

ФГБОУ ВО «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



**ЛЕБЗИН МАКСИМ СЕРГЕЕВИЧ**

**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ КОНСЕРВАЦИИ ПОРОДНЫХ  
ОТВАЛОВ СОРБЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННЫМ МЕТОДОМ**

Специальность - 2.8.8 Геотехнология, горные машины

Автореферат диссертации на соискание  
учёной степени кандидата технических наук

Екатеринбург 2025

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

Научный руководитель - **Валиев Нияз Гадым Оглы**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой горного дела ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»

**Официальные оппоненты:**

**Заляднов Вадим Юрьевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

**Кремчеев Эльдар Абдоллович**

доктор технических наук, доцент, профессор департамента государственного администрирования филиала ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»» в г. Санкт-Петербурге.

**Ведущая организация**

ФГБУН «Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук»

Защита диссертации состоится «05» июня 2025 г. в 13-30 на заседании диссертационного совета Д 24.2.423.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» по адресу: 620144, г. Екатеринбург, ГСП, ул. Куйбышева, д.30, 2-й учебный корпус, ауд. 2142.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» <https://www.ursmu.ru/lebzin-maksim-sergeevic>

Автореферат разослан «04» апреля 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент



Пелевин А.Е

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Деятельность человека связана с воздействием на природную среду и проявляется в виде изъятия природных ресурсов, загрязнения и деградации поверхности Земли. С каждым годом техногенное воздействие на природу возрастает: ежегодно в атмосферный воздух поступает более 30 миллионов тонн загрязняющих веществ, до 20 % сточных вод сбрасывается в водные объекты без очистки.

Наблюдается ухудшение состояния почв в силу водной и ветровой эрозии, переувлажнение, подтопление земель и заболачивание. Опустынивание затронуло более 100 миллионов гектаров земель, еще 18 миллионов гектаров представляют собой зоны загрязнения почв вокруг промышленных комплексов.

Ежегодно образуется около 4 млрд тонн отходов производства и потребления, при этом отходами занято примерно 4 млн гектаров земельных площадей на сегодняшний день. Накоплено более 30 млн тонн отходов производства и потребления, из которых более 400 тыс тонн относятся к числу высокотоксичных.

Ежегодные потери ВВП России, обусловленные ухудшением качества окружающей среды (без учета ущерба здоровью людей), составляют до 6 %. Немаловажную роль в ухудшении состояния экологической безопасности играет горнопромышленный комплекс России, который оказывает воздействие на все элементы биосферы и участвует в перемещении огромных масс геоматериалов.

На единицу извлекаемой из недр рудной массы приходится 1...7 единиц пустой породы. Отвалы и хвостохранилища занимают до 75 % земельного отвала при разработке железорудных месторождений и еще больше – на предприятиях добычи и переработки полиметаллов.

К числу регионов с высоким уровнем деградации земель относятся Уральский, Сибирский и Дальневосточный округа, которые представляют собой основные минерально-сырьевые центры Российской Федерации.

Антропогенные нарушения, связанные с разработкой месторождений полезных ископаемых, достигают 80 %. Наибольшая доля нарушенных земель приходится на открытый способ разработки месторождений, который в России является основным. Ярким проявлением этого является создание породных отвалов, загрязненных тяжелыми металлами.

Поэтому работа, связанная с обоснованием использования сорбентов-мелиорантов для сорбции ионов тяжелых металлов из породных отвалов является своевременной и актуальной.

### **Степень разработанности темы**

Несмотря на наличие научных исследований, по результатам анализа научных работ установлено, что в настоящее время отсутствует оптимальная технология консервации породного отвала сорбент-ориентированным

методом с применением композитных сорбентов-мелиорантов, что требует проведения дополнительных исследований.

**Объект исследования** – породные отвалы, загрязненные тяжелыми металлами.

**Предмет исследования** – процессы сорбции ионов тяжелых металлов в рамках сорбент-ориентированной геотехнологии консервации отвалов.

**Цель работы** – совершенствование сорбент-ориентированного метода с использованием природных и техногенных материалов при консервации отвалов с минимизацией воздействия на окружающую природную среду.

**Идея работы** состоит в применении сорбентов-мелиорантов для консервации породных отвалов при рекультивации нарушенных земель с целью сохранения качества окружающей природной среды.

**Основные задачи исследования:**

1. Провести анализ технологий, методов и средств иммобилизации ионов тяжелых металлов природными и техногенными сорбентами.

2. Изучить физико-химические свойства торфа и осадков водоподготовки, как сорбентов-мелиорантов.

3. Исследовать процессы сорбции и иммобилизации ионов тяжелых металлов сорбентом-мелиорантом на основе торфа и осадков водоподготовки.

4. Обосновать параметры эффективного применения технологии консервации породного отвала сорбент-ориентированным методом.

5. Обосновать эколого-экономические расчеты применения сорбентов-мелиорантов на примере Левихинского рудника.

**Область исследования** соответствует паспорту ВАК по специальности 2.8.8. «Геотехнология, горные машины» (технические науки), а именно: п. 13. «Техногенное воздействие на окружающую среду в процессе ведения открытых и подземных горных работ при строительстве, эксплуатации, реконструкции, техническом переоснащении, консервации и ликвидации предприятий горной промышленности и подземных сооружений».

**Методы исследований:** обобщение, анализ, изучение, моделирование, сорбции ионов, атомно-адсорбционная и атомно-эмиссионная спектрометрия, инженерное прогнозирование, сорбент-ориентированный метод.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Использование торфа и осадков водоподготовки в составе композитного сорбента-мелиоранта торф-осадки водоподготовки, в пропорциях 20/80, 40/60, 60/40 (масс. %) обеспечивает сорбцию не менее 98 % ионов  $\text{Cu}^{2+}$ , не менее 49 % ионов  $\text{Pb}^{2+}$ , не менее 59 % ионов  $\text{As}^{3+}$ .

2. Модифицированный сорбент-мелиорант на основе торфа и осадков водоподготовки обеспечивает сорбцию ионов тяжелых металлов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{As}^{3+}$  при комнатной температуре в течение 60 минут. Содержание ионов тяжелых металлов с концентрацией 5 ПДК уменьшается в 3 раза для иона  $\text{Cu}^{2+}$ ,

в 4 раза для  $Pb^{2+}$  и в 10 раз для  $As^{3+}$ . Полная сорбция ионов  $Cu^{2+}$  происходит через 48 ч, ионов  $Pb^{2+}$  - через 24 ч, ионов  $As^{3+}$  - через 5 ч.

3. Геотехнология консервации породного отвала сорбент-ориентированным методом за счет сорбции ионов тяжелых металлов  $Cu^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $As^{3+}$  эффективна при условии обводнения, положительных температур и рыхления верхнего слоя отвала на глубину не менее 1 м.

**Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждается** представительным объемом экспериментальных данных, дублированием экспериментальных работ, удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

**Научная новизна:**

1. Обоснован и разработан оптимальный состав сорбента-мелиоранта для сорбции ионов тяжелых металлов  $Cu^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $As^{3+}$ , отличающийся присутствием торфа и осадков водоподготовки.

2. Обоснованы параметры использования сорбентов-мелиорантов на основе торфа и осадков водоподготовки для повышения эффективности процессов сорбции ионов тяжелых металлов.

3. Обоснованы параметры эффективного применения геотехнологии консервации породного отвала сорбентами-мелиорантами на основе торфа и осадков водоподготовки.

**Теоретическая значимость** исследования заключается в развитии концепции применения новых методов решения экологических проблем.

**Практическая значимость** работы заключается в разработке новой технологии консервации породного отвала сорбент-ориентированным методом, отличающейся относительной экономической эффективностью; разработке методики расчета параметров иммобилизации ионов тяжелых металлов  $Cu^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $As^{3+}$  сорбентом-мелиорантом на основе торфа и осадков водоподготовки, позволяющей повысить эффективность консервации отвала.

**Реализация работы.** Результаты диссертационного исследования были использованы:

- при выполнении научно-исследовательских работ по проекту РФФИ № 22-24-20102 на тему «Научные основы "зеленой утилизации" осадков водоподготовки в составе природных почвенных мелиорантов для селективной сорбции тяжелых металлов» (2022-2023 гг.);

- по проекту РФФИ № 24-17-20033 на тему «Новая технология ликвидации объектов накопленного вреда на территориях затопленных медных рудников Среднего Урала (Дегтярский, Левихинский, Карпушихинский, Ломовский, Белореченский, Зюзельский)» (2024 г.);

- в качестве эколого-экономического раздела государственного задания для ФГБОУ ВО УГГУ «Разработка и эколого-экономическое обоснование новых технологий рекуперации техногенных минеральных образований в условиях циркулярной экономики и растущей потребности промышленности в минеральном сырье» (FEUU-2024-0008) (2024-2026 гг.).

