

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет»

*На правах рукописи*

Харько Полина Александровна



ЛИКВИДАЦИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ МАЛЫХ ПРИРОДНЫХ  
ВОДОТОКОВ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕХНОГЕННЫХ МАССИВОВ  
МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА

Специальность 1.6.21. Геоэкология

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Пашкевич М.А.

Санкт-Петербург – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1 ПРОБЛЕМА ОБРАЗОВАНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ.....</b>	<b>13</b>
1.1 Техногенные массивы и их воздействие на окружающую среду .....	15
1.2 Техногенные массивы горнодобывающих и горно-перерабатывающих производств.....	18
1.3 Формирование техногенных массивов Сибайского горно-обогатительного комбината и их воздействие на компоненты природной среды.....	24
1.3.1 Формирование техногенных наносов в зоне воздействия насыпных техногенных массивов МСК .....	32
1.3.2 Формирование техногенных наносов в зоне воздействия намывных техногенных массивов МСК .....	38
1.4 Выводы к первой главе .....	48
<b>ГЛАВА 2 МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СУЛЬФИДСОДЕРЖАЩИХ ТЕХНОГЕННЫХ МАССИВОВ СИБАЙСКОГО ГОК.....</b>	<b>51</b>
2.1 Современное состояние и экологические проблемы малых природных водотоков.....	51
2.2 Мониторинг природных и сточных дренажных вод .....	53
2.2.1 Пробоотбор, пробоподготовка и полевые исследования водных проб.....	55
2.2.2 Анализ водных проб в лабораторных условиях .....	56
2.3. Мониторинг донных отложений водных объектов .....	58
2.3.1 Пробоотбор и пробоподготовка донных отложений.....	58
2.3.2 Анализ донных отложений в лабораторных условиях.....	62
2.4 Особенности содержания тяжелых металлов в поверхностных водах и донных отложениях р. Карагайлы .....	68
2.5 Выводы ко второй главе .....	74
<b>ГЛАВА 3 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗОЛЫ ОТ СЖИГАНИЯ ТКО ДЛЯ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ И ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ДРЕНАЖНЫХ ВОД ОТ МЕТАЛЛОВ .....</b>	<b>76</b>

3.1 Проблема образования золы от сжигания ТКО и перспективы ее использования для нейтрализации и очистки кислых дренажных вод от металлов .....	82
3.2 Моделирование очистки сернокислых сточных дренажных вод хвостохранилища золы от сжигания ТКО в лабораторных условиях .....	90
3.2.1 Установление диапазона значения рН .....	90
3.2.2 Определение дозы реагента и времени равновесного значения рН .....	92
3.2.3 Оценка эффективности очистки модельного раствора от металлов и взвешенных веществ .....	92
3.2.4 Химический состав осадка и оценка степени вымываемости металлов .....	97
3.3 Выводы к третьей главе .....	99
<b>ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕКИ КАРАГАЙЛЫ .....</b>	<b>101</b>
4.1 Каптирование и отвод сернокислых дренажных вод хвостохранилища для дальнейшей очистки.....	101
4.2 Модернизация очистных сооружений и обезвоживание осадка.....	104
4.3 Изъятие, обезвоживание и утилизация техногенных наносов в донных отложениях.....	113
4.4 Эколого-экономическая оценка организации комплексного средозащитного мероприятия.....	120
4.4.1 Расчет затрат на проведение работ по каптированию и отводу сточных дренажных вод на очистку .....	121
4.4.2 Расчет затрат на очистку сточных дренажных вод хвостохранилища .....	122
4.4.3. Расчет затрат на изъятие, обезвоживание и утилизацию донных отложений .....	123
4.4.4 Определение величины предотвращенного экологического ущерба .....	126
4.5 Выводы к четвертой главе.....	128
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>129</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>130</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А Графики накопления металлов в донных отложениях .</b>	<b>143</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б Фазовый состав проб донных отложений .....</b>	<b>146</b>

<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В Фазовый состав образцов золы от сжигания ТКО.....</b>	<b>149</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г Расчет кратности основного разбавления сточных вод.</b>	<b>152</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акт внедрения результатов диссертационной работы на производственном объекте .....</b>	<b>154</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Е Патент.....</b>	<b>156</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** В России малые природные водотоки составляют более 95 % общей протяженности гидрографической сети. Они имеют большое экологическое значение, являясь первым звеном в формировании речной системы и определяя гидрологический режим и качество средних и крупных рек. Из-за небольшой водности малые водотоки являются крайне чувствительными как к естественной смене окружающей обстановки, так и к антропогенному воздействию.

Загрязнение вод малых водотоков ведет к изменению процесса образования и накопления осадков. Часто в результате загрязнения происходят химические реакции, приводящие к аккумуляции загрязняющих веществ в донных отложениях, при этом образуются новые соединения, обладающие большей токсичностью, чем исходные.

Несмотря на локальный характер в Программе ООН по окружающей среде загрязнение, заиливание и деградацию малых природных водотоков рассматривает как угрозу сохранения природных экосистем. Особенно актуальной эта проблема является для зоны недостаточного увлажнения, занимающей 27% территории Российской Федерации, к которой относится водосбор р. Урал, включающий р. Карагайлы.

На состояние реки непосредственное влияние оказывает деятельность Сибайского ГОКа, в особенности наземных сульфидсодержащих техногенных массивов. Воздействие климатических факторов на такие отходы приводит к формированию кислых дренажных вод, интенсифицирующих процессы растворения и выщелачивания химических элементов, в особенности тяжелых металлов, и резкому увеличению их миграционной способности. В результате инфильтрации дренажных вод через тело массивов, в подземных водах происходит формирование гидрогеохимических ореолов загрязнения, а в поверхностных водах гидрохимических потоков загрязнения с крайне низкими значениями водородного показателя (рН 2-3).

Помимо трансформации состава речных вод, в донных отложениях р. Карагайлы происходит формирование источника вторичного загрязнения - техногенных наносов, содержащих водорастворимые и подвижные формы металлов.

Необходимость решения проблем, связанных с ликвидацией загрязнения малых природных водотоков и предотвращения дальнейшего ухудшения качества главных рек страны, таких как р. Урал, предопределяет актуальность диссертационной работы.

### **Степень разработанности темы исследования**

Проблемы складирования минеральных отходов и их трансформации под воздействием внешних условий нашли отражение в трудах таких ученых и специалистов как А.М. Гальперин, А.И. Семячков, М.А. Пашкевич, А.Н. Попов, Х.-Ю. Шеф.

Большое внимание вопросам водной миграции загрязняющих компонентов с территории хранилищ отходов уделяли В.А. Мироненко, Н.И. Плотников, И.Н. Гавич, J.W. Finch Förstner, W. Salamons, А.Ю. Опекунов, формированию и воздействию кислых дренажных вод на природные компоненты – А.А. Летел, Т.И. Моисеенко, Г.В. Калабин.

Частная проблема экологического состояния малых рек и других водных объектов, а также влияния техногенных объектов на их состояние нашла отражение в работах следующих учёных: В.Г. Орлов, Е.Н. Янин, А.И. Мережко, F. Elbaz-Poulichet, J.L. Seidel, C. Casiot, M.H. Tusseau-Vuillemin. Большое внимание уделялось разработке средозащитных мероприятий по предотвращению загрязнения малых рек предприятиями различных отраслей.

Вопрос изъятия, обезвоживания и утилизации загрязненных донных отложений рассматривался такими авторами, как Д.Ю. Кнутарев, В.А. Шабанов, К.В. Свалова и др.

Опыт использования природных материалов и отходов различных производств для нейтрализации и очистки кислых вод от металлов описан в работах: E. Balladares, A. Izadi, Е. Яковлева, Т.В. Ткаченко, Л.О. Штриплинг.

Опыт применения различных средозащитных мероприятий остается недостаточным для полной ликвидации последствий и предотвращения повторного загрязнения р. Карагайлы.

В этой связи, несмотря на изученность вопроса, актуальным на сегодняшний день является разработка экологически эффективного и экономически выгодного комплексного решения проблемы загрязнения малых природных водотоков в зоне воздействия техногенных массивов минерально-сырьевого комплекса.

Содержание диссертации **соответствует паспорту научной специальности** по пунктам:

18. Горно-геологическая природная среда и её изменение при разработке месторождений полезных ископаемых, взаимодействие природных и технических систем в процессе недропользования.

24. Теория и методы геоэкологической оценки существующих и создаваемых технологий добычи и переработки полезных ископаемых природного и техногенного происхождения, инженерная защита экосистем, прогнозирование, предупреждение и ликвидация загрязнений природной среды.

**Объект исследований** – малый природный водоток, находящийся под воздействием сульфидсодержащих техногенных массивов минерально-сырьевого комплекса.

**Предмет исследований** – геоэкологические условия формирования состава речных вод и донных отложений в зоне воздействия сульфидсодержащих техногенных массивов минерально-сырьевого комплекса.

**Цель работы** – ликвидация накопленного экологического вреда и предотвращение повторного загрязнения р. Карагайлы в зоне воздействия сульфидсодержащих техногенных массивов Сибайского ГОКа.

**Идея работы** заключается в изъятии, обезвоживании и утилизации техногенных наносов р. Карагайлы, а также каптировании и очистке кислых дренажных вод хвостового хозяйства.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Мониторинг природных и сточных дренажных вод, а также донных отложений р. Карагайлы, включающий в себя установление механизма формирования техногенных гидро- и литохимического потоков в зоне влияния действующего хвостохранилища и зон формирования техногенных геохимических барьеров в малом природном водотоке.

2. Оценка состава, экологической опасности и динамики накопления донных отложений в зоне воздействия сульфидсодержащих техногенных массивов минерально-сырьевого комплекса.

3. Анализ существующих механизмов очистки кислых дренажных вод и обоснование выбора золы от сжигания твердых коммунальных отходов (ТКО) для их нейтрализации и осаждения металлов в процессе очистки.

4. Определение состава золы от сжигания различных ТКО и оценка эффективности применения в качестве реагентов для нейтрализации кислых дренажных вод, эмпирическое установление дозы вносимого реагента, времени контакта для достижения требуемого качества очищенной воды, а также определение скорости осаждения взвешенных веществ.

5. Разработка комплекса инженерно-технических решений по ликвидации накопленного вреда р. Карагайлы, а также эколого-экономическое и социальное обоснование эффективности предложенных инженерно-технических решений.

#### **Научная новизна работы:**

1. Установлен механизм формирования техногенных гидро- и литохимических потоков загрязнения в реке Карагайлы в зоне влияния сульфидсодержащих техногенных массивов Сибайского ГОКа.

2. Установлена эффективность очистки модельных растворов кислых дренажных вод от ионов металлов реагентом, представленным золой от сжигания ТКО, в зависимости от состава и количества реагента, времени контакта.

### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Выполнена комплексная оценка состояния вод и донных отложений р. Карагайлы в зоне воздействия сульфидсодержащих техногенных массивов с выявлением территорий и условий формирования техногенных геохимических барьеров.

2. Выявлена возможность использования золы от сжигания ТКО в качестве реагента для нейтрализации и очистки кислых дренажных вод хранилищ сульфидсодержащих отходов от металлов.

3. Разработано технологическое решение по ликвидации последствий и предотвращению повторного загрязнения воды и донных отложений р. Карагайлы металлами.

4. Результаты и рекомендации диссертационной работы приняты к использованию в проекте технической документации ООО «Компания «ГрандПроект» при разработке мероприятий по очистке сильно концентрированных сточных вод от металлов (акт о внедрении (использовании) результатов от 07.02.2023, Приложение Д).

5. Результаты диссертационной работы подтверждены патентом на изобретение № 2779420 «Способ очистки подотвальных вод от ионов железа и меди» от 06.09.2022 г. (Приложение Е).

**Методология и методы исследования.** Проведение исследований осуществлялось с использованием системного анализа источников и факторов техногенного воздействия на воду и донные отложения в зоне воздействия Сибайского ГОКа; аналитических и экспериментальных методов в полевых и лабораторных условиях с использованием приборной базы Научного центра «Экосистема» и Научно-образовательного центра коллективного пользования высокотехнологическим оборудованием Санкт-Петербургского горного университета (рентгенофлуоресцентная спектрометрия, порошковая рентгеновская дифракция, атомно-эмиссионная спектрометрия и высокоэффективная жидкостная хроматография); системного анализа методов изъятия и обезвоживания техногенных наносов и промышленных методов

очистки сточных дренажных вод от металлов, а также обработке полученных результатов.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Складирование сульфидсодержащих отходов Сибайского ГОКа приводит к образованию кислых дренажных и подотвальных вод, разгрузка которых в р. Карагайлы приводит к формированию техногенных высококонтрастных гидрохимических ( $K_{\text{ПДКр.х.}}^{\text{Zn}} \leq 410$ ,  $K_{\text{ПДКр.х.}}^{\text{Cu}} \leq 280$ ,  $K_{\text{ПДКр.х.}}^{\text{Mn}} \leq 82$ ,  $K_{\text{ПДКр.х.}}^{\text{Al}} \leq 80$ ,  $K_{\text{ПДКр.х.}}^{\text{Fe}} \leq 5$ ,  $K_{\text{ПДКр.х.}}^{\text{Cd}} \leq 2,6$ ) и литохимических ( $K_{\text{фон}}^{\text{Cu}} \leq 220$ ,  $K_{\text{фон}}^{\text{Zn}} \leq 66$ ,  $K_{\text{фон}}^{\text{Cd}} \leq 6,7$ ,  $K_{\text{фон}}^{\text{Mn}} \leq 6,6$ ,  $K_{\text{фон}}^{\text{Fe}} \leq 2,5$ ) потоков загрязнения.

2. Эффективность очистки кислых дренажных вод на уровне 91-99 % по отношению к следующим металлам Al, Cd, Cu, Fe, Mn, Zn достигается использованием реагента, представленного золой от сжигания ТКО с содержанием активного CaO в диапазоне 5-8 %.

3. Ликвидация накопленного вреда р. Карагайлы должна достигаться путем изъятия и последующей консолидацией в геотубах техногенного осадка реки, являющегося потенциальным минеральным сырьем с содержанием до 0,56 % меди и до 0,44 % цинка, а также включением в водооборот предварительно каптированных и очищенных путем нейтрализации золой от сжигания ТКО кислых дренажных вод хвостохранилища.

**Степень достоверности результатов исследования** обусловлена проведением комплексного мониторинга природных и сточных вод, а также донных отложений в зоне воздействия производственных объектов с применением современного высокотехнологичного оборудования; подтверждается сходимостью полученных экспериментальных данных по изучению нейтрализации и очистки вод от металлов с теоретическими исследованиями.

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: XVIII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы

недропользования» (апрель 2020 года, г. Санкт-Петербург); XXI Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке» имени выдающихся химиков Л.П. Кулева и Н.М. Кинжера, посвященной 110-летию со дня рождения профессора А.Г. Стромберга (сентябрь 2020 года, г. Томск); X Всероссийская научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» (октябрь 2020 года, г. Санкт-Петербург); IV Международная научно-практическая конференция «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование» (октябрь 2021 года, г. Санкт-Петербург).

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; проведении комплексного экологического мониторинга природных и сточных вод, донных отложений в зоне воздействия производственных объектов; проведении исследований по установлению степени загрязнения р. Карагайлы металлами; обосновании выбора золы от сжигания ТКО как реагента для нейтрализации и очистки кислых дренажных вод от металлов; проведении лабораторных исследований по определению состава золы; проведении экспериментальных исследований по установлению дозы реагента, времени контакта и осаждения взвешенных веществ для обеспечения необходимой степени очистки модельного раствора от металлов и взвеси; разработке технического решения по ликвидации накопленного вреда р. Карагайлы и предотвращению ее повторного загрязнения; оценке эколого-экономической эффективности предлагаемого средозащитного мероприятия.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 11 печатных работах (пункты списка литературы № 36, 46, 49, 71-77, 93), в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, в 3 статьях - в изданиях, входящих в

международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент (пункт списка литературы № 45).

**Структура работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 95 наименований. Диссертация изложена на 156 страницах машинописного текста, содержит 34 рисунка, 21 таблицу, 6 приложений.

**Благодарности.** Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю д.т.н., профессору Пашкевич М.А. за научное руководство над работой. За помощь в проведении исследований и ценные научные консультации директору НЦ «Экосистема» к.т.н., доценту Матвеевой В.А., сотрудникам НЦ к.т.н. Чукаевой М.А., к.т.н. Сверчкову И.П. и всему коллективу кафедры геоэкологии Горного университета.

## ГЛАВА 1 ПРОБЛЕМА ОБРАЗОВАНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ

Рост численности населения, интенсивность развития промышленности и увеличение потребления материальных ресурсов приводит к ежегодному росту количества различных видов отходов. Их складирование и захоронение, особенно при недостаточной эффективности средозащитных мероприятий по их утилизации, может привести к непосредственной угрозе как живым организмам, так и окружающей хранилища природной среде.

Обращение с отходами является достаточно сложной и важной проблемой: для их размещения и захоронения отчуждаются территории, площадью в несколько сотен гектаров, причём негативное воздействие хранилищ отходов на все компоненты окружающей среды распространяется на сотни и тысячи метров от границы складирования.

В России примерно 2,7 млн. га используется в качестве земельных отводов горнодобывающих и горно-перерабатывающих предприятий, которые вносят наибольший негативный вклад в загрязнение природной среды, в особенности соединениями тяжелых металлов. Экологический ущерб от размещения отходов предприятий по добыче и переработке минерального сырья составляет более 60 % от общего ущерба деятельности промышленности в целом [20].

Согласно данным Федеральной службы по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор), общий объем накопленных к началу 2021 года промышленных и бытовых отходов в России составляет около 52 миллиардов тонн. За последние 10 лет количество отходов, образующихся ежегодно, увеличилось с 3,7 млрд. тонн до 8,5 млрд. тонн или приблизительно на 200 %. По виду экономической деятельности наибольший объем образующихся отходов приходится на «добычу полезных ископаемых» и составляет около 95 % от общего количества образованных отходов. Из общего количества минерального сырья, добываемого в России, порядка 98-99 % составляют отходы [20].

В виду увеличения объемов добываемого сырья из-за роста потребностей населения в материальных ресурсах, геологическая деятельность человека стала сопоставимой с природными геологическими процессами [1].

В настоящее время не менее актуальной проблемой является накопление твердых коммунальных отходов (далее – ТКО). По данным Росприроднадзора в России к 2021 году объем ТКО составил 48,5 млн. тонн. Несмотря на ценность ТКО (свалочный газ, как энергетический ресурс, компостная масса) в качестве возможности использования их как вторичных ресурсов, в России около 75 % всех коммунальных отходов отправляется на полигоны захоронения (по данным 2020 года), при этом в переработку и на сжигание направляется всего 5 % [1]. Это сопряжено с относительно низкой стоимостью земли для складирования по сравнению с другими методами обращения ТКО [34]. Помимо использования земельных ресурсов и потери ценных компонентов отходов, полигонное захоронение отходов ведет к загрязнению окружающей среды [34]. Существование полигонов ТКО сопряжено с выделением и распространением фильтрата, выделением биогаза, разносом отдельных фракций отходов, повышением температуры окружающей среды и т.д.

Советом при Президенте по стратегическому развитию и приоритетным проектам 21 декабря 2016 года был утвержден паспорт приоритетного проекта "Снижение негативного воздействия на окружающую среду посредством ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде и снижения доли захоронения твердых коммунальных отходов" ("Чистая страна"). Согласно данному проекту, планируется снизить экологический ущерб от захоронения ТКО, а также оперативно выявлять и ликвидировать несанкционированные свалки мусора [42]. Данный проект планируется реализовать до 2025 года включительно. Уже к 2023 году ожидается снижение объема размещенных на свалках отходов на 30 % в Московской области и до 100 % в Казани благодаря работе мусоросжигательных заводов [42].

Проект также включает в себя план восстановления и рекультивации около полутора гектаров нарушенных земель, что к 2025 году улучшит экологические условия проживания для 4,3 млн. человек [42].

Таким образом, утилизация ТКО в России в виде техногенных массивов сопровождается изъятием сотен гектаров земли. Их наземное размещение сопряжено с высокой экологической опасностью, ввиду негативного воздействия на компоненты природной среды.

### **1.1 Техногенные массивы и их воздействие на окружающую среду**

В отечественной и зарубежной литературе встречаются различные толкования термина «техногенный массив». Следующую трактовку можно определить, как наиболее широкую и правильную:

*«Техногенный массив – геологическая структура, сложенная породой (ми) или наносом (-ами) антропогенного генезиса, отличающаяся по своему составу (химическому, гранулометрическому, бактериологическому) и свойствам (физико-механическим, фильтрационным, сорбционным и пр.) от фоновых пород их вмещающих, форма и размеры которой определяются преимущественно технологическими процессами»* [47].

Техногенные образования, формирующиеся в результате инженерной деятельности человека, осуществляемой с помощью транспортных средств, взрыва, в результате чего происходит их перемещение и укладка, представляют собой хранилища отходов. Такие техногенные образования, в соответствии с принятой в Российской Федерации классификации, называют *насыпные техногенные массивы*. Они могут быть представлены как природными грунтами, но с нарушенной естественной структурой, так и отходами промышленных производств, и коммунальными отходами [47].

На горнодобывающих и горно-перерабатывающих предприятиях техногенные насыпные массивы формируются в виде отвалов, предусматривая под собой транспортировку и укладку пустой породы, золы, шлака, некоторой части полезных ископаемых на специально отведенные площади земельного

отвода. Отвалы могут занимать до 60 % земельного отвода предприятия. На рисунке 1.1 представлен пример насыпного техногенного массива (отвал).



Рисунок 1.1 – Насыпной техногенный массив

К *намывным техногенным массивам* относят хранилища жидких отходов, таких как отходы обогащения полезных ископаемых (хвосты), отходы рудопромывки (шламы), минеральные и бытовые отходы, а также хранилища гидравлически укладываемых грунтов природного или техногенного происхождения (гидроотвалы) [47]. На рисунке 1.2 представлен пример намывного техногенного массива (хвостохранилище).



