воду. В дополнение к этому, были зафиксированы исходные концентрации металлов в самом материале ОГП до начала эксперимента, что необходимо для сравнения и оценки масштаба потенциального загрязнения (таблица 12).

Таблица 12 - Результаты химического анализа ОГП после процесса взаимодействия со сточными водами

Элемент	Валовые формы, мг/кг (До взаимодействия)	Валовые формы, мг/кг (После взаимодействия)	Подвижные, мг/кг (После взаимодействия)	ПДК, мг/кг ¹ (валовая/подвижная формы)
Cu	0,81±0,10	9,68±1,58	1,53±0,25	33/3
Zn	4,38±0,98	21,75±4,58	4,25±0,89	55/23
Cd	< 0,0015	< 0,0015	< 0,0015	0,5/Не установлена
Co	0,20±0,05	4,35±1,25	0,98±0,10	-/5,0
Mg	1504,31±354,44	1305,40±299,45	602,93±154,45	Не установлена
Mn	21,27±3,47	22,03±3,33	4,03±0,78	1500/700
K	36540,38±3548,21	3628,68±454,68	1245,39±248,45	Не установлена
Fe	2485,93±384,49	2490,38±335,24	1300,58±224,87	Не установлена

Предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) взяты на основании:

¹СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».

Анализ элементного состава ОГП до и после взаимодействия со сточными водами выявил значительные изменения в содержании ряда элементов. Исходный состав ОГП характеризуется высоким содержанием магния (1504,31 мг/кг), калия (36540,38 мг/кг), железа (2485,93 мг/кг) и марганца (21,27 мг/кг). После эксперимента наблюдалось уменьшение концентрации магния (до 1305,40 мг/кг) и калия (до 3628,68 мг/кг), что может свидетельствовать о вымывании этих элементов из ОГП в водную среду. В то же время, зафиксировано значительное увеличение концентрации меди (с 0,81 до 9,68 мг/кг), цинка (с 4,38 до 21,75 мг/кг) и кобальта (с 0,20 до 4,35 мг/кг), что указывает на поглощение данных металлов из сточных вод на ОГП [151].

Эксперименты по доочистке предварительно обработанных сточных подотвальных вод месторождения Кабан-1 позволили установить оптимальные условия для очистки. Максимальная эффективность процесса достигается в диапазоне времени контакта от 120 до 180 минут при дозировке ОГП 10 г/л (навеска 0,5 г), [151].

Установлено, что эффективность извлечения металлов из раствора с помощью ЖМКС и ОГП зависит от начальной концентрации металлов в данном растворе. Для ЖМКС эффективность извлечения увеличивается при повышении начальной концентрации металлов до 500 мг/л (Cu, Zn, Cd), [22]. ОГП неэффективен для извлечения высоких концентраций меди и цинка (более 50,00 мг/л). Может быть использован для доочистки сточных вод с низкими концентрациями этих металлов [151].

Оптимальное время контакта между отходами и сточными водами для эффективного удаления металлов составляет от 120 до 180 минут. Значение pH раствора увеличивается с

увеличением массы испытуемого материала, что связано с щелочной природой отходов (рН 8,01- 8,70) и с увеличением Mg в растворе. Оптимальная навеска отходов для эффективного удаления металлов составляет 0,5 г, что соответствует дозировке 10 г/л [151].

Исследования демонстрируют перспективность применения отходов железомagneзиевого и гуминового производств для очистки сточных вод, загрязненных при разработке медноколчеданных месторождений. Этот подход представляет интерес для совершенствования систем водоочистки и способствует устойчивому развитию горнотехнических систем [151].

3.3 Выводы к третьей главе

1. Для достижения высокой эффективности (до 99,99%) удаления тяжелых металлов (Cu, Zn, Cd, Fe) из высокоминерализованных кислых подотвальных вод (рН 2,33-2,91) необходимо последовательное применение ЖМКС и ОГП в дозировке 10 г/л при времени контакта 120-180 минут. Эффективность ЖМКС повышается при увеличении начальной концентрации металлов до 500,00 мг/л, в то время как ОГП лучше подходит для доочистки вод с низкими концентрациями меди и цинка (менее 50,00 мг/л).

2. Увеличение дозировки ЖМКС от 0,1 до 2 г приводит к экспоненциальному росту содержания магния (Mg) в растворе до 2153,00 мг/л, что, в свою очередь, вызывает повышение рН фильтрата до 8,01.

3. Эффективность извлечения меди, цинка и кадмия из сточных вод с использованием ЖМКС демонстрирует экспоненциальное увеличение с ростом времени контакта и дозировки ЖМКС. При этом, эффективность извлечения меди достигает максимального значения 93,33% с временным интервалом релаксации 6,1 мин, а цинка и кадмия – 81,89% и 83,00% соответственно, с более длительными интервалами релаксации (47,4 и 55,4 мин). Увеличение дозировки ЖМКС приводит к достижению максимальной эффективности извлечения, стремящейся к 99,99% для меди и кадмия, и 99,80% для цинка, с интервалами релаксации 0,1-0,2 г.

4. Применение ОГП для извлечения меди, цинка и кадмия из сточных вод также демонстрирует экспоненциальное увеличение эффективности с ростом дозировки и времени контакта. Увеличение дозировки ОГП приводит к достижению высокой эффективности извлечения, стремящейся к 99,99% для всех трех металлов, с интервалом релаксации 0,1-0,2 г. Однако, эффективность извлечения при увеличении времени контакта достигает значительно более низких максимальных значений (медь – 58,72%, цинк – 50,61%, кадмий – 68,95%), с интервалами релаксации 13-21,8 мин.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА БЕЗОТХОДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ СИСТЕМ ВОДООЧИСТКИ ПРИ ОСВОЕНИИ МЕДНОКОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ И ОЦЕНКА ИХ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

4.1 Техничко-технологические рекомендации по очистке высокоминерализованных сточных вод от тяжелых металлов с применением ЖМКС и ОГП

Проведенные ранее эксперименты [22, 35, 151] подтвердили возможность использования ЖМКС и ОГП в целях нейтрализации промышленных сточных вод от металлов (Cd, Zn, Fe, Cu). Экспериментально выявлены закономерности, определяющие эффективность процесса, что является основой для разработки технико-технологических рекомендаций на этапе проектирования систем водоочистки, позволяющих оптимизировать расход реагентов и сорбентов с учетом особенностей функционирования ГТС.

Оптимальные параметры использования ЖМКС и ОГП:

- время контакта 120-180 минут;
- дозировка до 10 г/л;
- исходная концентрация ионов металлов не более 500 мг/л для ЖМКС и 50 мг/л для ОГП.

Для получения ЖМКС и ОГП производственные отходы предварительно высушивают (допустимая влажность составляет не более 10%) и измельчают посредством применения дробильно-сушильного оборудования (рисунок 20). Внутри оборудования, под действием высокоскоростного потока горячего воздуха, материал дробится, проходит процессы столкновения, трения и срезания.

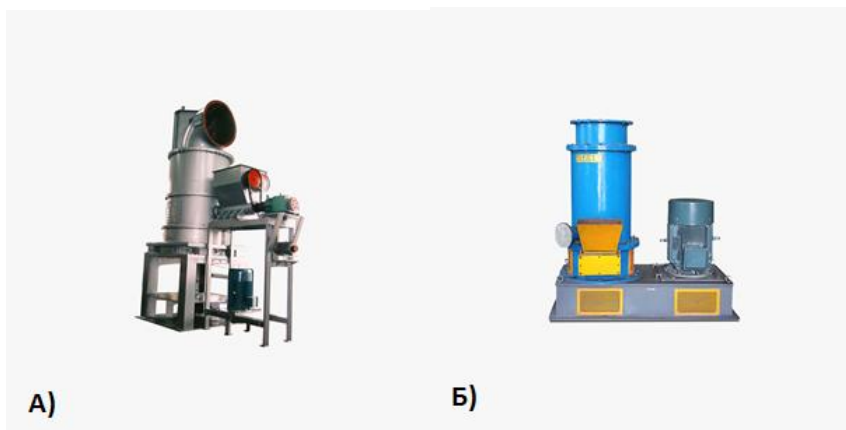


Рис. 20 - Дробильно-сушильное оборудование а) Многофункциональная мощная сушилка серии QGS; б) Роторная мельница для сушки, диспергации и модификации

После обработки готовый продукт (ЖМКС и ОГП) собирается в специальное приемное устройство и упаковывается в синтетическую ткань.

Технологический процесс

В целях обеспечения целостности технологического процесса очистки сточных вод от металлов с помощью отходов производств создается гидротехнические сооружения виде каскада прудов.

Технологическая схема очистки сточных промышленных вод от металлов с применением ЖМКС и ОГП приведена на (рисунок 21).

Предварительно поток сточных высокоминерализованных вод аккумулируется в пруде-отстойнике (усреднитель) для отстаивания, усреднения и дальнейший очистки. Усреднитель также служит для сбора поверхностных стоков с территорий во время интенсивного дождя, либо в паводковый период и их смешения со сточными водами.

Далее два пруда, непосредственно предназначенные для поэтапной очистки, каждый из которых оборудован аэратором, обеспечивающим как насыщение воды кислородом, так и предотвращения ее застоя.

Первый этап очистки, представляющий собой осаждение с использованием реагента ЖМКС. Включает нейтрализацию тяжелых металлов, образование осадка, увеличение концентрации магния в растворе и повышение pH. Далее следует сушка осадка и его грануляция для получения мелиоранта ФММ.

Второй этап очистки, а именно сорбция, проводится с применением ОГП. На этом этапе происходит доочистка сточных вод от меди, кадмия и цинка. Процесс также сопровождается увеличением концентрации калия в растворе, повышением pH до нейтрального значения, сушкой осадка и его грануляцией для получения мелиоранта ГМ.

Аккумуляция уже очищенных вод перед сбросом в поверхностные водные объекты или использованием для технических нужд предусмотрена в пруду накопителе. Пруды позволяют сглаживать неравномерный приток очищенной воды, что особенно важно при работе с переменным объемом стоков. Объем сооружения должен соответствовать трехдневному объему поступления сточных вод и требованиям к качеству очищенной воды.

Пруды представляют собой земляное сооружение, объемом от 5000 до 15000 м³.

В целях предотвращения загрязнения подземных вод и прилегающей территории предусматривается устройство сплошного противofiltrационного экрана в основании.

Для создания эффективного противofiltrационного экрана рекомендуется применять полимерные листы (геомембраны) типа 5/2, имеющие защитно-дренажное покрытие с обеих сторон. Характеристики этого материала должны полностью отвечать требованиям и стандартам, прописанным в ГОСТ 10354-82 для пленки марки Вс

(бесцветной, обработанной сажей для устойчивости к внешним воздействиям, высшего качества). Согласно санитарным нормам (СанПиН 2.1.3684-21, пункт 4.23), гидроизоляционный материал должен иметь документы, подтверждающие его соответствие стандартам безопасности и гигиеническое заключение.

Для предохранения геомембраны от возможных повреждений механического характера, её необходимо располагать между двумя слоями геотекстиля, изготовленного из нетканого материала. Альтернативный вариант – использование полимерного листа с защитно-дренажным покрытием, созданного на базе гладкой геомембраны тип 1, соединенной методом термоскрепления с нетканым синтетическим материалом из полипропилена (геотекстилем). Такой подход позволяет эффективно защитить геомембрану от повреждений в процессе строительства объектов на нестабильных грунтах, а также на грунтах, содержащих острые включения размером до 40 мм.

Необходимые характеристики полимерного материала:

- прочность при растяжении, не менее: в продольном направлении - 13,7 МПа, в поперечном направлении - 12,7 МПа;
- относительное удлинение при разрыве, не менее: в продольном направлении - 350%, в поперечном направлении - 400%;
- морозостойкость материала должна быть не выше минус 60° С.

Полимерный материал экрана укладывается по дну и откосам ёмкостей прудовосстанавливающих единое гидротехническое сооружение.

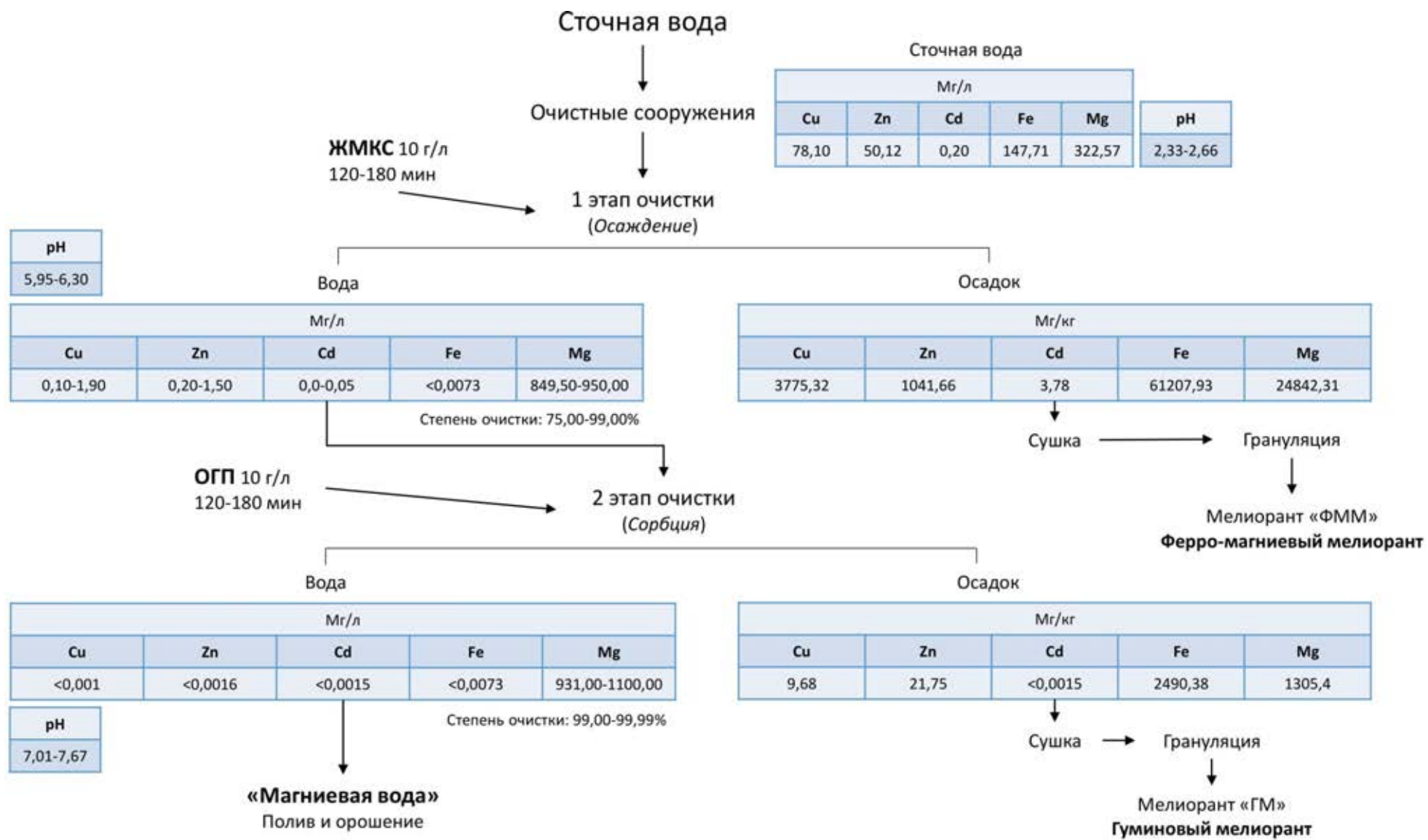


Рис. 21 - Технологическая схема очистки высокоминерализованных сточных вод от металлов (Cu, Zn, Cd, Fe) с применением ЖМКС и ОГП

Последовательность действий

Сточная вода объемом 1591 м³/сутки поступает в пруд-отстойник, представляющим собой грунтовую выемку объемом 5000м³ и размерами Ш 15 х Д 75 Г 4,5 м. Химический состав воды, поступающей на очистку указан в таблице 13.

Далее с помощью насосов вода перекачивается в пруды с аэраторами с аналогичными размерами и объемами (1-2 этапы очистки).

На 1 этапе очистки в пруд опускается предварительно подготовленный материал – ЖМКС с дозировкой 10 г/л на время, не превышающее 180 минут.

Осадок извлекается по мере накопления, затем гранулируется для дальнейшего использования в качестве мелиорантов (ФММ), а сточная вода с помощью насосов перекачивается в следующий пруд для второго этапа очистки.

На втором этапе применяют сорбент ОГП с целью снижения остаточных концентраций меди, цинка и кадмия до уровня рыбохозяйственного значения, а также увеличения содержания калия в растворе.

Дозировка ОГП – 10 г/л в время взаимодействия не более 180 минут, после отработанный материал складывают для дальнейшего использования.

Перед использованием очищенная вода обеззараживается ультрафиолетовой установкой и затем перекачивается в пруд-накопитель.

Параметры очистки сточных вод после каждого из этапов приведены в таблице 13. Контроль за расходом очищенной воды осуществляется при помощи расходомеров. Контроль за уровнем pH сбрасываемой очищенной воды осуществляется при помощи pH-метра.