На основе результатов диссертационного исследования был сертифицирован торфяной сорбент для рекультивации земель, загрязнённых тяжёлыми металлами (Сертификат соответствия № РОСС RU HE06.H08673 от 26.06.2023 г.).

Материалы работы используются при чтении лекционных курсов для студентов ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», обучающихся по направлению подготовки 20.02.01 «Рациональное использование природно-хозяйственных комплексов» по дисциплинам: «Промышленная экология и промышленная радиэкология», «Природопользование и охрана окружающей среды».

**Апробация работы.** Основные выводы и теоретические материалы данного исследования были презентованы на восьми ведущих международных конференциях, включая XVIII Международную научно-техническую конференцию «Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2022)» г. Уфа, Международную научно-техническую конференцию «Уральская горная школа – регионам» (2019-2024 гг.) г. Екатеринбург, Международную научно-практическую конференцию «Окружающая среда, устойчивость природных экосистем и проблемы экологической инженерии» (ICESSE 2024).

**Публикации.** По существу данной диссертации опубликованы 25 научных трудов, включая 12 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК. Получено 5 патентов на изобретение и 1 свидетельство на базу данных ЭВМ.

**Личный вклад соискателя.** Положения настоящей диссертационной работы осуществлены при непосредственном участии автора на основании проведенных исследований. Автором разработана технология консервации породного отвала сорбент-ориентированным методом и проведены многофакторные физико-химические и термодинамические исследования иммобилизации ионов тяжёлых металлов сорбентами-мелиорантами на основе торфа и осадков водоподготовки.

**Объём и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 131 наименование и 8 приложений. Текст диссертации изложен на 159 страницах, содержит 39 рисунков и 27 таблиц.

**Исходные материалы** обобщены автором в научно-исследовательской лаборатории рекультивации нарушенных земель и техногенных объектов ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» в период с 2020...2023 гг.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель и задачи исследований, представлены защищаемые научные

положения, изложены методы исследований, научная новизна и практическая значимость работы, отражены личный вклад автора, реализация и апробация работы.

**В первой главе** рассмотрены воздействие отвалов на окружающую природную среду и перспектива их рекультивации, механизмы воздействия тяжёлых металлов на экосистемы окружающей среды и современные исследования процесса сорбции минеральными и органическими природными сорбентами ионов тяжелых металлов. Проведен анализ опыта использования отходов в качестве сорбентов.

Значительный вклад в создание теоретических основ использования торфа и осадков водоподготовки в составе сорбентов-мелиорантов, технологии консервации породных отвалов и эколого-экономического обоснования сорбент-ориентированных методов восстановления нарушенных земель внесли: доктор технических наук, профессор Лиштван И. И., доктор технических наук, профессор Гамаюнов Н. И., доктор технических наук, профессор Александров Б. М., доктор технических наук, доцент Мисников О. С., доктор технических наук, профессор Гревцев Н. В., доктор геолого-минералогических наук Гуман О. М., доктор химических наук, профессор Апакашев Р. А., доктор технических наук, профессор Голик В. И., доктор экономических наук, профессор Игнатьева М. Н.

Установлено, что породные отвалы, на примере Левихинского рудника, являются крайне опасными техногенными объектами способными влиять на состояние окружающей природной среды, загрязнять биосферу химическими элементами и соединениями токсичных металлов.

Сорбент-ориентированный метод восстановления нарушенных земель в сравнении с биоремедиационным по критерию экономической целесообразности наиболее перспективен. Сорбент-ориентированный метод - применение органоминеральных сорбентов природного происхождения - перспективен в связи с их низкой стоимостью, эффективностью и наличием больших запасов, а также функциональной способностью выступать не только сорбентами, но и мелиорантами.

Использование сорбентов на основе природных материалов, таких как торф и осадков водоподготовки, для детоксикации техногенных грунтов требует создания технологии рекультивации нарушенных земель, загрязненных тяжелыми металлами; Выявлена необходимость тестирования композитных сорбентов в отношении иммобилизации водорастворимой формы тяжелых металлов для последующего закрепления их в сорбентах и снижения негативного воздействия на окружающую среду.

**Во второй главе** исследованы физико-химические свойства торфа и осадков водоподготовки.

Выявлено, что химический состав органической части торфа в значительной степени определяется химическим составом растений-торфообразователей и условий, при которых происходило их разложение. Все твердые

горючие ископаемые, входящие в генетический ряд каустобиолитов, являются результатом превращения различных растительных остатков как наземных, так и водных. В элементный состав органической массы входят: углерод, водород, сера, азот и кислород. В таблице 1 описаны соединения, составляющие торф в зависимости от их состава, содержания и других свойств.

Таблица 1 - Соединения, составляющие торф

№ п/п	Вещество	Содержание в низинном или верховом торфе		Состав
		Низинный, %	Верховой, %	
1.	Битумы	до 7	до 15	Асфальтены, воски, парафины и масла. С=70,4 (65-75); Н=10 (9-12) и N=0,53 (0,36-0,67)
2.	Водорастворимые и легкогидролизуемые	от 6,9 до 63		Гемицеллюлозы, аминокислоты, углеводы
3.	Негидролизуемый остаток	от 12 до 20	от 6 до 12	Лигнины, нерастворимые битумы, углеводы и гуминовые вещества
4.	Лигнины	от 1,8 до 22		Н = 5,4-6,5 и О = 34,6-27,5
5.	Гуминовые	от 4,6 до 49,9	от 18,6 до 55,5	Гуминовые кислоты, гуматы и фульвокислоты
6.	Целлюлоза	от 0,7 до 20,7	от 0 до 9	С – 44,4; О – 6,2 и Н – 49,4

На рисунке 1 представлена фотография частицы нейтрализованного торфа, полученная с помощью электронного микроскопа.

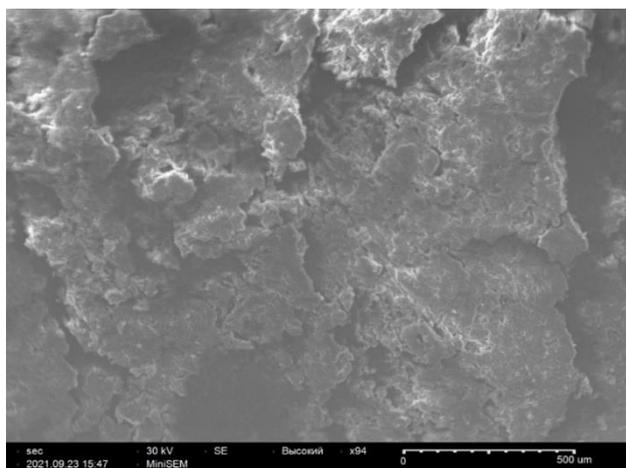


Рисунок 1 - Торф нейтрализованный

Из рисунка 1 видно, что частица торфа имеет четкую структуру. Наличие пор, гуминовых кислот и лигнина обеспечивает достаточную сорбционную способность иммобилизации ионов тяжелых металлов.

В качестве объекта исследования изучались осадки водоподготовки Западной фильтрационной станции г. Екатеринбурга, отобранные в летний период водозабора. Для анализа были выбраны

следующие параметры осадков: гранулометрический, фазовый и химический состав, электропроводность, а также кислотно-основные свойства.

Из рисунка 2 видно, что преобладающая часть осадков водоподготовки представлена частицами с линейным размером менее 50 мкм (53 %) и частицами размером более 100 мкм (44 %). На частицы с размером от 71 до 100 мкм приходится всего 2 % от общего числа.