Рисунок 1.2 – Намывной техногенный массив

Третью группу техногенных массивов, характеризующуюся малой мощностью, но значительной площадью или протяженностью, называют "*техногенные наносы*" [47]. Выделяют три основные группы техногенных наносов: атмосферные выпадения, искусственные почвы, донные отложения водотоков и водоемов.

К атмосферным выпадениям относят твердые частицы и аэрозоли, осевшие на поверхность земли в результате гравитации. Чаще всего веществами, загрязняющими земли, выступают пыль, зола, тяжелые металлы, летучие органические соединения, сажа и смолистые соединения [5, 47, 87]. Воздействие атмосферных выпадений приводит к почвенной эрозии и угнетению растительности, что может косвенно сказаться на здоровье людей.

Результатом осаждения взвешенных в воде различных примесей, химических осадков сбросов различных предприятий являются донные отложения водных объектов. Так же на их формирование влияет изменение окислительно-восстановительной обстановки, что может приводить к выпадению из воды труднорастворимых соединений (например, с тяжелыми металлами) [47, 94]. Аккумуляция металлов в донных отложениях ухудшает санитарное состояние водных объектов, делая воду непригодной для использования в быту [64].

Прирост донных отложений приводит к выходу воды из берегов, что ведет к подтоплению ближайших территорий. Данная ситуация особенно опасна при аккумуляции весомых концентраций металлов в донных отложениях. Такие донные отложения с техногенными наносами становятся вторичными источниками загрязнения водной толщи природных водоемов и водотоков.

Рекультивация земель, нарушенных горными, строительными и сельскохозяйственными работами приводит к образованию искусственных почв.

На рисунке 1.3. представлены основные типы воздействия техногенных массивов на окружающую среду. Влияние техногенных массивов на окружающую среду может быть непосредственным (прямым) и косвенным,

являющимся следствием первого. Как правило, косвенное воздействие значительно превышает размеры зоны прямого воздействия [12, 40, 50].



Рисунок 1.3 - Основные типы воздействия техногенных массивов на окружающую среду

## **1.2 Техногенные массивы горнодобывающих и горно-перерабатывающих производств**

Отходы горнодобывающих и горно-перерабатывающих производств бывают как твердыми (например, вскрышная порода), так и жидкими (например, пульпа от обогащения руд) [29].

В качестве особенностей отходов предприятий, занимающихся горной деятельностью, относят:

- Преобладание в составе отходов природных минеральных компонентов, которые, в свою очередь, часто являются токсичными для природного фона. К таким компонентам можно отнести различные сульфиды металлов (пирит, халькопирит), соединения мышьяка, ртути и др. В процессе переработки и обогащения руда подвергается обработке различными реагентами (щелочи, фенолы, цианиды и др.), которые так же являются токсичными веществами.

- Большие объемы отходов. Для их размещения требуются значительные площади в максимально возможной близости от места добычи и переработки полезного ископаемого.
- Возможность использования отходов для заполнения выработанного пространства в местах добычи полезного ископаемого (в подземных и открытых горных выработках), в качестве строительных материалов, а также для доизвлечения ценных компонентов.

Главными факторами, от которых зависят состав и строение техногенных массивов, являются условия образования (добыча, обогащение, переработка, сжигание и т.п.), исходный состав сырья (месторождения цветных металлов, железорудные месторождения, полиметаллические месторождения и т.д.), механические и физико-химические процессы воздействия на техногенные массивы (окисление, выветривание и т.д.).

К примеру, при подземном способе добычи угля образуется от 0,2 до 3,5 м<sup>3</sup> вмещающих пород, при открытом способе – от 2,9 до 4,5 м<sup>3</sup> вскрышных пород [28]. В черной металлургии на одну тонну чугуна приходится порядка 1,2 тонн отходов обогащения и 1 тонны золы [4]. В цветной металлургии на одну тонну металлов приходится от 100 до 1000 тонн отходов, что значительно превосходит железорудную и угольную промышленности. При этом объем пустой породы при добыче достигает 80 %, а отходы обогащения составляют до 10 % добытой горной массы [4].

Производство цветных металлов из сульфидных руд характеризуется образованием значительных количеств газообразных, жидких и твердых минеральных отходов, в частности газовые выбросы диоксида серы (SO<sub>2</sub>), сточные и дренажные воды, содержащие соединения тяжелых металлов и реагентов обогащения, техногенные отложения отвалов и хвостохранилищ, содержащие сульфидные минералы. Соединения серы являются одними из главных веществ, негативно воздействующих на окружающую среду [23]. В виде SO<sub>2</sub> в атмосферу поступает более 95 % серы, остальное количество – в виде сульфатов, сероводорода и других соединений. Тяжелые металлы, такие как медь

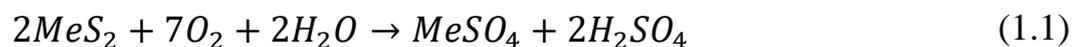
(Cu), никель (Ni), кобальт (Co) и мышьяк (As), присутствуют в воздухе в виде пыли и аэрозолей. Более крупные частицы металлов осаждаются на растения, почву и воду, где сохраняют свои токсичные свойства [11, 25, 55].

Наибольшее негативное воздействие техногенные массивы сульфидных месторождений оказывают на природные водные ресурсы. Чаще всего хранение отходов горной промышленности осуществляется на открытом пространстве без использования специальных изолирующих экранов, вследствие чего может происходить разгрузка подстилающих намывные техногенные массивы грунтовых вод в поверхностные водоемы и водотоки, приводя к их загрязнению.

Приемником дренажных вод часто становятся малые природные водотоки, которые определяют гидрологическую и гидрохимическую специфику средних и крупных рек страны. Помимо трансформации состава речных вод, в донных отложениях малых водотоков происходит формирование техногенных наносов, содержащих водорастворимые и подвижные формы металлов.

В зоне влияния техногенных массивов состав воды трансформируется в результате фильтрации стоков из накопителей сточной воды, отстойников, хвосто- и шламохранилищ; фильтрации атмосферных осадков через загрязненные грунты; вымывания и выщелачивания компонентов из хранилищ отходов, пород, почв; непосредственной закачки стоков.

Сульфиды, составляющие отходы добычи и переработки руд цветных металлов, подвержены окислению и растворению, что приводит к образованию сульфатных вод высокой кислотности, содержащих значительное количество железа, цинка, меди, марганца и других химических элементов (Cd, Al, Pb и др.). Техногенные воды, формирующиеся в зоне воздействия отходов добычи и переработки сульфидных руд по значениям минерализации, pH, содержаниям макро- и микрокомпонентов резко отличаются от фоновых природных вод [38]. Общая схема формирования кислых дренажных вод вследствие окисления и гидролиза сульфидных минералов проиллюстрирована в формуле 1.1.



Воздействие кислых дренажных вод на отложения, заскладированные в техногенных массивах приводит к интенсификации процессов растворения и выщелачивания минералов, в результате чего в растворённое состояние попадают загрязнители, в том числе, тяжёлые металлы. Вследствие данного процесса загрязняющие компоненты мигрируют в подземные воды, что приводит к их широкому рассеиванию с последующим концентрированием в различных объектах окружающей среды. В результате рассеивания загрязнителей происходит формирование техногенных гидрогеохимических ореолов, площадью от сотен квадратных метров до нескольких квадратных километров.

Развитие техногенных гидрогеохимических ореолов значительно расширяет области воздействия предприятий по добыче и переработке минерального сырья на окружающую среду, а высокая миграционная способность ряда загрязнителей сказывается на ухудшении общей экологической обстановки.

#### **Зона окисления сульфидных техногенных массивов**

Сульфидные минералы, стабильные в восстановительной бескислородной обстановке, перемещённые при добыче руд на поверхность земли становятся неустойчивыми при контактах с растворами, содержащими свободный кислород, и переходят в кислородные соединения – оксиды, гидроксиды, сульфаты, карбонаты и т.п. [61].

В исследованиях Dold, В. и др., 2001 году отмечено, что на ход процесса окисления оказывают влияние характер рудной массы, ее минеральный состав и структурно-текстурные особенности, процесс обогащения, общий характер вмещающих пород, климат, рельеф, тектоника, отсутствие антропогенных изменений (дополнительное поступление воды или хвостов) после прекращения работ, а также знание того, что на каждом участке все хвосты были получены только из одной шахты или рудника [90].

В 1904 году Finch, J. W. описал три зоны области циркуляции приповерхностных вод [91]. Схематичный пример окисления сульфидных техногенных отложений представлен на рисунке 1.4.

Зона просачивания или зона аэрации – верхняя зона, расположенная между поверхностью и уровнем грунтовых вод. Здесь происходит окисление минеральных веществ, слагающих техногенный массив, за счет высокого содержания в воде кислорода и углекислоты. Воды в этой зоне быстрые и циркулирующие, чаще проходящие вертикально к уровню грунтовых вод. Воздух и вода заполняют поры, трещины и полости в породах, создавая водяно-воздушный режим. [61, 91, 92].

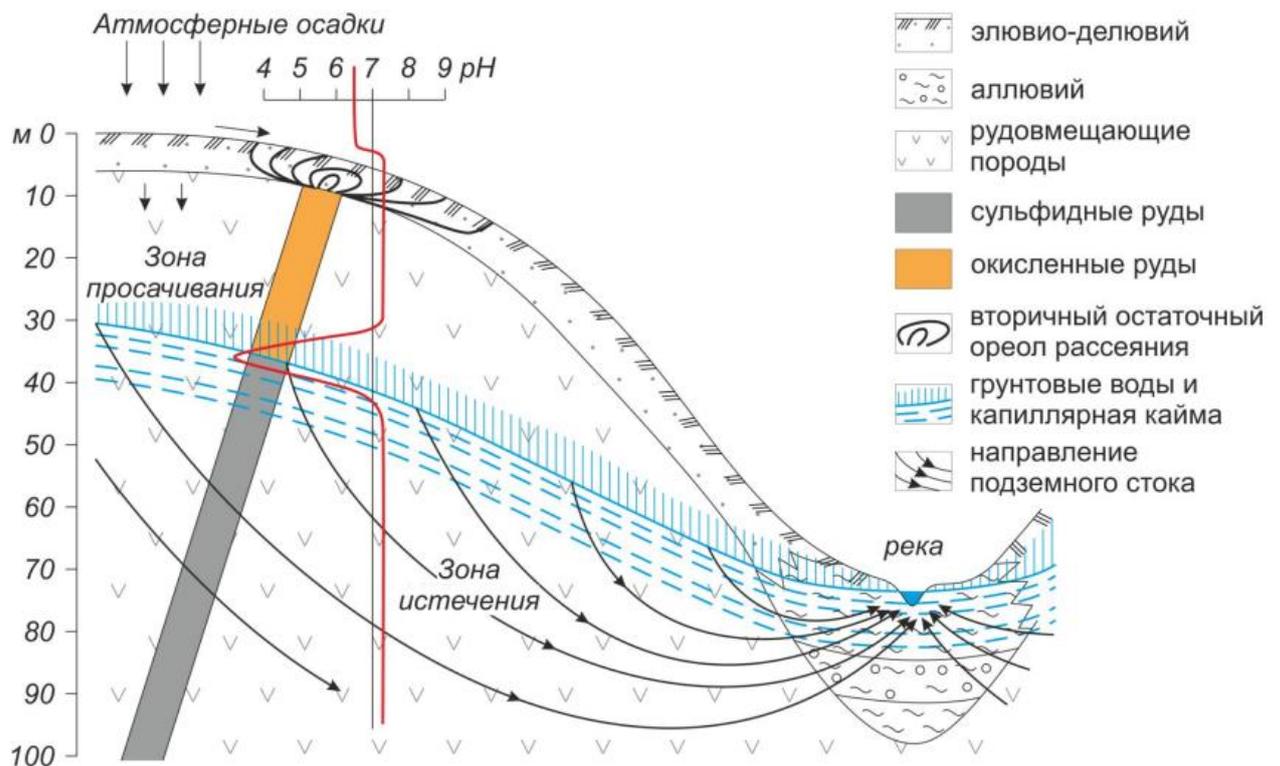


Рисунок 1.4 – Схема циркуляции приповерхностных вод в пористых породах

В данной зоне находится наиболее окисленная и измененная часть залежи, то есть собственно зона окисления. Преобладающими минералами являются сульфидные, но также могут находиться и окисленные формы. В зоне окисления происходит полное удаление серы и рассеяние некоторых других составляющих техногенные отложения веществ. Скопление вторичных гипергенных сульфидов называют зоной вторичного сульфидного обогащения. Она обусловлена переотложением некоторых металлов, например, Cu, Fe, Ag, выщелоченных из зоны окисления.

Ниже находится зона истечения, верхней границей которой являются грунтовые воды, а нижней - пункты истечения грунтовых вод или пункты пересечения уровня грунтовых вод с поверхностью. В данной зоне вода обеднена растворенным кислородом и характеризуется слабым движением, направленным, в основном, близкое к горизонтальному, к пунктам истечения. В отличие от предыдущей, в данной зоне полости в породах чаще заполнены водой и содержат небольшое количество кислорода [61, 91, 92].

Зоной застойных вод является самая нижняя зона техногенных отложений, в которой не содержится кислорода и отсутствует перемещение воды [61, 91, 92].

Границы зон не являются постоянными. Их изменения могут происходить под влиянием колебаний грунтовых вод из-за смен сухих и влажных времен года, при наложении молодых зон окисления старые.

Так, к примеру, окисление пирита при воздействии кислорода и воды (зона истечения) приводит к образованию сульфату железа и оксиду железа, которые, ввиду своей неустойчивости в нейтральных и слабокислых растворах, переходят в гидроксид железа с образованием серной кислоты и лимонита (зона окисления).

Среди всей этой совокупности процессов наиболее принципиально важными являются представленные на рисунке 1.5 [61]. Данные процессы сменяются последовательно.

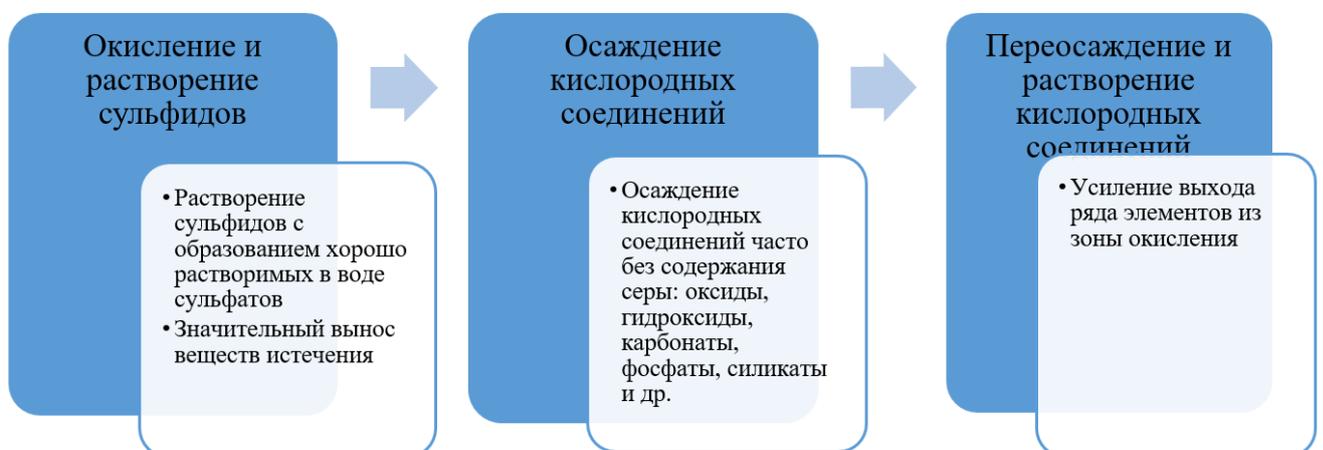


Рисунок 1.5 – Схема процессов, происходящих в зоне окисления

Согласно справочным данным, наибольшей растворимостью среди основных компонентов зоны окисления сульфидного техногенного массива обладают сульфаты металлов [61]. Окисление сульфидов металлов до сульфатов может происходить как в естественных условиях, так и при технологической переработке.

В результате миграции загрязняющих веществ, в том числе металлов, по природным транспортным каналам в окружающей среде образуются техногенные геохимические ореолы (аномалии). К ним относят участки территории, где содержание химических элементов выше средней величины природной вариации содержаний этих элементов, то есть выше геохимического фона [10].

Сложные цепи миграции загрязняющих веществ с территории техногенных массивов, формируемые в связи с рассеянием в природных системах пылевых и газовых выбросов, сбросом и инфильтрацией сточных вод, неизбежно приводят к формированию техногенных геохимических ореолов и биогеохимическому концентрированию химических элементов в зоне воздействия предприятий по добыче и переработке полезных ископаемых [36]. Таким образом, экстремальные ситуации горнорудных районов распространяются на территории, площадью до десятков квадратных километров и оказывают значительное негативное воздействие на все компоненты окружающей среды.

### **1.3 Формирование техногенных массивов Сибайского горно-обогатительного комбината и их воздействие на компоненты природной среды**

В настоящее время Южный Урал является одним из самых крупных горнопромышленных регионов страны, где вследствие длительной разработки и обогащения (70-110 лет) более 20 месторождений сульфидных руд сформировались зоны экологического бедствия. Крупными горно-обогатительными комбинатами медно-цинковых руд данного региона являются Гайский, Сибайский, Учалинский, Бурибаевский. В работе Пешкова А.М. указано: «В результате отработки запасов и переработки руд медно-колчеданных месторождений Урала накоплено более 1,5 млрд. т. техногенного сырья,

содержащего значительные количества меди, цинка, железа, других цветных, драгоценных и редких металлов» [48]. Техногенные массивы представлены хвостохранилищами, отвалами вскрышных пород, высокоминерализованными промышленными стоками, металлургическими шламами. Большинство хранилищ отходов эксплуатируется с 60-х годов прошлого столетия [48, 72].

АО «Гайский горно-обогатительный комбинат» – одно из крупнейших в России горнодобывающих предприятий, являющееся основной рудной базой холдинга «Уральская горно-металлургическая компания» («УГМК»). Гайский ГОК достигает мощности обогатительной фабрики до 9,3 млн. т. в год руды [49]. В результате обогащения, предприятие накапливает 8,9 млн. т. отходов в год на территории хвостового хозяйства, которое состоит из хвостохранилища, прудов разбавления и пруда кислых вод [72, 49]. В отвалах и хвостохранилище предприятия содержится около 0,11 % и 0,38 % Cu, 0,08 % и 0,37 % Zn, 4,6 % и 21,0 % S, соответственно [8]. Содержание золота в хвостохранилище, ориентировочный запас которого около 47 млн. т, составляет порядка 0,7 г/т, серебра – до 4,0 г/т. Вода из хвостохранилища и прудов-отстойников дренажных и карьерных вод характеризуется повышенным содержанием меди, железа и сульфатов (до 460 мг/дм<sup>3</sup>, 21000 мг/дм<sup>3</sup>, 38000 мг/дм<sup>3</sup> соответственно) [49]. Территория, которая находится в зоне воздействия ГОКа, охватывает основную водную артерию р. Урала и её притоков. В русле р. Колпачки расположено Гайское Купоросное озеро с концентрацией меди до 500 г/л. Поверхностные воды характеризуются повышенным содержанием компонентов руд – меди, железа, цинка и др. Отмечается загрязнение грунтовых вод подотвальными стоками, что выражается в повышении их минерализации до 17,6 – 21,7 г/л за счёт хлоридов и сульфатов и pH=6,4 – 5,0. Также обнаружено загрязнение грунтовых вод тяжёлыми металлами (Cu, Zn) [2].

ОАО «Учалинский горно-обогатительный комбинат» также входит в холдинг «УГМК». Предприятие производит свыше 65 % цинкового концентрата республики Башкортостан, занимаясь как добычей, так и переработкой медно-колчеданных руд. Согласно Государственному докладу «О состоянии природных

ресурсов и окружающей среды республики Башкортостан в 2021 году» предприятие за 2021 год сбросило в поверхностные водные объекты 1,03 млн м<sup>3</sup> недостаточно очищенных сточных вод [21]. В среднем, отвалы хвостов Учалинского ГОКа содержат 0,22 % меди, 0,63 % цинка, 23,1 % серы, а также 0,6 и 8,5 г/т золота и серебра, соответственно. Общее количество низкодисперсного сырья составляет более 40 млн. т. Ориентировочные запасы отвалов предприятия составляют порядка 500 млн. т. Донные отложения и вода реки Буйда, бассейном которой является река Иртыш, в районе расположения технологического пруда предприятия характеризуется высоким содержанием меди, цинка, марганца, железа, алюминия, кадмия, свинца и сульфатов [27].

Сибайский филиал АО «Учалинский ГОК» (Сибайский ГОК) находится в Республике Башкортостан Российской Федерации. Предприятие является градообразующим, а экономическим центром является город Сибай. Сибайский ГОК осуществлял добычу медноколчеданной руды, содержащей драгоценные металлы, открытым (с 1939 г.) и подземным (с 2003 г.) способами. Главные рудообразующие минералы месторождения - пирит (65-90 % рудной массы), халькопирит и сфалерит, второстепенные - борнит, теннантит, халькозин, галенит, магнетит и гематит [71]. Из нерудных минералов широко распространены серицит и кварц, в меньших количествах присутствуют хлорит, карбонаты, полевые шпаты (альбит) и барит [27].

В настоящее время (с 2019 года) ведется консервация (затопление) Сибайского карьера для предотвращения его тления, в связи с этим добыча руды не осуществляется. В настоящее время предприятие занимается обогащением привозной руды, производством и сбытом медного, цинкового и пиритного концентратов.

Также до 2020 года УГМК занимался добычей известняка на Худолазском месторождении, производством и сбытом строительных материалов: щебня, песка, известняка и др. В настоящее время данное месторождение находится в ведении компании, занимающейся производством керамической плитки [66].