Таблица 13 - Концентрации загрязняющих веществ в стоках после каждой стадии очистки

Контролируемые показатели сточных вод	Исходные концентрации в сточных водах	После 1 этапа очистки (ЖМКС)	После 2 этапа очистки (ОГП)	ПДК*
pH	2,33-2,66	5,95-6,30	7,01-7,67	6,50-8,50
Медь (Cu)				
Степень очистки, %	-	97,50-99,99	99,99	-
Концентрация мг/л	78,10	0,10-1,90	< 0,0012	0,001
Цинк (Zn)				
Степень очистки, %	-	97,00-99,99	99,99	-
Концентрация мг/л	50,12	0,20-1,50	< 0,0016	0,01
Кадмий (Cd)				
Степень очистки, %	-	75,00-95,00	99,99	-
Концентрация мг/л	0,20	0,01-0,05	< 0,0015	0,005
Железо (Fe)				

Степень очистки, %	-	99,99	99,99	-
Концентрация мг/л	147,71	< 0,0073	< 0,0073	0,10
Магний (Mg)				
Степень очистки, %	-	-	-	-
Концентрация мг/л	322,57	849,50-950,00	931,00-1100,00	40,00

* Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 N 552 (ред. от 10.03.2020) «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения»

На первом этапе степень очистки для меди, цинка, железа достигает 99,99%, для кадмия, показатель варьируется от 75,00 до 95,00%. Одновременно с нейтрализацией металлов происходит изменение pH раствора: с начального значения 2,33-2,66 до 5,95-6,30. При этом наблюдается увеличение концентрации магния в растворе с 322,57 до 849,50-950,00 мг/л.

Второй этап очистки включает использование ОГП, который обеспечивает 99.99% очистки по меди, цинку, кадмию и железу. Важно отметить, что после второго этапа концентрация металлов соответствует установленным ПДК, однако происходит увеличение содержания магния до 931,00-1100,00 мг/л. После сорбент извлекается и сушится, затем гранулируется для дальнейшего использования в качестве мелиоранта (ГМ).

Доочищенная сточная вода накапливается в пруду объемом 15 000 кубических метров, размерами до 25 метров в ширину и 125 метров в длину, глубиной до 5 метров. После подлежит УФ-облучению.

Эксплуатация

Эксплуатация гидротехнического сооружения в виде каскада прудов для очистки сточных вод от металлов с использованием материалов на основе отходов и двух параллельных схем основана на циклическом чередовании работы и очистки прудов.

По мере накопления осадка сточных вод работа первой линии прудов прекращается. Производится очистка прудов с помощью погрузчика и транспортировка на площадку переработки или складирования.

После очистки первый каскад прудов переходит в режим ожидания. Вторая линия прудов, находившаяся до этого в режиме ожидания, начинает работу, принимая сточные воды.

Таким образом, сточная вода проходит многоступенчатую безотходную очистку, включающую накопление, обеззараживание и хранение, прежде чем стать пригодной для использования в хозяйственных целях.

Разработка и получение новых мелиорантов на основе осадков сточных вод с последующим подтверждением их экологической безопасности и экономической целесообразности использования, является значимым природоохранным мероприятием, поскольку способствует решению проблемы утилизации отходов, улучшению свойств почв и грунтов, предоставлению альтернативы традиционным мелиорантам и снижению затрат на утилизацию.

В свою очередь, проектирование очистных сооружений на основе доказанных оптимальных параметров, с учетом снижения штрафных санкций за экологический ущерб, также является природоохранным мероприятием, поскольку обеспечивает эффективную очистку сточных вод, снижая потребление ресурсов и предотвращая загрязнение водоемов, почв и грунтовых вод.

Таким образом, обоснован комплексный подход, направленный на снижение негативного воздействия производственных процессов в динамике развития ГТС на окружающую среду и обеспечение рационального использования природных ресурсов.

4.2 Оценка фитотоксичности доочищенных сточных вод как основа для разработки технико-технологических рекомендаций по их безопасному использованию в хозяйственной деятельности

Оценка качества воды, определяющей ее пригодность для различных хозяйственных целей, проводилась посредством биотестирования с использованием кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) в качестве индикатора, отражающим состояние сточной воды после предварительной очистки, позволяя оценить влияние воды на рост и развитие растений. Этот метод позволяет оценить воздействие воды на живые организмы [22, 35, 151].

30 семян кресс-салата были размещены в чашках Петри с фильтровальной бумагой, куда добавляли по 5 мл доочищенной сточной воды. Контрольными образцами служили сточная вода с исходным составом и дистиллированная вода (таблица 14). Чашки закрывали и выдерживали 72 часа при комнатной температуре для наблюдения за прорастанием семян [151]. Результаты исследований приведены в таблице 14 и на рисунке 22.

Таблица 14 - Влияние различных составов сточных вод на всхожесть и рост кресс-салата (*Lepidium sativum* L.), элементный анализ особей после процесса взаимодействия.

№	Название	Сточная вода с месторождения Кабан-1 (необработанная)	Сточная вода с месторождения Кабан-1 (после взаимодействия с отходом железо-магниевого производства) <i>Дозировка отходов - 10 г/л Время контакта - 120 минут</i>	Сточная вода с месторождения Кабан-1 (после взаимодействия с отходом железо-магниевого производства и с ОГП). <i>Дозировка отходов - 10 г/л 10 г/л Время контакта - 120 минут</i>	Дистиллированная вода
		1	2	3	
1	Кол-во проросших семян, шт	19,00±2,00	30,00±0,00	30,00±0,00	30,00±0,00
2	Длина корня, мм	4,30±4,00	9,64±2,65	21,11±6,00	21,06±1,53
3	Общая биомасса, мг	15,00±2,89	27,15±4,04	40,09±4,36	45,66±1,15
4	RGP, % (процент прорастания)	63,33±2,00	100,00±0,00	100,00±0,00	100,00±0,00
5	RGG, % (относительная длина корней)	20,50±4,00	45,74±2,65	100,50±6,00	100,00±1,53
6	Cu, мг/кг	662,67±30,00	16,80±1,33	8,75±1,02	8,40±1,11
7	Zn, мг/кг	1478,40±218,04	174,32±6,56	53,10±3,11	45,12±1,85
8	Cd, мг/кг	1,87±0,46	1,00±0,27	<0,0015	<0,0015
9	Fe, мг/кг	1442,47±117,90	234,80±33,50	206,15±25,51	246,40±29,42
10	Mg, мг/кг	2042,13±211,00	15064,00±667,18	11956,00±468,01	1996,00±127,42
11	K, мг/кг	<0,0008	13108,00±452,28	15419,50±709,10	13704,00±394,22
12	pH	2,40	5,95	7,05	6,51

Установлено, что необработанная сточная вода с месторождения «Кабан-1» оказывает негативное воздействие на кресс-салат (*Lepidium sativum* L.). В частности, было выявлено значительное снижение процента прорастания семян, уменьшение общей биомассы и ухудшение развития корневой системы по сравнению с контрольными образцами, выращенными в чистой воде (таблица 14, рисунок 22). Прорастание семян снижается более чем на 30%, биомасса – на 65%, а развитие корней – на 80%, указывая на её токсичность.

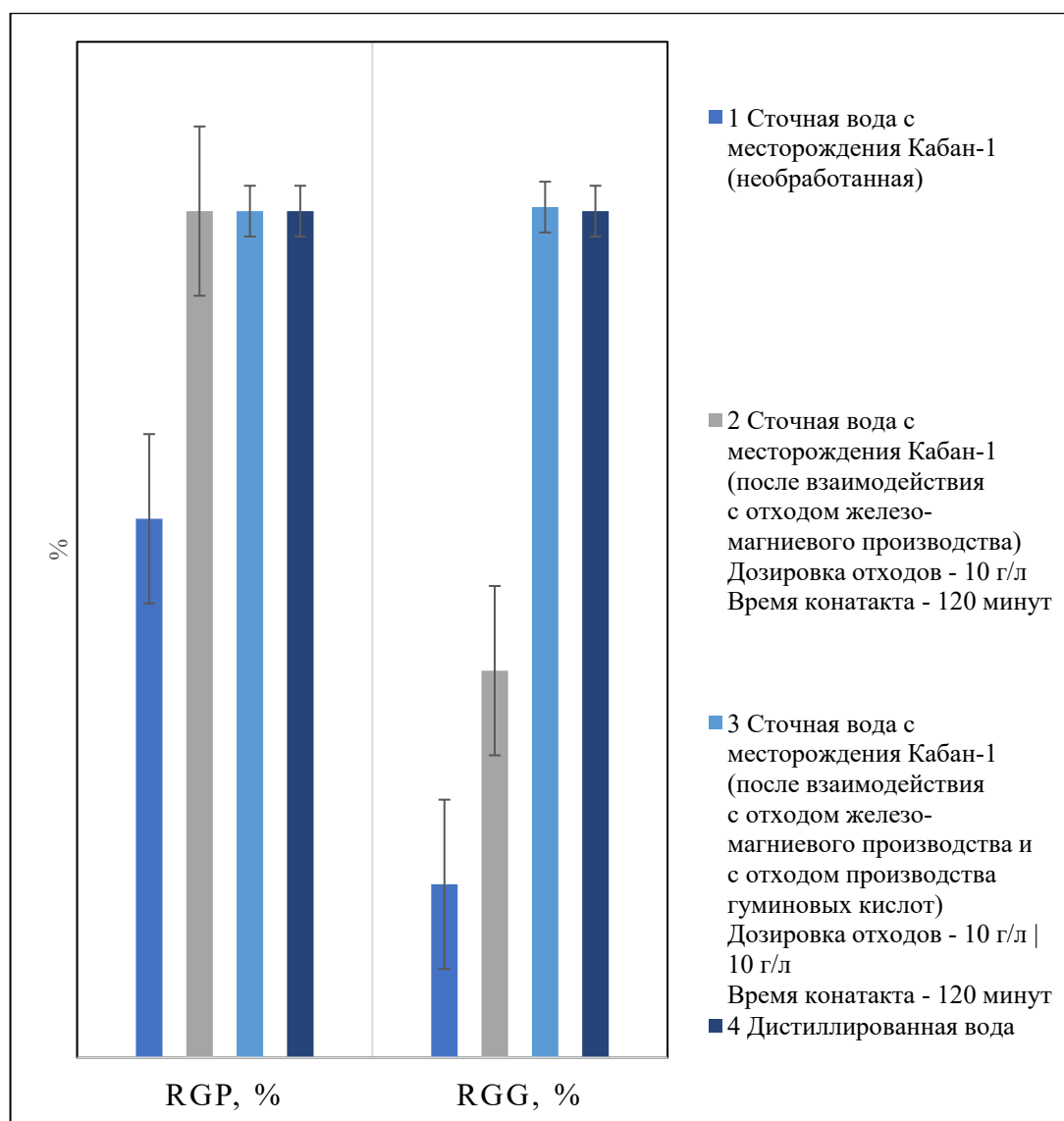


Рис. 22 - Влияние различных составов сточных вод на показатели всхожести (RGP) и роста корней (RGG) кресс-салата (*Lepidium sativum* L.)

Прорастание семян в сточной воде, прошедшей очистку, было на уровне контрольного образца (100%), что свидетельствует о снижении токсичности [151].

Установлено, что развитие корневой системы кресс-салата в воде, прошедшей первый этап очистки (состав №2) в 2,2 раза лучше по сравнению с неочищенными сточными водами, но в 2,1 раза хуже, чем в воде, прошедшей оба этапа очистки (состав №3). Это указывает на высокую эффективность двухэтапной очистки [151].

Анализ растений [151], выращенных в очищенной воде, выявил снижение содержания большинства металлов, но увеличение содержания магния и калия. Калий и магний - важные макроэлементы, необходимые для нормального роста и устойчивости растений к стрессу, поскольку они участвуют в фотосинтезе, метаболизме и усвоении фосфора. Хотя важность этих элементов подчеркивается [177, 178], стоит отметить, что

очищенная вода не оказывает стимулирующего эффекта на растения *Lepidium sativum* L. [151].

Железо (Fe) – важный, но трудноусваиваемый микроэлемент для растений из-за плохой растворимости его солей. Его недостаток или избыток негативно влияет на развитие растений [179]. В сточных водах месторождения «Кабан-1» (составы №1 и №2) концентрация железа значительно выше, чем в образцах, прошедших очистку [151].

Химический состав кресс-салата свидетельствует о значительном накоплении железа, цинка, меди и кадмия в растениях, подвергшихся воздействию высокоминерализованных сточных вод (таблица 14). Высокие концентрации металлов, аккумулирующихся преимущественно в корнях, оказывают токсическое воздействие на растения. Это выражается в негативном влиянии на прорастание семян, длину корней и общую биомассу кресс-салата, что согласуется с данными, представленными в работах [180, 181, 182, 183].

Исследования [151] химического состава кресс-салата свидетельствуют о значительном накоплении железа, цинка, меди и кадмия в растениях, подвергшихся воздействию необработанных сточных вод (таблица 14). Высокие концентрации этих металлов, аккумулирующихся преимущественно в корнях, оказывают токсическое воздействие на растения. Это выражается в негативном влиянии на прорастание семян, длину корней и общую биомассу кресс-салата, что согласуется с данными, представленными в работах [180, 181, 182, 183].

У растений [151], выращенных в воде, не прошедшей очистку (образец №1), наблюдался хлороз из-за недостатка хлорофилла, проявляющийся в пожелтении. Низкий pH (до 2,33) в этом образце также затруднил усвоение важных макроэлементов, таких как магний и калий, необходимых для здорового роста [184, 185]. Оптимальное усвоение макроэлементов происходит при pH 6,0-6,5, а микроэлементы становятся менее доступными при pH выше 7,0.

Калий и магний - антагонисты, конкурирующие за усвоение в растениях. В образцах [151] с низким pH растения испытывают дефицит калия и магния, но при этом накапливают избыток железа, цинка, кадмия и меди. Этот дисбаланс в усвоении элементов негативно сказывается на росте и развитии растений [185].

Поддержание оптимального pH почвы важно для предотвращения хлороза и обеспечения здорового роста растений. Результаты исследования показывают, что сточные воды, очищенные с использованием последовательного применения ЖМКС и ОГП, потенциально пригодны для полива растительных ресурсов при экологической

реабилитации экосистем, пострадавших в результате разработки медноколчеданных месторождений [151].

4.3 Обоснование параметров внесения вновь образованных материалов в качестве мелиорантов

В целях обоснования безотходности предлагаемой технологии обоснованы оптимальные дозы внесения мелиорантов, что является необходимым при разработке мероприятий по охране окружающей среды. Недостаточное количество мелиоранта может оказаться неэффективным для изменения свойств почвы и обеспечения необходимого уровня питания для растений, в то время как избыточное внесение способно ингибировать рост, вызывать дисбаланс химических элементов в почвенных растворах и тканях растений и, в крайних случаях, загрязнять окружающие экосистемы.

В данном этапе проведены исследования влияния различных дозировок мелиорантов на рост кресс-салата (*Lepidium sativum* L.). Эксперимент проводился путем добавления различных доз ферро-магниевого мелиоранта (ФММ) от 25-300 г/м² в среду выращивания кресс-салата. Анализировались морфологические параметры растений, такие как длина корней, всхожесть, измерялось содержание химических элементов в особях растений (таблица 15).

Ферро-магниевый мелиорант, получен после процесса очистки сточных вод с помощью отходов железо-магниевого производства (ЖМКС).

При внесении мелиорантов, содержащих металлы в почву, происходит процесс перераспределения. Растения могут адсорбировать металлы из почвы через корневую систему [186].

Таблица 15 - Показатели роста и развития и элементный анализ особей кресс-салата (*Lepidium sativum* L.), выращенных на субстратах с различной дозировкой ФММ

№	Название	Почва 100% (контроль)	ФММ Дозировка 25 г/м2	ФММ Дозировка 60 г/м2	ФММ Дозировка 120 г/м2	ФММ Дозировка 200 г/м2	ФММ Дозировка 300 г/м2
		1	2	3	4	5	6
1	Общая биомасса, мг	35,00±2,00	35,00±3,15	50,00±5,00	50,00±5,11	55,00±6,13	55,00±5,51
2	RGP, % (процент прорастания)	100,00±0,00	83,33±6,53	100,00±0,00	93,33±4,43	100,00±0,00	100,00±0,00
3	RGG, % (относительная длина корней)	100,00±0,00	59,00±7,14	96,00±4,31	77,00±5,87	70,00±4,91	56,00±6,66
4	Cu, мг/кг	0,62±0,11	7,00±1,74	6,84±1,09	14,35±2,76	21,16±3,87	21,29±3,75
5	Zn, мг/кг	52,89±6,76	24,73±2,17	52,89±3,65	59,50±3,58	90,53±5,46	90,71±7,28
6	Cd, мг/кг	<0,0015	<0,0015	<0,0015	0,35±0,20	0,62±0,30	0,88±0,40
7	Fe, мг/кг	413,78±44,13	1274,47±246,44	1244,13±222,10	1904,00±327,84	2372,00±539,33	3827,83±599,00
8	Mg, мг/кг	10627,56±1323,00	4741,33±543,74	9538,57±1148,71	16268,00±3475,00	17182,67±4985,12	9081,33±1298,00
9	K, мг/кг	15384,00±4958,00	47548,67±8476,33	44373,78±6414,09	57711,50±6663,81	60025,78±8161,31	73949,17±9681,11

По результатам, представленных в таблице 15 и на рисунке 23, можно сделать вывод о том, что наиболее эффективным субстратом среди рассмотренных является образец с дозировкой 60 г/м² (номер 3). Следует отметить, что растения, выращенные на данном субстрате, не содержат кадмия, а содержание остальных исследуемых элементов (железо, медь, цинк, калий и магний) присутствуют в средних количествах относительно всех рассматриваемых субстратов, также стоит отметить, что в этом образце наблюдались наиболее приближенные к контролю значения показателей всхожести RGP – 100% и относительной длины корней RGG – 96,00%, при этом начиная именно с этой дозировкой увеличивается биомасса растений (50,00 мг), в то время как в контрольном образце она составляет 35,00 мг.