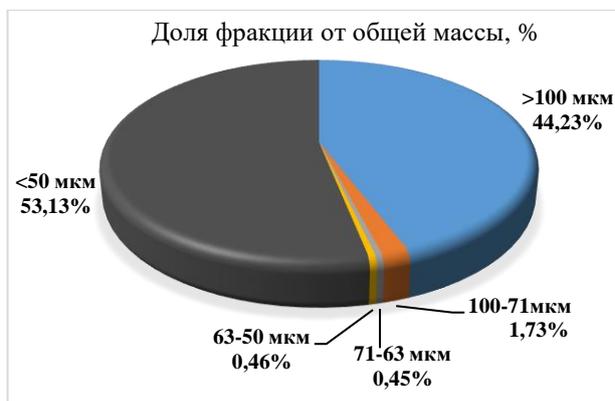


Рисунок 2 - Гранулометрический состав осадков водоподготовки, определенный ситовым методом анализа с промывкой водой

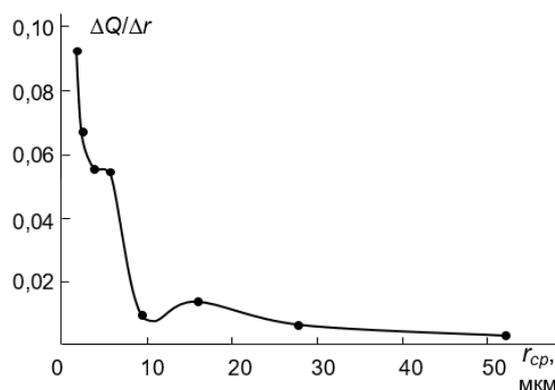


Рисунок 3 - Распределение весового количества фракций методом седиментации:  $\Delta Q$  – вес фракции, усл. ед.;  $r_{ср}$  – средний радиус частиц фракции, мкм

Дополнительные гранулометрические исследования осадков водоподготовки были выполнены седиментационным методом. На рисунке 3 представлена соответствующая дифференциальная кривая распределения частиц, имеющих размер менее 50 мкм.

Результаты гранулометрических исследований показывают, что осадки водоподготовки представляют собой полидисперсную систему. Гранулометрический анализ позволяет заключить, что осадки водоподготовки при контакте с другими веществами характеризуются развитой поверхностью границы раздела.

Из рисунка 4 видно, что частица осадка сформирована из водорослей различных видов. Наиболее простым классом для идентификации являются диатомовые водоросли Diatomeae, имеющие гладкий, геометрически ровный трубчатый панцирь.

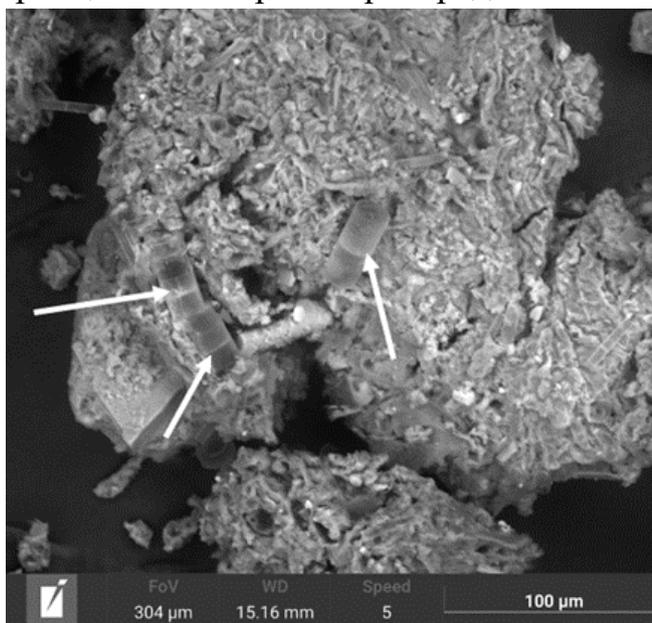


Рисунок 4 - Осадки водоподготовки: стрелками отмечены наиболее крупные диатомовые водоросли

На основании сравнительного анализа результатов проведенных экспериментов обоснован выбор композитного сорбента-мелиоранта из природного сырья и техногенных осадков водоподготовки, проявляющего наибольшую эффективность в отношении связывания ионов тяжелых металлов –  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{As}^{3+}$ . Для обоснования выбора состава композитного сорбента-мелиоранта исследовали иммобилизацию ионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{As}^{3+}$

сорбентами торф - осадки водоподготовки с различным содержанием компонентов. Предложенный состав композитного сорбционного материала на основе торфа и осадков водоподготовки является потенциально эффективным в отношении селективной иммобилизации ионов тяжелых металлов и способным обеспечить утилизацию осадков водоподготовки в большом количестве. В результате проведенных экспериментов установлена за-

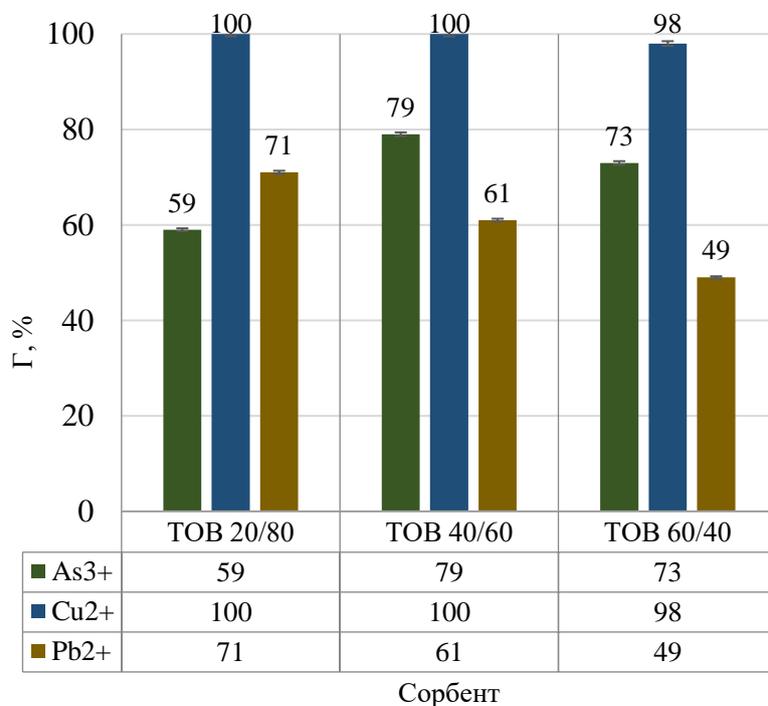


Рисунок 5 - Эффективность сорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{As}^{3+}$  при их индивидуальном присутствии в растворе с композитным сорбентом-мелиорантом торф – осадки водоподготовки (ТОВ, пропорции, масс. % – 20/80, 40/60, 60/40):  
Г, % – процент извлечения ионов

ионов тяжелых металлов в исходном растворе от времени контакта фаз системы «сорбент-раствор соли тяжелого металла» при различной температуре раствора.

Кинетические исследования показали, что при комнатной температуре уже в первый час эксперимента содержание тяжелого металла в исходном растворе соли с концентрацией 5 ПДК уменьшается в 3 раза для иона  $\text{Cu}^{2+}$ , в 4 раза для  $\text{Pb}^{2+}$  и в 10 раз для  $\text{As}^{3+}$ . Также отмечено, что ионы меди (II) не обнаруживаются в растворе через 48 ч при всех исследованных температурах, ионы  $\text{Pb}^{2+}$  - через 24 ч, а ионы  $\text{As}^{3+}$  не фиксируются прибором уже к 5 часу эксперимента.

висимость величины сорбции ионов тяжелых металлов от состава композитного материала, представленная на рисунке 5.

Как следует из рисунка 5, результаты экспериментов свидетельствуют о сохранении высокой сорбционной эффективности композитного материала при увеличении содержания в нем осадков водоподготовки.

На рисунке 6 представлены результаты исследований зависимости остаточной концентрации