### **Состояние окружающей среды в районе расположения предприятия**

Положение рассматриваемой территории в центральной части Евразии определяет континентальный характер климата, выражающийся в больших колебаниях температуры воздуха как внутри года, так и в течение суток со средней годовой амплитудой температуры воздуха (разность средних месячных температур самого теплого и холодного месяцев в году) 33,4 °С.

Климат территории характеризуется сравнительно жарким сухим летом и холодной относительно малоснежной зимой.

Среднегодовое количество осадков (норма) в районе составляет ~445 мм. Снежный покров появляется в среднем в первой декаде октября, устойчивый снежный покров образуется во второй декаде ноября. Снежный покров сходит во второй половине апреля. Число дней со снежным покровом в среднем составляет 145. Средняя высота снежного покрова за зиму составляет 37 см.

### **Гидрографическая сеть района расположения Сибайского ГОКа**

По территории г. Сибая и его окрестностям протекает три реки — Худолаз, Карагайлы и Камышлы-Узяк.

Река Худолаз (Туяляс) протекает с юго-запада на северо-восток, берет свое начало с восточных отрогов хребта Ирэндык и впадает в р. Урал, крупную водную артерию нашей страны. Длина реки составляет 81 км, площадь бассейна 1060 км<sup>2</sup>. Среднегодовой расход воды составляет 3,9 м<sup>3</sup>/с. Река Худолаз — типично горная река — ее течение быстрое, дно каменистое, русло извилистое, с большими уклонами. Бассейн реки расположен на равнине (плоскогорье), которая простирается от села Кизильское между Уральскими горами и долиной реки Урал.

Качество воды и донных отложений р. Худолаз формируется под влиянием предприятий, в том числе горнодобывающей и горно-перерабатывающей промышленности, г. Сибай. Загрязняющие вещества, такие как ионы тяжелых металлов, взвешенные вещества, сульфаты, хлориды и др., поступают в реку по руслу р. Карагайлы — притоку р. Худолаз.

Река Карагайлы течет в восточном направлении от своего начала на хребте Ирэндык. В верховьях река имеет характер горного ручья, а ниже, при выходе на пологохолмистую равнину, расширяется и становится местами заболоченной. Общая длина реки составляет 28 км со средней густотой 0,33 км/км<sup>2</sup> и средним коэффициентом извилистости 1,10. Средний уклон реки равняется 16,1 ‰, площадь водосбора занимает 144 км<sup>2</sup>. Река Карагайлы относится к малым рекам. Естественное русло реки было изменено в 1957 году, в связи с углублением Сибайского карьера, и переброшено в р. Камышлы-Узяк.

На водосборе р. Карагайлы находятся различные объекты промышленных производств и коммунально-складских предприятий. На состояние реки оказывают влияние отвалы пустой породы, отработанное и действующее хвостохранилища, выходы сточных вод различных предприятий, стоки с селитебных территорий, стоки с Известнякового карьера, очистные сооружения города, недействующие полигоны ТКО, кладбища и т.д. Русло р. Карагайлы имеет ширину 2-10 м, глубину 15-40 см, скорость течения 0,1-0,8 м/с. При этом после дноуглубления реки в черте города минимальная глубина русла составляет 0,5 м, ширина по дну – 4 м. В периоды высокой водности уровень воды может подниматься на 1,0-1,5 м выше уровня межи. Берега русла заросли густой травяной растительностью.

Естественный водный режим реки характеризуется крайней неравномерностью стока. Более 70-80 % стока воды проходит по реке в весенний период времени, причем весеннее половодье имеет продолжительность около месяца. В остальное время года сток воды очень невелик, особенно в зимний период. В летний период могут наблюдаться дождевые паводки, которые по своим параметрам существенно уступают характеристикам весеннего половодья.

Согласно данным по контролю качества воды р. Карагайлы, проводимому 1 раз в квартал в течение года, содержание меди превышало нормативные значения в 18-45 раз, железа общего – в 2,1-5,5 раз, марганца – в 9-35 раз. Также превышения отмечены по сульфатам (2,8-6,2 раза), фосфатам (11,5-26,5 раза), аммоний (1-13,8 раз), нитратам (2,5 раза) и нитритам (1,25-7,5 раза) относительно

ПДК. В воде р. Худолаз после впадения р. Карагайлы практически по всем определяемым показателям выявлено увеличение концентрации загрязняющих примесей. С превышениями нормативных концентраций обнаруживались ионы аммония (однократно), нитриты (после впадения р. Карагайлы – весной и осенью), сульфаты, фосфаты, медь, железо общее, марганец. Концентрация меди в обоих створах менялась в диапазоне от 4 до 20 ПДК. Содержание марганца в створе реки выше впадения р. Карагайлы составило 7-12 ПДК, ниже впадения – 9-17 ПДК, железа общего – от 2,3-4,3 ПДК в обоих створах. В донных отложениях в створе, расположенном ниже устья р. Карагайлы, по сравнению со створом выше устья отмечается увеличение концентрации железа – в 3,2 раза летом и 4,7 раза осенью, цинка – в 55 и 56 раз, меди – в 86 и 55 раз, сульфатов в 1,3 и 4,5 раза кадмия – более чем в 1100 раз, ртути – в 2,4 раза.

Таким образом, в илах рек накапливаются тяжелые металлы, в особенности кадмий, медь, цинк и железо, уровень концентрации которых возрастает из года в год [8].

В 10 км к югу от г. Сибая и Сибайского горнорудного комплекса расположено озеро Култубан, диаметром около 3 км и глубиной 4-5 м. Площадь водосбора озера около 61 км<sup>2</sup>. Степное озеро не имеет стоков, а питание происходит за счет атмосферных осадков. В засушливые годы озеро усыхает, отступая от своих берегов на 10-15 м. На южном побережье озера и в районе ручья Юмаш происходит подток подземных вод.

Фоновое загрязнение реки Карагайлы в створе 500 м выше объектов Сибайского ГОК приведено в таблице 1.1 [21].

Таблица 1.1 - Качество природных вод в фоновом створе р. Карагайлы

Показатели состава	Фоновые концентрации, мг/дм <sup>3</sup>	ПДК рыбохозяйственного использования 1 категории, мг/дм <sup>3</sup>
Взвешенные вещества	15,9	+0,25 к фону
Сухой остаток	544	1000
БПК <sub>полн</sub>	2,09	3,0

*Продолжение таблицы 1.1.*

Фосфаты	0,00	0,2 (по Р)
Хлориды	8,61	300
Сульфаты	178	100
Цинк	0,027	0,01
Никель	0,002	0,01
Железо общее	0,06	0,1
Марганец	0,022	0,01
Медь	0,005	0,001
Кадмий	0,001	0,005
Нефтепродукты	0	0,05
ХПК	16,7	-

**Гидрогеологические условия района расположения Сибайского ГОКа**

Подземные воды района размещаются в рыхлых мезо-кайнозойских отложениях и в зонах региональной трещиноватости палеозойских пород. Разгрузка подземных вод в естественных условиях происходит в местную овражно-речную систему многочисленными родниками, расположенными на трех-четырёх уровнях горной части района. Например, группа Давлетовских родников, являющихся источником питьевого водоснабжения г. Сибай. В нарушенных условиях подземные воды дренируются существующими водозаборами для хозяйственно-питьевого водоснабжения, а также системой дренажа при производстве горных работ.

По условиям залегания и в соответствии с действующей стратификацией в рассматриваемом районе выделяются:

- четвертичный водоносный комплекс, представленный делювиальными и аллювиальными суглинками и глиной с дресвой, щебнем, галькой, гравием;
- триасовый водоносный комплекс, представленный песчано-глинистой и глинисто-щебнистой каолинизированной корой выветривания палеозойских пород;

– среднедевонская водоносная зона в породах карамалыташской свиты, сложенной базальтовыми порфиритами, их туфами и туфобрекчиями, дацитовыми порфиритами, туфами дацитового и дацито-базальтового состава;

– нижнекаменноугольная-среднедевонская водоносная зона в осадочных породах зилаирской и вулканогенно-осадочных улутауской свит, представленных кремнистыми сланцами и яшмами мукасовского и бугулыгырского горизонтов.

Для проводимых исследований наибольший интерес представляет водоносный комплекс четвертичных отложений, который приурочен к аллювиальным, делювиальным, элювиально-делювиальным, элювиальным образованиям.

Аллювиальные отложения развиты в долинах рек Худолаз, Карагайлы, Камышлы-Узяк. Водовмещающие породы представлены песчано-гравийным и песчано-галечным материалом с глинистым и суглинистым заполнителем. Верхняя часть разреза аллювия сложена более плотными слабопроницаемыми суглинками и глинами мощностью 1-8 м. Мощность водоносного горизонта изменяется от 1-2 до 16 м. Подстилают аллювий элювиальные глины, реже коренные палеозойские породы. Глубина залегания грунтовых вод аллювиальных отложений регулируется урезом рек. Водоносный горизонт обладает слабым местным напором на отдельных участках, но преимущественно является безнапорным. Общее направление потока четвертичного водоносного комплекса на восток, от предгорий к долине реки Худолаз. В районе Сибайского, Камаганского рудников поток грунтовых вод осложняется дренирующим влиянием горных выработок, барражированием построек г. Сибай. На границе с городскими постройками происходит подтопление и засоление территорий. Дополнительно комплекс подпитывается дренажными водами, сбрасываемыми в отводную канаву.

Водообильность аллювиальных отложений крайне неравномерна и зависит от гранулометрического состава отложений, их мощности. В паводок в питание аллювиального горизонта участвуют поверхностные воды. По химическому составу воды аллювия преимущественно пресные, гидрокарбонатные кальциевые

и магниевые-кальциевые с минерализацией 0,0003-0,0005 г/м<sup>3</sup>; реже (в восточной части района) – сульфатно-гидрокарбонатные кальциевые-магниевые-натриевые с минерализацией до 0,0011 г/м<sup>3</sup>.

Элювиальные и элювиально-делювиальные дресвяно-щебнистые образования с супесчаным и суглинистым заполнителем, песчаные суглинки и глины с дресвой и щебнем развиты на небольших разобщенных, уплощенных водораздельных поверхностях и пологонаклонных верхних частях склонов. Делювиальные отложения широко развиты на пологовсхолмленной равнине в центре и на востоке исследуемого района. Подземные воды имеют локальный характер и приурочены к линзам, прослоям песков, дресвяно-щебнистых отложений. Значительная расчлененность рельефа, особенно в предгорьях, способствует дренированию вод посредством родников. По химическому составу воды сульфатно-гидрокарбонатные натриево-кальциевые, хлоридно-гидрокарбонатные магниевые-кальциевые и натриево-магниевые с сухим остатком 0,00015-0,0006 г/м<sup>3</sup>.

По данным эксплуатации Сибайского медноколчеданного месторождения, четвертичный водоносный горизонт участвовал в обводнении карьера. Осушение карьера зумпфом и водопонижительными шахтами не позволяло эффективно дренировать четвертичные отложения, подстилаемые или имеющие в нижней части своего разреза слабопроницаемые породы, что осложняло горнотехнические условия эксплуатации карьера.

### **1.3.1 Формирование техногенных наносов в зоне воздействия насыпных техногенных массивов МСК**

На территории предприятия Сибайского филиала АО «Учалинский ГОК» располагаются насыпные техногенные массивы, представленные отвалами вскрышных (горных) пород Сибайского и Камаганского месторождений. В среднем, содержание полезных компонентов в отвалах обоих месторождений составляют цинк – 0,03 %, медь – 0,08 %. Формирование отвалов Сибайского месторождения началось еще в 1940 году и продолжалось до 2010 года.

Складирование вскрышной породы проходило без селекционного разделения. Длительное хранение привело к процессам эродирования.

В настоящее время в границах земельного отвода осталось лишь около 20 млн. м<sup>3</sup>, что составляет 10 % от общего объема образованных в результате эксплуатации Сибайского месторождения отходов. Объем вскрышной породы Камаганского месторождения составляет порядка 10 млн. м<sup>3</sup>. Общая площадь, занимаемая отвалами предприятия, покрывает около 150 га.

Влияние на атмосферный воздух отвалов вскрышных пород незначительно, так как предусмотрена отсыпка пустых пород глинистыми и скальными породами. Глинистые породы имеют высокую естественную влажность. Скальные породы устойчивы к выветриванию и являются мало пылящими, пылевыделение происходит от свеженасыпанной поверхности. Для снижения выбросов пыли проводится увлажнение пылящей поверхности.

В зоне влияния отвалов Сибайского карьера загрязнение почв приусадебных участков и пастбищных угодий жителей поселков не превышает санитарно-гигиенические нормативы.

Атмосферные осадки, просачивающиеся через насыпные массивы, обогащаются рудными элементами и приносят их в почвы и природные водные объекты. Автор Сомов В.В. в своей работе отмечает: «Объем подотвальных вод Сибайского месторождения оценивается в 650 тыс. куб. м/год. Воды характеризуются высокой минерализацией, низким значением рН и содержат в себе ионы тяжелых металлов» [63].

До 2011 года на предприятии был предусмотрен один выпуск сточных вод Камаганского карьера и Сибайского месторождения.

Сточные воды карьера Камаган формируются карьерным водоотливом. Водоприток в карьер формируется атмосферными осадками и притоком подземных вод. Подотвальные воды, образующиеся в границах депрессионной воронки, частично инфильтруясь, поступают в систему карьерного водоотлива. Карьерные воды собираются в зумпфе на дне карьера, затем частично осветленная вода откачивается насосами из зумпфа по трубам на поверхность в отстойник-

накопитель, располагающийся на южном борту карьера. Из отстойника-накопителя воды поступают в приемную камеру насосной станции, из которой отводятся по сбросному коллектору в общую систему водоотведения Сибайского карьера.

Изначально водоотлив Сибайского месторождения формировался за счет карьерных и дренажных вод подземного рудника. В процессе длительной эксплуатации Сибайского месторождения, в частности функционирования водоотлива рудника, сопровождающегося понижением уровня подземных вод, сформировалась общая зона депрессии подземных вод. Карьерные воды формировались за счет атмосферных осадков и незначительного стока подотвальных вод по бортам карьера. Образующиеся карьерные воды фильтровались по техногенным трещинам горных пород дна карьера и вовлекались в шахтный водоотлив. При образовании депрессионной воронки изменилась и структура потока подземных вод, поэтому частично подотвальные воды попадали в систему шахтного водоотлива. Расположение отвала в границах депрессионной воронки обеспечивал сбор фильтрующихся поверхностных (в том числе подотвальных) и карьерных вод в систему шахтного водоотлива.

Таким образом, до 2011 года сточные воды с Камаганского карьера и Сибайского рудника, смешиваясь с подземными водами, поступали в р. Карагайлы, изменяя характеристики ее вод. В 2011 году было завершено строительство очистных сооружений, основным назначением которых являлся сбор и очистка шахтных, подотвальных сточных вод (образующихся в период дождя и таяния снегов) и подземных источников, выходящих на поверхность на территории отвалов Сибайского ГОК, с последующим выпуском в водоем рыбохозяйственного назначения.

В основу метода очистки стоков положен метод химического осаждения тяжелых металлов в виде малорастворимых гидроксидов по химической схеме (формула 1.2).



где  $Me^{n+}$  - ион тяжелого металла.

Очистка от тяжелых металлов происходила при рН-среде, равном 7. Для создания в среде рН 7 исходная вода смешивалась с известковым молоком. При этом происходило образование практически нерастворимых гидроксидов тяжелых металлов. Для лучшего осаждения образовавшихся гидроксидов сточные воды дополнительно обрабатывались флокулянтами.

После очистки вода подвергалась обеззараживанию с применением гипохлорита натрия для последующего выпуска в р. Карагайлы.

В таблице 1.2 приведены данные по концентрациям веществ в загрязненных и очищенных сточных водах. Количество подотвальных и шахтных сточных вод, поступавших на очистку – 3,504 млн. куб. м/год. Производительность установки – 9,6 тыс. куб. м/сут или 400 куб. м./ч. Режим работы установки – непрерывный. Известь, используемая для нейтрализации сточных вод, соответствовала ГОСТ 9179-77. Обезвоженный осадок (кек) направлялся на заводы цветной металлургии для извлечения чистых металлов, либо использовался для заполнения штрековых шахтных выработок.

Таблица 1.2 – Концентрации веществ в загрязненных и очищенных сточных водах

Наименование контролируемого показателя	Концентрация загрязняющих веществ в поступающей сточной воде, мг/дм <sup>3</sup>	Концентрация загрязняющих веществ в сточных водах на выпуске в водоем, мг/дм <sup>3</sup>	ПДК вод, мг/дм <sup>3</sup> для водоемов рыбохозяйственного водопользования
рН среды	6,3	9,5	Фоновое значение
Взвешенные вещества	614,5	0,180	Сф+0,25
Нефтепродукты	0,034	0,0012	0,05
Цинк	19,52	0,01	0,01
Железо общее	0,083	0,03	0,1
Медь	0,028	0,001	0,001
Никель	0,015	0,01	0,01
Кадмий	0,034	0,005	0,005
Марганец	5,4	0,01	0,01
Кальций	13,4	13,4	180

*Продолжение таблицы 1.2.*

Свинец	0,006	0,006	0,006
Кобальт	0,18	0,01	0,01
Фосфаты (по Р)	0,005	0,005	0,2
Сульфаты	1852,12	1852,12	100
Хлориды	127,62	127,62	300
Сухой остаток*	3096,0	2496,0	1000
Азот нитратов	15,12	3,414	9,1
*так как сухой остаток представляет собой массу взвешенных, растворенных веществ и нефтепродуктов, полученных путем выпаривания воды из образца и высушивания остатка, то в результате очистки сточных вод от взвешенных веществ и нефтепродуктов величину сухого остатка будут составлять в основном сульфаты, очистка стока от которых данным проектом не предусматривался.			

Исследования воды р. Карагайлы, в которую производился сброс очищенных сточных вод, проводились такими авторами, как Опекунов, Опекунова, Митрофанов, Сомов, Кукушкин, Бактыбаева, Сулейманов, Валеев, Рахматуллин, Ямалов, Кулагин и другими, с 2004 года. Авторами отмечается, что до 2011 года аномально высокие концентрации металлов в р. Карагайлы сохранялись на всем ее протяжении до впадения в р. Худолаз.

После 2011 года предприятие начало сброс воды с очистных сооружений в р. Карагайлы в около 2,5 км ниже истока реки, вследствие чего изменился характер миграции металлов. Сброс очищенной воды в р. Карагайлы привело к значительному росту кислотно-щелочного показателя речной воды и вызвало образование в месте сброса комплексного щелочного и сорбционно-гидроксидного барьера, на котором происходит осаждение металлов [75, 93]. Это вызвало заметное уменьшение концентраций металлов и минерализации речных вод, а также снижение выноса загрязнителей в р. Худолаз [6, 37, 76].

Сформировавшийся геохимический барьер, по мнению авторов, решает проблему очистки реки, но, тем не менее, он приводит к образованию техногенной геохимической аномалии в донных отложениях реки.

Геохимический барьер имеет стадию насыщения, после которой он теряет свою эффективность, в связи с чем концентрации загрязнителей до и после

барьера выравниваются [75]. Осаждение и накопление металлов на геохимическом барьере ведет к образованию техногенных наносов в русле реки и заболачиванию прибрежных участков реки [76]. При этом в заболоченной береговой зоне загрязняющие вещества напрямую проникают в почвы, что влечет за собой гибель фитоценоза и биоценоза почв [77, 75].

Русло р. Карагайлы было расчищено в 2014-2015 годах. Согласно статье информационного агентства «Башинформ»: «По проекту ширина русла по дну реки должна составлять не менее четырех метров, расстояние между верхними кромками берегов - не менее 12 метров. Заявленная глубина реки в черте города – 0,5 метров. Извлеченный из реки грунт складировается на берегу, по мере высыхания его отправляют на полигон твердых бытовых отходов» [59].

В настоящее время работа очистных сооружений приостановлена (с 2019 года), в связи с закачкой подотвальных вод в карьер для предотвращения его тления. Это привело к тому, что с началом подтопления карьера, р. Карагайлы, которая уже около четырех лет была охристой окраски, восстановилась до прозрачного цвета. На рисунках 1.6 и 1.7 представлены фотографии р. Карагайлы в 2017 и 2021 годах соответственно.

Согласно данным инвестиционных проектов г. Сибая за 2019-2020 год, городом вновь планируется рассмотреть проект «Реконструкции сооружений по очистке шахтных и подотвальных вод Сибайского и Камаганского месторождений».



Рисунок 1.6 - Состояние реки Карагайлы на 2017-2018 года



Рисунок 1.7 - Состояние реки Карагайлы на 2021-2022 года

### **1.3.2 Формирование техногенных наносов в зоне воздействия намывных техногенных массивов МСК**

Добытая и привозная руда перерабатывается на Сибайской обогатительной фабрике (СОФ). Ее проектная производительность составляет 2200 тысяч тонн руды в год. СОФ включает в себя Дробильное отделение двух очередей, измельчительно-флотационное отделение, реагентное отделение, фильтровально-сушильное отделение, а также действующее хвостохранилище. Схема переработки руд на СОФ представлена на рисунке 1.8.

Руда поступает в дробильное отделение, состоящее из двух очередей. На дробление 1 очереди поступает руда крупностью 0-800 мм и влажностью не менее 2 %, на дробление второй очереди – крупностью, не более 1200 мм, влажностью менее 2 %. После дробления в одной из двух очередей до крупности 45-60 мм, руда поступает на общую стадию дробления до 5-7 мм.

Далее по схеме, представленной на рисунке 1.9, происходит измельчение и классификация руды.

Обогащение руды на СОФ происходит по следующей схеме.

Медно-цинковые колчеданные руды перерабатываются по схеме прямой селективной флотации с получением медного, цинкового концентрата и пиритсодержащих хвостов. Повышение качества цинкового концентрата

производится на операции обезмеживания и обезжелезнения некондиционных цинковых концентратов.