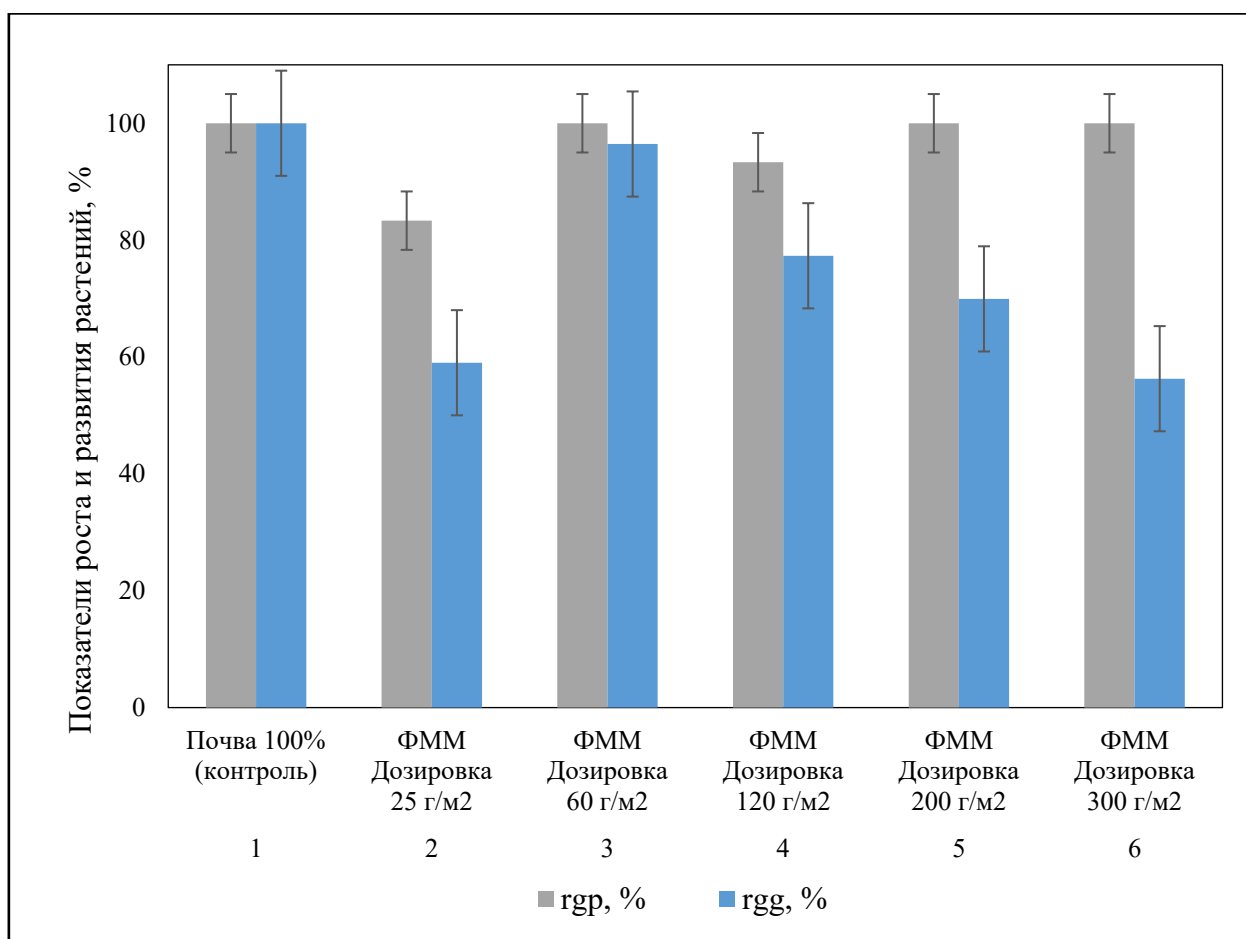


Рис. 23 - Влияние дозировки ФММ на показатели всхожести (rgp) и роста корней (rgg) кресс-салата (*Lepidium sativum* L.)

Во всех образцах фиксируется увеличение содержание калия и магния в составе растений по сравнению с контрольными значениями. Калий (K) является необходимым для процесса фотосинтеза, активирует ферменты, регулирует водный баланс и повышает

устойчивость растений к стрессовым условиям. Магний (Mg) играет важную роль в фотосинтезе, синтезе хлорофилла, а также в усвоении фосфора, обеспечивая оптимальные условия для роста и развития растений. Таким образом, достаточная обеспеченность растений этими элементами питания является важным фактором для возобновления и поддержания экологического баланса в техногенно нарушенных экосистемах [177, 178].

Результаты эксперимента показали, что дозировка ФММ не имеет существенного влияния на рост и развитие кресс-салата по сравнению с контрольным образцом. Оптимальная дозировка (60 г/м²) способствовала увеличению биомассы растений, однако, излишнее использование отходов (от 120 до 300 г/м²) не приводит к дополнительному увеличению исследуемых показателей роста рисунке 23. Однако при внесении ФММ 120 г/м² и выше наблюдается увеличение содержания кадмия в растениях в диапазоне от 0,35 до 0,88 мг/кг. Это указывает на необходимость соблюдения норм внесения в грунт мелиоранта, чтобы избежать нежелательного накопления вредных веществ в растениях.

Таким образом, установлено, что образец с дозировкой ФММ 60 г/м², показал наилучшие условия для выращивания растений по сравнению с контрольным образцом и другими рассмотренными вариантами.

4.4 Влияние мелиорантов на рост и развитие растений

Вторичное использование отходов горнодобывающей отрасли в качестве мелиорантов для различных целей является одним из аспектов комплексного освоения ресурсов недр [186-188]. Мелиоранты представляют собой вещества, которые применяются с целью улучшения физических и химических характеристик почв и грунтов. Они повышают плодородие, обеспечивая необходимые условия для роста растений и микробиологической активности. Мелиоранты могут быть природными или искусственными, что определяется их конкретным назначением [189-191]. Вторичная переработка отходов горнодобывающей промышленности в природоохранных целях, во-первых, снижает нагрузку на окружающую среду и уменьшает затраты на утилизацию, во-вторых, возможна дополнительная экономическая прибыль, поскольку полученные мелиоранты могут быть востребованы в сельском хозяйстве, ландшафтном дизайне, строительстве и других областях [192].

В рамках эксперимента были использованы различные субстраты на основе мелиорантов, полученных из отходов производства (таблицы 16-17). По результатам проведен морфометрический анализ, дана оценка воздействию, очищенной сточной воды, содержащей повышенные концентрации магния (магниевая вода) на рост и развитие растений кресс-салата и сои. Для этого все образцы были поделены на две группы, в первой поливали магниевой водой, а во второй дистиллированной водой.

Таблица 16 - Влияние различных составов субстратов на всхожесть и рост кресс-салата (*Lepidium sativum* L.), элементный анализ особей после процесса взаимодействия.

№	Название	Почва 100%		Почва+ФММ		Почва+ФММ+ГМ		Почва+ГМ	
		Магнeвая вода	Дистиллированная вода	Магнeвая вода	Дистиллированная вода	Магнeвая вода	Дистиллированная вода	Магнeвая вода	Дистиллированная вода
1	Кол-во проросших семян, шт	30,00±0,00	30,00±0,00	30,00±0,00	30,00±0,00	30,00±0,00	28,00±1,73	26,00±1,52	30,00±0,00
2	Длина подземной части, мм	27,53±11,21	29,06±14,55	27,00±10,82	30,78±7,72	17,62±10,08	31,11±11,36	21,08±14,37	35,55±7,22
3	Длина надземной части, мм	53,52±17,78	59,00±10,47	54,33±14,69	64,42±14,00	53,83±16,41	61,16±16,88	42,00±15,84	64,50±10,14
5	Сухая биомасса, мг	40,00±2,00	30,00±1,00	40,00±2,00	40,00±2,00	40,00±5,00	40,00±2,00	30,00±1,00	40,00±3,00
6	RGP, % (процент прорастания)	100,00±0,00	100,00±0,00	100,00±0,00	100,00±0,00	100,00±0,00	93,33±6,07	86,67±5,00	100,00±0,00
7	RGG, % (относительная длина корней)	93,32±23,27	100,00±0,00	93,35±22,22	99,32±15,89	56,89±24,13	100,36±17,31	79,01±27,41	114,68±14,97
8	Cu, мг/кг	10,00±1,00	10,82±1,50	15,44±2,40	33,08±5,45	15,38±2,30	23,08±4,50	5,38±0,86	17,69±2,90
9	Zn, мг/кг	61,54±8,07	100,00±10,00	53,85±6,45	130,77±9,50	76,92±7,50	123,08±12,00	38,46±3,90	130,77±12,70
10	Cd, мг/кг	<0,0015	<0,0015	<0,0015	<0,0015	<0,0015	< 0,0015	<0,0015	<0,0015
11	Fe, мг/кг	923,08±93,45	1286,15±105,00	1410,77±125,00	724,66±89,30	1242,31±110,10	385,38±39,45	966,15±98,00	407,69±56,00
12	Mg, мг/кг	5053,85±440,00	4161,54±330,00	7230,77±1680,00	7607,69±1500,00	9753,85±1750,00	7323,08±1350,00	4284,62±970,00	6161,54±1000,00
13	K, мг/кг	52661,54±7500,00	55338,46±7700,00	19630,77±2500,00	117307,69±12000,00	127707,69±12500,00	50007,69±5600,00	126536,46±10000,000	74323,08±8300,00

Таблица 17 - Влияние различных составов субстратов на всхожесть и рост сои (*Glycine max* (L.) Мерг элементный анализ особей после процесса взаимодействия.

№	Название	Почва 100%		Почва+ФММ		Почва+ФММ+ГМ		Почва+ГМ	
		Магниева вода	Дистиллированн ая вода	Магниева вода	Дистиллированн ая вода	Магниева вода	Дистиллированн ая вода	Магниева вода	Дистиллированн ая вода
1	Кол-во проросших семян, шт	27,00±1,92	30,00±0,00	28,00±1,73	30,00±0,00	30,00±0,00	28,00±1,73	29,00±1,53	30,00±0,00
2	Длина подземной части, мм	88,00±10,98	96,00±13,58	46,25±27,61	52,5±28,55	39,44±27,02	77,28±28,35	41,67±18,87	82,33±59,32
3	Длина надземной части, мм	121,10±17,04	133,50±22,14	51,25±21,35	90,00±34,54	43,44±26,97	111,75±55,66	50,00±39,05	180,66±90,05
5	Сухая биомасса, мг	630,00±54,00	928,00±79,00	690,00±55,00	1030,00±90,00	1180,00±95,00	800,00±82,00	800,00±85,00	960,00±87,00
6	RGP, % (процент прорастания)	90,00±1,92	100,00±0,00	93,33±5,77	100,00±0,00	100,00±0,00	93,33±5,77	96,67±5,09	100,00±0,00
7	RGG, % (относительная длина корней)	90,71±15,45	100,00±0,00	48,18±19,76	54,69±30,31	44,27±39,14	66,96±27,74	43,40±21,44	59,32±24,05
8	Cu, мг/кг	13,75±1,25	11,00±1,10	12,25±1,15	9,75±1,05	17,50±1,60	13,25±1,20	11,25±1,15	12,00±1,15
9	Zn, мг/кг	45,00±6,75	27,50±3,45	135,00±9,15	37,50±3,99	25,00±3,15	35,00±3,85	20,00±3,00	40,00±6,00
10	Cd, мг/кг	< 0,0015	< 0,0015	0,25±0,10	0,25±0,10	< 0,0015	0,25±0,10	0,50±0,10	0,25±0,10
11	Fe, мг/кг	307,25±34,55	455,00±39,15	161,50±15,00	220,50±18,10	277,00±30,00	362,00±35,55	185,75±16,00	295,00±12,00
12	Mg, мг/кг	4710,00±550,00	3852,50±405,00	5925,00±590,00	4582,50±420,10	4305,02±460,90	5037,55±540,00	3910,00±400,00	4387,54±420,10
13	K, мг/кг	56277,00±6500,00	67912,50±6600,00	59780,00±5400,00	51220,50±6500,00	45927,55±5010,00	59502,50±5250,00	62722,50±5945,00	79620,12±6325,00

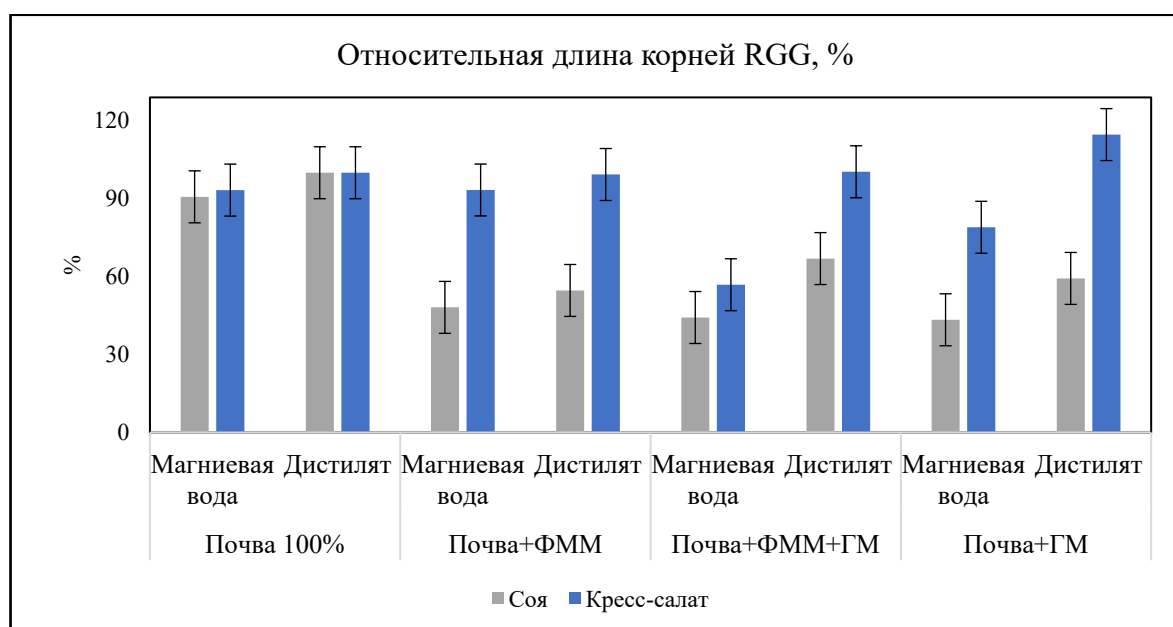
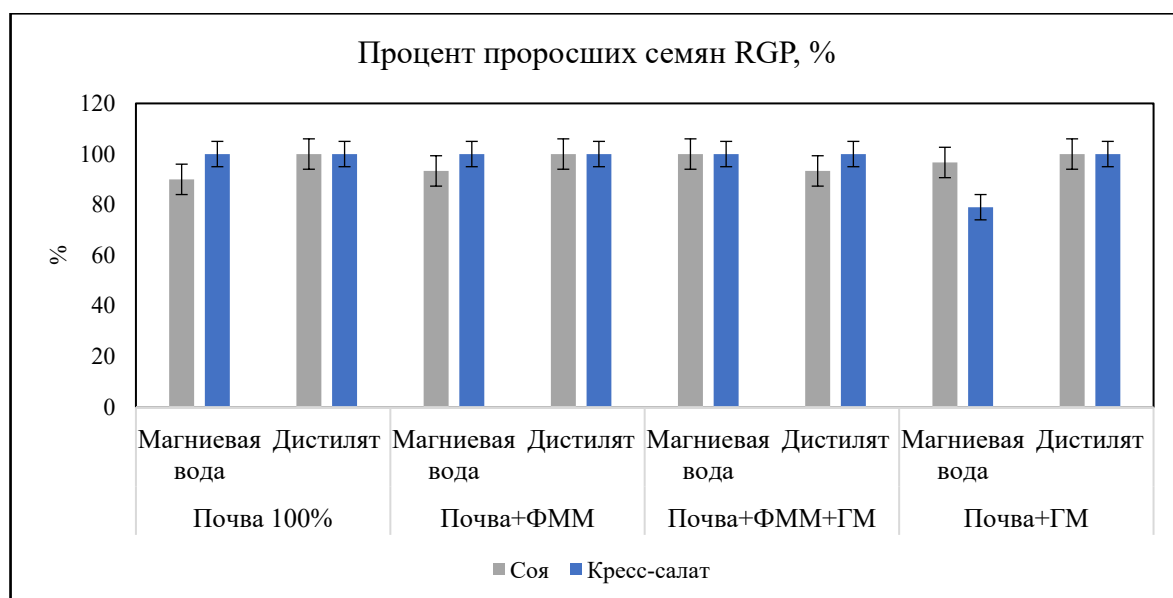


Рис. 24 - Влияние различных субстратов на показатели всхожести RGP, % и относительную длину корней RGG, %

В проведенном эксперименте было показано влияние полива магниевой водой и дистиллированной водой на всхожесть семян кресс-салата и сои, выращенных на субстратах с добавлением мелиорантов (рисунок 24). Установлено, что для кресс-салата при использовании магниевой воды показатель всхожести составлял от 86,67% до 100,00%, в то время как при использовании дистиллированной воды от 93,33% до 100,00%. Для сои результаты были схожи, с показателями от 90,00% до 96,67% для магниевой воды и от 93,33% до 100,00% для дистиллированной воды.

В ходе исследований было выявлено, что наиболее благоприятные условия для кресс-салата создает смесь почвы и гуминового мелиоранта (ГМ), при поливе дистиллированной водой. Этот состав способствует полному прорастанию семян (100,00%) и значительному развитию корневой системы (относительная длина корней 114,68%) благодаря тому, что мелиорант ГМ обогащает почву питательными веществами, а дистиллированная вода обеспечивает их равномерное распределение.

Для выращивания сои оптимальным решением оказалось использование обычной почвы (100,00%), при этом полив осуществлялся магниевой водой. Такой простой способ обеспечивает растения важным для их развития магнием, который, в свою очередь, способствует усвоению других питательных веществ и укрепляет корни [192]. Результаты были следующие: всхожесть семян 90%, относительная длина корней – 90,71%.