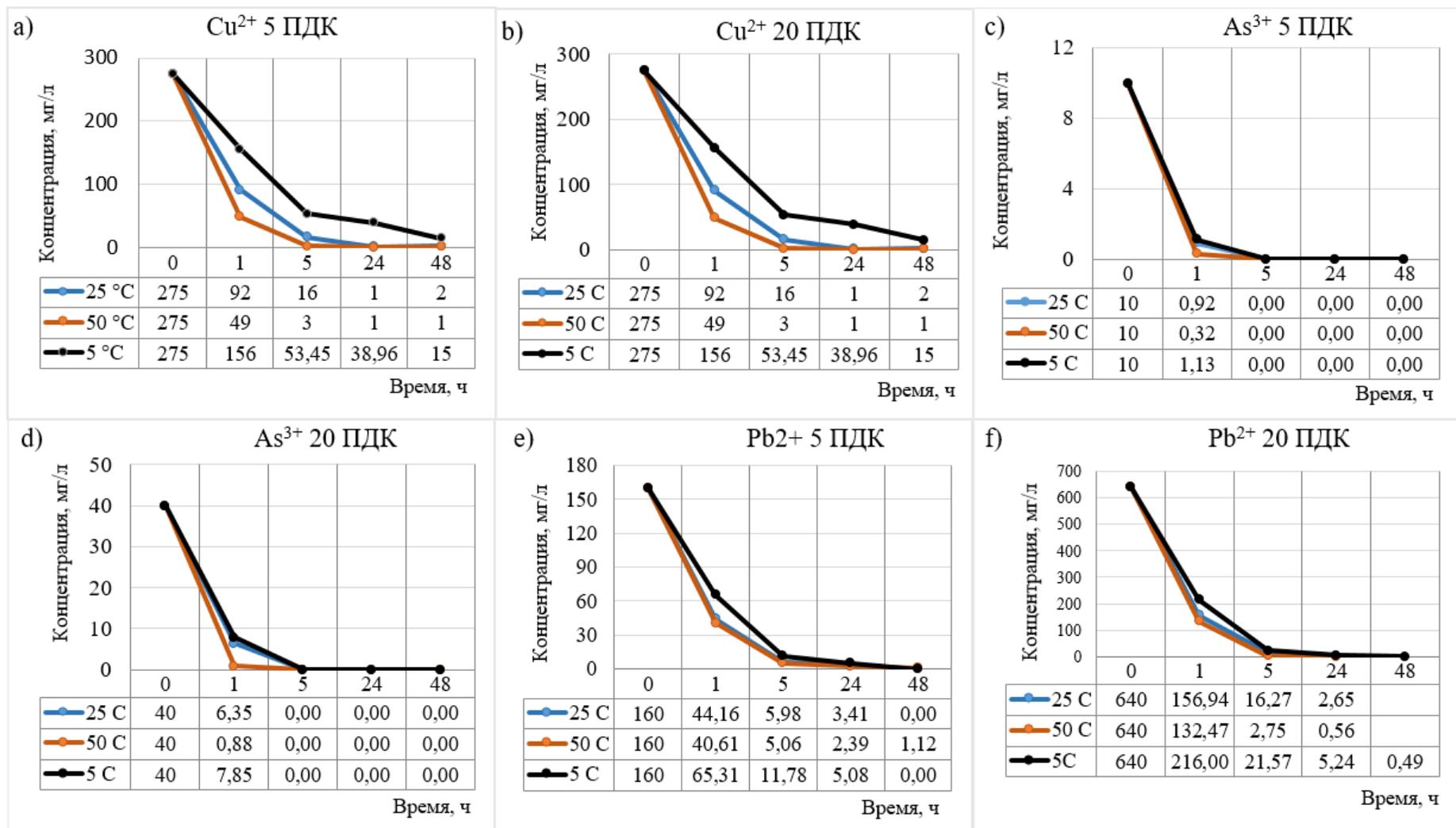


Рисунок 6 - Зависимость концентрации ионов тяжелых металлов в растворе от времени контакта фаз системы «сорбент – раствор соли тяжелого металла» при различной температуре окружающей среды раствора 5 ПДК, 20 ПДК – концентрация иона тяжелого металла в исходном растворе

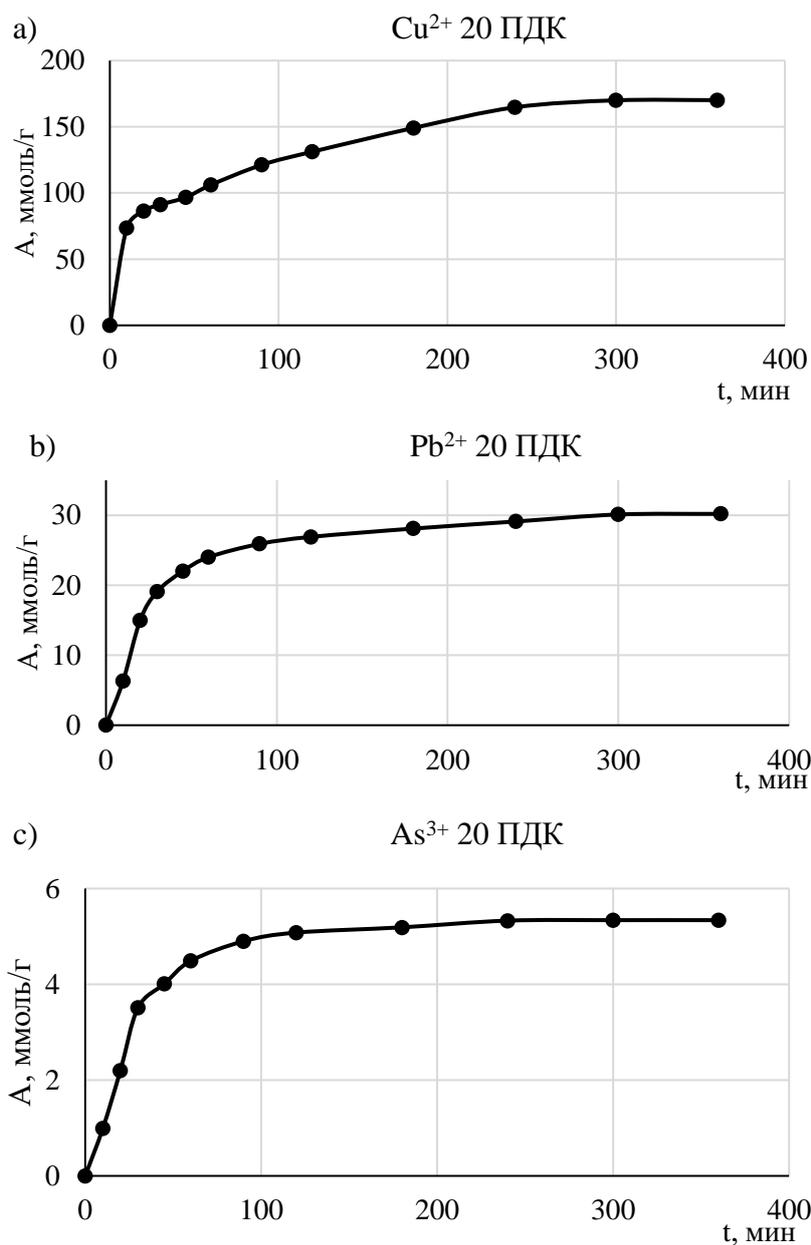


Рисунок 7 - Интегральные кинетические кривые сорбции ионов тяжелых металлов композитным сорбентом-мелиорантом торф – осадки водоподготовки (80 масс. %) при 25°C

среде (pH = 2) (рисунок 8).

На основании полученных результатов следует, что в сильноокислой среде десорбция ионов Cu<sup>2+</sup> достигает максимума в первые 30 мин. эксперимента. При этом в случае с торфом не гранулированным переходит в подвижную форму от 5 до 22 % ранее связанных ионов Cu<sup>2+</sup>.

На рисунке 7 изображены примеры полученных интегральных кинетических кривых. Из данных зависимостей видно, что основное количество ионов Cu<sup>2+</sup> и Pb<sup>2+</sup> связывается сорбентом-мелиорантом примерно в течение первых 4 ч, ионов As<sup>3+</sup> – в течение 2 ч.

В исследовании по десорбции ионов тяжелых металлов изучали ионы Cu<sup>2+</sup>. Установлено, что концентрация десорбированных ионов Cu<sup>2+</sup> из природных сорбентов и композитного материала на их основе в слабоокислой, нейтральной и слабощелочной среде (pH = 4, 6, 7, 8) не превышает погрешности метода спектрофотометрии, использованного для количественного определения ионов тяжелого металла. Ситуация меняется в сильноокислой

Для увеличения эффективности природных сорбентов и обеспечения их применения в условиях сильноокислых сред возможно внесение в их состав оксида кальция, что позволяет снижать кислотность среды и повышать эффективность связывания ионов тяжелого металла.