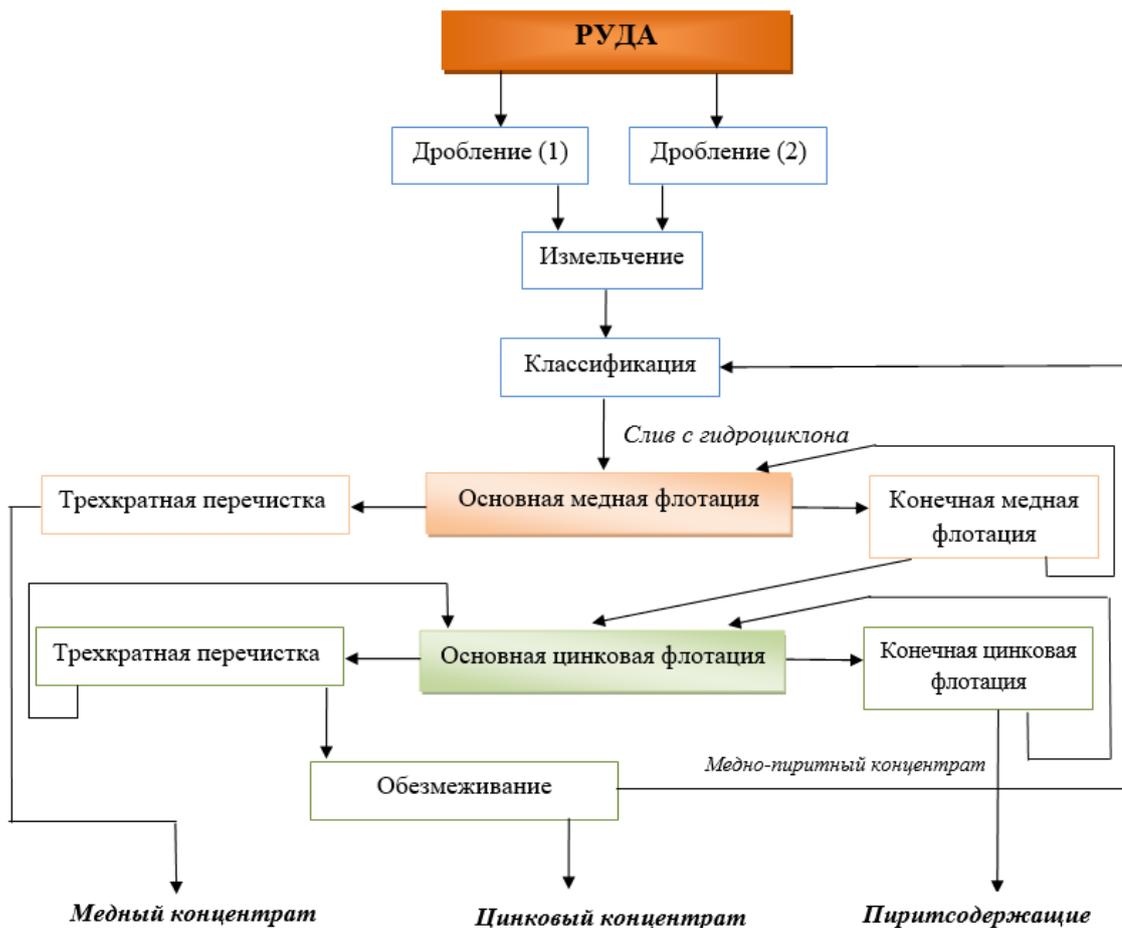


Рисунок 1.8 – Общая схема переработки руд на СОФ

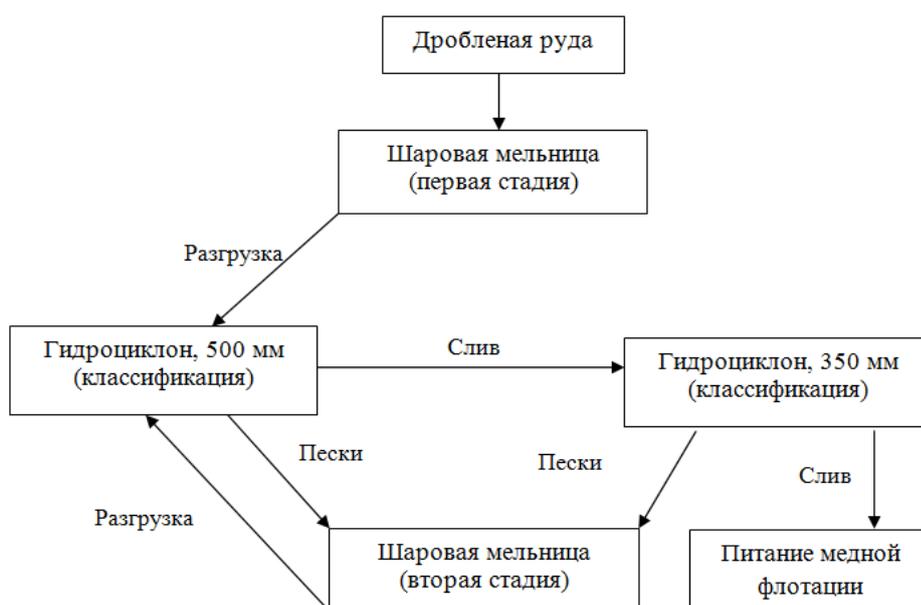


Рисунок 1.9 - Схема измельчения руд на СОФ

Измельченная руда в виде слива гидроциклонов подается на основную медную флотацию, пенный продукт (грубый медный концентрат) направляется на 3-х кратную медную перечистку, хвосты основной медной флотации на контрольную медную флотацию, пенный продукт контрольной медной флотации подается на классификацию в гидроциклонах III стадии измельчения.

Хвосты контрольной медной флотации направляются на основную цинковую флотацию, пенный продукт (грубый цинковый концентрат) направляется на 3-х кратную цинковую перечистку, хвосты основной цинковой флотации - на контрольную цинковую флотацию. Пенный продукт контрольной цинковой флотации идет на основную цинковую флотацию, а хвосты являются готовым пиритным концентратом.

Пенный продукт третьей цинковой перечистки (некондиционный цинковый концентрат) 1 и 2 секций направляется в контактные чаны для обработки сульфогидратом натрия (сернистым натрием). Разгрузка контактных чанов насосами перекачивается в сгуститель для отмывки от известковой щелочности технической водой. Разгрузка сгустителя поступает в следующий сгуститель для дальнейшей обработки сульфогидратом натрия. Разгрузка сгустителя перекачивается в другой сгуститель для отмывки технической водой избытка сульфидных и сульфоксидных ионов. Сливы сгустителей направляются на хвостохранилище.

Сгущенный продукт из сгустителя песковым насосом подается в дозатор и далее в контактный чан для снижения щелочности железным купоросом, а избыток из дозатора направляется обратно в сгуститель.

В разгрузку контактного чана подается цинковый купорос и сода для депрессии сфалерита.

Обработанный реагентами материал направляется на медно-пиритную флотацию 1 нитки, которая состоит из основной флотации и одной перечисточной операции, оборудованных пневмомеханическими машинами.

Пенный продукт перечистки направляется на повторное обезмеживание на II нитке с получением медно-пиритного продукта.

Медно-пиритный продукт сгущается в сгустителе и подается в мельницы третьих стадий работающих секций.

Камерные продукты I и II ниток объединяются и являются готовым цинковым концентратом.

Вторая нитка так же состоит из основной и перечистой медно-пиритной флотации и оборудована флотомашинами.

Обезвоживание медного и цинкового концентратов происходит путем их сгущения в сгустителях. После этого концентраты поступают в пульподелители, а слив – в хвостохранилище. После отделения концентрата от слива сушка концентратов происходит осуществляется в сушильных барабанах, оснащенных вакуум-фильтрами. Сухие концентраты направляются в закрытый склад, затем грейферным краном цинковый концентрат погружается в контейнеры, а медный концентрат – в железнодорожные вагоны навалом. Хвосты обогащения транспортируются самотеком до насосной станции, затем насосами до хвостохранилища.

Состав хвостов обогащения представлен в таблице 1.3. Ежегодно образуется порядка 625 тыс. м<sup>3</sup> хвостов.

Таблица 1.3 – Состав отходов обогащения

Наименование компонента	Содержание от общего, %
Диоксид кремния	36,20
Оксид железа	18,78
Оксид алюминия	12,59
Сера	11,30
Оксид кальция	3,06
Оксид магния	2,52
Оксид цинка	0,61
Оксид меди	0,31
Оксид марганца	0,10
Оксид кадмия (в пересчете на кадмий)	0,004

*Продолжение таблицы 1.2.*

Свинец	0,02
Кобальт	0,01
Вода	14,40

Для размещения отходов обогащения в настоящий момент используется один из трех отсеков действующего хвостохранилища СОФ. Места размещения шламов и хвостов обогащения расположены примерно в 100-150 метрах от правого берега р. Карагайлы, в то время как водоохранная зона реки также составляет 100 м. На рисунке 1.10 представлен вид сверху на действующее хвостохранилище.

На другом берегу реки расположены: обогатительная фабрика, неэксплуатируемое хвостохранилище, городские очистные сооружения хозяйственно-бытовых стоков. На рисунке 1.11 представлен вид с северной дамбы Отсека 3 на русло р. Карагайлы, старое хвостохранилище и обогатительную фабрику.



Рисунок 1.10 - Действующее хвостохранилище СОФ



Рисунок 1.11 – Вид с северной дамбы хвостохранилища на русло р. Карагайлы

Хвостохранилище косогорно-наливного типа состоит из трех отсеков общей площадью 1 843 100 м<sup>2</sup>. Площадь земельного участка Отсека 1 составляет 520600 м<sup>2</sup>, Отсека 2 – 732000 м<sup>2</sup>, Отсека 3 – 590500 м<sup>2</sup>. Отсек 1 хвостохранилища находился в эксплуатации с 1966 по 2001 год, его реконструкция проводилась с 2016 по 2019 год, 2 и 3 Отсеки хвостохранилища эксплуатировались с 2001 по 2019 года.

К 2020 году Отсеки 2 и 3 заполнены полностью, ведется эксплуатация реконструированного Отсека 1. В Отсеках 1 и 2 размещено 15 252,085 тыс. м<sup>3</sup> (36 605,005 тыс. т) хвостов. Полезный объем Отсека 3 – 9 388 тыс. м<sup>3</sup> (заполнен), общая вместимость хвостохранилища 27 230 тыс. м<sup>3</sup>.

В настоящее время производится строительство нового Отсека 4 хвостохранилища западнее Отсека 1, план расположения которого представлен на рисунке 1.12.

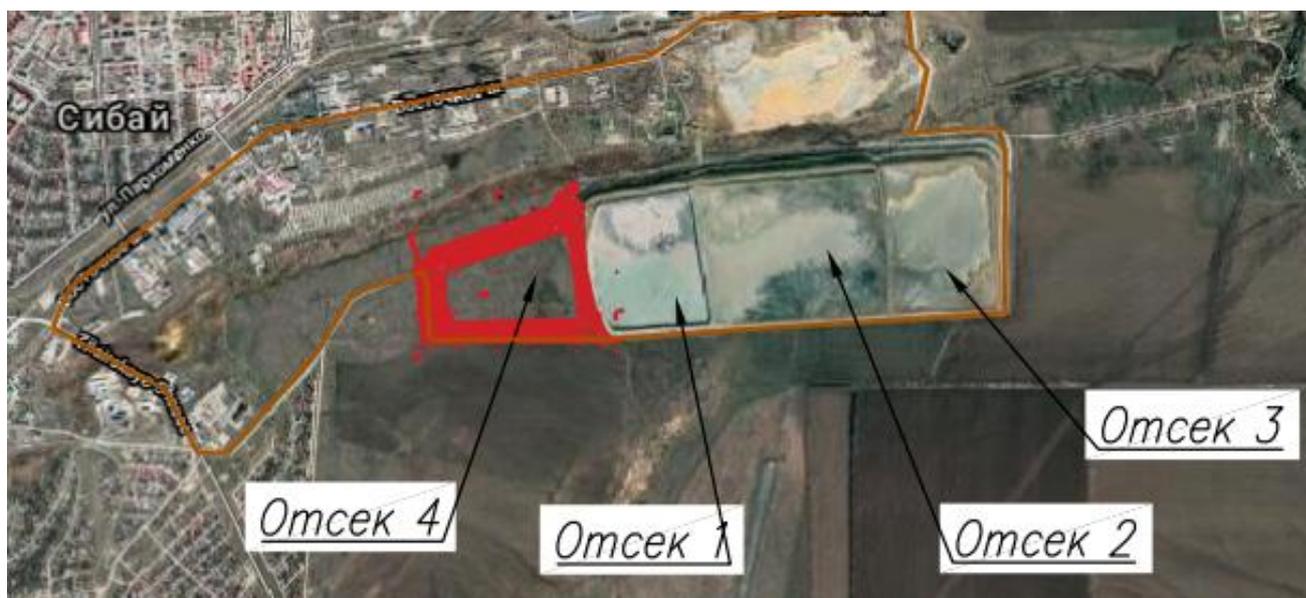


Рисунок 1.12 – Ситуационный план расположения отсеков хвостохранилища

Состав проектируемых гидротехнических сооружений Отсека 4 принят из условия нормальной работы хвостохранилища, при увеличении емкости на 3370 тыс. м<sup>3</sup> ( $27\,230 + 3\,370 = 30\,600$  тыс. м<sup>3</sup>) дает фабрике запас работы до 2028-2029 года с условием годового выхода хвостов 625 тыс. м<sup>3</sup>. Создание емкости Отсека 4 выполняется путем устройства котлована и строительства грунтовой ограждающей дамбы в полувыемке-полунасыпи из грунта (глины) выемки котлована, поверх которой укладывается геотекстиль с поверхностной плотностью 400 г/м<sup>2</sup>, слой щебня 0,2 м (фракция 5-20 мм), слой щебня 0,2 м (фракция 20-40 мм). Восточная сторона Отсека 4 примыкает к западной стороне Отсека 1, которая в настоящее время эксплуатируется предприятием. Площадь проектируемого Отсека 4 на конечный уровень заполнения ( $\approx 367,00$  м) составит 320 тыс. м<sup>2</sup>, вмещаемый объем хвостов составит 3370 тыс. м<sup>3</sup>, объем прудка-осветлителя 19 тыс. м<sup>3</sup>.

Характеристика Отсека 4:

- полезный объем (до отм. 367,00 м) – 3370,00 тыс. м<sup>3</sup>;
- полный объем (до отм. 368,50 м) – 3855,94 тыс. м<sup>3</sup>;
- площадь зеркала (при отм. 367,00 м) – 320,00 тыс. м<sup>2</sup>;
- площадь зеркала (при отм. 368,50 м) – 330,20 тыс. м<sup>2</sup>.

На хвостохранилище предусмотрено удаление осветленной воды через сливные колодцы, после чего вода по трубопроводу самотеком поступает в зумпф оборотной воды насосной станции.

Водные хвосты, сбрасываемые в хвостохранилище, характеризуются повышенным содержанием металлов относительно ПДК рыб.хоз. Содержание меди превышает ПДК в 14 раз, цинка – в 17,6 раз, кадмия – в 0,16 раз, кобальта – в 0,38 раз, никеля – в 5,6 раз, стронция – в 19 раз, молибдена – в 268 раз [64].

Для перехвата дождевых и талых вод по южной стороне хвостохранилища устроена нагорная канава (рисунок 1.13, слева), которая возле крайних (западной и восточной) дамб поворачивает на север и выходит в р. Карагайлы (рисунок 1.13 справа). Глубина канавы от 0,8 до 1,5 м с переменным уклоном и шириной по дну 1,5 м, откосы и дно канавы имеют щебёночную засыпку. С восточной стороны хвостохранилища канава выполнена из железобетонных лотков.



Рисунок 1.13 – Водоотлив талых и дождевых вод хвостохранилища

Для Отсека 4 сбор талых и дождевых вод также так же будет проводиться с помощью устройства нагорной канавы, расположенной с южной (нагорной)

стороны и проходящей вдоль западной части дамбы с переходом в р. Карагайлы. С учетом уклона рельефа местности, высоты канавы скорость расчетного потока составит от 4,7 до 5,39 м/с. Следует отметить, что в нагорную канаву попадают фильтрационные воды хвостохранилища, содержащие значительное количество загрязняющих веществ, в особенности металлов, и имеют пониженное значение рН (ниже 6). Тем не менее, мониторинг данных вод на содержание загрязняющих веществ перед поступлением в р. Карагайлы не ведется.

На северной стороне хвостохранилища находится дренажная канава, обеспечивающая сбор фильтрационных дренажных вод и их произвольный отвод в р. Карагайлы. В момент проведения мониторинга дренажная канава была размыта и поросла травой.

Загрязняющие вещества попадают в атмосферный воздух с территории пляжной зоны хвостохранилища, где происходит пыление тонкодисперсной фракции хвостов, в результате чего в атмосферный воздух попадают такие металлы, как кадмий, алюминий, марганец, медь, кобальт и свинец.

Складирование хвостов в Отсек 4 предусмотрено методом гидротранспорта с полным заливом отсека водой (без сухих пылящих пляжей), таким образом отсек не будет являться источником загрязнения атмосферы. Проектом строительства 4 отсека также предусмотрено одновременное перекрытие поверхностей существующих карт 2 и 3 почвенным грунтом, что исключит возможность пыления с их поверхности, и соответственно снизит до нулевой отметки их воздействие на атмосферный воздух (рисунок 1.14). Общий объем срезки почвенно-растительного слоя составит около 190 тыс. м<sup>3</sup>. Размещение осуществляется на поверхности 2 и 3 отсека, не занятой водной средой, слоем 0,22 м в объеме около 175 тыс. м<sup>3</sup> и разделительной дамбы между отсеками 2 и 3 в кавальеры высотой 2,0 м с заложением откоса 1,5 м в объеме около 15 тыс. м<sup>3</sup>.

При длительном атмосферном воздействии техногенных массивов, в частности, пылении пляжей хвостохранилища, тяжелые металлы оказываются на поверхности почвы, формируя техногенные наносы.

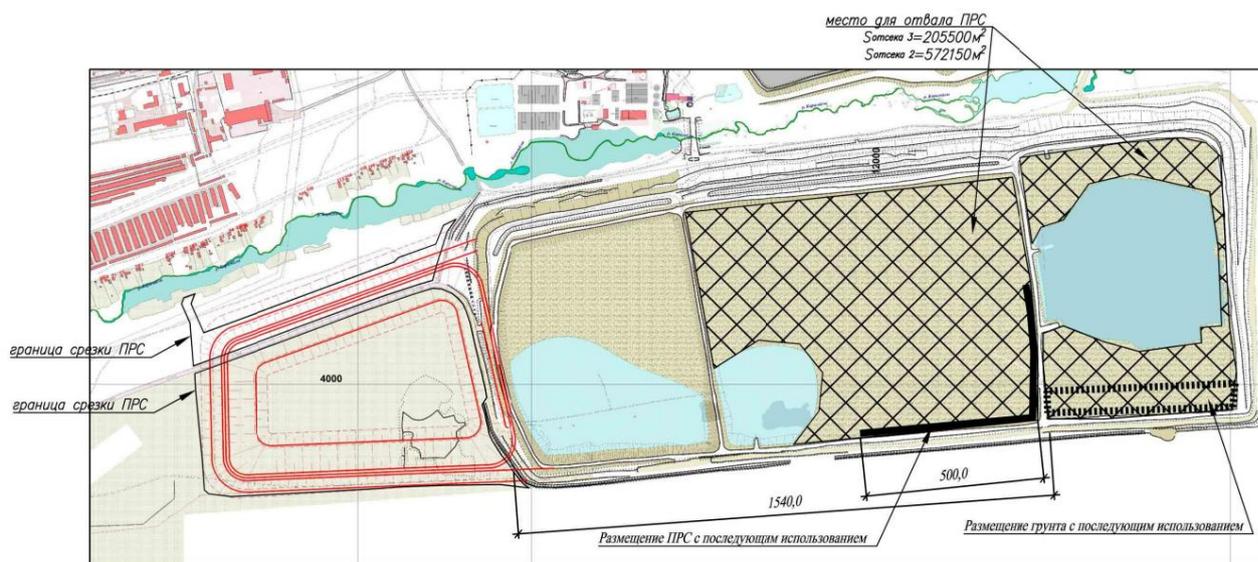


Рисунок 1.14 – Мероприятия по предотвращению пыления. Нанесение почвенного слоя на поверхность 2 и 3 отсеков

Почвы района расположения предприятия изначально характеризуются повышенным содержанием меди и цинка по сравнению с фоновыми почвами [26, 70]. В исследованиях Сомова В.В. для корректной оценки техногенного загрязнения был рассчитан РГФ – региональный геохимический фон [63, 65]. Валовые содержания тяжелых металлов в почвах фоновых участков составляют 1,5 РГФ, за исключением Со и Ni (2 и 5 РГФ соответственно) [63].

В исследованиях Хасановой Р.Ф. и др. для оценки содержания тяжелых металлов в почве были использованы значения ПДК элементов, а также кларк для железа (25000 мг/кг) и региональный фон (РГФ) для кадмия (0,22 мг/кг) [83]. По результатам исследований в районе хвостохранилища выявлены максимальные значения по валовому содержанию меди (в 3-4 раза), по валовому содержанию цинка также отмечается превышение в почвах на глубине 0-0,1 м. в 4,5, на глубине 0,1-0,3 м в 3 раза. Также отмечается превышение ПДК по содержанию валовых форм кадмия и кобальта в верхних слоях (0-0,1 и 0,1-0,2 м). Результат исследований почв на содержание подвижных форм ТМ показали превышение допустимых значений всех изучаемых металлов в несколько раз.