Помимо оптимального варианта, хорошие показатели роста кресс-салата были зафиксированы в образцах, выращенных на субстратах «Почва+ФММ+ГМ» и «Почва+ФММ» при поливе дистиллированной водой. Для них процент прорастания (RGP) составил 93,33% и 100,00%, а относительная длина корней (RGG) – 100,36% и 99,32%, соответственно. Важно, что за исключением образца «Почва+ФММ+ГМ» с поливом магниевой водой, все прочие субстраты не вызвали отрицательного воздействия на развитие кресс-салата. Что касается сои, ситуация была противоположной: все варианты, кроме «Почва 100%» с поливом магниевой водой, привели к замедлению роста корневой системы в пределах 33,00-52,00%.

Таким образом, результаты подчеркивают видоспецифичность реакций растений на различные почвенные и водные условия. Использование гуминового мелиоранта и дистиллированной воды оказалось благоприятным для кресс-салата, в то время как для сои более подходящей средой была чистая почва в сочетании с магниевой водой.

Полученные данные позволяют сделать вывод о перспективности применения отходов, образованных в результате очистки высокоминерализованных сточных вод (ФММ и ГМ) в качестве мелиорантов почв, что доказывает безотходность разработанной технологии водоочистки.

4.5 Оценка экономического эффекта внедрения технологической схемы водочистки с применением производственных отходов

4.5.1 Оценка капитальных затрат при использовании отходов производств (ЖМКС и ОГП) в качестве материалов для очистки сточных промышленных вод от металлов

В данном разделе дана оценка капитальных затрат на внедрение технологий, использующих ЖМКС и ОГП в качестве материалов для очистки сточных промышленных

вод от металлов. Проведен анализ затрат на приобретение и обработку материалов, инвестиции в оборудование для очистки, также учтены земельно-строительные работы.

При определении стоимости технологического оборудования учитываются не только его рыночные цены, но и сопутствующие затраты. В частности, в расчет включают стоимость транспортировки оборудования к месту установки, затраты на заготовку необходимых материалов и комплектующих, а также затраты на его монтаж. Согласно принятой методике расчета, стоимость транспортно-заготовительных работ составляет 15% от рыночной стоимости оборудования. Таким образом, для точной оценки экономической целесообразности внедрения новой безотходной технологии необходимо учитывать все составляющие полной стоимости оборудования.

В таблице 18 приведено необходимое оборудование и затраты на него.

Таблица 18 - Капитальные затраты при проведении процесса очистки сточных вод от металлов

Наименование оборудования	Кол-во,	Цена, тыс. руб. за ед.	Сумма, тыс. руб.	Расходы на логистику и монтаж, руб.	Всего капитальных затрат, руб.
Погружной-аэратор BF-370, шт	4	25,00	100,00	15,00	115,00
Насосная станция	1	1200,00	1200,00	180,00	1380,00
Строительные работы, м2	20	8,00	160,00	24,00	184,00
Земельные работы, м3	60000	0,07	4593,00	688,95	5 281,95
Емкости для очищенной воды, шт	1	500,00	500,00	75,00	575,00
УФ установка, шт	1	100,00	100,00	15,00	115,00
Сушильное оборудование, шт	2	4500,00	9000,00	1 350	10350,00
					18000,95

Погружной-аэратор BF-370 – это устройство, предназначенное для аэрации воды в водных объектах. Обеспечивает циркуляцию воды в водоеме, предотвращая застойные зоны, помогает предотвратить цветение воды и образование водорослей. Размер: 600х300х260, производительность 390 л/м, насыщение воды воздухом 80м³/час, 220В, 370Вт, Цена принята в размере 25 тыс. руб. за комплект, всего используется 4 комплекта, итого: **100 тыс. руб.**

Насосная станция – Производительность водоотливной насосной установки должна обеспечивать откачку максимального суточного водопритока за 20 часов. Для откачки карьерных вод устанавливается насосная станция, оборудованная насосами ЦНС-60-132 производительностью по 60 м³/ч в количестве 2-х единиц. И 2 комплекта насос Rеха PRO VO80A-244 производительностью 40 л/с, напором 8м, мощностью 12,3 кВт, 400В, класс защиты IP-68. Цена насоса 1 комплект Rеха PRO VO80A-244 – 400 тыс.руб., ЦНС-60-132 – 200 тыс. руб., итого: **1200 тыс. руб.**

Земельно-строительные работы

Для строительства четырех прудов общим объемом 60000 куб. м. необходимо произвести земляные работы. В стоимость этих работ входят следующие статьи затрат:

Работа экскаватора:

* Производительность экскаватора: 125 куб. м./час.

* Общее время работы: 480 часов.

* Ставка оплаты: 900 руб./час.

Затраты на зарплату машиниста: 900 руб./час 240 часов = 432 тыс. руб.

* Расход: 20 литров/час.

* Стоимость дизеля: 70 руб./литр.

* Общее время работы: 480 часов.

Затраты на топливо: 20 литров/час 70 руб./литр * 240 часов = 672 тыс. руб.

• Амортизация экскаватора:

* Ставка амортизации: 500 руб./час.

* Общее время работы: 240 часов.

Затраты на амортизацию экскаватора: 500 руб./час 480 часов = 240 тыс. руб.

Суммарные затраты на земляные работы без учета транспортировки породы: 432 + 672 + 240 = 1344 тыс. руб.

Стоимость транспортировки: 30% от общей стоимости затрат на земляные работы

Стоимость транспортировки горной породы: 1344 тыс. руб. * 0,30 = 403 тыс. руб.

В качестве материала для экрана выбраны листы полимерной геомембраны. Для дополнительной защиты и повышения надежности, геомембрана будет покрыта с двух сторон защитно-дренирующим слоем. Цена 170 руб./м², всего с учетом площади стен, дна и запасом 5%, получается 3780 + 3780 + 9186 = 16746 м² * 170 руб. = **2 846 тыс. руб.**

Общая стоимость земляных работ: 1344 + 403 + 2846 = **4593 тыс. руб.**

Складские помещения и хранение вновь образованных материалов

Для складирования вновь образованных после очистки материалов, также для организации складских и хозяйственных помещений необходимы закрытые помещения и

навес вновь образованных материалов, приготовленных для дальнейшего хозяйственного использования. Цена за 1 м² строительных работ принята в размере 8 тыс. руб. с учетом материала. Итого $20 \text{ м}^2 * 8 = 160 \text{ тыс. руб.}$

Ёмкость для очищенной воды на полив изготовлена из металла с антикоррозийным покрытием, $t=5\text{мм}$, объемом 30 м³, $D=2400\text{мм}$, $L=1800\text{мм}$. Цена **500 тыс. руб.**

Доочищенные сточные воды используются для хозяйственных нужд. Поэтому после процесса очистки с помощью насоса вода поступает на УФ-установку для осуществления процесса их обеззараживания.

Установка обеззараживания ОДВ-4С. Производительность 5 м³/час, 220В, 80Вт, цена – **100 тыс. руб.** за комплект.

Итого по разделу: $160 + 500 + 100 = 760 \text{ тыс. руб.}$

Подготовка материалов к использованию

В данном исследовании не учитываются затраты на сушку материалов, так как предполагается использование отходов, высушенных естественным путем. Влажность этих отходов не превышает 10%, что позволяет исключить дополнительный этап сушки и связанные с ним расходы.

Для ускорения процесса сушки для подготовки материалов, используется дробильно-сушильное оборудование, пример: QGS-5. Объем обрабатываемого воздуха м³ / мин – 240, Скорость вращения об/мин – 940, Номинальная мощность двигателя, кВт – 7.5-25. Цена за комплект – **4500 тыс. руб.** Необходимо 2 комплекта. Расчет затрат на электроэнергию:

- Время сушки: $32000 \text{ кг} / 5000 \text{ кг/час} = 6,4 \text{ часа}$
- Потребление электроэнергии: $50 \text{ кВт/час} * 6,4 \text{ часа} = 320 \text{ кВт}$
- Стоимость электроэнергии (7,25 руб. за кВт): $320 \text{ кВт} * 7,25 \text{ руб./кВт} = 2320 \text{ рублей}$

Транспортно-заготовительные затраты на подготовку материалов включают в себя цену отхода, покупаемого у предприятия и транспортные расходы от стоимости отхода.

Для очистки 1591 куб. м. сточных вод необходимо 15,91 тонны каждого материала (0,01 тонны на 1 куб. м.) как для ЖМКС, так и для ОГП. Цена за тонну материала составляет 20 рублей, а транспортные расходы - 30% от этой стоимости, то есть 6 рублей за тонну ($20 \text{ руб.} * 0,3 = 6 \text{ руб.}$). Таким образом, общая стоимость одной тонны материала с учетом доставки составляет 26 руб. ($20 \text{ руб.} + 6 \text{ руб.}$). Для обоих типов материалов (ЖМКС и ОГП) требуется по 15,91 тонны, поэтому общие затраты на материалы в день составят 827 руб. ($15,91 \text{ тонны} * 26 \text{ руб./тонну} + 15,91 \text{ тонны} * 26 \text{ руб./тонну}$). Следовательно, стоимость очистки 1 куб. м. сточных вод от металлов составляет **0,52 рубля** ($827 \text{ руб.} / 1591 \text{ куб. м.}$).

С учетом сушки материалов 827 руб. + 2320 руб.=3147 руб./1591 куб. м=**1,97 руб.**, эксплуатационных затрат- **4,20 руб.**

Сводные затраты на организацию очистки сточных вод от металлов

Суммарные затраты на организацию очистки сточных вод от металлов составили **15 653** тыс. руб. Данная сумма включает в себя следующие статьи расходов:

- Оборудование:
 - о Погружные аэраторы (2 комплекта): 100 тыс. руб.
 - о Насосная станция: 1200 тыс. руб.
 - о Установка обеззараживания (УФ): 100 тыс. руб.
 - о Сушильное оборудование: 9000 тыс.руб.
- Земляные работы:
 - о Общие затраты на земляные работы: 1344 тыс. руб.
 - о Транспортировка горной породы: 403 тыс. руб.
 - о Геомембрана: 2846 тыс. руб.
- Строительство и хранение:
 - о Складские и хозяйственные помещения: 160 тыс. руб.
 - о Ёмкость для очищенной воды: 500 тыс. руб.

Итого: 15 653 тыс. руб.

- Подготовка материалов:

о Затраты на подготовку материалов для очистки 1591 куб. м. сточных вод: 827 руб.+2320 руб.=3147 руб.

Транспортно-заготовительные работы приняты в размере 15% от общей стоимости, что составляет 2 347,95 тыс. руб. Транспортно-заготовительные работы включают в себя:

- Доставку оборудования и материалов
- Монтаж оборудования

Итого затраты на капитальные вложения с учетом транспортно-заготовительных работ - **18 000,95 тыс. руб.**

Удельная стоимость оборудования рассчитывается как отношение общей стоимости оборудования к производительности очистных сооружений.

В нашем случае:

- Общая капитальных вложений: **18 000,95 тыс. руб.**
- Производительность: 5000 м3/сут.
- Удельная стоимость: 18 000,95 тыс. руб./ 5000 м3/сут = **3,6 тыс. руб./м3.**

Затраты на эксплуатацию: фонд оплаты труда принят в размере – 950 тыс. руб в год., затраты на электроэнергию 350 тыс. руб. в год.

Таким образом, общая стоимость организации очистки 1591 куб. м./сутки сточных вод от металлов с помощью материалов на основе производств составила **18 000,95 тыс. руб.**, включая транспортно-заготовительные работы. Стоимость очистки 1 куб. м. сточных вод составила **1,97 руб.**, что было рассчитано с учетом цены материала, транспортных расходов и необходимого количества материала для очистки. с учетом эксплуатационных затрат- **4,20 руб.**

Полученные результаты демонстрируют экономическую эффективность использования материалов на основе производств для очистки сточных вод от металлов.

4.5.2 Размер вреда, причиненного водным объектам сбросом загрязняющих веществ

Исчисление размера вреда, причиненного водному объекту, основывается на компенсационном принципе. Это означает, что размер ущерба определяется величиной затрат, необходимых для устранения вреда и восстановления водного объекта до состояния, которое наблюдалось до нарушения.

Основные элементы компенсации:

- Затраты на установление факта нарушения: включают в себя проведение анализов качества воды и донных отложений, а также экспертизы для определения причин и масштабов ущерба.
- Затраты на ликвидацию нарушения: это затраты на разработку проектно-сметной документации, осуществление работ по устранению последствий нарушения, восстановлению водного объекта до нормального состояния и ликвидацию допущенного нарушения.
- Затраты на предупреждение дальнейшего ущерба: включают в себя мероприятия по предотвращению распространения загрязнения на другие участки водного объекта или на другие водные объекты.

В соответствии с методикой, утвержденной приказом Минприроды России от 13.04.2009 N 87¹ был рассчитан размер вреда, причиненного водным объектам сбросом загрязняющих веществ в составе сточных вод. Методика включает в себя анализ концентрации загрязняющих веществ в сточных водах, учет нормативов качества воды, оценку негативных последствий загрязнения и определение экономического ущерба. Таким образом, исчисление размера вреда водному объекту – это комплексный процесс,

¹ Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства (с изменениями на 26 августа 2015 года) Приказ Минприроды России (Министерства природных ресурсов и экологии РФ) от 13.04.2009 N 87 З зарегистрирован в Министерстве юстиции Российской Федерации 25.05.2009 N 13989

основанный на принципах компенсации и определении фактических затрат на устранение ущерба и восстановление водного объекта.

Размер вреда, причиненного водному объекту сбросом вредных веществ в составе сточных вод или дренажных вод, рассчитывается по формуле N 1:

$$Y = K_{\text{вг}} \times K_{\text{в}} \times K_{\text{ин}} \times \sum_{i=1}^n H_i \times M_i \times K_{\text{из}}, \quad (6)$$

где: Y - размер вреда, тыс. руб.;

$K_{\text{вг}}$ - коэффициент, учитывающий природно-климатические условия в зависимости от времени года. Определяется согласно таблице 1 приложения 1 к данной методике.

$K_{\text{в}}$ - коэффициент, учитывающий экологические факторы (состояние водных объектов).

$K_{\text{ин}}$ - коэффициент индексации, учитывающий инфляционную составляющую экономического развития.

H_i - такса для исчисления размера вреда от сброса i -го вредного (загрязняющего) вещества в водные объекты, выраженная в тысячах рублей за тонну.

M_i - масса сброшенного i -го вредного (загрязняющего) вещества, определяемая для каждого загрязняющего вещества, выраженная в тоннах.

$K_{\text{из}}$ - коэффициент, учитывающий интенсивность негативного воздействия вредных (загрязняющих) веществ на водный объект.

Масса сброшенного вредного (загрязняющего) вещества в составе сточных вод и (или) загрязненных дренажных (в том числе шахтных, рудничных) вод определяется по формуле N 10:

$$M_i = Q (C_{\text{фи}} - C_{\text{ди}}) T \cdot 10^{-6}, \quad (7)$$

где: M_i - масса сброшенного i -го вредного (загрязняющего) вещества, т;

i - загрязняющее вещество, по которому исчисляется размер вреда;

Q - расход сточных вод и (или) загрязненных дренажных (в том числе шахтных, рудничных) вод, с превышением содержания i -го вредного (загрязняющего) вещества определяется по приборам учета, а при их отсутствии - расчетным путем в соответствии с методами расчета объема сброса сточных вод и их характеристик, $\text{м}^3/\text{час}$;

$C_{\text{ф}i}$ - средняя фактическая за период сброса концентрация i -го вредного (загрязняющего) вещества в сточных водах и (или) загрязненных дренажных (в том числе шахтных, рудничных) водах, определяемая по результатам анализов аккредитованной лаборатории как средняя арифметическая из общего количества результатов анализов (не менее 3-х) за период времени T , $\text{мг}/\text{дм}^3$;

$C_{\text{д}i}$ - допустимая концентрация i -го вредного (загрязняющего) вещества в пределах норматива допустимого (предельно допустимого) сброса или лимита сброса при его наличии на период проведения мероприятий по снижению сбросов вредных (загрязняющих) веществ в водные объекты, $\text{мг}/\text{дм}^3$;

Допустимая концентрация i -го вредного (загрязняющего) вещества в пределах норматива допустимого (предельно допустимого) сброса или лимита на сбросы при его наличии для организаций, осуществляющих водоотведение в соответствии с Федеральным законом «О водоснабжении и водоотведении», вносящих плату за негативное воздействие на окружающую среду, применяется с коэффициентом, равным 1,4 (кроме случаев аварийного и залпового сброса сточных вод).

Таблица 19 - Показатели исчисления размера вреда, причиненного водному объекту сбросом вредных (загрязняющих) веществ в составе сточных вод

№	Загрязняющее в-во	H_i , тыс. руб.	M_i , тонн	Q , $\text{м}^3/\text{час}$	$K_{\text{вг}}$	$K_{\text{в}}$	$K_{\text{ин}}$	$K_{\text{из}}$
1	Cu	12100	0,00047	66	1,16	1,3	1,04	5
2	Zn	4350	0,00032	66	1,16	1,3	1,04	5
3	Cd	4800	0,000000494	66	1,16	1,3	1,04	5
4	Fe	510	0,033	66	1,16	1,3	1,04	5
5	Mg	5	0,00028	66	1,16	1,3	1,04	1
6	Ni	4350	0,00000022	66	1,16	1,3	1,04	2
7	Co	4350	0,0000017	66	1,16	1,3	1,04	5

В данном случае методика была применена для оценки вреда, причиненного сбросом следующих металлов: меди, магния, цинка, железа, кадмия и никеля (таблица 19). По результатам расчета был определен размер вреда, тыс. руб.:

- Медь (Cu): 2 969,54
- Магний (Mg): 735,06

- Цинк (Zn): 2,47
- Железо (Fe): 8 841,17
- Кадмий (Cd): 0,15
- Никель (Ni): 0,20
- Кобальт (Co): 3,89

Таким образом, оценка суммарного размера вреда, причиненного водным объектам сбросом тяжелых металлов, в денежном эквиваленте составит **12552,46 тыс. руб.** Данный расчет позволяет оценить ущерб, нанесенный окружающей среде, и служит основой для принятия мер по предотвращению подобных ситуаций в будущем.