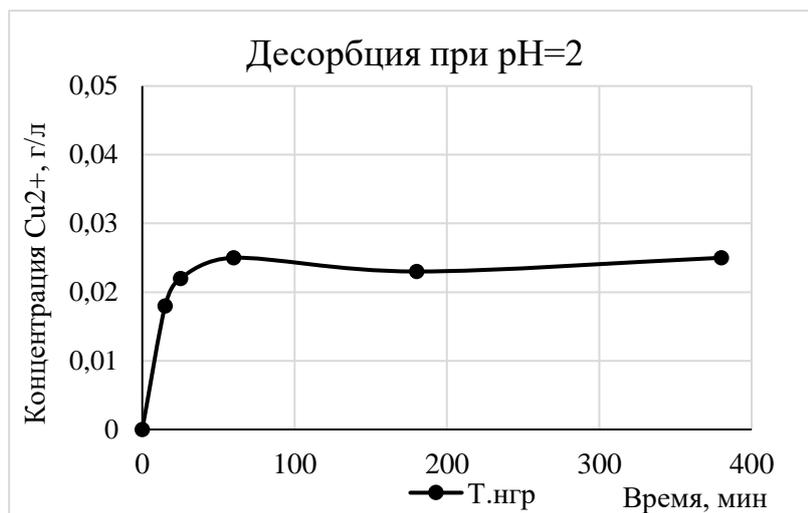


Рисунок 8 - Изменение концентрации ионов Cu<sup>2+</sup> в процессе десорбции: Т.нгр – торф не гранулированный

**В третьей главе** обоснована технология консервации породного отвала сорбент-ориентированным методом.

Породные отвалы по своей структуре дифференцируются по трем зонам (рисунок 9).



Рисунок 9 - Структура породного отвала

Миграция тяжелых металлов происходит в виде атмосферных и гидрогенных потоков рассеяния, которые формируют техногенные ореолы и аномалии тяжелых металлов – источники уже вторичного загрязнения.

На рисунке 10 представлена концептуальная схема миграции тяжелых металлов в системе «отвал-грунтовые воды-растения».

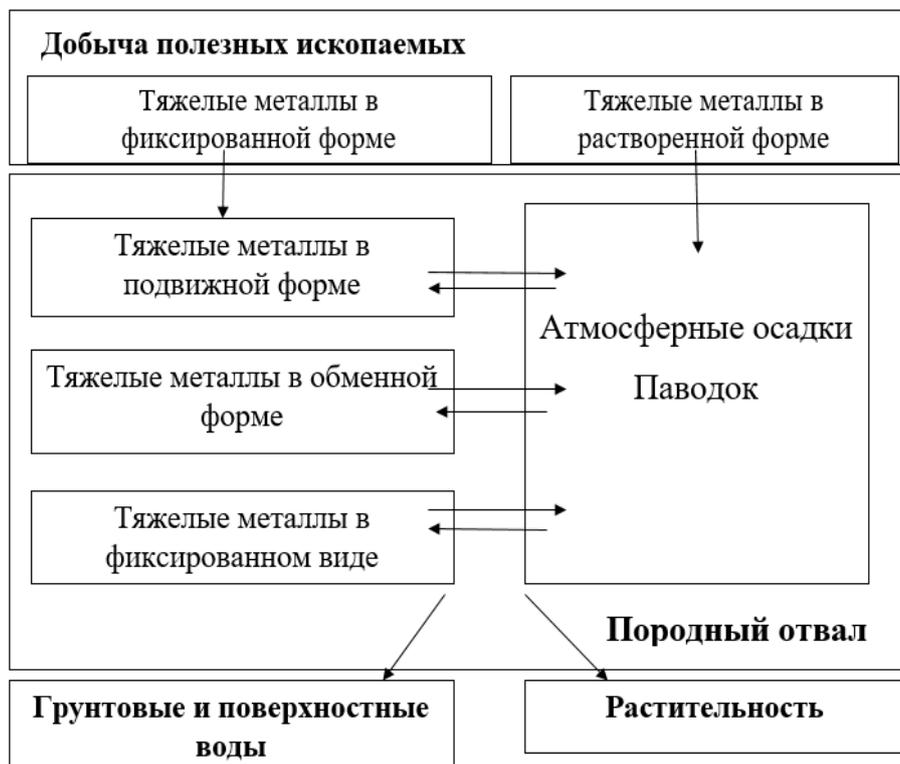


Рисунок 10 - Схема миграции тяжелых металлов

На рисунке 11 представлена схема иммобилизации ионов тяжелых металлов в обводнённой среде сорбентами-мелиорантами.

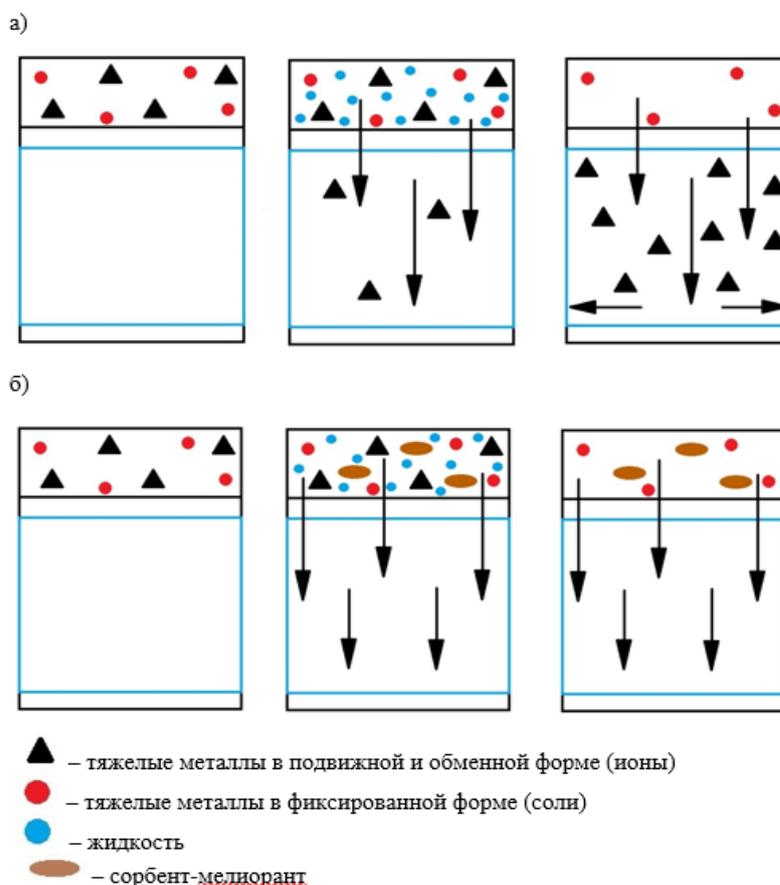


Рисунок 11 - Схема иммобилизации ионов тяжелых металлов в обводнённой среде: а) без применения сорбентов-мелиорантов, б) с применением сорбентов-

Для эффективной иммобилизации ионов тяжелых металлов необходимо обводнение грунтов породного отвала, в результате начнется растворение тяжелых металлов, перевод их в подвижную и обменную формы, что создаст условия для сорбции ионов тяжелых металлов сорбентами-мелиорантами.

Периодическое (краткосрочное) обводнение на породном отвале создается естественным способом с помощью атмосферных осадков и таянья снега в период положительных температур воздуха. Соответственно, районы с продолжительными периодами положительных температур воздуха и обилием атмосферных осадков являются наиболее перспективными районами для применения сорбентов-мелиорантов. Исходя из схемы иммобилизации, тяжелые металлы в ионной форме, благодаря обводнению растворяются и свободно мигрируют по всей толще тела породного отвала и за его пределы. Тяжелые металлы в фиксированной форме (соли) остаются в грунте породного отвала или мигрируют на незначительные расстояния.

На рисунке 12 предложена технология консервации породного отвала с применением сорбентов-мелиорантов.



Рисунок 12 - Консервации отвала с применением сорбентов-мелиорантов

Технология консервации породного отвала сорбент-ориентированным методом предполагает создание новых поверхностей и форм рельефа, изменение и регулирование водного режима, изменение химических и физико-химических свойств земель внесением сорбента-мелиоранта, изменение структуры почвы и создание условий для роста и развития растений.

В общем виде мощность насыпного консервирующего слоя на породных отвалах, поверхность которых сложена непригодными для биологической рекультивации породами, определяется по формуле:

$$P = K_{\text{слой}} + H_k + 0,2 \quad (1)$$

где:  $P$  – мощность насыпного консервирующего слоя, м;  $K_{\text{слой}}$  – мощность корнеобитаемого слоя (слой, где сосредоточен максимальный объем корней), м;  $H_k$  – мощность слоя «сорбент-мелиорант-грунт», м.

Объем выколаживания при прямолинейном откосе определяется по формуле:

$$V_0 = \frac{L_0}{2} \left( \frac{h}{\sqrt{K_p} + 1} \right)^2 \cdot \left( \frac{1}{\text{tg}\alpha_2} - \frac{1}{\text{tg}\alpha_0} \right), \quad (2)$$

где:  $V_0$  – объем грунта, перемещаемый при выколаживании откоса, м;  $h$  – высота выколаживания, м;  $K_p$  – коэффициент разрыхления;  $L_0$  – длина участка выколаживания, м;  $\alpha_0$  – угол откоса до выколаживания, град.;  $\alpha_2$  – угол откоса после выколаживания, град.