Согласно данным проектной документации 4 отсека хвостохранилища, почва района расположения 4 отсека практически во всех точках отбора проб на

глубине 0,0-0,2 м относится к категории «опасная». Значительные превышения ПДК отмечаются по содержанию цинка (1,12-1,61 ПДК), меди (1,21-1,28 ПДК), свинцу (1,03-1,13 ПДК). Содержание железа не определено. Образцы грунта, отобранного с глубины 1-2 м, относятся к «допустимой» категории химического загрязнения.

Таким образом, снятие почвенно-растительного слоя при строительстве нового отсека позволит устранить основной накопленный вред от пыления хвостов, а его размещение на пылящих пляжах хвостохранилища 2 и 3 отсека позволит предотвратить повторное загрязнение почв металлами.

#### **1.4 Выводы к первой главе**

1. Жизнедеятельность человека приводит к образованию и накоплению около 8,5 млрд. тонн различных видов промышленных и бытовых отходов. Отходы от добычи полезных ископаемых составляют около 95 % от общего количества образованных отходов. Деятельность горнодобывающих и горно-перерабатывающих предприятий приводит к формированию техногенных массивов различного типа, для размещения и захоронения которых отчуждаются территории, площадью в несколько сотен гектаров. Хранилища отходов горной деятельности, содержащих в своем составе токсичные примеси, оказывают негативное воздействие на все компоненты окружающей среды, которое распространяется на сотни и тысячи метров от границы складирования.

2. В Российской Федерации к настоящему времени накоплено более 48,5 млн. тонн ТКО, около 75 % которых отправляется на полигоны захоронения. Помимо использования земельных ресурсов и потери ценных компонентов отходов, полигонное захоронение отходов сопряжено с образованием и распространением фильтрата, выделением биогаза, переносом отдельных фракций отходов, повышением температуры окружающей среды, что ведет к загрязнению компонентов природной среды.

3. Разработка месторождений полиметаллических руд приводит к накоплению сульфидсодержащих отходов, которые, окисляясь и гидролизуясь, переходят в

оксиды, гидроксиды, сульфаты. В результате дальнейших преобразований формируются сульфатные дренажные стоки высокой кислотности и минерализации, резко отличающиеся от фоновых природных вод содержанием железа, цинка, меди, марганца и других химических элементов (Cd, Al, Pb и др.). Сульфаты имеют в несколько раз большую растворимость, чем сульфиды тяжелых металлов, в связи с чем, в процессе миграции металлы выносятся с территорий техногенных массивов по природным транспортным каналам, образуя в окружающей среде техногенные геохимические ореолы (аномалии).

4. Часто приемником дренажных вод становятся малые природные водотоки, которые определяют гидрологическую и гидрохимическую специфику средних и крупных рек страны. Помимо трансформации состава речных вод, в донных отложениях малых водотоков происходит формирование источника вторичного загрязнения рек – техногенных наносов, содержащих водорастворимые и подвижные формы металлов.

5. Сибайский филиал АО «Учалинский ГОК» ведет эксплуатацию месторождений медно-цинковых руд с начала XX-го века, переработку руды на обогатительной фабрике – с 1957 года. К настоящему времени в границах земельного отвода предприятия находится около 210 млн. м<sup>3</sup> отвалов вскрышной породы, объем образующихся подотвальных вод составляет 650 тыс. м<sup>3</sup>/год. При обогащении руды ежегодно образуется порядка 625 тыс. м<sup>3</sup> хвостов, содержащих сульфиды и оксиды металлов, размещение которых производится в хвостохранилище СОФ. Общий объем хвостов обогащения составляет 27 230 тыс. м<sup>3</sup>. В настоящее время ведется строительство нового отсека, вмещаемый объем отходов обогащения которого составит 3 370 тыс. м<sup>3</sup>.

6. Оценка воздействия техногенных массивов на компоненты природной среды показала, что основной и малоисследованной проблемой является миграция металлов со сточными дренажными водами с территории отвалов и хвостохранилища в ближайший водный объект – р. Карагайлы. Помимо выноса металлов в р. Худолаз и далее – в р. Урал, в концентрациях, в несколько раз превышающих значения ПДК, в донных отложениях и на берегах р. Карагайлы образуются техногенные наносы, в

которых накапливаются тяжелые металлы, в особенности кадмий, медь, цинк и железо, уровень концентрации которых возрастает из года в год. В связи с этим необходимо провести мониторинг воды и донных отложений реки, а также фильтрационных вод хвостохранилища, поступающих в реку, и разработать средозащитные мероприятия для ликвидации последствий и предотвращения повторного воздействия кислых дренажных вод, содержащих металлы, на природные воды.

## ГЛАВА 2 МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СУЛЬФИДСОДЕРЖАЩИХ ТЕХНОГЕННЫХ МАССИВОВ СИБАЙСКОГО ГОК

### 2.1 Современное состояние и экологические проблемы малых природных водотоков

К малым природным водотокам в гидрологии относят ручьи и реки, длина которых не превышает 100-150 км, а площадь водосбора – 2 000 км<sup>2</sup>. В России по различным данным насчитывается около 2,5 млн малых водотоков, из которых порядка 127 тыс. используется в народном хозяйстве. В бассейнах малых водотоков проживает почти 90 % сельского населения и около 40 % городского. В Башкортостане находится более 12,5 тыс. малых водотоков общей протяженностью около 50 тыс. км, что составляет порядка 87 % протяженности всех рек республики.

Малые природные водотоки составляют более 95 % общей протяженности гидрографической сети страны и формируют около половины речного стока. Они имеют большое экологическое значение, потому что являются первым звеном в формировании речной системы и определяют гидрологический режим и качество средних и, далее, крупных рек. Авторами Ткачевым Б.П. и Булатовым В.И. в своем аналитическом отмечено, что малые водотоки регулируют водный режим природного ландшафта, перераспределяют и поддерживают влагу. Авторами также отмечено, что ввиду тесного взаимодействия малых природных водотоков с другими компонентами природной среды, они многие тысячелетия формируют в своих руслах, поймах и береговых зонах экологические связи, природные процессы и, в том числе, участвуют в воспроизводстве биотического потенциала территорий [33].

Из-за небольшой водности малые водотоки чувствительны как к естественной смене окружающей обстановки (колебания климата), так и к антропогенному воздействию. Водосборные площади таких водотоков

перегружены промышленными и сельскохозяйственными объектами, поэтому загрязняющие вещества в первую очередь накапливаются именно здесь.

Деграцию малых водотоков рассматривают как угрозу безопасности человечества. Усиление эрозии почв в водосборах таких водотоков из-за распашки, вырубка лесов, строительство плотин, возведение гидротехнических сооружений, интенсивный водозабор в степной зоне (например, на нужды предприятий), изменение их русел ведут к деградации, заиливанию, а местами – к полному исчезновению малых водотоков. Ситуация с уничтожением малых природных водотоков чаще всего встречается в горнодобывающих районах Урала, Сибири и Дальнего Востока [78]. Здесь природный сток водотоков отводится в искусственные каналы, либо фильтруется в отвалах горных пород.

Загрязнение вод малых водотоков ведет к изменению процесса образования и накопления осадков. Часто в результате аккумуляции загрязняющих веществ в донных отложениях формируются новые геологические образования [85]. Состав и свойства донных отложений отражают временные физические, химические и биологические процессы, которые протекают в самих водотоках и водоемах. Донные отложения накапливают загрязняющие вещества, также в них могут происходить различные химические реакции, приводящие к образованию новых соединений, обладающих большим токсичным эффектом, чем исходные. Данные соединения по трофическим цепям могут попадать в организм человека [86]. Также накопленные загрязняющие вещества в результате смены климатических, физико-химических и других условий, действий различных организмов могут вновь оказаться в водной толще, вызвав тем самым повторное загрязнение воды.

Особое внимание уделяется проблеме загрязнения донных отложений малых водотоков металлами, т.к. металлы в природной среде постоянно пребывают в различном виде миграции. Металлы могут попадать в донные отложения путем механической миграции, т.е. с какими-либо другими частями осадков, а также в растворенной форме через воду. Сорбция металлов в донных отложениях зависит от их состава и содержания органических веществ [51, 58].

Таким образом, для оценки состояния малых природных водотоков необходим комплексный мониторинг, включающий в себя:

- анализ источников поступления загрязняющих веществ для определения потенциальных поллютантов;
- оценка Eh – рН обстановок в местах дальнейшего отбора проб воды и донных отложений;
- отбор проб воды и количественный анализ содержания основных загрязняющих веществ;
- отбор проб донных отложений и количественный анализ содержания основных загрязняющих веществ в различных формах нахождения (водорастворимая, подвижная, валовое содержание);
- анализ минерального состава донных отложений для изучения химических процессов, происходящих в донных отложениях (например, образование сульфидов металлов).

Комплексная оценка состояния малых природных водотоков необходима для разработки средозащитных мероприятий по ликвидации последствий загрязнения воды и донных отложений, что в дальнейшем поможет снизить негативную нагрузку на крупные водные артерии.

## **2.2 Мониторинг природных и сточных дренажных вод**

Оценка состояния р. Карагайлы, р. Худолаз, оз. Колтубан, а также определение состава фильтрационных вод хвостохранилища из дренажной системы, талых и дождевых вод нагорной канавы хвостохранилища проводились в 2017-2021 годах. Во время проведения экологических изысканий схема отбора проб воды р. Карагайлы и р. Худолаз включала в себя следующие точки (рисунок 2.1):

- 1 – р. Карагайлы, фоновая за пределами города Сибай, до влияния производственных объектов;
- 2 – р. Карагайлы, фоновая в черте г. Сибай, до влияния производственных объектов;

- 3 – р. Карагайлы, выход вод с ключа возле отвалов;
- 4 – р. Карагайлы после смешения речных вод и вод, выходящих с ключа возле отвалов;
- 5 – р. Карагайлы возле отстойника рудничных, шахтных и подотвальных вод предприятия;
- 6 – р. Карагайлы, 500 м после отстойника (т. 5);
- 7 – р. Карагайлы, место сброса сточных вод предприятия во время работы очистных сооружений;
- 8 – р. Карагайлы, 1 км после места сброса сточных вод;
- 9 – р. Карагайлы перед хвостохранилищем;
- 13 – р. Карагайлы перед п. Калинино;
- 14 – р. Карагайлы, впадение в р. Худолаз;
- 15 – р. Худолаз ниже места впадения р. Карагайлы.
- Также были отобраны пробы воды со следующих объектов:
- 10 – водные хвосты, сбрасываемые в хвостохранилище;
- 11 – дренажные воды хвостохранилища;
- 12 – сток талых и дождевых вод нагорной канавы хвостохранилища.

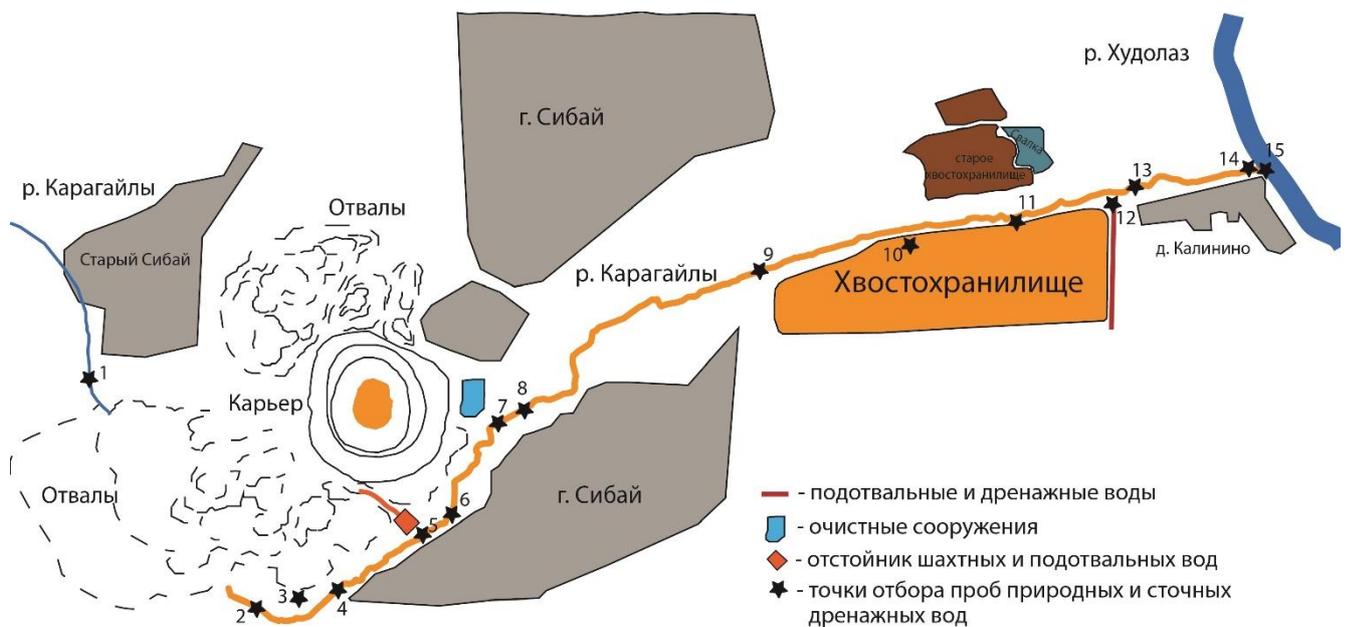


Рисунок 2.1 - Карта отбора проб природных и сточных дренажных вод

### 2.2.1 Пробоотбор, пробоподготовка и полевые исследования водных проб

В ходе мониторинговых исследований проводился отбор точечных проб воды в соответствии с нормативными документами [19,57].

Учитывая, что глубина рек в местах отбора проб составляла менее 5 м, то был установлен один горизонт у поверхности воды на глубине 0,3 м. В виду невысокой ширины водотоков, была установлена одна вертикаль на стрежне водотоков. При отборе простых (разовых) проб водных хвостов, сточных дренажных вод, талых и дождевых вод нагорной канавы пробоотборники помещались вниз по течению потока в участки с наиболее турбулентным движением.

Устройство для отбора проб выбиралось и подготавливалось в соответствии с нормативным документом [14]. Для отбора проб использовался пробоотборник в виде бутылки, прикрепленной к шесту. Бутылка выполнена из химически стойкого и нейтрального материала для исключения изменения состава отобранных проб, предварительно подготовлена в лаборатории путем ополаскивания ацетоном, разбавленной соляной кислотой и деионизированной водой (рисунок 2.2). Непосредственно перед отбором чистые емкости несколько раз были омыты отбираемой водой. Емкости герметично закрываются для обеспечения отсутствия попадания посторонних веществ.



Рисунок 2.2 – Емкости для отбора и хранения проб воды

В исходной воде, непосредственно после отбора, в полевых условиях определялся показатель рН, относящийся к «нестойким», для которых характерна изменчивость во времени. Для изучения показателя рН был использован потенциометрический метод, заложенный в многопараметровом анализаторе Multi 340 I. Результаты анализа представлены в таблице 2.1.

После определения водородного показателя отобранные пробы подвергались фильтрации и консервации путем подкисления азотной кислотой до  $\text{pH} < 2$ . После консервации пробы охлаждались до температуры 2-4 °С и транспортировались в требуемые сроки в таре, обеспечивающей темное и охлаждающее место.

### 2.2.2 Анализ водных проб в лабораторных условиях

Качественный и количественный химический анализ природных и сточных дренажных вод проводился в Научном центре «Экосистема» Горного университета. Определение содержания массовой концентрации металлов в отобранных пробах проводилось методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой с использованием атомно-эмиссионного спектрометра Shimadzu ICPE-9000.

Пробы природных и сточных вод предварительно фильтровались через фильтр «синяя лента» для удаления взвешенных веществ. Результаты полученных измерений представлены в таблице 2.1. В таблице 2.2 представлены коэффициенты контрастности относительно ПДК<sub>р.х.</sub> (К<sub>ПДК</sub>).

Таблица 2.1 – Результаты анализа проб природных и сточных дренажных вод

	Концентрация, мг/дм <sup>3</sup>						
Наименование компонента	рН	Al	Cd	Cu	Fe	Mn	Zn
Номер пробы	Природные воды						
ПДК рыб. хоз. [54]	Фоновое значение	0,04	0,005	0,001	0,1	0,01	0,01
1	7,7	0,071	0,0004	0,014	0,087	0,125	0,058

Продолжение таблицы 2.1

2	7,2	0,217	0,004	0,018	0,377	0,039	0,011
3	7,5	0,090	0,003	0,013	0,224	0,038	0,004
4	5,8	1,550	0,012	0,224	0,216	0,429	3,97
5	5,1	3,170	0,012	0,281	0,496	0,520	4,11
6	6,3	0,879	0,013	0,164	0,38	0,712	3,85
7	6,7	0,598	0,013	0,166	0,73	0,821	3,98
8	7,0	0,454	0,012	0,202	0,442	0,508	3,2
9	6,5	0,216	0,009	0,079	0,294	0,526	1,78
13	6,3	0,241	0,003	0,021	0,335	0,063	0,022
14	6,9	0,132	0,004	0,036	0,43	0,187	0,276
15	7,1	0,167	0,004	0,048	0,45	0,287	0,581
<b>Сточные дренажные воды</b>							
10	6,5	0,054	0,0008	0,014	0,096	0,0002	0,176
11	3,9	20,7	0,029	3,07	316	3,55	6,77
12	4,1	143	0,15	17,5	31,1	35,1	121

Таблица 2.2 – Коэффициенты контрастности.(K<sub>пдж</sub>)

Наименование компонента	Концентрация, мг/дм <sup>3</sup>					
	Al	Cd	Cu	Fe	Mn	Zn
Номер пробы	Природные воды					
1	1,8	0,1	14,0	0,9	12,5	5,8
2	5,4	0,8	18,0	3,8	3,9	1,1
3	2,3	0,6	13,0	2,2	3,8	0,4
4	38,8	2,4	224,0	2,2	42,9	397,0
5	79,3	2,4	281,0	5,0	52,0	411,0
6	22,0	2,6	164,0	3,8	71,2	385,0
7	15,0	2,6	166,0	7,3	82,1	398,0
8	11,4	2,4	202,0	4,4	50,8	320,0

Продолжение таблицы 2.2.

9	5,4	1,8	79,0	2,9	52,6	178,0
13	6,0	0,6	21,0	3,4	6,3	2,2
14	3,3	0,8	36,0	4,3	18,7	27,6
15	4,2	0,8	48,0	4,5	28,7	58,1
	Сточные дренажные воды					
10	1,4	0,2	14,0	1,0	0,0	17,6
11	517,5	5,8	3070,0	3160,0	355,0	677,0
12	3575,0	30,0	17500,0	311,0	3510,0	12100,0

	К <sub>ПДК</sub> < 1		1 < К <sub>ПДК</sub> < 10		10 < К <sub>ПДК</sub> < 100		К <sub>ПДК</sub> > 100
--	----------------------	--	---------------------------	--	-----------------------------	--	------------------------

Для комплексной оценки качества воды в р. Карагайлы используют условный комплексный показатель качества воды, учитывающий коэффициенты контрастности наиболее распространенных загрязняющих веществ, - индекс загрязнения воды (ИЗВ). Расчет ИЗВ проводился с использованием концентраций металлов (Al, Cd, Fe, Cu, Mn, Zn) по формуле 2.1.

$$\text{ИЗВ} = \left( \sum_{i=1}^n K_{\text{ПДК}} \right) / n \quad (2.1)$$

где  $n$  – количество показателей, берущихся для расчета, имеющих наибольшее значение (б).

В местах влияния техногенных массивов предприятия индекс загрязнения воды в сотни раз превышает значения индекса фоновых вод, что соответствует категории «чрезвычайно грязная вода».

### 2.3. Мониторинг донных отложений водных объектов

#### 2.3.1 Пробоотбор и пробоподготовка донных отложений

Донные отложения депонируют различные загрязняющие вещества, в том числе металлы. Вследствие этого донные отложения содержат информацию о

многолетнем загрязнении водных объектов. При изменении различных физико-химических условий, таких как изменение водородного показателя воды в водном объекте (например, при сбросе щелочных стоков, попадании кислых подотвальных и инфильтрационных вод хвостохранилищ в водный объект), показателя  $Eh$ , растворенного кислорода и других, может происходить изменение фазового состояния загрязняющих веществ в донных отложениях, что приводит к поступлению загрязнителей в водную толщу, вызывая вторичное загрязнение речных вод.

Таким образом, для того, чтобы корректно оценить состояние р. Карагайлы, необходимо также изучить состав донных отложений.

Во время проведения экологических изысканий исследуемая р. Карагайлы была условно разделена на следующие зоны (рисунок 2.3):

1ДО – район, расположенный вне влияния предприятия на р. Карагайлы;

2ДО – участок реки, находящийся в месте ранее выходивших на поверхность подотвальных вод;

3ДО – участок реки, находящийся в месте, где во время работы очистных сооружений происходил выпуск щелочных сточных вод;

4ДО – участок реки перед хвостохранилищем СОФ (рисунок 2.4);

5ДО – участок реки после хвостохранилища;

6ДО – место впадения исследуемой реки в реку Худолаз.

В качестве фонового района выбрано оз. Колтубан, где также была отобрана проба донных отложений (7ДО).

Отбор проб донных отложений производился в соответствии с ГОСТ 17.1.5.01-80 [13]. Пробы отбирались с помощью штангового дночерпателя, который предназначен для взятия проб с нарушением структуры. Данным пробоотборником можно отбирать как несвязанные илистые, так и песчано-гравелитистые донные отложения. Отобранные пробы донных отложений помещались в полиэтиленовые пакеты с герметически закрывающимся замком и до дальнейших этапов пробоподготовки в лаборатории хранились при

температуре 4 °С. На всех этапах отбора и подготовки проб было соблюдено условие отсутствия их повторного загрязнения.