Полученные результаты свидетельствуют о значительном ущербе, который может быть нанесен водным объектам в результате сброса загрязняющих веществ. Данный расчет подчеркивает необходимость применения мер по предотвращению загрязнения водных объектов и минимизации негативных последствий.

4.5.3 Размер вреда, причиненного почвам как объекту окружающей среды

Оценка ущерба, нанесенного почвам, проведена в соответствии с приказом Минприроды России от 08.07.2010 N 238 (с изменениями на 18 ноября 2021 года)² документ, определяющий методику исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды.

В рамках данной работы была проведена оценка экономического эффекта от использования отходов в качестве материалов для очистки почв. Исходя из методики расчета, указанной в приказе Минприроды России, был рассчитан потенциальный суммарный эффект от проведенных природоохранных мероприятий.

$$УЩ_{отх} = \sum_{i=1}^n (M_i \times T_{отх}) \times K_{исп} \times K_{мпс} \quad (8)$$

$УЩ_{отх} = 7200 \times 10000 \times 1 \times 0.5 = 36000$ тыс. руб.

$УЩ_{отх}$ - размер вреда (руб.);

M_i - масса отходов с одинаковым классом опасности (тонна);

² Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды (с изменениями на 18 ноября 2021 года) Приказ Минприроды России (Министерства природных ресурсов и экологии РФ) от 08.07.2010 N 238 Зарегистрирован в Министерстве юстиции Российской Федерации 07.09.2010 N 18364

n - количество видов отходов, сгруппированных по классам опасности в пределах одного участка, на котором выявлено несанкционированное размещение отходов производства и потребления;

$K_{\text{исп}}$ - показатель, учитывающий категорию земель и вид разрешенного использования земельного участка,

$T_{\text{отх}}$ - такса для исчисления размера вреда, причиненного почвам как объекту охраны окружающей среды, в результате порчи почв при их захламлении,

$K_{\text{мпс}}$ - показатель, учитывающий мощность плодородного слоя почвы,

Исследование показало, что захламление почв отходами производства и потребления приводит к ущербу в размере **36000 тыс. руб./год**. Этот результат был получен путем исчисления размера вреда в стоимостной форме, основанного на формуле, учитывающей степень загрязнения почвы и ее экономическую ценность. Полученные данные подчеркивают значимость проблемы захламления почв и необходимость разработки мер по предотвращению и ликвидации данного вида загрязнения.

В ходе расчета было установлено, что загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами и отходами производства и потребления приводит к значительному экономическому ущербу. Сброс тяжелых металлов в водные объекты оценили в **12 552,46 тыс. рублей**, а захламление почв - в **36000 тыс. рублей** в год. Данные получены путем стоимостной оценки ущерба, учитывающей степень загрязнения и экономическую ценность ресурсов. Результаты подчеркивают важность разработки и внедрения мер по предотвращению загрязнения окружающей среды для минимизации экологического и экономического ущерба.

4.5.4 Экономический эффект от внедрения технико-технологических рекомендаций очистки сточных вод

Для расчета экономического эффекта внедрения безотходной технологии очистки сточных вод необходимо учесть несколько факторов и использовать метод дисконтирования денежных потоков [193, 194]. Ставка дисконтирования (29,54%) рассчитана как сумма ключевой ставки Центрального банка РФ (21%) и уровня инфляции (8,54%). Поскольку ставка дисконтирования высока (29,54%), наиболее значимую роль будут играть поступления от избежание штрафов в начальные годы проекта.

Данные по затратам на очистку сточных вод:

Сумма капитальных затрат - 18 000,95 тыс. руб;

Сумма предотвращенного вреда водным объектам - 12552,46 тыс. руб/год;

Сумма предотвращенного вреда почвам как объекту окружающей среды - 36000 тыс. руб./год.

Расчет годового экономического эффекта:

- Экономия от штрафов: 48 552,46 тыс. руб. в год.
- Текущие затраты: 1300 тыс. руб. в год.
- Чистый годовой экономический эффект: 48 552,46 тыс. руб. - 1300 тыс. руб. = 47 252,46 тыс. руб.

Для оценки экономической эффективности проекта с учетом временной стоимости денег необходимо дисконтировать чистый годовой экономический эффект на каждый год проекта (таблица 20). Формула дисконтированного денежного потока (ДДП) выглядит так:

$$\text{ДДП} = \text{ДП} / (1 + \text{Сд})^t \quad (9)$$

где:

- ДП - чистый денежный поток за год (47 252,46 тыс. руб.)
- Сд - ставка дисконтирования (29,54% или 0,2954)
- t - номер года (от 1 до 10)

Расчет чистой приведенной стоимости (ЧДД): суммируем все дисконтированные чистые годовые эффекты и вычтем из них первоначальные инвестиции:

$$\text{ЧДД} = \Sigma [47\,252,46 \text{ тыс. руб.} / (1 + 0,2954)^t] - 18\,000,95 \text{ тыс. руб.}$$

$$\text{ЧДД} = 143\,174,95 \text{ тыс. руб.} - 18\,000,95 \text{ тыс. руб.} = 125\,174,00 \text{ тыс. руб.}$$

Таблица 20 - Расчет дисконтированных денежных потоков

Год (t)	Чистый годовой эффект (Сд)	Дисконтирующий множитель $(1/(1+\text{Сд}))^t$	Дисконтирующий денежный поток (ДДП)
1	47 252,46	0,76	35911,86
2	47 252,46	0,59	27878,95
3	47 252,46	0,45	21263,60
4	47 252,46	0,34	16065,83
5	47 252,46	0,26	12285,63
6	47 252,46	0,20	9450,49
7	47 252,46	0,15	7087,86
8	47 252,46	0,12	5670,29
9	47 252,46	0,09	4252,72
10	47 252,46	0,07	3307,67
Сумма ДДП			143174,95

Рассчитанная чистая приведенная стоимость (ЧДД) проекта составляет 125 174,00 тыс. руб. Поскольку ЧДД значительно больше нуля, проект внедрения технологии очистки сточных вод при указанных параметрах является экономически выгодным.

Индекс доходности, показывающий прибыль инвестора на каждый вложенный им рубль, составит 6,95 (125 174,00/18 000,95).

Срок окупаемости проекта составит 1 год 2 месяца (18 000,95 / 14 317,49).

Полученные результаты свидетельствуют о значительном экономическом потенциале применения отходов для восстановления и очистки почв. Данный подход позволяет не только снизить уровень деградации почв, но и оптимизировать расходы на природоохранные мероприятия. Необходимо продолжить разработку и внедрение технологий по утилизации и переработке отходов для их использования в качестве материалов для очистки почв.

4.5.5 Сравнение очистки сточных вод с помощью отходов производств с традиционными методами

Очистка сточных вод с использованием отходов производств – перспективное направление, позволяющее снизить затраты и решить проблему утилизации отходов. Однако, данный подход требует тщательной оценки применимости конкретного вида отходов, разработки оптимальных технологий и строгого контроля качества очищенной воды. В большинстве случаев, наиболее эффективным является комбинированный подход, сочетающий традиционные и инновационные методы, с учетом специфики сточных вод и доступных отходов.

Таблица 21 демонстрирует разницу в стоимости очистки одного кубического метра сточных вод при использовании различных методов [195, 196]. Данные показывают, что затраты значительно варьируются в зависимости от выбранной технологии, таблица 21, [197].

Таблица 21 - Затраты на очистку 1 м³

Способ очистки	Затраты на очистку 1 м ³ , руб.
Очистка ЖМКС+ОГП	4,20
Реагенты	150,00-187,00
Электромембранный	138,00-140,19
Реагенты / коагулянты	18,8-51,3

Таблица 21 демонстрирует значительную разницу в затратах на очистку 1 м³ сточных вод в зависимости от метода: наиболее экономичной является «Очистка ЖМКС+ОГП» с затратами всего 4,20 руб., в то время как применение реагентов обходится в 150-187 руб.,

электромембранный метод - в 138-140,19 руб., а использование реагентов/коагулянтов - в 18,8-51,3 руб. Эти цифры наглядно показывают, что использование отходов в методе «ЖМКС+ОГП», позволяет существенно снизить расходы, по сравнению с другими технологиями, которые обходятся дороже.

Внедрение данных технико-технологических рекомендаций позволяет существенно снизить затраты на очистку сточных вод как на эксплуатационном, так и на постэксплуатационном этапах. Это достигается за счет использования новых, более эффективных материалов, что приводит к уменьшению эксплуатационных расходов. Дополнительная экономия обеспечивается снижением штрафов за причинение вреда водным объектам и почвам благодаря повышению эффективности очистки и минимизации негативного воздействия на окружающую среду.

4.6 Выводы к четвертой главе

1. Разработана технологическая схема очистки сточных вод от металлов с применением отходов производств – ЖМКС и ОГП. Процесс состоит из четырех этапов: накопление и усреднение сточных вод, очистка с использованием ЖМКС (осаждение металлов, нейтрализация, повышение pH и получение мелиоранта ФММ), доочистка с применением ОГП (сорбция остаточных металлов, повышение концентрации калия, нейтрализация pH и получение мелиоранта ГМ) и складирование доочищенной воды «магниева вода» для повторного использования

2. Доказана возможность использования в качестве ферро-магниевого мелиоранта (ФММ) с дозировкой в 60 г/м² вновь образованных в процессе очистки материалов.

3. Технологические решения обеспечивают значительное снижение затрат на очистку сточных вод — с 119,15 руб./м³ (при существующих подходах) до 4,20 руб./м³, а также позволяют ежегодно сокращать потери в виде штрафов и компенсации за экологический ущерб в размере до 48 552,46 тыс. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертация является квалификационной работой, в которой изложено решение актуальной научно-практической задачи - обоснованы параметры безотходной технологии очистки высокоминерализованных сточных вод, с использованием отходов железо-магниевого производства и гуминовых препаратов, что имеет существенное значение при проектировании систем водоочистки на этапе освоения медноколчеданных месторождений.

Основные научные результаты работы заключаются в следующем:

1. Установлены закономерности влияния высокоминерализованных сточных вод, формирующихся при разботке медноколчеданных месторождений. Увеличение концентрации тяжелых металлов в воде приводит к снижению интенсивности самовосстановления биологических растительных ресурсов, что проявляется в уменьшении длины корней (в 1,4 раза) и длины побегов (в 1,3 раза) по сравнению с контрольной группой (фоновым участком).
2. Для достижения высокой эффективности (до 99,99%) удаления тяжелых металлов (Cu, Zn, Cd, Fe) из высокоминерализованных сточных вод (pH 2,33-2,91) необходимо последовательное применение ЖМКС и ОГП в дозировке 10 г/л при времени контакта 120-180 минут. Эффективность ЖМКС повышается при увеличении начальной концентрации металлов до 500,00 мг/л, в то время как ОГП лучше подходит для доочистки вод с низкими концентрациями меди и цинка (менее 50,00 мг/л).
3. Для очистки сточных вод запатентовано применение отхода гуминового производства, а также железо-магниевого композиционного состава, в основе которого отход железо-магниевого производства, обладающих способностью к активной нейтрализации тяжелых металлов (Cu^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{3+}).
4. Разработана безотходная технология, основанная на последовательном осаждении и сорбции тяжелых металлов Cu, Zn, Cd, Fe обеспечивающим совершенствование проектирования системы водоочистки производительностью до 1591 м³/сутки.
5. Доказана возможность использования в качестве ферро-магниевого мелиоранта (ФММ) с дозировкой в 60 г/м² вновь образованных в процессе очистки материалов.
6. Технологические решения обеспечивают значительное снижение затрат на очистку сточных вод — с 119,15 руб./м³ (при существующих подходах) до 4,20 руб./м³, а

также позволяют ежегодно сокращать потери в виде штрафов и компенсации за экологический ущерб в размере до 48 552,46 тыс. руб.

Рекомендации и дальнейшие перспективы разработки темы

Полученные в диссертации результаты рекомендуется использовать для совершенствования методики проектирования и внедрения технологии очистки сточных вод с применением производственных отходов. Заинтересованными предприятиями и учреждениями могут быть научно-исследовательские институты, проектные организации и горнодобывающие предприятия.

Комиссия предприятия «НПО УГГУ» отмечает эколого-экономическую целесообразность использования предлагаемой технологии очистки высокоминерализованных сточных вод за счет применения производственных отходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минигаимов Н.С., Батанов Б.Н., Мустафин Р.Ф., Сакаев Р.А. Влияние сбросов сточных вод на качество воды рек Республики Башкортостан // Вестник Академии наук Республики Башкортостан. 2019. Т. 30, № 2(94). С. 35-45. DOI: 10.24411/1728-5283-2019-10204.
2. Брындина Л.В., Корчагина А.Ю. Влияние загрязнений сточных вод на биоценоз активного ила // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10, № 3(39). С. 16-25. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.3/2.
3. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Наволокина В.Ю. Реабилитация техногенных объектов, отработанных медноколчеданных месторождений на примере Левихинского рудника (средний Урал) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, № 8. С. 137-150. DOI: 10.18799/24131830/2023/8/4089.
4. Тихомирова В.В., Смирнова П.С. Загрязнение поверхностных и сточных вод Российской Федерации тяжелыми металлами // Международный научно-исследовательский журнал. 2022. № 10(124). DOI: 10.23670/IRJ.2022.124.55.
5. Пинаева А.С., Ельшаева И.В. Влияние осадка сточных вод на накопление РВ, СД в системе почва-растение // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2022. № 4(69). С. 113-121. DOI: 10.24412/2078-1318-2022-4-113-121.
6. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году. Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ имени М.В.Ломоносова, 2023. – 686 с.
7. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году: Доклад / Минприроды России. - Москва, 2024. - 711 с.
8. Степанова И.А., Полищук С.Д., Чурилов Д.Г., Чурилова В.В., Обидина И. В., Чурилов Г. И. Биологическая активность наночастиц кобальта и оксида цинка и их биоаккумуляция на примере вики // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2019. № 1(41). С. 62-68
9. Иванищев В.В. Биоаккумуляция, гомеостаз и токсичность меди в растениях // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2020. № 1. С. 33-41.
10. Симонова О.А., Симонов М.В., Товстик Е.В. Сортовые особенности биоаккумуляции железа в растениях ячменя // Таврический вестник аграрной науки. 2020. № 3(23). С. 142-151. DOI: 10.33952/2542-0720-2020-3-23-142-151.

11. Толкачев Г.Ю. Оценка влияния поровых растворов донных отложений и подземных вод на качество воды Иваньковского водохранилища // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 5-1(83). С. 48-52. DOI: 10.23670/IRJ.2019.83.5.010.
12. Иванов Д.В., Зиганшин И.И., Осмелкин Е.В., Подшивалина В.Н. Донные отложения как фактор, определяющий условия обитания выхухолы русской в пойменных озерах Присурья // Известия Русского географического общества. 2022. Т. 154, № 1. С. 48-60. DOI: 10.31857/S0869607122010049.
13. Корженевский Б.И., Толкачев Г.Ю. Загрязнения донных отложений тяжелыми металлами в водных объектах с различным гидрологическим режимом // Безопасность жизнедеятельности. 2021. № 5(245). С. 28-33.
14. Курамшина З.М., Смирнова Ю.В., Хайруллин Р.М. Токсичность кадмия и никеля для растений *Sinapis alba*, инокулированных эндофитными штаммами *Bacillus subtilis* // Физиология растений. 2018. Т. 65, № 2. С. 133-142. DOI: 10.7868/S0015330318020057.
15. Багова З.И., Жантасов К.Т., Туребекова Г.З., Нестеренко Н.Г. Анализ и влияние свинецсодержащих отходов свинцового производства на жизнедеятельность человека и окружающую среду // Научные труды ЮКГУ им. М. Ауэзова. 2021. № 1(57). С. 8-14.
16. Толкачев Г.Ю., Корженевский Б.И., Коломийцев Н.В. Мониторинг загрязнения донных отложений тяжелыми металлами для различных водных объектов верхней Волги // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2023. № 3. С. 65-75. DOI: 10.31857/S0869780923030116.
17. Бакаева Е.Н., Тарадайко М.Н. Токсичность донных отложений малых рек бассейна реки Тузлов по набору биотестов // Успехи современного естествознания. 2019. № 4. С. 31-36.
18. Zakrutkin, V. E., Reshetnyak V. N., Reshetnyak O. S. Assessment of the heavy metal pollution level of the river sediments in the east Donbass (Rostov region, Russia) // Water and Ecology. 2020. № 3(83). С. 32-40. DOI: 10.23968/2305-3488.2020.25.3.32-40. EDN: STSFGI
19. Корженевский Б.И., Толкачев Г.Ю., Коломийцев Н.В. Основные критерии оценок содержания тяжелых металлов в донных отложениях водных объектов // Мелиорация и водное хозяйство. 2020. № 4. С. 34-40.