На рисунке 13 представлены схема планировочных мероприятий по созданию новых поверхностей и форм рельефа.

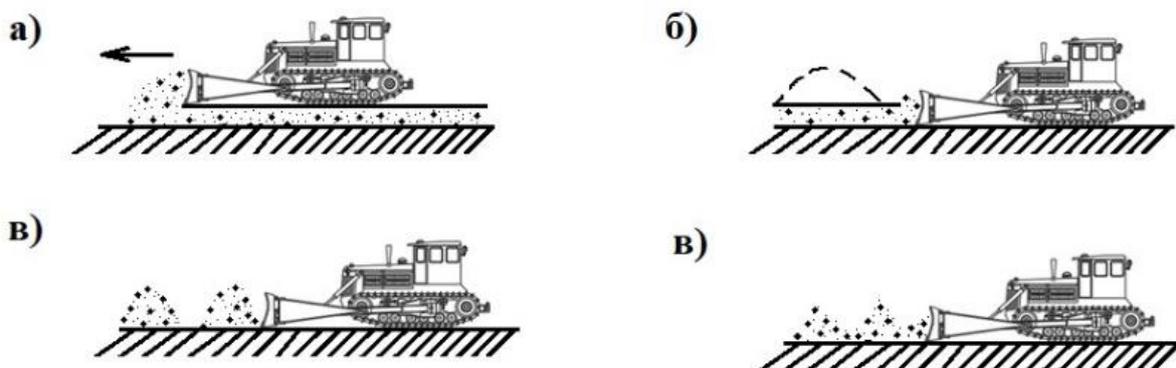


Рисунок 13 - Схема первого этапа планировочных мероприятий: а – транспортирование и выравнивание; б – резание; в, г – отсыпка берм

Для улучшения условий обводнения и, соответственно, более эффективного применения сорбента-мелиоранта необходимо применять технологию рыхления.

Рыхление верхней толщи грунта необходимо для слежавшихся грунтов и водоупорного слоя грунта на дневной поверхности породного отвала или на глубине до 1 м.

Оптимальная глубина эффективного рыхления массива рассчитывается по формуле:

$$h_3 = \frac{0,5 C \operatorname{tg} \alpha}{K_1}, \quad (3)$$

где:  $h_3$  – глубина эффективного рыхления массива, м;  $C$  – оптимальное расстояние между смежными проходами рыхлителя, м;  $K_1$  – коэффициент, учитывающий форму сечения прорези.

Оптимальная глубина эффективного рыхления массива при параллельных проходах рассчитывается по формуле:

$$h_3 = \frac{[K_1 h_3 + 0,5(C-b) \operatorname{tg} \alpha]}{K_2}, \quad (4)$$

где:  $h_3$  – глубина эффективного рыхления массива, м;  $K_1$  – коэффициент, учитывающий форму сечения прорези;  $h_3$  – возможное заглубление зуба рыхлителя, м;  $\alpha$  – угол наклона стенок прорези, град.;  $b$  – ширина основания прорези, м;  $K_2$  – коэффициент, учитывающий влияние состояния массива на размеры ненарушенных гребней.

На рисунке 14 представлена схема рыхления грунта для повышения водопроницаемости верхнего слоя грунта породного отвала.

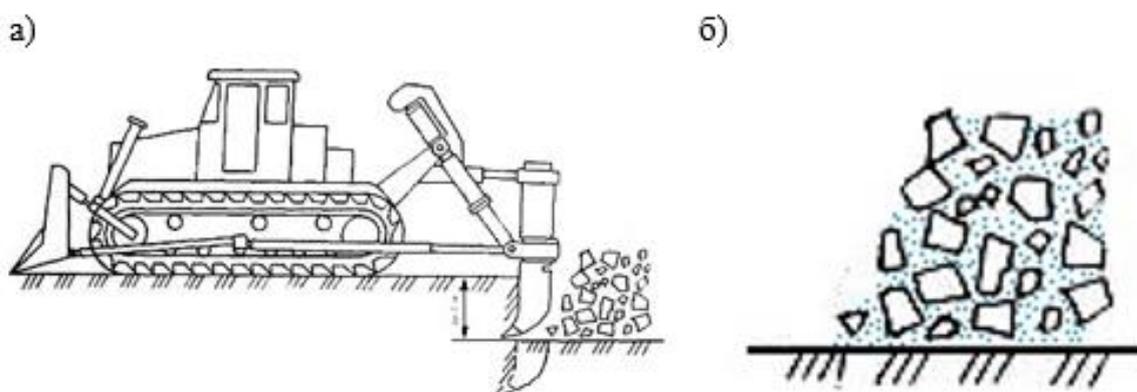


Рисунок 14 - Схема рыхления грунта для повышения водопоглощения верхнего слоя грунта породного отвала: а) схема рыхления на глубину до 1 м; б) заполнение влагой рыхлой породы

Процесс рыхления предполагает разуплотнение верхней толщи грунта, в результате появляются крупные трещины и влагопроводящие поры. В периоды снеготаяния или выпадения атмосферных осадков зона разрыхления заполняется водой и удерживает обводнение. Как следствие, удлиняется период контакта сорбента-мелиоранта и ионов тяжелых металлов в растворенной и обменной форме.

Увеличение объема стока воды в зону контакта сорбента-мелиоранта и ионов тяжелых металлов необходимо для эффективной сорбции ионов тяжелых металлов.

Толщина слоя сорбента-мелиоранта перед рыхлением должна составлять не менее 0,5 м на 1 м грунта породного отвала. Для перемешивания слоя «сорбент-мелиорант» и грунта на породном отвале рекомендовано использовать бульдозер с рыхлителем.

При выколаживании откосов бульдозером среднее расстояние перемещения пород определяется по формуле:

$$L_{\text{ср}} = \frac{mh}{2s \sin \alpha_2} \quad (5)$$

где:  $L_{cp}$  – среднее расстояние перемещения породы, м;  $m$  – коэффициент, учитывающий повторное перемещение породы, равным принимается 1,3;  $h$  – высота выколаживания, м;  $\alpha_2$  – угол откоса после выколаживания, град.

На вершине полностью отсыпанного породного отвала укладывается почва или торф сплошным слоем по всей площади или в виде полос шириной 2,5-3,0 м с расстоянием между ними 2,0-3,0 м. Полосы выполняются в виде траншей глубиной 0,5 м.

Почвенный покров наносится на перемешанный слой «сорбент-мелиорант» - «минеральный слой породного отвала потенциально плодородных пород».

При землевании рекомендовано использовать бульдозер со использованием «спиральной» и «челночной со смещением» схемой работы. Толщина почвенного слоя – не менее 0,2 м.

Виды растений, пригодных для озеленения породного отвала представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Рекомендуемые для озеленения породного отвала растения

Растения	Тяжелые металлы
Аксонopus сжатый	Cd, As, Pb, Cr
Папоротник Птерис	Cd, As, Pb, Cr
Пенник индийский	Cd, As, Pb, Cr
Бархатцы	Cu, Pb
Семейство крестоцветных	Ni, Co, Mn, Cd
Многолетние бобовые травы	Zn, Pb, Cu, Mo, Fe

**В четвертой главе** приведено эколого-экономическое обоснование консервации породного отвала сорбент-ориентированным методом.

Вертикальная миграция загрязнителя в почву и далее в подстилающие породы представляет собой важный процесс, который требует глубокого понимания физических и химических взаимодействий. Уравнение миграции ионов тяжелых металлов имеет следующий вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D_s \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - K_{cпо}, \quad (6)$$

где:  $c(z, t)$  – концентрация ионов тяжелых металлов в породном отвале;  $w$  – средняя скорость фильтрации почвенного раствора;  $D_s$  – коэффициент диффузии ионов тяжелых металлов;  $K_{cпо}$  – константа скорости сорбции ионов тяжелых металлов породным отвалом.

Основная формула, представляющая собой уравнение диффузии, может быть записана как:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla(uC_{TM}) = \nabla(K\nabla C_{TM}) + S_{по}, \quad (7)$$

где:  $C_{TM}$  – концентрация тяжелых металлов;  $u$  – вектор скорости потока;  $K$  – коэффициент турбулентной диффузии;  $S_{по}$  – источник загрязнения в породном отвале.