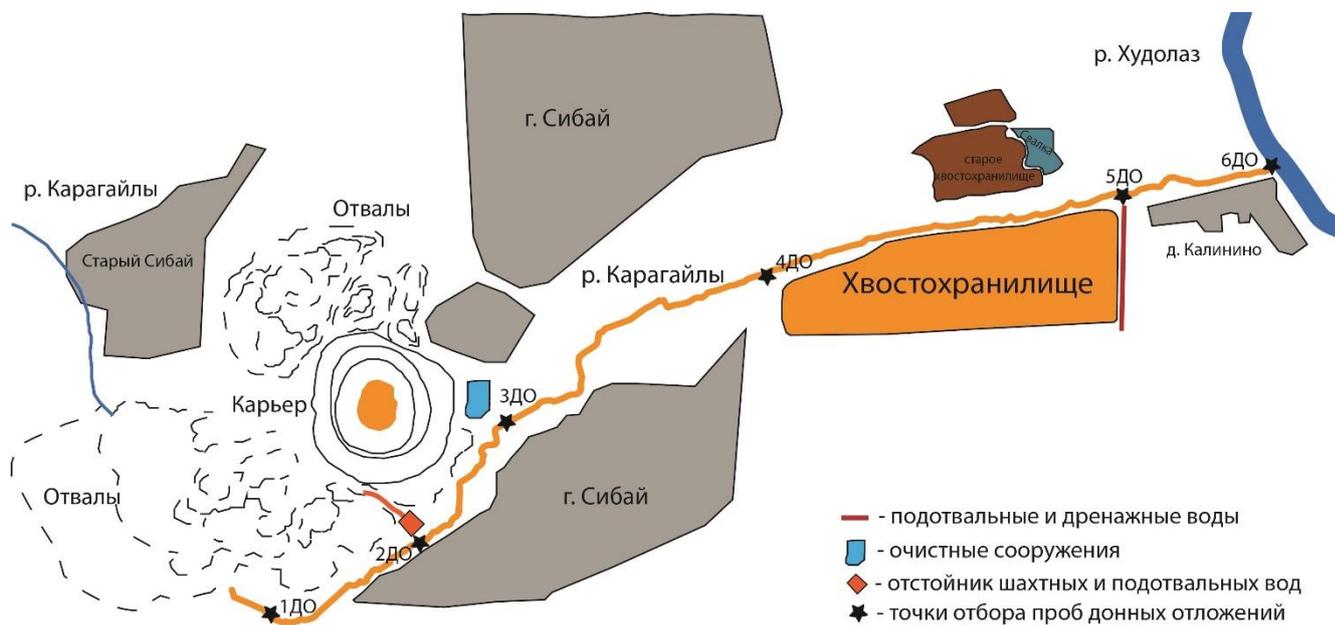


Рисунок 2.3 – Точки отбора проб донных отложений



Рисунок 2.4 – Точка отбора проб № 4

Общая первоначальная пробоподготовка донных отложений производилась автором в Научном центре «Экосистема» Горного университета и включала в себя следующие стадии, представленные на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Основные стадии пробоподготовки донных отложений

После просеивания в пробах был проведен анализ влажности на анализаторе влажности МХ-50. Данный анализатор предназначен для экспресс-анализа влажности твердых, сыпучих, пастообразных материалов. Во время анализа образец высушивается с помощью галогеновой лампы, далее определяется содержание влаги (в %).

Для анализа влажности были отобраны навески проб, весом по 5 грамм каждая. Пробы высушивались при стандартном режиме, когда поддерживается

постоянная температура сушки (130 °С) на протяжении всего анализа, при автоматическом режиме. При данном режиме происходит изменение уровня содержания влаги в минуту меньше заданного значения (0,05 %/мин), далее - считается результат. Результаты анализа влажности проб приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Результаты влажности проб донных отложений

Номер пробы	1ДО	2ДО	3ДО	4ДО	5ДО	6ДО	7ДО
Влажность, %	3,28	0,98	20,21	5,91	6,54	3,72	0,72

Отдельным этапом пробоподготовки являлось измельчение проб до состояния порошка для дальнейшего качественного определения фазового состава донных отложений с использованием метода порошковой рентгеновской дифракции.

### 2.3.2 Анализ донных отложений в лабораторных условиях

Для полной оценки роли донных отложений как накопителя и источника загрязняющих веществ, необходимо определить различные формы содержания металлов, такие как валовое содержание, подвижные и водорастворимые формы. Также необходимо понимать качественный фазовый состав.

*Водорастворимая форма* – наиболее подвижная форма нахождения тяжелых металлов в донных отложениях. Она содержит в себе свободные ионы или комплексные соединения металлов. Водорастворимые формы извлекали путем растворения навески образцов в дистиллированной воде при соотношении проба:раствор = 1:5 при постоянном перемешивании. Суспензию почвы с водой сразу же переводили на воронку с фильтром «белая лента». Колба так же ополаскивалась дистиллированной водой. Фильтрат собирали в чистой конической колбе.

*Подвижная форма* - важнейший показатель, характеризующий санитарно-гигиеническую обстановку и определяющий необходимость проведения

средозащитных мероприятий. Подвижные формы микроэлементов извлекали из навесок образцов следующим образом.

Навеску воздушно-сухой пробы донных отложений (массой около 5 грамм) после взвешивания на аналитических весах помещали в полиэтиленовый флакон вместимостью 100 мл. Далее к навескам приливали ацетатно-аммонийный буферный раствор с рН 4,8 объемом 50 мл. Пробы перемешивались вращательными движениями. Далее флаконы закрывали крышками и выдерживали при комнатной температуре в течение 24 часов, после чего профильтровывали через фильтр «белая лента». Далее объем каждого фильтрата в мерной колбе доводился до 100 мл буферным раствором.

Использование буфера со значением рН около 5 позволяет оценить содержание металлов, которые перешли в раствор при резком понижении кислотности среды.

*Валовое содержание металлов* – это сумма растворенных и взвешенных форм. Здесь определяется общее содержание металлов, в том числе закрепленных на кристаллических решетках. Выделение металлов в раствор происходит при воздействии сильных кислот (плавиковая, соляная, азотная), повышенных температуре и давлении.

В качестве метода для полного извлечения металлов из твердой пробы в раствор было выбрано микроволновое разложение. На рисунке 2.6 представлена микроволновая печь Multiwave 3000. Разложение проб проводилось в соответствии с методикой М-МВИ-80-2008 [32]. Дальнейшие измерения осуществлялись с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой Shimadzu ICPE-9000.



Рисунок 2.6 - Система микроволнового разложения Multiwave 3000

В специальные сосуды помещали навески анализируемых проб массой около 0,5 г и добавляли реагенты в соответствии с выбранной программой для валового разложения проб при температуре 170-210<sup>0</sup>С и давлении до 80 атм. в зависимости от этапа.

После завершения двух этапов программы сосуды с разложенными пробами охлаждались, после чего были перемещены в колбы объемом 100 см<sup>3</sup>. При переводе проб в колбы были обмыты внутренние стенки реакционных сосудов и доведено до метки. Также был приготовлен холостой раствор.

Определение концентрации элементов в образцах донных отложений выполнялось аналогично анализу водных проб с использованием спектрометра ICPE-9000. Обработка результатов измерений заключалась в пересчете из массовых концентраций металлов в вытяжках в массовые концентрации в пробах почв (мг/кг) в абсолютно сухом состоянии (с учетом влажности) по формуле 2.2.

$$X = \frac{C_{\text{изм}} \cdot V_{\text{в}}}{m \cdot K} \quad (2.2)$$

где  $C_{\text{изм}}$  – массовая концентрация элемента в вытяжке, мг/дм<sup>3</sup>;

$V_{\text{в}}$  – объем экстрагирующего раствора для вытяжки, дм<sup>3</sup>;

$m$  – масса навески, взятой для анализа, кг;

$K$  – коэффициент пересчета навески на абсолютно сухое состояние, рассчитываемый по формуле 2.3.

$$K = \frac{100}{100 + W} \quad (2.3)$$

где  $W$  - влажность пробы донных отложений согласно таблице, %

Результаты анализа проб донных отложений представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты анализа проб донных отложений

Номер пробы	Форма нахождения	Содержание, мг/кг (в пересчете на абсолютно сухое состояние)					
		Al	Cd	Cu	Fe	Mn	Zn
1ДО	Водорастворимая	3,61	0,01	0,08	3,87	0,57	0,11
	Подвижная	122,7	0,04	0,09	2849,6	117,7	3,82
	Валовое содержание	46744	2,73	13,84	31182	474,5	69,2
2ДО	Водорастворимая	0,25	0,01	0,11	0,17	0,36	0,01
	Подвижная	201,2	1,53	1362	10101	189,4	203,8
	Валовое содержание	18674	5,37	1725	33901	611,0	864,5
3ДО	Водорастворимая	1148	1,98	2500	65,51	35,46	1295
	Подвижная	12042	2,31	6299	12741	454,0	2404
	Валовое содержание	21667	13,9	8599	102724	735,0	2746
4ДО	Водорастворимая	0,26	0,02	0,33	0,97	20,18	10,33
	Подвижная	577,6	2,14	122,6	2710	129,9	354,3
	Валовое содержание	28409	6,40	2050	40861	435,8	1032
5ДО	Водорастворимая	0,27	0,03	0,17	0,14	2,13	0,91
	Подвижная	2767	2,88	609,2	4005	373,6	909,8
	Валовое содержание	34971	6,73	651,0	44951	696,2	1111
6ДО	Водорастворимая	0,26	0,10	0,48	0,10	11,77	9,49
	Подвижная	6427	15,56	1288	15557	1990	1641
	Валовое содержание	45454	23,77	2136	44383	3713	4432
7ДО (фоновая)	Водорастворимая	10,58	0,01	0,29	6,55	0,30	0,40
	Подвижная	74,13	0,08	3,63	1657	120,7	13,45
	Валовое содержание	45550	3,55	39,28	43905	563,5	67,08

В таблице 2.5 представлены коэффициенты контрастности относительно фона ( $K_{фон}$ ), т.к. в настоящее время ПДК для донных отложений не установлены.

Таблица 2.5 - Коэффициенты контрастности относительно фона ( $K_{флн}$ )

Номер пробы	Форма нахождения	$K_{сф}$					
		Al	Cd	Cu	Fe	Mn	Zn
1ДО	Водорастворимая	0,34	1,00	0,28	0,59	1,90	0,28
	Подвижная	1,66	0,50	0,02	1,72	0,98	0,28
	Валовое содержание	1,02	0,77	0,35	0,71	0,84	1,03
2ДО	Водорастворимая	0,02	1,00	0,38	0,03	1,20	0,03
	Подвижная	2,71	19,13	375,21	6,10	1,57	15,15
	Валовое содержание	0,41	1,51	43,92	0,77	1,08	12,89
3ДО	Водорастворимая	108,51	198,00	8620,69	10,00	118,20	3237,50
	Подвижная	162,44	28,88	1735,26	7,69	3,76	178,74
	Валовое содержание	0,48	3,92	218,92	2,34	1,30	40,94
4ДО	Водорастворимая	0,02	2,00	1,14	0,15	67,27	25,83
	Подвижная	7,79	26,75	33,77	1,64	1,08	26,34
	Валовое содержание	0,62	1,80	52,19	0,93	0,77	15,38
5ДО	Водорастворимая	0,03	3,00	0,59	0,02	7,10	2,28
	Подвижная	37,33	36,0	167,82	2,42	3,10	67,64
	Валовое содержание	0,77	1,90	16,57	1,02	1,24	16,56
6ДО	Водорастворимая	0,02	10,00	1,66	0,02	39,23	23,73
	Подвижная	86,70	194,50	354,82	9,39	16,49	122,01
	Валовое содержание	1,00	6,70	54,38	1,01	6,59	66,07

$K_{фон} < 1$ 
  $1 < K_{фон} < 10$ 
  $10 < K_{фон} < 100$ 
  $K_{фон} > 100$

Визуально накопление Al, Cd, Cu, Fe, Mn и Zn в донных отложениях (валовое содержание) сопоставимо с точками отбора 1-6 ДО и относительно фонового содержания металлов в точке 7 представлено в Приложении А.

Качественное определение фазового состава донных отложений проводилось с использованием метода порошковой рентгеновской дифракции в

Центре коллективного пользования Санкт-Петербургского горного университета. Данный метод заключается в исследовании структурных характеристик материала при помощи дифракции рентгеновских лучей на порошке исследуемого образца (рентгеноструктурный анализ).

Представление результатов рентгеноструктурного анализа состава образцов донных отложений осуществляется в виде дифрактограмм, на которых показаны зарегистрированные пики обнаруженных минералов (рисунок 2.7). Дифрактограммы проб 1, 2, 4, 5, 6 представлены в Приложении Б. Основными формами нахождения металлов проанализированных проб донных отложений реки являются силикаты (кварц), альбит и карбонат кальция. Проба ЗДО имела в своем составе сульфид цинка (сфалерит) и сульфид железа (пирит). В пробе 5 ДО также обнаружен пирит и цинк в виде гидроксида.

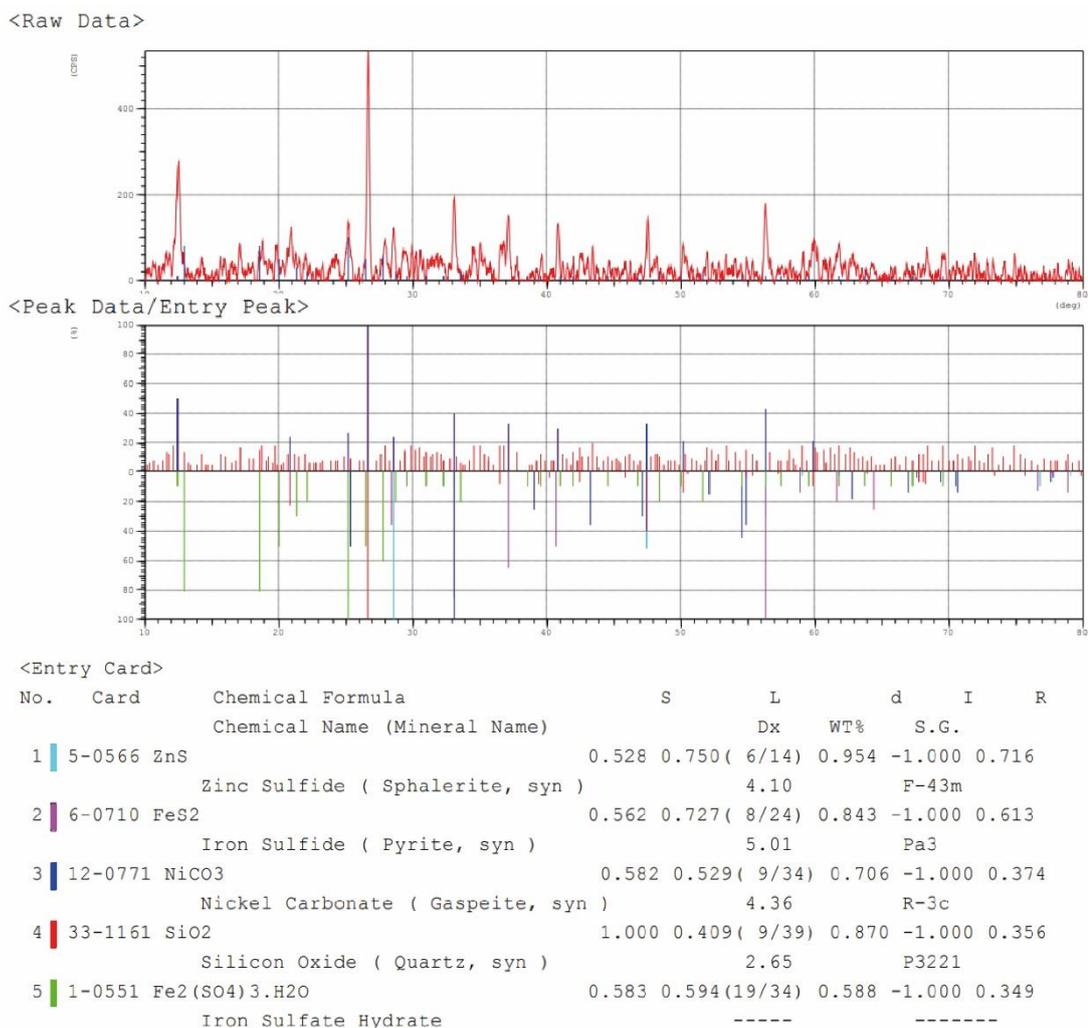


Рисунок 2.7– Дифрактограмма пробы ЗДО

## 2.4 Особенности содержания тяжелых металлов в поверхностных водах и донных отложениях р. Карагайлы

Высокие содержания Al, Cu, Cd, Fe, Mn и Zn в фоновых участках, а именно, донных отложениях оз. Колтубан, объясняются присутствием меди, и железа в породах Сибайского рудного района и их взаимосвязью по содержанию с марганцем и кадмием, благодаря геохимическому сходству с железом и цинком соответственно. В гипергенных условиях происходит окисление сульфидов и образование сульфатов и гидросульфатов - вторичных минералов рудных тяжелых металлов. Содержание металлов в донных отложениях рек может превышать таковое в сульфидных рудах.

Формы нахождения тяжелых металлов и серосодержащих соединений в реках, их миграция и перераспределение между связанным и водорастворимым состоянием определяются различными параметрами, в том числе водородным показателем. Ниже рассмотрена гидрогеохимическая ситуация, сложившаяся в р. Карагайлы (рисунок 2.8).

В фоновых створах, т.е. до влияния промышленных объектов предприятия и города, вода р. Карагайлы характеризуется нейтральным значением водородного показателя и низким содержанием металлов относительно ПДК. Содержание металлов в донных отложениях данной зоны сопоставимо с фоновыми значениями концентраций металлов по трем формам нахождения (таблица 2.5).

Возле отвалов кислотно-щелочной показатель речной воды снижается до 5,8, вместе с чем концентрации металлов возрастают в несколько раз. Это может говорить о неполном сборе и отводе кислых подотвальных вод, и их частичной разгрузке в реку. В донных отложениях данного участка отмечается увеличение содержания подвижных форм и валового содержания Cd, Cu, Zn, что подтверждает формирование в данном месте щелочного барьера, в результате чего в осадок выпадают тяжелые металлы [6].

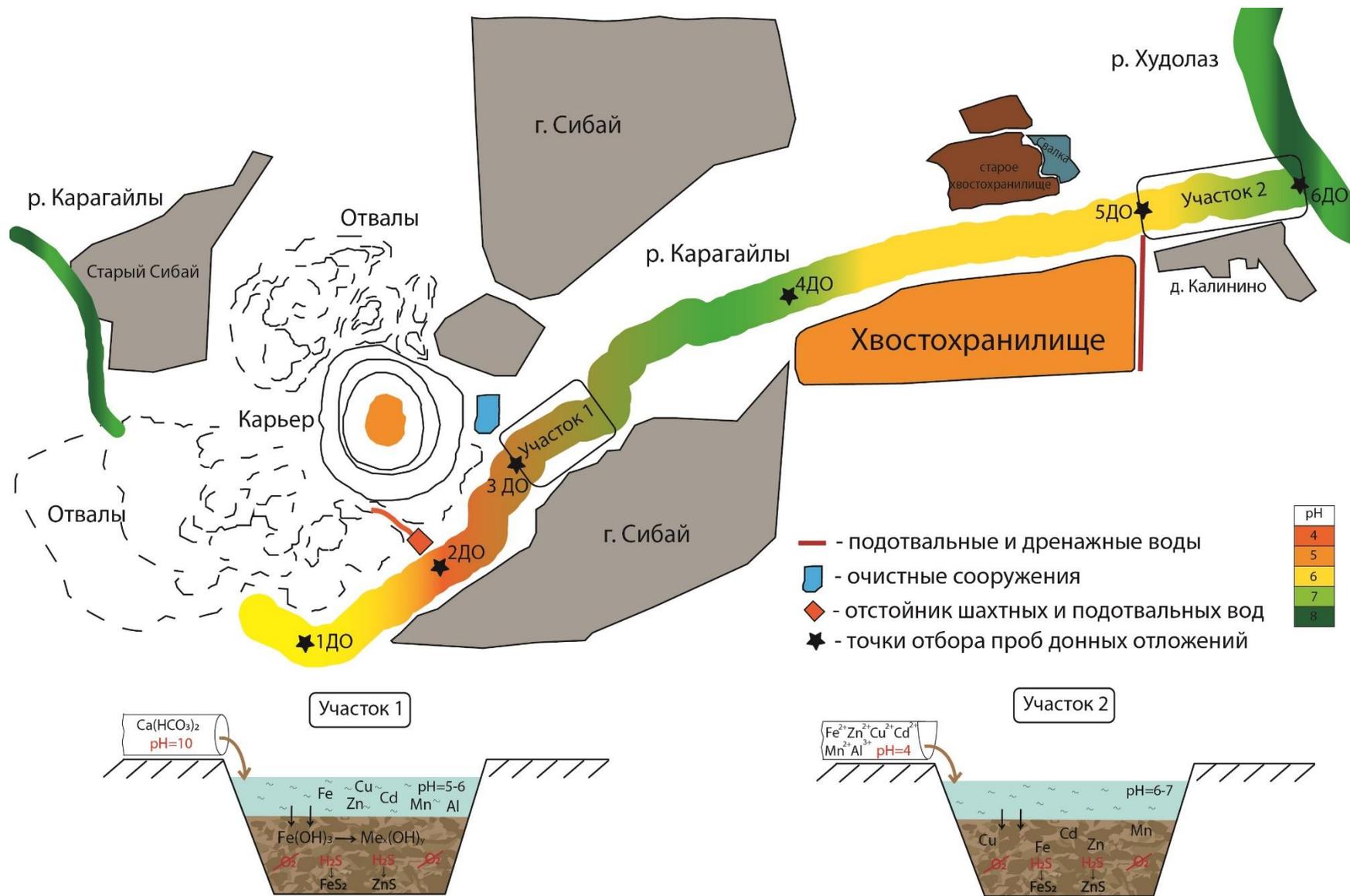


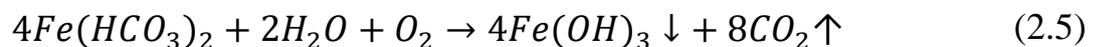
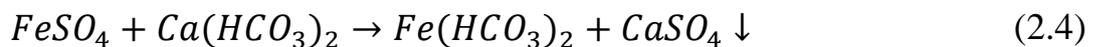
Рисунок 2.8 – Гидрохимическая ситуация в р. Карагайлы

Участок р. Карагайлы возле отстойника рудничных, шахтных и подотвальных вод предприятия характеризуется максимальным содержанием Al, Cu, Zn в воде относительно всей исследованной части реки. Далее, ниже по течению, содержание металлов снижаются, рН достигает значения 6,3. Полученные результаты могут говорить о недостаточной изоляции отстойников рудничных, шахтных и подотвальных вод.