20. Гузева, А. В., Федорова И. В. Формы нахождения тяжелых металлов в донных отложениях озер острова Самойловский, дельта реки Лены // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2020. № 9. С. 18-29. DOI 10.17076/lim1235.
21. Антонинова Н.Ю., Рыбникова Л.С., Славиковская Ю.О., Шубина Л.А. Эколого-экономические аспекты выбора направлений реабилитации территорий размещения промышленных отходов горно-металлургического комплекса // Горная промышленность. 2022. № S1. С. 71-77. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-71-77.
22. Антонинова Н.Ю., Собенин А.В., Усманов А.И., Шепель К.В. Оценка возможности использования отходов железо-магниевого производства для очистки сточных вод от тяжелых металлов (Cd^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+}) // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 257-265. DOI: 10.31897/PMI.2023.34.
23. Капустин В. Г., Корнеев И. Н. География Свердловской области // Екатеринбург. Сократ. 2006. – 400 с.
24. Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы свердловской области на 15.03.2022 г. Справка подготовлена ФГБУ «ВСЕГЕИ» в рамках выполнения Государственного задания Федерального агентства по недропользованию от 14.01.2022 г. № 049-00018-22-01
25. Туманян А.Ф., Селиверстова А.П., Зайцева Н.А. Влияние тяжелых металлов на экосистемы // Химия и технология топлив и масел. 2020. № 3(619). С. 46-49.
26. Сандимиров С.С. Влияние технического водоснабжения Кольской АЭС на содержание тяжелых металлов в озере Имандра // Вода и экология: проблемы и решения. 2020. № 2(82). С. 93-103. DOI: 10.23968/2305-3488.2020.25.2.93-103.
27. Apestegui A., Juncos R., Daga R. et al. Trace element distribution and pollution status of surface sediments in lakes impacted by volcanic activity // J Soils Sediments. 2023. Vol. 23. P. 1552–1567. DOI: 10.1007/s11368-023-03429-7.
28. Yiika L.P., Jean-Lavenir N.M., Suh G.C. et al. Distribution, Sources, and Ecotoxicological Assessment of Potentially Toxic Metals in River Sediments of Nkwen Area (Cameroon Volcanic Line) // Water Air Soil Pollut. 2024. Vol. 235. P. 16. DOI: 10.1007/s11270-023-06830-7.
29. Shevko E.P., Gora M.P., Kokhanova S.P. et al. The Formation of the Composition of Thermal Waters of Present-Day Volcanoes Based on the Example of the Golovnin Caldera, Kunashir Island, Kuril Islands // Russ. J. of Pac. Geol. 2023. Vol. 17. P. 90–100. DOI: 10.1134/S1819714023010098.

30. Chao H.C. Water of Eastern Taiwan mud volcanoes: part II—trace element distribution of Lei-Gong-Huo mud volcano // *Terr Atmos Ocean Sci.* 2023. Vol. 34. P. 1. DOI: 10.1007/s44195-022-00033-z.
31. Rahman M.M., Hasan M.F., Hasan A.S.M.M. et al. Chemical weathering, provenance, and tectonic setting inferred from recently deposited sediments of Dharla River, Bangladesh // *J. Sediment. Environ.* 2021. Vol. 6. P. 73–91. DOI: 10.1007/s43217-020-00046-z.
32. Babu S.S., Prajith A., Rao V.P. et al. Composition of river sediments from Kerala, southwest India: Inferences on lateritic weathering // *J Earth Syst Sci.* 2023. Vol. 132. P. 150. DOI: 10.1007/s12040-023-02153-7.
33. Abebe Y., Whitehead P., Alamirew T. et al. Evaluating the effects of geochemical and anthropogenic factors on the concentration and treatability of heavy metals in Awash River and Lake Beseka, Ethiopia: arsenic and molybdenum issues // *Environ Monit Assess.* 2023. Vol. 195. P. 1188. DOI: 10.1007/s10661-023-11674-z.
34. Aydin M., Uğış A., Akkuzu E., Ünal S. Forest fire effects on water resources // *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty.* 2017. Vol. 17, № 4. P. 554-564. DOI: 10.17475/kastorman.369008.
35. Собенин А.В., Антонинова Н.Ю., Усманов А.И., Шепель К.В. Удаление ионов меди из промышленных сточных вод с использованием отходов железомagneзиевого производства // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал.* 2023. № 2. С. 32-42. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-2-32-42.
36. Ушакова Е.С., Белкин П.А., Бакланов М.А., Дробинина Е.В., Пузик А.Ю. Экогеохимическая и биоиндикационная оценка загрязнения малых рек города Березники // *Вестник Пермского университета. Геология.* 2022. Т. 21, № 4. С. 384-393. DOI: 10.17072/psu.geol.21.4.375.
37. Мягкая И.Н., Сарыг-оол Б.Ю., Кириченко И.С., Густайтис М.А., Лазарева Е.В. Экогеохимическая оценка рек Ярлы-Амры и Чибитка, расположенных в ореоле действия Акташского ртутного месторождения и его отвалов (Горный Алтай) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* 2022. Т. 333, № 4. С. 7-26. DOI: 10.18799/24131830/2022/4/3273.
38. Yakovlev E., Druzhinina A., Druzhinin S. et al. Assessment of physical and chemical properties, health risk of trace metals and quality indices of surface waters of the rivers and lakes of the Kola Peninsula (Murmansk Region, North–West Russia) // *Environ Geochem Health.* 2022. Vol. 44. P. 2465–2494. DOI: 10.1007/s10653-021-01027-5.
39. Mistikawy J.A., Mackowiak T.J., Butler M.J. et al. Chromium, manganese, nickel, and cobalt mobility and bioavailability from mafic-to-ultramafic mine spoil weathering in western

Massachusetts, USA // *Environ Geochem Health*. 2020. Vol. 42. P. 3263–3279. DOI: 10.1007/s10653-020-00566-7

40. Barago N., Mastroianni C., Pavoni E. et al. Environmental impact of potentially toxic elements on soils, sediments, waters, and air nearby an abandoned Hg-rich fahlore mine (Mt. Avanza, Carnic Alps, NE Italy) // *Environ Sci Pollut Res*. 2023. Vol. 30. P. 63754–63775. DOI: 10.1007/s11356-023-26629-7.

41. Chalaris M., Gkika D.A., Tolkou A.K. et al. Advancements and sustainable strategies for the treatment and management of wastewaters from metallurgical industries: an overview // *Environ Sci Pollut Res*. 2023. Vol. 30. P. 119627–119653. DOI: 10.1007/s11356-023-30891-0.

42. Mahmood T., Momin S., Ali R., Naeem A., Khan A. Technologies for Removal of Emerging Contaminants from Wastewater. IntechOpen, 2022. DOI: 10.5772/intechopen.104466.

43. Kumar A., Thakur A., Panesar P.S. A review on the industrial wastewater with the efficient treatment techniques // *Chem. Pap*. 2023. Vol. 77. P. 4131–4163. DOI: 10.1007/s11696-023-02779-3.

44. Atamanova O.V., Tikhomirova E.I., Burahta V.A. et al. Hydrochemical Monitoring of Water Quality in Natural Water Bodies of the Ural River Basin // *Biol Bull Russ Acad Sci*. 2022. Vol. 49. P. 1821–1826. DOI: 10.1134/S106235902210003X.

45. Nwosu F., Babamale H. ASSESSMENT OF PHYSICOCHEMICAL QUALITY OF WASTE WATER FROM A METALLURGICAL INDUSTRY // *Nigerian Journal of Scientific Research*. 2016. Vol. 15. iss. 2. P. 296-299.

46. Shylla L., Barik S.K., Joshi S.R. Impact assessment of heavy metal contamination on water quality of underground and open-cast coal mines // *The NEHU Journal*. 2020. Vol. XVIII, № 2. P. 58-72.

47. Badamasi H., Hassan U.F., Adamu H., Baba N. Assessment of Water Quality Using Heavy Metal Evaluation Index: A case study of Riruwai Mining Area, Kano State, Nigeria. 2021. P. 33-41.

48. Shylla L., Barik S.K., Behera M.D. et al. Impact of heavy metals on water quality and indigenous *Bacillus* spp. prevalent in rat-hole coal mines // *3 Biotech*. 2021. Vol. 11. P. 253. DOI: 10.1007/s13205-021-02808-6.

49. de Jesus Santos M.J., de Paula Laranja R.E. Influence of agriculture on surface water quality in three lentic environments in a conservation unit of Brazil // *Int. J. Environ. Sci. Technol*. 2023. DOI: 10.1007/s13762-023-05296-8.

50. Mohammed A.M., Refaee A., El-Din G.K. et al. Hydrochemical characteristics and quality assessment of shallow groundwater under intensive agriculture practices in arid region, Qena, Egypt // *Appl Water Sci.* 2022. Vol. 12. P. 92. DOI: 10.1007/s13201-022-01611-9.
51. Габараева З.Г., Макиева Д.Ч. Действие тяжелых металлов на организм человека // *Образование и право.* 2020. № 11. С. 302-304. DOI: 10.24411/2076-1503-2020-11146
52. Genchi G., Sinicropi M.S., Lauria G. et al. The Effects of Cadmium Toxicity // *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 2020. Vol. 17. Iss. 11. № 3782. DOI: 10.3390/ijerph17113782
53. Fu Z., Xi S. The effects of heavy metals on human metabolism // *Toxicology Mechanisms and Methods.* 2020. Vol. 30, № 3. P. 167-176. DOI: 10.1080/15376516.2019.1701594.
54. Zulfiqar U., Ayub A., Hussain S. et al. Cadmium Toxicity in Plants: Recent Progress on Morpho-physiological Effects and Remediation Strategies // *J Soil Sci Plant Nutr.* 2022. Vol. 22. P. 212–269. DOI: 10.1007/s42729-021-00645-3.
55. Zhao H., Guan J., Liang Q. et al. Effects of cadmium stress on growth and physiological characteristics of safflower seedlings // *Sci Rep.* 2021. Vol. 11. P. 9913. DOI: 10.1038/s41598-021-89322-0.
56. Aqeel M., Khalid N., Tufail A. et al. Elucidating the distinct interactive impact of cadmium and nickel on growth, photosynthesis, metal-homeostasis, and yield responses of mung bean (*Vigna radiata* L.) varieties // *Environ Sci Pollut Res.* 2021. Vol. 28. P. 27376–27390. DOI: 10.1007/s11356-021-12579-5.
57. Soyupek S., Oksay T., Sütçü R., Armagan A., Gökalp O., Perk H., Delibas N. The effect of cadmium toxicity on renal nitric oxide synthase isoenzymes // *Toxicol Ind Health.* 2012. Vol. 28, № 7. P. 624-8. DOI: 10.1177/0748233711420467.
58. Treviño S., Pulido G., Fuentes E., Handal-Silva A., Moreno-Rodríguez A., Venegas B., Flores G., Guevara J., Díaz A. Effect of cadmium administration on the antioxidant system and neuronal death in the hippocampus of rats // *Synapse.* 2022. Vol. 76, № 9-10. P. 1-16. DOI: 10.1002/syn.22242.
59. Ma Y., Su Q., Yue C., Zou H., Zhu J., Zhao H., Song R., Liu Z. The Effect of Oxidative Stress-Induced Autophagy by Cadmium Exposure in Kidney, Liver, and Bone Damage, and Neurotoxicity // *Int J Mol Sci.* 2022. Vol. 23, № 21. P. 13491. DOI: 10.3390/ijms232113491.
60. Chen F.C., Huang C.M., Yu X.W., Chen Y.Y. Effect of nano zinc oxide on proliferation and toxicity of human gingival cells // *Hum Exp Toxicol.* 2022. Vol. 41. P. 9603271221080236. DOI: 10.1177/09603271221080237.

61. Souza S.C.R., Souza L.A., Schiavinato M.A., de Oliveira Silva F.M., de Andrade S.A.L. Zinc toxicity in seedlings of three trees from the Fabaceae associated with arbuscular mycorrhizal fungi // *Ecotoxicol Environ Saf.* 2020. Vol. 195. P. 110450. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.110450.
62. Jung A., Kim S.H., Yang J.Y., Jeong J., Lee J.K., Oh J.H., Lee J.H. Effect of Pulmonary Inflammation by Surface Functionalization of Zinc Oxide Nanoparticles // *Toxics*. 2021. Vol. 9, № 12. P. 336. DOI: 10.3390/toxics9120336.
63. Kopach A. Ye., Fedoriv, O. Ye., Melnyk N. A. Effects of the influence of copper and zinc on living organisms (literature review) // *Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2021. Vol. 100, № 2. P. 172-177. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-2-172-177.
64. Naz S., Gul A., Zia M. Toxicity of copper oxide nanoparticles: a review study // *IET Nanobiotechnol.* 2020. Vol. 14, iss. 1. P. 1-13. DOI: 10.1049/iet-nbt.2019.0176.
65. Hou J., Wang X., Hayat T., Wang X. Ecotoxicological effects and mechanism of CuO nanoparticles to individual organisms // *Environ Pollut.* 2017. Vol. 221. P. 209-217. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.11.066.
66. Mir A.R., Pichtel J., Hayat S. Copper: uptake, toxicity and tolerance in plants and management of Cu-contaminated soil // *Biometals*. 2021. Vol. 34, № 4. P. 737-759. DOI: 10.1007/s10534-021-00306-z.
67. Huo K., Shangguan X., Xia Y., Shen Z., Chen C. Excess copper inhibits the growth of rice seedlings by decreasing uptake of nitrate // *Ecotoxicol Environ Saf.* 2020. Vol. 190. P. 110105. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.110105.
68. Assadian E., Zarei M.H., Gilani A.G. et al. Toxicity of Copper Oxide (CuO) Nanoparticles on Human Blood Lymphocytes // *Biol Trace Elem Res.* 2018. Vol. 184. P. 350–357. DOI: 10.1007/s12011-017-1170-4.
69. Галкин Ю. А., Уласовец Е. А., Селицкий Г. А., Ермаков Д.В., Обадин Д.Н. Результаты разработки внедрения технологии очистки промышленных сточных вод предприятий горно - металлургического комплекса // *Чистая вода России-2021 : Сборник материалов XVI Международного научно-практического симпозиума и выставки, Екатеринбург, 17–20 мая 2021 года. – Екатеринбург: ООО "ДжиЛайм". 2021. С. 261-263. – EDN HCBDBH.*
70. Вараева, Е. А., В. И. Аксенов. Водное хозяйство горно-обогатительных комбинатов: проблемы и пути решения // *Вода Magazine*. 2016. № 1(101). С. 28-32. – EDN VVNGMV

71. Bologo V., Maree J. P., Carlsson F. Application of magnesium hydroxide and barium hydroxide for the removal of metals and sulphate from mine water // Water SA. 2012. V. 38(1). P. 23 – 28
72. Медяник Н. Л., Мишурина О. А., Муллина Э. Р., Смирнова А. В., Зайцева Е. В. Технология комплексной переработки гидротехногенных образований горных предприятий медноколчеданного профиля // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. 2019. №4.
73. Селицкий Г.А. Технологическая схема очистки карьерных и подотвальных вод // Экология производства. 2005. № 9. с.83–87
74. Шадрунова, И. В., Орехова Н.Н. Исследование технологии извлечения цветных металлов из шахтных и подотвальных вод // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 9. С. 125-134. EDN RLECHD.
75. Коваленко К. А. Природные минералы в решении экологических проблем горно-перерабатывающих предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 10. С. 348-368. – EDN UQFRTN.
76. Лин М.М., Фарносова Е.Н., Каграманов Г.Г. Очистка сточных вод от тяжелых металлов методами нанофильтрации и ионного обмена // Химическая промышленность сегодня. 2017. № 8. С. 30-35
77. Фадеев А.Б., Кузин Е.Н., Кручинина Н.Е. [и др.] Оценка эффективности методов очистки сточных вод гальванического производства от аммиачно-тартратных комплексов меди (II) // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Естественные науки. 2020. № 5(92). С. 97-108. DOI: 10.18698/1812-3368-2020-5-97-108.
78. Мухамедов К.Г., Насирова Н.К., Мухамедов Ж.К., Абдурахманов О.Х. Очистка сточных вод гальванических производств реагентным методом // Universum: технические науки. 2023. № 7-3(112). С. 51-56.
79. Овчинников А.С., Бочарников В.С., Денисова М.А. [и др.] Сравнительная экономическая оценка различных природных сорбентов для очистки сточных вод // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2020. № 2(58). С. 65-72. DOI: 10.32786/2071-9485-2020-02-06.
80. Степанов С.В., Авдеенков П.П., Пономаренко О.С., Морозова К.М. Оптимизация и технико-экономическая оценка технологических схем очистки сточных вод предприятия глубокой переработки куриных яиц // Водоснабжение и санитарная техника. 2023. № 5. С. 37-47. DOI: 10.35776/VST.2023.05.05.

81. Хорохорина И.В., Лазарев С.И., Филимонова О.С., Брянкин К.В. Технологическое оформление и экономическая оценка электромембранных методов очистки промышленных сточных вод от тяжелых металлов и АПАВ // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2023. № 2(88). С. 19-28. DOI: 10.17277/voprosy.2023.02.pp.019-028.
82. Натареев С.В., Бакин М.А., Снегирев Д.Г. Разработка математической модели ионообменной очистки воды от солей тяжелых металлов в емкостном аппарате // Пожарная и аварийная безопасность. 2021. № 1(20). С. 27-31.
83. Медяник Н.Л., Тусупбаев Н.К., Варламова И.А. [и др.] Удаление тяжелых металлов из растворов методом ионной флотации // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14, № 1. С. 18-26. DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-1-18-26.
84. Дагаева Е.В., Валинурова Э.Р. Сорбция ионов меди (II) на природном и модифицированных цеолитах месторождения Хонгуруу // Вестник Башкирского университета. 2019. Т. 24, № 1. С. 71-75.
85. Смирнова Н.Н., Небукина И.А., Шиганова Е.А. Сравнительная эффективность применения реагентных методов в процессах очистки сточных вод гальванических производств от ионов меди (II) // Вода: химия и экология. 2016. № 8(98). С. 32-37.
86. Ates N., Uzal N. Removal of heavy metals from aluminum anodic oxidation wastewaters by membrane filtration // Environ Sci Pollut Res Int. 2018. Vol. 25, № 22. P. 22259-22272. DOI: 10.1007/s11356-018-2345-z.
87. Мейрамкулова К.С., Аубакирова К.М., Усербаев М.Т., Саябаев К.М. Эффективность очистки сточных вод убойного цеха птицефабрики электрохимическим методом // Известия Международной академии аграрного образования. 2018. № 42-2. С. 55-60.
88. Lupa L., Coheci L. Heavy Metals Removal from Water and Wastewater // Heavy Metals - Recent Advances, IntechOpen, 2023. DOI: 10.5772/intechopen.110228.
89. Zhang Y., Duan X. Chemical precipitation of heavy metals from wastewater by using the synthetical magnesium hydroxy carbonate // Water Science and Technology. 2020. Vol. 81. P. 1130-1136. DOI: 10.2166/wst.2020.208
90. Mohd Yatim S.R., Kasmuri S.N.H., Syahjidan H.N., Mokhtar N.S., Zainuddin N.A. Removing copper, chromium and nickel in industrial effluent using hydroxide precipitation versus sulphide precipitation // Health Scope. 2020. Vol. 3. P. 54-60.