Концентрацию ионов тяжелых металлов в породном отвале можно определить по формуле:

$$\sum K_k = \frac{c_{1TM}}{K_1} + \dots + \frac{c_{iTM}}{K_i}, \quad (8)$$

где:  $C_{1TM} \dots C_{iTM}$  – содержание ионов тяжелых металлов в породном отвале, г/т;  $K_1 \dots K_i$  – кларковые содержания элементов в почвах, г/т.

В исследованиях вещественного состава отвалов медно-колчеданных руд Левихинского рудника Свердловской области анализировались пробы на содержания вредных компонентов (таблицы 3 и 4).

Таблица 3 - Химический состав проб с отвалов Левихинского рудника, масс, %

Компоненты	Проба 1	Проба 2
SiO <sub>2</sub>	61,29	57,91
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,96	8,04
CaO	0,22	0,44
MgO	1,04	0,86
TiO <sub>2</sub>	1,17	0,60
FeO	0,00	1,58
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,15	22,54
Fe <sub>общ</sub>	2,90	17,00
MnO	0,036	0,034
K <sub>2</sub> O	3,88	1,19
Na <sub>2</sub> O	1,05	1,14
S	1,27	0,40
Cu	0,0098	0,074
Σ	92,52	94,81

Таблица 4 - Концентрация химических элементов в водных объектах вблизи затопленного карьера Левихинского рудника, мг/дм<sup>3</sup>.

Химическое вещество	ПДК, мг/дм <sup>3</sup>	Класс опасности	Подготовительная вода (Проба 1) мг/дм <sup>3</sup>	Вода затопленного карьера (Проба 2) мг/дм <sup>3</sup>	Вода в ручье (Проба 3) мг/дм <sup>3</sup>	Вода после станции нейтрализации (Проба 4) мг/дм <sup>3</sup>	Вода в пруде-отстойнике (Проба 5) мг/дм <sup>3</sup>
Al	0,04	4	312	90,6	1834	7,84	26,2
Ba	0,74	4	0,914	1,072	-	0,402	0,16
Ca	180,0	4	131,5	226	492	819	758
Cd	0,005	2	-	-	7,14	-	-
Co	0,01	3	0,89	0,322	4,14	0,214	0,506
Cr <sup>3+</sup>	0,07	3	0,064	-	2,42	-	-
Cu	0,001	3	43,1	8,56	361	-	3,56
Fe	0,1	4	1272	142	5520	4,22	7,4
Mg	40,0	4	250	97,2	1302	346	250
Mn	0,01	4	15,5	10,82	93,8	15,22	25,2
Na	120,0	4	16,38	13,36	19,88	56,8	16,44
Zn	0,01	3	24,2	28,1	273	0,72	61,6

Многолетний анализ проб поверхностных вод на исследуемой территории выявил значительное ухудшение качества воды в водных объектах, расположенных рядом с породным отвалом.

Определение объема ущерба, нанесенного водному объекту в результате сброса загрязняющих веществ из сточных и/или дренажных вод породным отвалом осуществляется с использованием следующей формулы:

$$Y = K_{\text{вг}} K_{\text{в}} K_{\text{ин}} \sum_{i=1}^n H_i M_i K_{\text{из}}, \quad (9)$$

где:  $Y$  – размер вреда, тыс. руб.;  $K_{\text{вг}}$  - коэффициент, учитывающий природно-климатические условия в зависимости от времени года;  $K_{\text{в}}$  – коэффициент, учитывающий экологические факторы, состояние водных объектов;  $K_{\text{ин}}$  – коэффициент индексации, учитывающий инфляционную составляющую экономического развития;  $H_i$  – таксы для исчисления размера вреда от сброса ионов тяжелых металлов в водные объекты, тыс. руб./т;  $M_i$  – масса сброшенных ионов тяжелых металлов (определяется по каждому загрязняющему веществу), т;  $K_{\text{из}}$  – коэффициент, учитывающий интенсивность негативного воздействия ионов тяжелых металлов на водный объект.

Таким образом, на основании выполненного расчета выявлено, что размер экономического ущерба в результате сброса ионов тяжелых металлов с породного отвала Левихинского рудника составляет 10 938,4 тыс. руб. в год.

В таблице 5 приведены расчеты стоимости консервации породного отвала на примере Левихинского рудника.

Таблица 5 - Расчет стоимости консервации породного отвала Левихинского рудника сорбент-ориентированным методом

№ п/п	Наименование показателя	Сорбент-мелиорант	Ед. измерения	Значение
1.	Объем породного отвала	-	га	30
2.	Насыпной слой сорбента-мелиоранта	торф – осадки водоподготовки	м	0,5
3.	Средняя насыпная плотность сорбента-мелиоранта в зависимости от пропорции	торф – осадки водоподготовки (пропорции, масс. % – 20/80)	кг/м <sup>2</sup>	364
		торф – осадки водоподготовки (пропорции, масс. % – 40/60)		406
		торф – осадки водоподготовки (пропорции, масс. % – 60/40)		434

4.	Средняя себестоимость сорбента-мелиоранта	торф – осадки водоподготовки (пропорции, масс. % – 20/80)	руб/т	2 400
		торф – осадки водоподготовки (пропорции, масс. % – 40/60)		2 650
5.		торф – осадки водоподготовки (пропорции, масс. % – 60/40)		2 900
6.	Средняя масса сорбента-мелиоранта	торф – осадки водоподготовки (пропорции, масс. % – 20/80)	т/га	1 820
		торф – осадки водоподготовки (пропорции, масс. % – 40/60)		2 030
		торф – осадки водоподготовки (пропорции, масс. % – 60/40)		2 170
7.	Масса травосмеси (многолетние бобовые травы - люцерна)	-	кг/га	20
8.	Средняя стоимость травосмеси (многолетние бобовые травы - люцерна)	-	тыс.руб/га	45
9.	Средняя стоимость технического этапа консервации породного отвала	-	тыс.руб/га	1 300

Стоимость консервации породного отвала Левихинского рудника, площадь которого составляет 30 гектар (суммарно 11 отвалов), составляет не менее 169 000,00 тыс. рублей при использовании сорбента-мелиоранта торф – осадки водоподготовки (пропорции, масс. % – 60/40).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертация на тему «Обоснование технологии консервации породных отвалов сорбент-ориентированным методом» является научно-квалификационной работой, в которой на основании теоретических и экспериментальных исследований изложены новые научно-обоснованные технологические решения по консервации породных отвалов сорбент-ориентированным методом, имеющее существенное значение для развития страны.

Основные научные и практические результаты заключаются в следующем:

1. Сорбент-ориентированный метод восстановления нарушенных земель в сравнении с биоремедиационным, является наиболее перспективным решением консервации породного отвала.

2. Химический состав органической части торфа определяется химическим составом участвующих в образовании торфа растений, играет важную роль в сорбции тяжелых металлов путем связывания и нейтрализации ионов тяжелых металлов в течение 48 ч.

3. Использование торфа и осадков водоподготовки в составе композитного сорбента-мелиоранта торф – осадки водоподготовки, в пропорциях – 20/80, 40/60, 60/40 (масс, %) обеспечивает сорбцию не менее 98 % ионов  $\text{Cu}^{2+}$ , не менее 49 % ионов  $\text{Pb}^{2+}$ , не менее 59 % ионов  $\text{As}^{3+}$ .

4. Эффективность сорбента-мелиоранта на основе торфа и осадков водоподготовки заключается в сорбции ионов тяжелых металлов  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{As}^{3+}$  при комнатной температуре в течение 60 минут. Содержание ионов  $\text{Cu}^{2+}$  с концентрацией 5 ПДК уменьшается в 3 раза, содержание ионов  $\text{Pb}^{2+}$  с концентрацией 5 ПДК в 4 раза, содержание ионов  $\text{As}^{3+}$  с концентрацией 5 ПДК в 10 раз. Полная сорбция ионов  $\text{Cu}^{2+}$  происходит через 48 ч, ионов  $\text{Pb}^{2+}$  - через 24 ч, ионов  $\text{As}^{3+}$  - через 5 ч.

5. Включение в состав сорбента-мелиоранта  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  на 17 % увеличивает сорбцию ионов  $\text{As}^{3+}$ .

6. Технология консервации породного отвала сорбент-ориентированным методом за счет сорбции ионов тяжелых металлов эффективна при условии обводнения, положительных температур и рыхления верхнего слоя породного отвала.

7. Для сорбции большого числа ионов тяжелых металлов торф верховой в качестве компонента сорбента-мелиоранта, в среднем, на 18 % эффективнее торфа низинного.