В районе нахождения ранее осуществлявшегося сброса сточных вод с очистных сооружений и в 1 км ниже по течению рН воды р. Карагайлы составляет 6,7-7,0. Содержание Al, Cd, Cu и Zn практически не меняется.

На протяжении всего участка реки в районе воздействия предприятия (т.4-7) наблюдается постепенное увеличение содержания Mn в воде. Максимальное содержание марганца (82 ПДК) приходится на участок бывшего сброса сточных вод. Также здесь отмечается максимальная концентрация Fe по сравнению с другими участками исследования воды р. Карагайлы.

Во время функционирования очистных сооружений, осуществлялся сброс сточных вод с рН около 10. Очистка карьерных, подотвальных и шахтных вод проводилась методом флокуляции после известкования. При взаимодействии кислых и слабокислых вод реки с щелочными карбонатными стоками очистных сооружений произошло образование гидроксида железа по уравнениям реакций (формулы 2.4, 2.5).



Это проявилось в охристой окраске осадков (рисунок 2.9) и аномально высокой концентрации в них Fe (до 11% по валовому содержанию).

Гидроксид железа имеет высокую удельную поверхность, за счет чего выступает сорбентом металлов из воды реки, что приводит к их соосаждению и формированию комплексного сорбционно-гидроксидного барьера [6, 93]. Это подтверждается высоким содержанием водорастворимой и подвижной форм и валового содержания Cu, Zn в донных отложениях. Также на данном участке

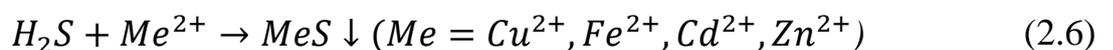
отмечается высокое содержание водорастворимой и подвижной форм Cd и водорастворимой формы Mn.



Рисунок 2.9 – Проба донных отложений в месте образования геохимического барьера (т.ЗДО)

Проба донных отложений в точке отбора ЗДО характеризуется более высокой влажностью (в 3-20 раз) по сравнению с другими пробами, что говорит о высоком содержании мелкодисперсных частиц по сравнению с другими пробами. Это может быть связано с образованием тонкой минеральной взвеси гидроксидов железа.

Образование пирита и сфалерита (рисунок 2.7) может быть связано с тем, что в месте сброса сточных вод очистных сооружений в нижних слоях донных отложениях р. Карагайлы, сформировалась застойная сероводородная зона. Причинами проявления такой зоны являются низкая скорость течения и возможность прогрева на мелководье, что характерно для малых рек, таких как р. Карагайлы, а также присутствие сульфатов и органических соединений, поступающих со сточными водами. Таким образом, в данной зоне сульфаты восстанавливаются до сероводорода под действием сульфатвосстанавливающих бактерий. Часть сероводорода, взаимодействуя с катионами металлов, связывает их и формирует отложения нерастворимых сульфидов в донных отложениях реки по химической реакции (формула 2.6).



В настоящее время сброс щелочных сточных вод не ведется, рН реки остается ниже 7, вследствие чего может наблюдаться переход водорастворимых, а также подвижных форм металлов обратно в водную толщу, что подтверждается наиболее высокими концентрациями Fe, Mn, Zn, Cd в воде по сравнению с остальными участками исследуемой реки. Таким образом, донные отложения, как говорилось ранее, являются источником вторичного загрязнения воды реки.

Благодаря механическим и биогеохимическим барьерам, расположенным в среднем течении р. Карагайлы [6], в верхнем течении, на участке отбора проб перед хвостохранилища предприятия, отмечается значительное снижение концентраций Al, Cd, Cu, Fe и Zn как в воде, так и в донных отложениях реки. Высоким остается содержание Mn в воде и водорастворимой формы в донных отложениях, что говорит о сложности аккумуляции марганца с помощью геохимических барьеров и его высокой степени миграции.

После хвостохранилища содержание исследуемых металлов и сульфатов в воде остается относительно низким. Это может быть связано с наличием застойных зон из-за наличия зарослей высшей водной растительности и корней деревьев, находящихся в донных отложениях р. Карагайлы, что приводит к образованию сероводорода и осаждению железа в виде пирита (Приложение Б) согласно уравнению реакции (формула 2.6). Это подтверждается резким возрастанием концентрации подвижных форм металлов в донных отложениях. Такое увеличение количества металлов, осаждаемого в донных отложениях реки, связано со скоплением фильтрационных вод хвостохранилища предприятия и талых, дождевых вод, отводимых нагорной канавой хвостохранилища, на рельефе и их дальнейшим поступлением с по природным водным каналам непосредственно в р. Карагайлы.

Содержание металлов в кислых фильтрационных водах хвостохранилища (т.11) превышает концентрации в сбрасываемых водных хвостах в сотни раз, что говорит о недостаточной изоляции хвостохранилища.

По проекту хвостохранилища нагорная канава предназначена для отвода условно чистых талых и дождевых вод, с целью предотвращения их скопления и

увеличения объема воды в хвостохранилище. Анализ и очистка данных вод не предусмотрены, их сброс осуществляется непосредственно в реку, а значит предполагается, что их состав не оказывает негативное влияние на природную среду. Тем не менее, анализ пробы воды из нагорной канавы (т. 12) показал, что содержание некоторых металлов многократно превышает значения ПДК по Cu – в 17500 раз, Zn – в 12100 раз, Al – в 3575 раз, Mn – в 3500 раз, Fe – в 311 раз и Cd – в 30 раз. Таким образом, отвод талых и дождевых вод напрямую в р. Карагайлы недопустим, в виду того, что прежде помимо природных вод, в нагорную канаву попадают кислые загрязненные металлами фильтрационные стоки, проходящие через тело хвостохранилища.

На исследуемом участке места выхода р. Карагайлы в р. Худолаз отмечается максимальная аккумуляция кадмия, марганца и цинка в донных отложениях. Валовое содержание Zn достигает 4432 мг/кг, Mn – 3713 мг/кг, Cd – 24 мг/кг (Приложение А). В донных отложениях данного участка содержание подвижных форм Cd, Fe, Mn также достигает максимальных значений по сравнению с другими участками реки. Это может быть связано с тем, что в данном месте направление течения р. Карагайлы меняется, скорость снижается, в следствии чего возникает механический барьер.

Несмотря на осаждение и аккумуляцию металлов на механических и биогеохимических барьерах в среднем течении реки и нейтральные значения водородного показателя в реке после хвостохранилища, концентрации металлов, выносимых в р. Худолаз, являющуюся притоком р. Урал, остаются на высоком уровне, что говорит о непосредственном влиянии хвостохранилища на состав реки. Так, содержание Zn в р. Худолаз превышает значение ПДК в 58 раз, Cu – в 48 раз, Mn – в 29 раз, Al – в 4,2 раза, Fe – в 4,5 раза. С учетом среднего расхода реки с водами р. Карагайлы в р. Худолаз в год выносятся около 88 тонн цинка, 73 тонн меди, 44 тонн марганца, 7 тонн железа, 6,4 тонн алюминия и 1,2 тонн кадмия.

## 2.5 Выводы ко второй главе

1. Проблема загрязнения малых водотоков, в основном, имеет локальный характер, но их суммарный вклад в экологическое состояние крупных водоемов и водотоков значителен, что вызывает необходимость проводить комплексную оценку их состояния для выявления основных источников поступления загрязняющих веществ и дальнейшей ликвидации накопленного вреда.

2. В результате деятельности производственных объектов предприятия и длительном существовании сульфидсодержащих отходов в виде насыпных и намывных массивов происходит загрязнение воды и донных отложений природных водных объектов металлами и серосодержащими соединениями. Форма их нахождения, а также их содержание в воде и донных отложениях определяются климатическими, гидрологическими и физико-химическими условиями, тем самым характеризуя донные отложения как источник вторичного загрязнения реки.

3. По результатам комплексных экологических изысканий (полевых исследований), оценки динамики поступления загрязняющих компонентов от производственных объектов были определены техногенные физико-химические барьеры. По результатам анализа проб установлено, что на выявленных участках происходит снижение содержания металлов в воде реки и значительное увеличение в донных отложениях.

4. Донные отложения реки в зоне формирования комплексного техногенного сорбционно-гидроксидного и щелочного барьера характеризуются яркой охристой окраской, высокой влажностью (20,21 %), высоким содержанием тонкой минеральной взвеси гидроксидов железа и аномально высоким валовым содержанием Fe (до 11 %). Рентгеноструктурный анализ показал, что в донных отложениях данной зоны присутствуют минералы пирит ( $\text{FeS}_2$ ) и сфалерит ( $\text{ZnS}$ ), а также сульфат железа.

5. Основным источником поступления металлов в р. Карагайлы, оказывающими непосредственное влияние на количество выносимых металлов в

р. Худолаз (приток р. Урал), является неконтролируемый отвод атмосферных и фильтрационных дренажных вод хвостохранилища, по содержаниям меди, цинка, алюминия, марганца, железа и ( $K_{\text{ПДКр.х.}}^{\text{Cu}} = 17\ 500$ ,  $K_{\text{ПДКр.х.}}^{\text{Zn}} = 12\ 100$ ,  $K_{\text{ПДКр.х.}}^{\text{Al}} = 3575$ ,  $K_{\text{ПДКр.х.}}^{\text{Mn}} = 3510$ ,  $K_{\text{ПДКр.х.}}^{\text{Fe}} = 311$ ,  $K_{\text{ПДКр.х.}}^{\text{Cd}} = 30$ ).

### **ГЛАВА 3 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗОЛЫ ОТ СЖИГАНИЯ ТКО ДЛЯ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ И ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ДРЕНАЖНЫХ ВОД ОТ МЕТАЛЛОВ**

Проведенный анализ воздействия объектов Сибайского ГОК на компоненты природной среды и результаты комплексного мониторинга водных объектов данного района влияния показали, что для снижения техногенной нагрузки на малую реку Карагайлы, р. Худолаз и р. Урал, в первую очередь, необходимо отвести кислые дренажные воды хвостохранилища и очистить их от металлов.

В общем виде любая технология очистки сточных вод включает в себя минимум три стадии.

Первая стадия – предварительная очистка. На данном этапе происходит усреднение всех поступающих на очистку стоков для обеспечения равномерной нагрузки на очистные сооружения. Здесь удаляются крупные (видимые включения типа пластика, бумаги и т.д.) и всплывающие, легко отделяемые примеси (нефтепродукты).

Вторая стадия – очистка. На данной стадии происходит поэтапное избавление воды от основной массы загрязнения (около 93-96 %). Способы очистки воды, количество подстадий зависят от вида загрязняющих веществ, их содержания в стоке, количества сточных вод, требований к качеству очищенной воды и так далее.

Третья стадия – дополнительная очистка. Данная стадия необходима для удаления остаточных концентраций загрязняющих веществ, например, для достижения предельно допустимых концентраций водоемов рыбохозяйственного значения. Блок доочистки включает в себя методы очистки, которые чаще всего чувствительны к содержанию взвешенных веществ, нефтепродуктов.

Также в общем виде технология очистки воды включает в себя стадию отстаивания взвешенных веществ.

Основными методами очистки сточных вод от ионов металлов являются: реагентный, сорбционный, ионообменный и электрохимический. В таблице 3.1 приведены достоинства и недостатки перечисленных методов [68, 69, 73, 82].

Таблица 3.1 – Основные способы очистки сточных вод от ионов металлов

Способ очистки	Принцип действия	Достоинства	Недостатки
<b>Реагентный</b>	Перевод ионов металлов в труднорастворимые соединения (гидроксиды, карбонаты, сульфиды) путем добавления реагентов, а также нейтрализация стоков	недорогой способ при использовании природных материалов (карбонатных минералов кальция и магния); способ применим для обезвреживания вод различных объемов с различной концентрацией ионов металлов	безвозвратная потеря ценных металлов с образующимся осадком; необходимость устройства усреднителей; необходимость отстаивания образующегося осадка; необходимость организации реагентного хозяйства; расход реагентов
<b>Сорбционный</b>	Поглощение ионов металлов сорбентом за счет пористой структуры	в качестве сорбентов могут использоваться отходы различных производств; очистка сточных вод до ПДК	высокие требования к сорбенту, такие как высокая поглотительная способность, легкая регенерация, селективность, дешевизна; способ целесообразен как конечная операция водоочистки после более дешевых видов очистки (для низких концентраций)
<b>Ионообменный</b>	Физико-химический процесс обмена ионами, находящимися в растворе, и ионами, присутствующими на поверхности твердой фазы – ионита	Хорошие результаты очистки от низких содержаний минеральных солей	вторичное загрязнение вод при регенерации; высокая стоимость ионообменных смол; не подходит для высокого содержания солей; чаще используется на стадии доочистки от остаточных концентраций загрязняющих веществ

## Продолжение таблицы 3.1

<b>Электрохимический</b>	Процессы анодного окисления, катодного восстановления, электрокоагуляции, электрофлокуляции и электродиализа. Перечисленные процессы протекают на электродах при прохождении через очищаемую воду постоянного электрического тока.	Позволяет удалить тяжелые металлы практически до 100%; малые площади для оборудования;	большой расход электроэнергии; требования к содержанию взвешенных веществ, нефтепродуктов, жиров; в некоторых случаях добавляются реагенты; замена электродных блоков; высокая стоимость
--------------------------	--	--	--

Наиболее широко распространенным на практике методом основной очистки воды от металлов является реагентный метод, включающий в себя процессы нейтрализации, окислительно-восстановительные реакции, химическое осаждение. Реагентный метод позволяет очищать сточные воды в широких интервалах концентрациях металлов. Суть метода заключается в переводе металлов в малорастворимые формы (гидроксиды, карбонаты, сульфиды) за счёт повышения рН кислых стоков щелочными реагентами до рН гидратообразования металлов (таблица 3.2) [30]. Вслед за этим происходит осаждение, очищаемая вода фильтруется.

Таблица 3.2. Значения величин рН осаждения и растворения гидроксидов основных металлов

Формула гидроксида	Величина рН начала осаждения	Величина рН полного осаждения	Величина рН начала растворения
Al (OH) <sub>3</sub>	4,0	5,2	7,8
Cd (OH) <sub>2</sub>	8,2	9,7-10,5	-
Cu (OH) <sub>2</sub>	5,5	8,0-10,0	-
Fe (OH) <sub>2</sub>	7,5	9,7	13,5
Fe (OH)	2,3	4,1	14,0
Mn (OH) <sub>2</sub>	8,8	10,4	14,0
Zn (OH) <sub>2</sub>	6,4	8,0	10,5

При совместном осаждении нескольких металлов при одной и той же величине рН достигаются лучшие результаты, чем при осаждении каждого из металлов в отдельности [3]. При таком осаждении происходит адсорбция на поверхности твердой фазы ионов металлов.

Основными щелочными реагентами для нейтрализации кислых вод и удаления металлов являются гидроксиды и карбонаты кальция, магния, натрия, оксиды кальция и сульфиды [22, 60]. На горных предприятиях в качестве реагентов широкое применение могут найти известняк, как наиболее распространенный в природе и недорогой материал, или совместное использование известняка и извести [46]. Результаты исследований показывают, что использование дробленного природного известняка крупностью менее 0,25 мм при статическом режиме позволяет снижать концентрации меди и железа в модельном растворе на 50-60 %. При динамическом режиме пропускания модельного раствора через дробленый известняк степень очистки от меди и железа спустя 16 часов составляет 99,9 % и 69,7 % соответственно [74].

В России предприятиями чаще всего используется водная суспензия гидроксида кальция с некоторым количеством карбоната кальция, называемая известковое молоко. Приготовление извести является трудоемким процессом, связанным с большими материальными затратами.

Нейтрализацию кислых вод и осаждение металлов ведут обычно при рН 8,5-9,0, автоматически дозируя необходимое расчетное количество реагента не только для нейтрализации кислоты (серной, соляной, азотной, уксусной), но и с учетом выделения металлов в осадок. Так, например, для нейтрализации 1 м<sup>3</sup> кислых вод с содержанием серной кислоты 1 г/дм<sup>3</sup> необходимо (с учетом запаса) 857 г негашеной и 830,5 г гашеной извести, кальцинированной соды – 1620 г при 100 % активной части в указанных реагентах.

Во время нейтрализации и очистки сернокислых сточных вод при взаимодействии кальция и сульфат-иона образуется сульфат кальция (гипс), который при высоких концентрациях выпадает в осадок. Пересыщенные гипсом растворы могут приводить к зарастанию трубопроводов и аппаратуры, поэтому

при использовании кальцийсодержащих щелочных реагентов необходимо тщательно и длительно перемешивать очищаемую воду, транспортировать воду на высоких скоростях, а также использовать пластмассовые трубопроводы, которые необходимо промывать [46, 81].

Очистка слабокислых сточных вод (рН 5-6) с низким содержанием металлов проводят, используя более выгодный реагент - оксид магния. В отличие от использования оксида и карбоната кальция, в процессе нейтрализации образуется сульфат магния, который легко растворим и не образует корочек шлама [3].

При использовании в качестве реагента оксиды кальция, магния или натрия образуется взвесь, содержащая гидроксиды металлов, которая подвергается сгущению и уплотнению способом отстаивания. В некоторых случаях для ускорения процесса осаждения металлов применяют коагулянт и флокулянт. Коагулянтами могут выступать соли Fe, Al или их смеси. В качестве флокулянтов используют как природные (крахмал, эфиры), так и неорганические (диоксид кремния) и синтетические (полиакриламид) вещества. В результате использования коагулянтов и флокулянтов скорость осаждения может возрасти более чем в 20 раз [3].

Чаще всего осадок (шлам) в виде суспензии выводится в отвалы, что чревато контактом с поверхностными и грунтовыми водами и растворению образованных гидроксидов металлов с их последующим поступлением в компоненты окружающей среды. Для снижения экологической опасности используют методы химической фиксации, такие как ферритизация, силикатизация, отверждение осадка с использованием различных вяжущих составляющих, спекание [3].

Помимо общеизвестных реагентов для нейтрализации и очистки кислых сточных вод от металлов, различными авторами рассматривается возможность использования сапропеля и торфа. Авторами Косов В.И. и Баженова Э.В. запатентовано изобретение, относящееся к способу получения щелочного реагентного раствора, полученного в результате обработки торфа соляной кислотой, гидроксидом натрия и гранулирования торфа до размера фракций 5-

12 мм [44]. Возможность нейтрализации кислых сточных вод с помощью гуминовых кислот сапропеля и торфа изучалась авторами Гофман Я.А. и др. Суть исследования заключалась в получении малотоксичного шлама, состоящего из хелатных соединений металлов, который после обработки (фильтрование и сушка при 150 °С) прессуют в брикеты [43].

В настоящее время все более популярной становится идея использования отходов одного из производств для утилизации отходов или очистки производственных сточных вод другого. Так, в качестве альтернативных реагентов для нейтрализации кислых сточных вод рассматриваются различные отходы, в том числе вскрышная порода, шлаки и зола производств, благодаря содержанию достаточного количества оксида кальция и щелочей. Высокая дисперсность шлаков и золы позволяет использовать их в естественном состоянии, минуя измельчение. Значительно меньшая стоимость шлаков и золы по сравнению с известью обуславливает экономическую целесообразность их использования [88].

Авторами Кременецкая И.П. и др. была предложена многоступенчатая очистка модельного раствора подотвальных вод Гайского ГОКа гранулированным магнезиально-силикатным реагентом на основе серпентинитомагнезита – попутно добываемой природной породы месторождения магнезита – с последовательным осаждением металлов [56]. Химический состав данной породы характеризуется наличием оксидов магния (30,8 %), кальция (7,4 %), кремния (33,2 %), железа, алюминия и никеля. Для получения реагента порода подвергалась прокаливанию при температуре 650-700 °С с целью разрушения кристаллической решетки исходного минерала [56].

Известен способ химической очистки подотвальных вод от ионов железа и меди с использованием отходов производства с высоким содержанием карбоната кальция (91-95 %). Авторами предлагается заполнять фильтрационные секции гидротехнического сооружения дробленным отходом производства (крупностью 0,25-1,00 мм), через который далее пропускаются кислые подотвальные воды. Данный способ позволяет нейтрализовать стоки и снизить содержание меди

более, чем на 99 %, железа – более, чем на 94 %. Образованные в результате нейтрализации гидрокомплексы металлов осаждаются на песчано-гравийной смеси в пруду-отстойнике [45].

Авторами Шишелова Т.И. и Самусева М.Н. была изучена нейтрализующая способность золы-уноса различных углей, сжигаемых на ТЭЦ. В результате исследований установлено, то нейтрализующая способность золы-уноса одного из видов углей достигает 56,5-74,3 % [80].

Золошлаковые отходы сжигания твердых коммунальных отходов (ТКО) имеют силикатную основу и оксид кальция в своем составе, что позволяет рассмотреть их в качестве альтернативного реагента для нейтрализации сернокислых дренажных вод. Известны результаты использования золы от сжигания ТКО в составе композитной смеси с негашеной известью в соотношении 10:1 для нейтрализации и очистки модельного раствора от катионов алюминия, кадмия, хрома, меди и железа [46].