91. Benalia M.C., Youcef L., Bouaziz M.G. et al. Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewater by Chemical Precipitation: Mechanisms and Sludge Characterization // Arab J Sci Eng. 2022. Vol. 47. P. 5587–5599. DOI: 10.1007/s13369-021-05525-7.
92. Hoseinian F.S., Irannajad M., Safari M. Effective factors and kinetics study of zinc ion removal from synthetic wastewater by ion flotation // Separation Science and Technology. 2016. Vol. 52, № 5. P. 892–902. DOI: 10.1080/01496395.2016.1267216.
93. Salmani M.H., Davoodi M., Ehrampoush M.H. et al. Removal of cadmium (II) from simulated wastewater by ion flotation technique // J Environ Health Sci Engineer. 2013. Vol. 10. P. 16. DOI: 10.1186/1735-2746-10-16.
94. Mulungulungu G.A., Mao T., Han K. Efficient removal of high-concentration copper ions from wastewater via 2D g-C₃N₄ photocatalytic membrane filtration // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2021. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.126714.
95. Xiang H. et al. Recent advances in membrane filtration for heavy metal removal from wastewater: A mini review // Journal of Water Process Engineering. 2022. Vol. 49. P. 103023. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103023.
96. Li C.W., Cheng C.H., Choo K.H., Yen W.S. Polyelectrolyte enhanced ultrafiltration (PEUF) for the removal of Cd(II): Effects of organic ligands and solution pH // Chemosphere. 2008. Vol. 72, Iss 4. P. 629-635. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2008.02.036.
97. Jiao Y. et al. Removal of heavy metal ions from acidic wastewater by constructing positively charged hollow fiber nanofiltration separating-layer based on Fe (III)/co deposition-quaternization // Journal of Water Process Engineering. 2023. Vol. 56. P. 104450. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104450.
98. Harharah R.H., Abdalla G.M.T., Elkhaleefa A., Shigidi I., Harharah H.N. A Study of Copper (II) Ions Removal by Reverse Osmosis under Various Operating Conditions // Separations. 2022. Vol. 9. P. 155. DOI: 10.3390/separations9060155.
99. Chen X. et al. Zinc removal from model wastewater by electrocoagulation: Processing, kinetics and mechanism // Chemical Engineering Journal. 2018. Vol. 349. P. 358-367. DOI: 10.1016/j.cej.2018.05.099
100. Brahmi K. et al. Treatment of heavy metal polluted industrial wastewater by a new water treatment process: ballasted electroflocculation // Journal of Hazardous Materials. 2018. Vol. 344. P. 968-980. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.11.051.
101. Wu C. et al. High-gravity intensified electrodeposition for efficient removal of Cd²⁺ from heavy metal wastewater // Separation and Purification Technology. 2022. Vol. 289. P. 120809.

102. Ahmed S., Aktar S., Zaman S. et al. Use of natural bio-sorbent in removing dye, heavy metal and antibiotic-resistant bacteria from industrial wastewater // *Appl Water Sci.* 2020. Vol. 10. P. 107. DOI: 10.1007/s13201-020-01200-8.
103. Hamidi D., Honarasa F. Natural Bitumen as an Available Low Cost Sorbent for Remediation of Heavy Metal Cations // *Iran J Sci Technol Trans Sci.* 2020. Vol. 44. P. 687–694. DOI: 10.1007/s40995-020-00888-2.
104. Topka P., Soukup K., Hejtmánek V. et al. Remediation of brownfields contaminated by organic compounds and heavy metals: a bench-scale test of a sulfur/vermiculite sorbent for mercury vapor removal // *Environ Sci Pollut Res.* 2020. Vol. 27. P. 42182–42188. DOI: 10.1007/s11356-020-10696-1.
105. Huang Y. et al. Heavy metal ion removal of wastewater by zeolite-imidazolate frameworks // *Separation and Purification Technology.* 2018. Vol. 194. P. 462-469.
106. Alasadi A.M., Khaili F.I., Awwad A.M. Adsorption of Cu(II), Ni(II) and Zn(II) ions by nano kaolinite: Thermodynamics and kinetics studies // *Chemistry International.* 2019. Vol. 5, № 4. P. 258-268. DOI: 10.5281/zenodo.2644985.
107. Ghasemi N. et al. Zn (II) removal by amino-functionalized magnetic nanoparticles: Kinetics, isotherm, and thermodynamic aspects of adsorption // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry.* 2018. Vol. 62. P. 302-310.
108. Фоменко Е.В., Аншиц Н.Н., Соловьев Л.А. [и др.] Состав и строение оболочки ценосфер золы-уноса от сжигания угля Кузнецкого бассейна // *Химия твердого топлива.* 2014. № 2. С. 55. DOI: 10.7868/S0023117714020030.
109. Lu Y. et al. Mechanism study of Cu (II) adsorption from acidic wastewater by ultrasonic-modified municipal solid waste incineration fly ash // *Chinese Journal of Chemical Engineering.* 2023. DOI: 10.1016/j.cjche.2023.11.019.
110. Astuti W., Chafidz A., Al-Fateesh A.S., Fakeeha A.H. Removal of lead (Pb(II)) and zinc (Zn(II)) from aqueous solution using coal fly ash (CFA) as a dual-sites adsorbent // *Chinese Journal of Chemical Engineering.* 2020. DOI: 10.1016/j.cjche.2020.08.046.
111. Zhao H., Huang X., Zhang G. et al. Possibility of removing cadmium pollution from the environment using a newly synthesized material coal fly ash // *Environ Sci Pollut Res.* 2020. Vol. 27. P. 4997–5008. DOI: 10.1007/s11356-019-07163-x.
112. Zheng R., Lü J., Song W. et al. Metallurgical properties of CaO-SiO₂-Al₂O₃-4.6wt%MgO-Fe₂O₃ slag system pertaining to spent automotive catalyst smelting // *Int J Miner Metall Mater.* 2023. Vol. 30. P. 886–896. DOI: 10.1007/s12613-022-2569-2.

113. Changelvaei M., Nilforoushan M. R., Arabmarkadeh A., Tayebi M. Removal of Ni and Zn heavy metal ions from industrial waste waters using modified slag of electric arc furnace // *Materials Research Express*. 2021. Vol. 8, № 5. P. 055506.
114. Latorrata S., Balzarotti R., Adami M.I., Marino B., Mostoni S., Scotti R., Bellotto M., Cristiani C. Wastewater Treatment Using Alkali-Activated-Based Sorbents Produced from Blast Furnace Slag // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, № 7. P. 2985. DOI: 10.3390/app11072985.
115. Czech B., Hojamberdiev M., Bogusz A. Impact of thermal treatment of calcium silicate-rich slag on the removal of cadmium from aqueous solution // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 200. P. 369-379. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.309.
116. Liu J., Xie Y., Li C., Fang G., Chen Q., Ao X. Novel red mud/poly-acrylic composites synthesized from red mud and its performance on cadmium removal from aqueous solution // *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 2019. DOI: 10.1002/jctb.6223.
117. Pang Y., Zhao C., Li Y. et al. Cadmium adsorption performance and mechanism from aqueous solution using red mud modified with amorphous MnO₂ // *Sci Rep*. 2022. Vol. 12. P. 4424. DOI: 10.1038/s41598-022-08451-2.
118. Dong W., Liang K., Qin Y., Ma H., Zhao X., Zhang L., Zhu S., Yu Y., Bian D., Yang J. Hydrothermal Conversion of Red Mud into Magnetic Adsorbent for Effective Adsorption of Zn(II) in Water // *Appl. Sci*. 2019. Vol. 9. P. 1519. DOI: 10.3390/app9081519
119. Ческидов В.И., Бобыльский А.С. Технологическо-экологические аспекты отвалообразования вскрышных пород на разрезах Кузбасса // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017. № 5. С. 96-104. DOI: 10.15372/FTPRPI20170511.
120. Пашкевич М.А. Оценка экологической опасности производственных объектов при добыче и переработке полезных ископаемых // *Записки Горного института*. 2006. Т. 168. С. 29-31.
121. Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В., Корнеев С.А. Систематизация и типизация горно-технических систем комбинированной геотехнологии // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009. № 11. С. 194-205. EDN LTZNHT
122. Антонов В. А. Смысловая интерпретация функционально-факторных моделей геомеханических явлений // *Проблемы недропользования*. 2023. № 4(39). С. 17-33. DOI 10.25635/2313-1586.2023.04.017.
123. Антонов В. А. Извлечение математико-статистических закономерностей в экспериментальных исследованиях горно-технологических процессов // *Проблемы недропользования*. 2018. №4(19). С. 61-70.

124. Даувальтер В.А., Кашулин Н.А. Влияние деятельности горно-металлургических предприятий на химический состав донных отложений озера Имандра, Мурманская область // Биосфера. 2015. Т. 7, № 3. С. 295-314.
125. Горбунов А.В., Ермолаев Б.В., Петренко Д.Б. и др. Биоаккумуляция тяжёлых металлов и других токсичных элементов в мышцах рыб бассейна р. Волги // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 2. С. 80-88. DOI: 10.25750/1995-4301-2023-2-080-088.
126. Assadian E., Zarei M.H., Gilani A.G. et al. Toxicity of Copper Oxide (CuO) Nanoparticles on Human Blood Lymphocytes // Biol Trace Elem Res. 2018. Vol. 184. P. 350–357. DOI: 10.1007/s12011-017-1170-4.
127. Бурмистров К. В., Осинцев Н. А. Принципы устойчивого развития горнотехнических систем в переходные периоды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 4. С. 179-195. – DOI 10.18799/24131830/2020/4/2606. – EDN TZVRAB.
128. Блинов И.А., Бутняков А.В. Минералы зоны окисления Кабанского колчеданного месторождения (Средний Урал) // Металлогения древних и современных океанов. 2017. № 23. С. 70-74.
129. Долгополова Н.В., Головастикова А.В., Глебова И.В., Батраченко Е.А. Трансформация свойств вскрышных пород под влиянием выветривания и почвообразования // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 3. С. 56-61.
130. Антонинова Н.Ю., Собенин А.В. Особенности оценки трансформации земельных ресурсов в районах интенсивного техногенного воздействия // Проблемы недропользования. 2016. № 4(11). С. 183-187.
131. Корнилков С.В., Антонинова Н.Ю., Собенин А.В., Усманова В.А., Усманов А.И. Об основных положениях методики проектирования мероприятий, локализирующих миграцию тяжелых металлов в почвах и техногенных грунтах // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. №6 (166). С. 85-94. doi: 10.26730/1999-4125-2024-6-85-94
132. Антонинова Н.Ю., Шубина Л.А., Собенин А.В. Геоэкологическая оценка техногенной трансформации земельных ресурсов при освоении месторождений полезных ископаемых // Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов: труды IV Международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 07 апреля 2016 года / Свердловское областное отделение общественной организации международной академия наук экологии, безопасности человека и природы; Министерство образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»; Институт

экономики УрО РАН. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2016.

133. Opekunova M., Opekunov A., Somov V., Kukushkin S., Papyan E. Transformation of metals migration and biogeochemical cycling under the influence of copper mining production (the Southern Urals) // CATENA. 2020. Vol. 189. 104512. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104512.

134. Chileshe M.N., Syampungani S., Festin E.S. et al. Physico-chemical characteristics and heavy metal concentrations of copper mine wastes in Zambia: implications for pollution risk and restoration // J. For. Res. 2020. Vol. 31. P. 1283–1293. DOI: 10.1007/s11676-019-00921-0.

135. Sahoo B.P., Sahu H.B., Kanuri V.V. et al. Assessment of Metal Pollution of Overburden in a Tropical Coalfield, Ib valley, India: A Case Study // J Geol Soc India. 2023. Vol. 99. P. 37–46. DOI: 10.1007/s12594-023-2264-6.

136. Размахнин К.К., Хатькова А.Н., Шумилова Л.В., Номоконова Т.С. Разработка технологии брикетирования отходов добычи бурых углей // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 9-1. С. 288–298. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_91_0_288.

137. Иванова Л.А., Беляева О.В., Гора Н.В. и др. Анализ эффективности методов очистки сточных вод угольной промышленности от ионов железа и марганца // Уголь. 2023. № 11(1173). С. 81-87. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-11-81-87.

138. Schlieff J., Mutz M. Palatability of Leaves Conditioned in Streams Affected by Mine Drainage: A Feeding Experiment with *Gammarus Pulex* (L.) // Hydrobiologia. 2006. Vol. 563. P. 445–452. DOI: 10.1007/s10750-006-0028-0.

139. Егоров И.Е. Капельно-дождевая эрозия - рельефообразующее значение и методы изучения // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2015. Т. 25, № 2. С. 159-166.

140. Luís A.T., Teixeira P., Almeida S.F.P. et al. Impact of Acid Mine Drainage (AMD) on Water Quality, Stream Sediments and Periphytic Diatom Communities in the Surrounding Streams of Aljustrel Mining Area (Portugal) // Water Air Soil Pollut. 2009. Vol. 200. P. 147–167. DOI: 10.1007/s11270-008-9900-z.

141. Крупкина Л.И. ИВАН-ЧАЙ // Большая российская энциклопедия. Том 10. Москва, 2008. С. 663-664.

142. Ельчининова О.А., Пузанов А.В., Рождественская Т.А., Двуреченская С.Я. Микроэлементы в межгорно-котловинных агроландшафтах Горного Алтая // Агрохимия. 2021. № 6. С. 16-27. DOI: 10.31857/S0002188121060041

143. Лескова О.А., Бондаревич Е.А., Коцюржинская Н.Н. Накопление и распределение химических элементов в растениях *Taraxacum officinale* Wigg.

(Забайкальский край) // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. 2021. № 20-1. С. 265-268. DOI: 10.14258/pbssm.2021051.

144. Сиромля, Т. И. Элементный химический состав *Hypericum perforatum* - ненормируемые элементы / Т. И. Сиромля, Ю. В. Загурская // Химия растительного сырья. – 2019. – № 2. – С. 179-187. – DOI 10.14258/jcprm.2019023965.

145. Яковлев В.Л. Основные этапы и результаты исследований по разработке методологических основ стратегии развития горнотехнических систем при освоении глубокозалегающих месторождений твердых полезных ископаемых // Горная промышленность. 2022. № 1S. С. 34–45. DOI: 10.30686/1609-9192-2022-1S-34-45.

146. Рыльникова М.В., Владимиров Д.Я., Пыталев И.А., Попова Т.М. Роботизированные геотехнологии как путь повышения эффективности и экологизации освоения недр // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017. № 1.

147. Собенин А.В., Антонинова Н.Ю., Усманов А.И., Шепель К.В. Оценка влияния вещественного состава ложа биологических прудков на очистку сточных вод предприятий горнометаллургического комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 5-2. С. 273-282. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_52_0_273.

148. Пашкевич М.А., Харько П.А. Применение композитной смеси для очистки кислых дренажных вод хвостового хозяйства от металлов // Обогащение руд. 2022. № 4. С. 40-47. DOI: 10.17580/or.2022.04.07

149. Кременецкая И.П., Иванов Т.К., Гуревич Б.И, Новиков А.И., Семушин В.В. Раздельное осаждение металлов из высококонцентрированных растворов гранулированным магниезиально-силикатным реагентом // Вестник МГТУ. 2021. Т. 24. № 1. С. 118-130. DOI: 10.21443/1560-9278-2021-24-1-118-130

150. Ming Kong, Longmian Wang, Jianying Chao et al. Removal of Cu²⁺ and Ni²⁺ from Wastewater by Using Modified Alkali-Leaching Residual Wire Sludge as Low-Cost Adsorbent // Water, Air, & Soil Pollution. 2019. Vol. 230. Iss. 3. № 65. DOI: 10.1007/s11270-018-4071-z

151. Антонинова Н.Ю., Собенин А.В., Усманов А.И., Горбунов А.А. Обоснование возможности применения отходов производства гуминовых препаратов для очистки сточных вод от металлов (Cd²⁺, Zn²⁺, Mg²⁺, Cu²⁺) с целью разработки эффективных мероприятий по экологической реабилитации // Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 421-432. EDN NYTBVH