8. Целесообразно комбинированное использование осадков водоподготовки и торфа в составе композиционного сорбента-мелиоранта в разных пропорциях - при увеличении осадков водоподготовки в пропорции увеличиваются сорбционные свойства, но снижаются мелиоративные свойства сорбента.

9. Для снижения десорбции ионов тяжелых металлов целесообразно использовать оксид кальция с целью снижения кислотности среды.

### **Рекомендации и дальнейшие перспективы разработки темы**

Полученные в диссертации результаты рекомендуется использовать для консервации и ликвидации объектов предприятий горной промышленности. Заинтересованными предприятиями и учреждениями могут быть научно-исследовательские и проектные институты, администрации муниципальных образований, Министерство природных ресурсов и экологии регионов, горнодобывающие предприятия и частные предприятия по добыче, производству продукции из торфяного сырья, фильтровальные станции городов и производственных предприятий.

Комиссия предприятия ООО «ЭкоИнноватор» отмечает целесообразность использования предлагаемых технологических решений при очистке наземных и водных экосистем загрязненных ионами тяжелых металлов. Результаты работы могут быть использованы для предотвращения вымывания тяжелых металлов в грунтовые воды и поверхностные водоемы, а также улучшению физических и химических свойств почвы, способствуя восстановлению растительного покрова. Предложенный автором метод, за счет использования доступных материалов (торф, осадки водоподготовки, оксид кальция) и относительно простой геотехнологии, является экономически целесообразным и может быть успешно применен для консервации различных типов породных отвалов, загрязненных тяжелыми металлами.

## Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

### Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Валиев Н. Г., Разоренов Ю. И., Голик В. И., **Лебзин М. С.** Комбинирование технологий выщелачивания с традиционными технологиями горного передела руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2024. № 4. С. 33-43.

2. Валиев Н. Г., **Лебзин М. С.**, Гутнов А. А., Тлехугов А. М., Илизаров Д. Л. К проблеме влияния рудничных стоков на экологию северного Кавказа // Известия Уральского государственного горного университета. 2024. № 2 (74). С. 142-148.

3. Валиев Н. Г., **Лебзин М. С.**, Усманов А. И., Завьялов С. С. Использование торфа в качестве сорбента тяжелых металлов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023. № 3. С. 137-146.

4. Юрак В. В., Апакашев Р. А., **Лебзин М. С.**, Малышев А. Н. Композитные сорбенты из природного и техногенного сырья: оптимизация состава для рекультивации. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 12-1. С. 177-191.

5. Юрак В. В., Апакашев Р. А., **Лебзин М. С.**, Малышев А. Н. Оценка эффективности и экологичности сорбент-ориентированного метода восстановления загрязненных тяжелыми металлами и металлоидами почв. Горные науки и технологии. 2023. Т. 8. № 4. С. 327-340.

6. Апакашев Р. А., **Лебзин М. С.**, Юрак В. В., Малышев А. Н. Гибридные сорбенты - мелиоранты для рекультивации загрязненных мышьяком почв. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 11-1. С. 18-28.

7. Валиев Н. Г., **Лебзин М. С.**, Завьялов С. С., Малышев А. Н. Исследование адсорбции ионов  $Cr$  композиционными сорбентами на основе природных материалов и осадков водоподготовки. Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. № 4. С. 204-213.

8. Апакашев Р. А., Малышев А. Н., **Лебзин М. С.** Исследование физико-химических свойств осадков водоподготовки для "зеленой" почвенной утилизации. Известия Уральского государственного горного университета. 2022. № 3 (67). С. 117-124.

9. Юрак В. В., Апакашев Р. А., Валиев Н. Г., **Лебзин М. С.** Сорбент-ориентированный метод детоксикации почв от тяжелых металлов. Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т. 13. № 1 (47). С. 135-150.

10. Апакашев Р. А., Валиев Н. Г., Усманов А. И., **Лебзин М. С.** Эффективность природных сорбентов при адсорбции ионов тяжелых металлов. Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2021. № 4. С. 14-23.

11. Apakashev R. A., Malyshev A. N., **Lebzin M. S.** Study of the physicochemical properties of water treatment sludge for "green" soil utilization // Bulletin of the Ural State Mining University. 2022. No. 3 (67). pp. 117-124.

12. Валиев Н. Г., Гревцев Н. В., Егошина О. С., **Лебзин М. С.** Научно-практические предпосылки создания цифровых природовоспроизводящих геотехнологий для комплексного освоения торфяных ресурсов. Горный журнал. 2022. № 5. С. 63-68.

*Научные работы, опубликованные в других изданиях:*

1. Апакашев Р.А., **Лебзин М.С.**, Юрак В.В., Малышев А.Н. Научные основы «зеленой утилизации» осадков водоподготовки в составе природных почвенных мелиорантов для селективной сорбции тяжелых металлов. Уральская горная школа - регионам. Материалы научно-практической конференции. Екатеринбург, 2023. С. 482.

2. **Лебзин М.С.**, Малышев А.Н. Использование осадков водоподготовки в составе природных мелиорантов-селективных почвенных сорбентов тяжелых металлов. В сборнике: Уральская горная школа - регионам. Материалы международной научно-практической конференции. Уральская горнопромышленная декада, 4-13 апреля 2022 года, г. Екатеринбург. Екатеринбург, 2022. С. 603-604.

3. Юрак В.В., Малышев А.Н., **Лебзин М.С.**, Апакашев Р.А. «Зеленая» утилизация осадков водоподготовки: патентный обзор. Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2022). Материалы XVIII Международной научно-технической конференции. В 2-х томах. Уфа, 2022. С. 230-235.

4. **Лебзин М.С.**, Усманов А.И. Использование местных природных сорбентов для связывания ионов тяжелых металлов. Международная научно-практическая конференция «Уральская горная школа - регионам». Материалы Международной научно-практической конференции. Екатеринбург, конференции. Екатеринбург, 2023. С. 482.

5. Егошина О.С., **Лебзин М.С.** Применение горно-геологических информационных систем при разработке месторождений торфа средствами гидромеханизации. Проектное управление природоохранными технологиями в условиях новых вызовов. Сборник научных статей Национальная интернет-конференция с международным участием. Под общей редакцией Н.В. Гревцева, А.Н. Сёмина. Екатеринбург, 2021. С. 113-117.

**Патенты на изобретения:**

1. Галактионова Л. В., Терехова Н. А., Холодилина Т. Н., Веденева Н. Г., Лебедев С. В., Юрак В. В., Душин А. В., **Лебзин М. С.** Мелиорант для почв земель сельскохозяйственного назначения. Патент на изобретение RU 2826149 C1, 04.09.2024. Заявка № 2024102884 от 06.02.2024

2. **Лебзин М. С.**, Егошина О. С., Александров Б. М. Исходная база данных для комплексной оценки запасов торфа по категориям сырья с учетом QR-кодов и оцифровывания генетической классификации видов торфа. База данных ЭВМ № 2024622055 от 16 мая 2024 г.

3. Апакашев Р. А., **Лебзин М. С.**, Малышев А. Н., Усманов А. И., Юрак В. В., Завьялов С. С. Композиционный гранулированный сорбент на основе природных материалов обогащенный  $Fe_2O_3$  для рекультивации земель, загрязненных  $As^{3+}$ . Патент РФ на изобретение RU 2819720 C1. 23.05.2024. Заявка на патент № 2023128044 от 31.10.2023 г.

4. Юрак В. В., Душин А. В., Апакашев Р. А., Усманов А. И., **Лебзин М. С.** Торфяной мелиорант для рекультивации земель, загрязненных тяжелыми металлами. Патент на изобретение RU 2745456 C1, 25.03.2021. Заявка № 2020129211 от 03.09.2020.

5. Усманов А. И., Апакашев Р. А., **Лебзин М. С.**, Юрак В. В., Душин А. В., Завьялов С. С. Торфяной гранулированный мелиорант для рекультивации земель, загрязненных тяжелыми металлами. Патент на изобретение RU 2774431 C1, 21.06.2022. Заявка № 2021134476 от 25.11.2021.

6. Апакашев Р. А., Давыдов С. Я., Бакалейщик А. М., **Лебзин М. С.**, Малышев А. Н. Способ утилизации осадков сооружений водоподготовки. Патент на изобретение RU 2796171 C1, 17.05.2023. Заявка № 2022127049 от 19.10.2022.

Подписано в печать 28.03.2025. Формат 60x84 1/16  
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 63  
Копировальный центр «Университетский»  
г. Екатеринбург, Университетский пер., д. 3, тел. 8-343-257-90-50