152. Патент № 2011638 С1 Российская Федерация, МПК C01F 5/06. Способ получения оксида магния из серпентинита: № 4860691/26: заявл. 08.06.1990: опубл. 30.04.1994 / Т. В. Кузнецова, Е. М. Иоффе, В. М. Колбасов [и др.]. – EDN IZBENL.
153. Xianshang Bai, Jianwei Lin, Zhibin Zhang, Yanhui Zhan. Immobilization of lead, copper, cadmium, nickel, and zinc in sediment by red mud: adsorption characteristics, mechanism, and effect of dosage on immobilization efficiency // *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. Iss. 34. P. 51793-51814. DOI: 10.1007/s11356-022-19506-2
154. Ang Liu, Yingchen Bai, Chao Wang et al. Study on the removal of iron (II) and manganese (II) in acidic mine drainage by red mud: Performance and mechanism // *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. Iss. 55. P. 117970-117980. DOI: 10.1007/s11356-023-30378-y
155. Фоменко А.И., Соколов Л.И. Применение зол тепловых электростанций для очистки сточных вод // *Экология и промышленность России*. 2022. Т. 26. № 1. С. 14-18. DOI: 10.18412/1816-0395-2022-1-14-18
156. Saranya S., Gandhi A.D., Suriyakala G. et al. A biotechnological approach of Pb (II) sequestration from synthetic wastewater using floral wastes // *SN Applied Sciences*. 2020. Vol. 2. Iss. 8. № 1357. DOI: 10.1007/s42452-020-3172-7
157. Barragán-Peña P., Macedo-Miranda M.G., Olguin M.T. Cadmium removal from wastewater in a fixed-bed column system with modified-natural clinoptilolite-rich tuff // *Chemical Papers*. 2021. Vol. 75. Iss. 2. P. 485-491. DOI: 10.1007/s11696-020-01314-y
158. Guifang Wang, Jie Xiang, Guangchuan Liang et al. Application of common industrial solid waste in water treatment: a review // *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. Iss. 52. P. 111766-111801. DOI: 10.1007/s11356-023-30142-2
159. Теран А.И. Кинетика извлечения из водных растворов ионов Fe^{3+} , Cu^{2+} и Pb^{2+} фильтрующими загрузками, полученными на основе сталеплавильных шлаков // *Литье и металлургия*. 2019. № 4. С. 76-80. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-4-76-80
160. Sizerici B., Fseha Y.H., Yildiz I. et al. The effect of pyrolysis temperature and feedstock on date palm waste derived biochar to remove single and multi-metals in aqueous solutions // *Sustainable Environment Research*. 2021. Vol. 31. № 9. DOI: 10.1186/s42834-021-00083-x
161. Runjuan Zhou, Ming Zhang, Shuai Shao. Optimization of target biochar for the adsorption of target heavy metal ion // *Scientific reports*. 2022. Vol. 12. № 13662. DOI: 10.1038/s41598-022-17901-w
162. Madzin Z., Zahidi I., Raghunandan M.E., Talei A. Potential application of spent mushroom compost (SMC) biochar as low-cost filtration media in heavy metal removal from

abandoned mining water: a review // International Journal of Environmental Science and Technology. 2023. Vol. 20. Iss. 6. P. 6989-7006. DOI: 10.1007/s13762-022-04617-7

163. Chowdhury I.R., Chowdhury S., Mazumder M.A.J. et al. Removal of lead ions (Pb²⁺) from water and wastewater: a review on the low-cost adsorbents // Applied Water Science. 2022. Vol. 12. Iss. 8. № 185. DOI: 10.1007/s13201-022-01703-6

164. Sadeghalvad B., Ahali Z., Azadmehr A. Modification of Natural Zeolite by Carboxylate Compounds and Minerals for Removal of Zinc Ions from Wastewater: Equilibrium and Kinetic Studies // Arabian Journal for Science and Engineering. 2016. Vol. 41. Iss. 7. P. 2501-2513. DOI: 10.1007/s13369-015-2003-4

165. Solache-Ríos M., Olguín M.T., Martínez-Miranda V. et al. Removal Behavior of Cobalt from Aqueous Solutions by a Sodium-Modified Zeolitic Tuff // Water, Air, & Soil Pollution. 2015. Vol. 226. Iss. 12. № 420. DOI: 10.1007/s11270-015-2688-8

166. Singh S.A., Shukla S.R. Adsorptive removal of cobalt ions on raw and alkali-treated lemon peels // International Journal of Environmental Science and Technology. 2016. Vol. 13. Iss. 1. P. 165-178. DOI: 10.1007/s13762-015-0801-6

167. Бахирева О.И., Соколова М.М., Маньковская О.Ю., Пан Л.С. Получение биосорбента на основе вермикулита для доочистки сточных вод от ионов никеля // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2021. № 4. С. 5-15. DOI: 10.15593/2224-9400/2021.4.01

168. Afolabi F.O., Musonge P., Bakare B.F. Bio-sorption of a bi-solute system of copper and lead ions onto banana peels: characterization and optimization // Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2021. Vol. 19. Iss. 1. P. 613-624. DOI: 10.1007/s40201-021-00632-x

169. Rahman D.Z., Vijayaraghavan J., Thivya J. A comprehensive review on zinc(II) sequestration from wastewater using various natural/modified low-cost agro-waste sorbents // Biomass Conversion and Biorefinery. 2023. Vol. 13. Iss. 7. P. 5469-5499. DOI: 10.1007/s13399-021-01822-1

170. Duwiejuah A.B., Amadu Y., Gameli B.H.R. et al. Spent Chinese Green Tea as an Adsorbent for Simultaneous Removal of Potentially Toxic Metals from Aqueous Solution // Chemistry Africa. 2022. Vol. 5. Iss. 6. P. 2107-2114. DOI: 10.1007/s42250-022-00459-5

171. Ahmed M., Mavukkandy M.O., Giwa A. et al. Recent developments in hazardous pollutants removal from wastewater and water reuse within a circular economy // Clean Water. 2022. Vol. 5. № 12. DOI: 10.1038/s41545-022-00154-5

172. Faisal A.A.H., Nassir Z.S., Rashid H.M. et al. Neural network for modeling the capture of lead and cadmium ions from wastewater using date palm stones // International Journal of Environmental Science and Technology. 2022. Vol. 19. Iss. 11. P. 10563-10576. DOI: 10.1007/s13762-021-03883-1
173. El-Shazly E.A.A., Dakroury G.A., Someda H.H. Kinetic and isotherm studies for the sorption of ^{134}Cs and ^{60}Co radio-nuclides onto supported titanium oxide // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2021. Vol. 330 Iss. 1. P. 127-139. DOI: 10.1007/s10967-021-07956-w
174. Chang Y.S., Au P.I., Mubarak N.M. et al. Adsorption of Cu(II) and Ni(II) ions from wastewater onto bentonite and bentonite/GO composite // Environmental Science and Pollution Research. 2020. Vol. 27. Iss. 26. P. 33270-33296. DOI: 10.1007/s11356-020-09423-7
175. Afolabi F.O., Musonge P., Bakare B.F. Bio-sorption of a bi-solute system of copper and lead ions onto banana peels: characterization and optimization // Journal of Environmental Health Science and Engineering. 2021. Vol. 19. Iss. 1. P. 613-624. DOI: 10.1007/s40201-021-00632-x
176. Sosun Ali A., Mannan A. et al. Removal of toxic metal ions (Ni^{2+} and Cd^{2+}) from wastewater by using TOPO decorated iron oxide nanoparticles // Applied Water Science. 2022. Vol. 12. Iss. 5. № 86. DOI: 10.1007/s13201-022-01588-5
177. Журова В.Г., Светличная М.С. Изучение влияния ионов калия, кальция и магния на рост и развитие растений // Достижения науки и образования. 2018. № 14(36). С. 13-15.
178. Аканова Н.И., Козлова А.В., Мухина М.Т. Роль магния в системе питания растений // Агрохимический вестник. 2021. № 6. С. 66-72. DOI 10.24412/1029-2551-2021-6-014
179. Иванищев В.В. Доступность железа в почве и его влияние на рост и развитие растений // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2019. Вып. 3. С. 127-138.
180. Riseh R.S., Vazvani M.G., Hajabdollahi N., Thakur V.K. Bioremediation of Heavy Metals by Rhizobacteria // Applied Biochemistry and Biotechnology. 2023. Vol. 195. Iss. 8. P. 4689-4711. DOI: 10.1007/s12010-022-04177-z
181. Пухальский Я.В., Лоскутов С.И., Воробьев Н.И. Чукаева М.А., Нагорнов Д.О., Шапошников А.И., Азарова Т.С., Кожемяков А.П. Изменение биохимического профиля корневых экзометаболитов гороха посевного под воздействием тяжелых металлов // Российская сельскохозяйственная наука. 2023. № 1. С. 53-63. DOI: 10.31857/S2500262723010106

182. El-Moustaqim K., Tallou A., Mabrouki J. et al. Phytoremediation Processes for the Removal of Heavy Metals / Integrated Solutions for Smart and Sustainable Environmental Conservation. Cham: Springer, 2024. P. 33-46. DOI: 10.1007/978-3-031-55787-3_3
183. Ferrarezi R.S., Lin X., Gonzalez Neira A.C. et al. Substrate pH Influences the Nutrient Absorption and Rhizosphere Microbiome of Huanglongbing-Affected Grapefruit Plants // *Frontiers in Plant Science*. 2022. Vol. 13. № 856937. DOI: 10.3389/fpls.2022.856937
184. Çalışkan B., Çalışkan A.C. Potassium Nutrition in Plants and Its Interactions with Other Nutrients in Hydroponic Culture / Improvement of Quality in Fruits and Vegetables Through Hydroponic Nutrient Management. InTechOpen, 2018. P. 9-21. DOI: 10.5772/intechopen.71951
185. Kailiu Xie, Ismail Cakmak, Shiyu Wang et al. Synergistic and antagonistic interactions between potassium and magnesium in higher plants // *The Crop Journal*. 2020. Vol. 9. Iss. 2. P. 249-256. DOI:10.1016/j.cj.2020.10.005
186. Абдуллаева Л.Э. Мелиоранты на основе отходов промышленного производства // *Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы*. 2022. №. 1-1 (62). С. 6-11.
187. Grechishkina, Y., Egorov, V.P., Matvienko, A.V. (2024). The Effect of Neutralized Phosphogypsum on the Productivity and Safety of Winter Wheat Grain. In: Samoylenko, I., Rajabov, T. (eds) *Innovations in Sustainable Agricultural Systems, Volume 1. ISAS 2024. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 1130. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70673-8_20
188. Власенко, В. П. Состав и свойства горной породы серпентинит и возможности использования ее в качестве мелиоранта почв // *Агрохимический вестник*. 2019. № 4. С. 28-31. DOI 10.24411/0235-2516-2019-10054. – EDN TFOQDK.
189. Matveeva V.A., Smirnov Y.D., Suchkov D.V. Industrial processing of phosphogypsum into organomineral fertilizer // *Environ Geochem Health*. 2022. Vol. 44. P. 1605–1618. DOI: 10.1007/s10653-021-00988-x.
190. Makarov V.N., Manakova N.K., Vasil'eva T.N. et al. Optimization of Olivine Processing To Obtain Magnesium Meliorant // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2003. Vol. 76. P. 171–174. DOI: 10.1023/A:1024665520978.
191. Байкин Ю.Л., Каренгина Л.Б., Байкенова Ю.Г. Эффективность использования магнезита в качестве магниевого и известкового удобрения // *Аграрное образование и наука*. 2013. № 3. С. 2.
192. Троц В.Б., Троц Н.М., Манухин А.И., Троц С.В. Влияние магниевого серосодержащего удобрения Ультра Си на продолжительность вегетации сои // *Известия*

Оренбургского государственного аграрного университета. 2023. № 2(100). С. 48-53. DOI: 10.37670/2073-0853-2023-100-2-48-53.

193. Некрасова Т.П., Крючихина А.Е. Экономическая эффективность применения системы очистки сточных вод // *π-Economy*. 2012. № 2-1 (144). С. 64-72.

194. Камдина Л.В., Симченко О.Л. Оценка экономической эффективности инвестиционного проекта по модернизации технологии очистки сбросов промышленного предприятия в рамках ESG-стратегии // *Вестник Удмуртского университета. Серия Экономика и право*. 2024. Т. 34. № 2. С. 221-227. DOI: 10.35634/2412-9593-2024-34-2-221-227.

195. Хорохорина И. В., Лазарев С. И., Филимонова О. С., Брянкин К. В. Технологическое оформление и экономическая оценка электромембранных методов очистки промышленных сточных вод от тяжелых металлов и АПАВ // *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского*. 2023. № 2(88). С. 19-28. DOI 10.17277/voprosy.2023.02 pp.019-028. – EDN JRZJBE.

196. Лазарев С. И., Долгова О. В., Хорохорина И. В., Игнатов Н. Н. Технико-экологическое обоснование применения комбинированных электромембранных методов очистки сточных вод гальванических производств // *Вестник Технологического университета*. 2024. Т. 27. № 2. С. 43-49. – DOI 10.55421/1998-7072_2024_27_2_43. – EDN FDUAAE.

197. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Наволокина В.Ю. Оценка эффективности очистки кислых шахтных вод (на примере медноколчеданных рудников Среднего Урала) // *Записки Горного института*. 2024. Т. 267. С. 388-401. EDN SBKRCK

ПРИЛОЖЕНИЕ А - Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024625407 Российская Федерация. Влияние тяжелых металлов на морфологические показатели растений *Chamaenerion Angustifolium* (L.) scor., произрастающих на отработанном медно- колчеданном месторождении: № 2024625407: заявл. 29.10.2024: опубл. 22.11.2024

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации базы данных
№ 2024625407

**Влияние тяжелых металлов на морфологические
показатели растений *Chamaenerion angustifolium* (L.)
Scor., произрастающих на отработанном медно-
колчеданном месторождении**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт горного дела Уральского
отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН) (RU)*

Авторы: *Антонинова Наталья Юрьевна (RU), Собенин Артем
Вячеславович (RU), Усманов Альберт Исмаилович (RU),
Усманова Вероника Алексеевна (RU)*

Заявка № **2024624759**
Дата поступления **29 октября 2024 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре баз данных **22 ноября 2024 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности
документ подписан электронной подписью
Сертификат 0692e703e9300554060570b0c0036
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 2024 по 03.10.2025

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б - Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023623743 Российская Федерация. Адсорбционная ёмкость железо-магниевого композиционного состава по отношению к тяжелым металлам (Cu^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Ni^{2+}): № 2023623462: заявл. 20.10.2023: опубл. 02.11.2023

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации базы данных
№ 2023623743

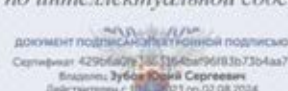
**Адсорбционная ёмкость железо-магниевого
композиционного состава по отношению к тяжелым
металлам (Cu^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Ni^{2+})**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт горного дела Уральского
отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН) (RU)*

Авторы: *Антонинова Наталья Юрьевна (RU), Собенин Артем
Вячеславович (RU), Усманов Альберт Исмаилович (RU),
Горбунов Алексей Александрович (RU)*

Заявка № **2023623462**
Дата поступления **20 октября 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре баз данных **02 ноября 2023 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности


 **Ю.С. Зубов**

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 42906402018011640496/83b7304aa7
Владелец: Зубов Юрий Сергеевич
Действителен с 10.10.2023 по 02.08.2024

ПРИЛОЖЕНИЕ В - Патент № 2800460 С1 Российская Федерация, МПК В01J 20/04, В01J 20/06, С02F 1/28. Железо-магниевый композиционный состав для очистки сточных вод: № 2022124852; заявл. 28.09.2022; опубл. 21.07.2023



ПРИЛОЖЕНИЕ Г - Патент на изобретение отходы гуминового производства для очистки сточных вод: № 2832437; заявитель федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт горного дела уральского отделения российской академии наук



ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Акты о внедрении научных и практических результатов в учебный процесс ФГБОУ ВО «УГГУ»



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Уральский государственный горный университет»
(ФГБОУ ВО «УГГУ»)

Куйбышева ул., д.30, Екатеринбург, 620144, ГСП. Тел./факс:(343)257-25-47/ 251-48-38
E-mail:office@ursmu.ru,http://www.ursmu.ru
ОКПО 02069237, ОГРН 1036603993777, ИНН/КПП 6661001004/667101001

Акт

о внедрении научных и практических результатов научных исследований научного сотрудника лаборатории экологии горного производства «Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук» (ИГД УрО РАН) Собенина А.В. на тему «Обоснование параметров технологии очистки сточных вод от тяжелых металлов при проектировании разработки медноколчеданных месторождений».

Научные и практические результаты научной работы Собенина А.В. внедрены ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» в учебный процесс при подготовке специалистов по специальности 20.02.01 «Рациональное использование природохозяйственных комплексов» по дисциплинам «Промышленная экология и промышленная радиозэкология», «Природопользование и охрана окружающей среды».

Проректор по учебной работе

25.12.2024 г.



В.В. Зубов



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Уральский государственный горный университет»
(ФГБОУ ВО «УГГУ»)

Куйбышева ул., д.30, Екатеринбург, 620144, ГСП. Тел./факс:(343)257-25-47/ 251-48-38
E-mail:office@ursmu.ru,http://www.ursmu.ru
ОКПО 02069237, ОГРН 1036603993777, ИНН/КПП 6661001004/667101001

Акт

о внедрении научных и практических результатов научных исследований научного сотрудника лаборатории экологии горного производства «Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук» (ИГД УрО РАН) Собенина А.В. на тему «Обоснование параметров технологии очистки сточных вод от тяжелых металлов при проектировании разработки медноколчеданных месторождений».

Научные и практические результаты научной работы Собенина А.В. внедрены ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» в учебный процесс при подготовке специалистов по специальности 21.05.04 «Горное дело, Открытые горные работы» по дисциплине «Основы проектной деятельности».

Проректор по учебной работе

03.04.2025 г.



В.В. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Е – Акт о внедрении научных и практических результатов в проектную деятельность НПО УГГУ



**НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ
УРАЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

620144, Екатеринбург, Фурманова, 66-25; тел.: (343) 2-000-170; e-mail: npo@proektiruem.com

Исх. № 25/107

от 17 марта 2025 г.

Акт

О внедрении результатов кандидатской диссертации научного сотрудника лаборатории экологии горного производства «Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук» (ИГД УрО РАН)

Собенина Артема Вячеславовича

на тему «Обоснование параметров технологии очистки сточных вод от тяжелых металлов при проектировании разработки медноколчеданных месторождений».

Результаты диссертационного исследования **Собенина А.В.** представляют практический интерес при разработке решений по выбору технологий очистки, нейтрализации сточных вод, составу применяемых реагентов и использованы в виде:

- рекомендаций по технологическому оформлению системы очистных сооружений и ее основных конструктивных параметров для повышения эффективности извлечения тяжелых металлов из высокоминерализованных сточных вод;
- экспериментальных данных по обоснованию возможности использования производственных отходов в природоохранных целях, в качестве реагентов и сорбентов.

Генеральный директор
ООО «НПО УГГУ», к.т.н.
+7 908-63-63-275



С.В. Исаков

ООО «НПО УГГУ» www.proektiruem.com
Проектная и консалтинговая деятельность в области добычи и переработки полезных ископаемых.