### **3.1 Проблема образования золы от сжигания ТКО и перспективы ее использования для нейтрализации и очистки кислых дренажных вод от металлов**

Проблема образования и утилизации коммунальных (бытовых) отходов стала актуальной еще в период Средневековья. С XIV века в странах Европы отходы принято было складировать на специальных территориях за городом. Законодательный характер обращение с отходами приняло после XIX века, благодаря чему стали внедряться технологии обращения с отходами: сжигание и сортировка [34]. Первый действующий мусоросжигательный завод был построен в Голландии в 1932 году, хотя сортировка и использование отходов началось еще в конце 18 века. В СССР в то время работала система раздельного сбора мусора, где каждый из вида отходов использовался в своем производстве [39].

В странах Европы порядка 20-50 % ТКО сжигаются с последующим энергетическим использованием. В Японии доля сжигаемых отходов составляет около 78 %, из которых 70 % используется для выработки энергии [94].

Использование энергетического потенциала ТКО возможно при обезвреживании отсортированных и неотсортированных отходов путем их сжигания на мусоросжигательных заводах либо специализированных установках.

В настоящее время в России интерес государства, промышленников и инвесторов к термическому обезвреживанию отходов заметно возрос, в связи с тем, что данный способ позволит уйти от хранения ТКО на полигонах, используя энергетический потенциал отходов в виде топлива. В связи с изменением нормативно-правовой базы России, в частности Федерального закона № 89 «Об отходах производства и потребления», получение энергии из ТКО является одним из приоритетных направлений развития системы обращения с отходами.

В России функционирует 243 мусороперерабатывающих завода, 50 мусоросортировочных комплексов и 10 мусоросжигательных заводов.

На московском мусоросжигательном заводе № 3 ТКО, поступившие на обезвреживание, предварительно взвешивают и проводят радиологический контроль, после чего разгружают в специальный бункер. Сжигание ТКО происходит на колосниковой решетке при температуре 850-1000<sup>0</sup>С. Образующиеся дымовые газы улавливаются и подвергаются трехступенчатой очистке. В результате сжигания из 1 тонны ТКО в среднем образуется около 250 кг шлаков, 26 кг отфильтрованной золы и 15 кг металлолома. Металлолом из шлака удаляется с помощью магнитного сепаратора. Так, на московском МСЗ № 3 в год образуется около 108 000 тонн золошлаковых отходов и 12 000 тонн отходов газоочистки.

На МСЗ № 4 г. Москва сжигание отходов происходит в топке ROWITEC, также после предварительного взвешивания и радиологического контроля. Очистка газов производится с помощью тканевого фильтра. Зольные отходы представляют собой летучую золу рукавного фильтра, золу от котла-утилизатора, циклонов и абсорберов. Проектом предусмотрена мощность 236 500 тонн ТКО в год.

Как говорилось в Главе 1, в рамках проекта «Чистая страна» после 2023 года ожидается запуск пяти заводов по переработке отходов в энергию, т.е.

обезвреживанию отходов путем сжигания. При работе пяти заводов будет образовываться 2 320 млн КВт\*ч электроэнергии в год [84]. К 2027 году ожидается строительство еще 25 мусоросжигательных заводов в 21 регионе страны.

Помимо мусоросжигательных заводов существуют установки термического обезвреживания отходов на крупных промышленных предприятиях, таких как ООО «МАСК» (на территории ОАО «Уфахимпром» в республике Башкортостан), ОАО «Вурнарский завод смесевых препаратов» (Чувашская республика), ПАО «Акрон» (Новгородская область), АО «Тольяттисинтез», ООО №СИБУР Тольятти» (Самарская область) и других.

Для термического обезвреживания отходов также существуют установки для утилизации различных отходов путем высокотемпературного контролируемого обезвреживания с последующей очисткой отходящих газов – инсинераторы (производительность 50-200 кг/час), крематоры и пиролизные установки. На 2020 год в России насчитывалось 1163 установки в 75 субъектах страны.

Основной проблемой термического обезвреживания ТКО является образование золошлаковой смеси – отходов IV класса опасности, согласно Федеральному классификационному каталогу отходов (ФККО), а точнее, ее утилизация. Шлаки от сжигания ТКО могут составлять до 21 % от общего количества поступивших несортированных отходов и до 3-5 % при отсутствии в них металлолома, стекла, песка и других несгораемых фракций. Более токсичная, чем шлаки, летучая зола, в среднем, составляет порядка 1-3 % от общего количества остатков.

Химический состав золы от сжигания ТКО зависит от характеристик исходных отходов. В среднем несортированные отходы ТКО (исключая крупногабаритные) содержат 26,3 % полимерных материалов, 23,7 % бумаги, 7,6 % металлического лома черного, 4,3 % дерева, 11,5 % отсева, 7,2 % стекла и 19,4 % пищевых отходов. Основными компонентами золы от сжигания ТКО

являются  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Также в состав шлаков и золы входят тяжелые металлы.

Золошлаковые отходы сжигания ТКО вывозятся и складировются, чаще всего нелегально, в виде отвалов и полигонов, под которые выделяются земельные участки, пригодные для различных нужд, в частности - сельского хозяйства. Такие техногенные массивы являются источником поступления тяжелых металлов в компоненты природной среды, в виду того, что в состав золы, помимо основных компонентов, входит большое количество растворимых в воде микропримесей, таких как соли свинца, цинка, ртути, особенно кадмия, хлоридов и фторидов.

Также в настоящее время золошлаковые отходы используют в качестве подстилающего слоя при создании дорожных покрытий, строительного песка и гравия, для производства цемента и бетона. Данное использование часто ограничено из-за неподходящих состава и свойств отходов, в том числе из-за выщелачивания из них тяжелых металлов. Использование рассматриваемых отходов для производства цемента может быть ограничено присутствием хлорид-ионов, которые способствуют ускорению коррозии стали, что снижает прочность железобетона [89, 95].

Для изучения возможности применения альтернативного реагента – золы от сжигания ТКО – для нейтрализации и очистки от металлов сернокислых сточных дренажных вод действующего хвостохранилища Сибайского ГОКа был исследован химический и фазовый состав трех образцов. Анализ проводился в Научном центре «Экосистема» с использованием методик ГОСТ Р 55879-2013, ГОСТ Р 54239-2018 (ИСО 23380:2013), ГОСТ 9326-2002 (ИСО 587-97) [16-18].

Химический состав образцов золы от сжигания ТКО проводился в Научном центре «Экосистема» методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии с использованием X-ray дифрактометра Shimadzu XRF-1800. Для этого из образцов с помощью ручного пресса дополнительно готовились таблетки. Результаты химического состава представлены в таблице 3.3.

Качественное определение фазового состава золы от сжигания ТКО проводилось в Центре коллективного пользования Санкт-Петербургского горного университета методом порошковой рентгеновской дифракции аналогично анализу донных отложений.

Таблица 3.3 – Химический состав образцов золы от сжигания ТКО

Наименование показателей, массовая доля	Единицы измерения	Результаты анализа		
		Образец 1	Образец 2	Образец 3
Оксид кремния	%	27,9	10,76	27,57
Оксид кальция		23,8	20,45	25,19
Оксид магния		2,50	2,99	2,43
Оксид натрия		2,74	1,29	1,82
Оксид калия		2,05	3,96	0,92
Оксид алюминия		8,26	14,65	11,49
Оксид железа		3,84	2,82	10,56
Цинк		мг/кг	1462	2421
Марганец	621		440	560
Медь	382		353	369
Кадмий	13		Менее 0,05	9,82
Сера	%	0,82	1,84	0,45
Хлор		5,28	0,28	1,84

По результатам анализа фазового состава отходов было установлено, что основными компонентами отходов являются карбонат кальция и силикаты (Приложение В). Результаты химического анализа подтвердили, что основными химическими элементами являются кремний, кальций, железо и алюминий, а также, что зола содержит в своем составе тяжелые металлы: цинк – до 5,5 тыс. мг/кг, медь – до 400 мг/кг, марганец – до 620 мг/кг, кадмий – до 13 мг/кг.

Содержание водорастворимых форм металлов в золе от сжигания ТКО проводилось для дальнейшей оценки влияния их складирования на открытой местности или при использовании напрямую для дорожного строительства при

контакте с атмосферными осадками на компоненты природной среды. Для этого готовились водные вытяжки с соотношением компонент: дистиллированная вода 1:5. После чего суспензии перемешивались и фильтровались через фильтр «синяя лента». Количественное содержание металлов определялось методом атомно-эмиссионной спектрометрии аналогично анализу водорастворимых форм металлов в донных отложениях. Результаты анализа представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Процентное содержание водорастворимой формы металлов в золе от сжигания ТКО относительно общего содержания

Наименование	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Al <sup>3+</sup>	19,36	10,93	13,90
Cd <sup>2+</sup>	0,08	0,07	0,10
Cu <sup>2+</sup>	0,19	0,21	0,20
Fe <sub>общ</sub>	0,04	0,01	0,001
Mn <sup>2+</sup>	0,04	0,03	0,03
Zn <sup>2+</sup>	0,28	0,23	0,17

По результатам анализа видно, что катионы алюминия переходят в раствор интенсивнее других металлов, его водорастворимая форма составляет от 10 до 20 % от общего содержания в золе. Водорастворимые формы катионов меди и цинка составляют в среднем 0,2 % от общего содержания.

Таким образом, при складировании 1 тонны золы от сжигания ТКО в компоненты природной среды может мигрировать порядка 0,85 кг кадмия, 0,35 кг марганца, 0,05 кг железа, 2 кг меди, 2,2 кг цинка и до 200 кг алюминия, что негативно скажется на компонентах природной среды.

Несмотря на общее содержание CaO (20-25 % от общей массы золы от сжигания) для нейтрализации сернокислых вод и осаждения гидроксидов металлов необходимо знать основную характеристику предлагаемого реагента - содержание активного оксида кальция.

Далее опыты проводились с двумя образцами (2 и 3), крайними по содержанию общего CaO.

Определение содержания активного оксида кальция в золе от сжигания ТКО проводилось аналогично методу испытаний для извести строительной [15]. Образцы предварительно квартовались и растирались в ступке до полного прохождения через сетку № 008 (рисунок 3.1).



Рисунок 3.1 – Пробоподготовка образцов

Сахаратный метод определения активного оксида кальция заключается в титровании образующегося при взаимодействии  $\text{CaO}$  с раствором сахарозы растворимого сахарата кальция, в то время как другие оксиды образуют осадки. Согласно методики, количество активного оксида кальция вычисляется при первом исчезновении окраски раствора. Опытным путем было отмечено, что при оставлении раствора после первого исчезновения окраски происходит возвращение розовой окраски, что говорит о пролонгированном высвобождении активного оксида кальция из золы от сжигания ТКО. Результаты содержания активного  $\text{CaO}$  в момент времени представлены на рисунке 3.2.

На графике можно отметить момент времени 35 минут для обоих образцов, где достигается максимальное значение содержания активного  $\text{CaO}$ , после чего рост концентрации в растворе незначителен. Для образца 2 содержание активного оксида кальция составляет 5,8 %, для образца 3 – 7,8 %.

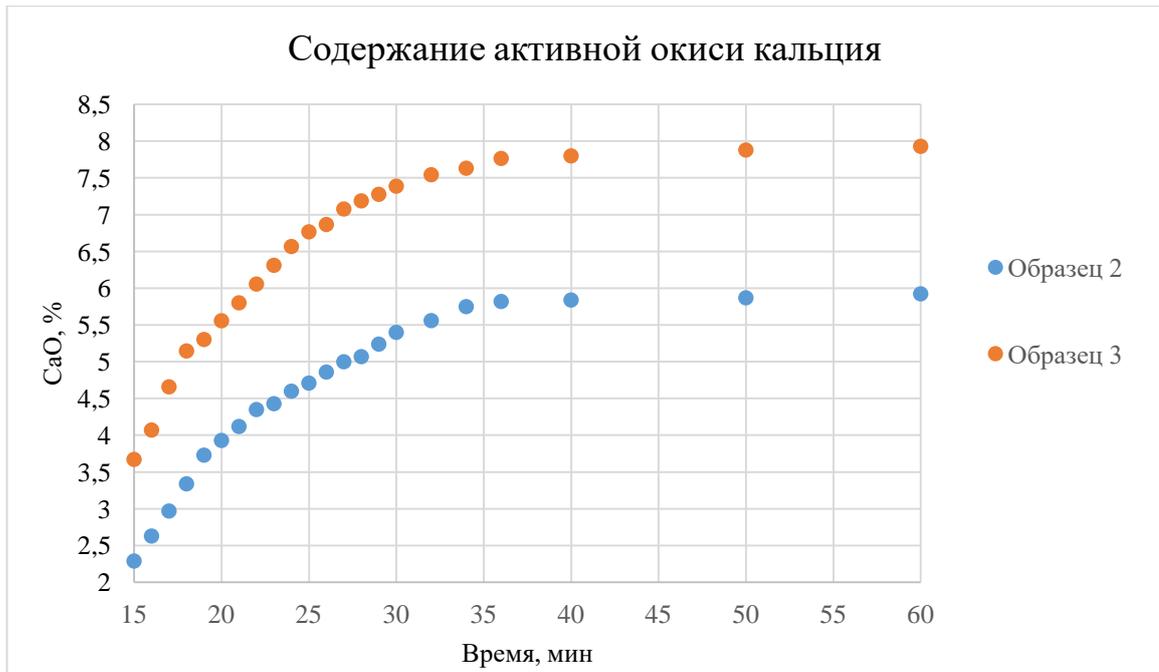


Рисунок 3.2 – Содержание активного оксида кальция в момент времени

При нейтрализации сернокислых вод гашеной известью, рекомендуется ее добавление в виде известкового молока с концентрацией активного оксида кальция 5-10 % с продолжительностью контакта для незагрязненных кислых стоков 15 минут, и не менее 30 минут для вод, содержащих ионы металлов [7, 24, 62].

Таким образом, использование золы от сжигания ТКО с содержанием активного оксида кальция 5-8 % предположительно допустимо в исходном виде для нейтрализации сернокислых вод, загрязненных ионами металлов, при времени контакта более 30 минут. Исходя из полученных результатов, образцы 2 и 3, предлагаемые как альтернативные реагенты для нейтрализации кислых дренажных вод и осаждения металлов, подходят под ключевые требуемые условия.

Как было отмечено ранее, золы от сжигания ТКО содержат значительное количество металлов. При контакте с водой может происходить вымывание ионов металлов, которые также будут взаимодействовать с CaO и осаждаться в виде гидроксидов металлов. Таким образом, несмотря на изученность реагентного метода очистки сточных вод, наличие и применимость методик по расчету

необходимой дозы реагента по активному веществу, подбор условий для нейтрализации определенных вод и осаждения характерных для этой воды металлов с применением конкретного реагента, необходимо осуществлять эмпирическим путем. Дозы реагентов, далее, корректируются в период непосредственной наладки и эксплуатации сооружений.

## **3.2 Моделирование очистки сернокислых сточных дренажных вод хвостохранилища золы от сжигания ТКО в лабораторных условиях**

### **3.2.1 Установление диапазона значения pH**

Для установления диапазонов pH совместного осаждения ионов металлов из модельного раствора до минимально возможных значений были проведены эксперименты.

Модельный раствор, приближенный по составу к кислым дренажным водам хвостохранилища с pH 3,8-4,0, готовился из реактивов путем растворения в дистиллированной воде. Концентрации металлов в модельном растворе приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Состав модельного раствора

Элементы	Al	Cd	Cu	Fe	Mn	Zn
Концентрация, мг/дм <sup>3</sup>	150	0,15	17,5	31,1	35,1	121

Водородный показатель модельного раствора объемом 100 см<sup>3</sup> корректировался с помощью раствора гидроксида аммония до заданных значений pH, после чего методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой с использованием атомно-эмиссионного спектрометра Shimadzu ICPE-9000 определялось остаточное содержание металлов в растворе. Контроль pH осуществлялся с помощью pH-метра. График осаждения гидроксидов металлов в зависимости от pH модельного раствора представлен на рисунке 3.3.

Из графика видно, что осаждение Al начинается при более низких значениях pH относительно других металлов. Максимально низкое остаточное содержание Al в растворе фиксируется при pH 6-8, после чего наблюдается повышение концентрации, что говорит о растворении соединений металла. Это подтверждается литературными данными [41].

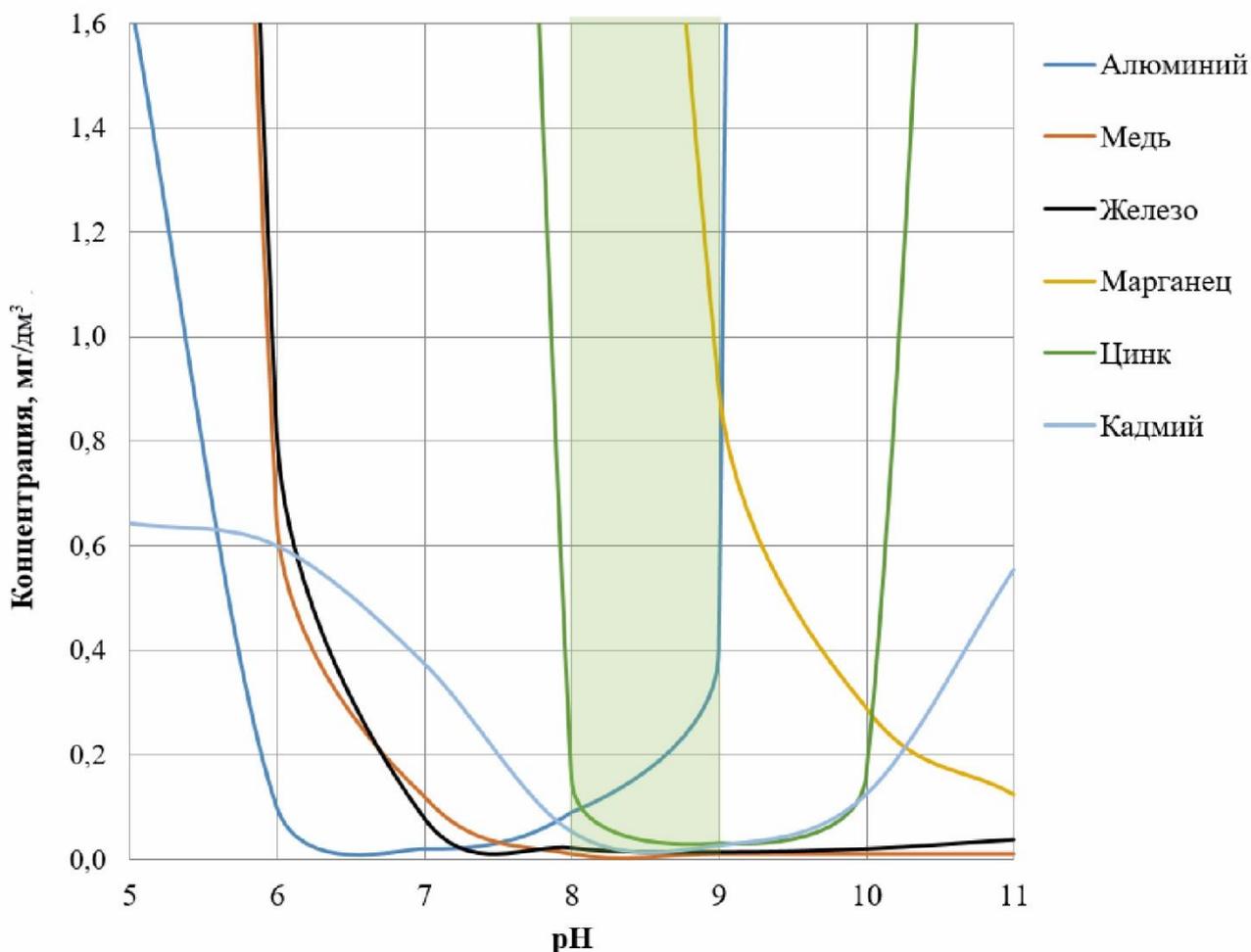


Рисунок 3.3 - График осаждения гидроксидов металлов в модельном растворе

При исходной концентрации Mn в модельном растворе максимально возможно осаждение металла происходит при  $\text{pH} > 10$ , что также соответствует литературным данным. Осаждение Cd, Cu, Fe и Zn до минимальных возможных концентраций происходит при pH 8-10 аналогично справочным данным. Исходя из крайних диапазонов осаждения ионов металлов из модельного раствора (Al, Mn), оптимальным для достижения наибольшей эффективности осаждения каждого иона металла является значение pH 8-9.

### 3.2.2 Определение дозы реагента и времени равновесного значения рН

Для определения количества золы от сжигания ТКО с содержанием активного оксида кальция в диапазоне 5-8 % для нейтрализации кислого модельного раствора и установления оптимального времени стабилизации рН нейтрализованного раствора были взяты различные навески образца с содержанием активного СаО 5 % и образца с содержанием активного СаО 8 %. Навески помещались в стаканы с модельными растворами объемом 100 см<sup>3</sup> каждый и устанавливались на магнитную мешалку. Контроль рН осуществлялся с помощью рН-метра.

Графики установления времени равновесного значения рН 8-9 для образца с содержанием активного СаО 5 % и образца с содержанием активного СаО 8 % представлены на рисунке 3.4.

Из графиков видно, что для установления значения рН модельного раствора объемом 100 см<sup>3</sup> требуется более 2 г образца 2, при этом при увеличении навески свыше 3 г происходит превышение допустимого диапазона рН 8-9. Таким образом, оптимальной дозой вносимого реагента в виде образца с содержанием активного СаО 5 % для установления требуемого диапазона рН и не превышения его верхнего значения является 2-2,5 грамма. Для образца с содержанием активного СаО 8 % оптимальная доза – 1,0-1,5 грамма.

Для обоих образцов требуемое время контакта составляет минимум 20 минут, при этом стабилизация рН происходит после 30 минут.

### 3.2.3 Оценка эффективности очистки модельного раствора от металлов и взвешенных веществ

Для определения эффективности очистки воды от катионов алюминия, кадмия, меди, железа, марганца и цинка реагентным методом с использованием золы от сжигания ТКО были проведены следующие лабораторные эксперименты.

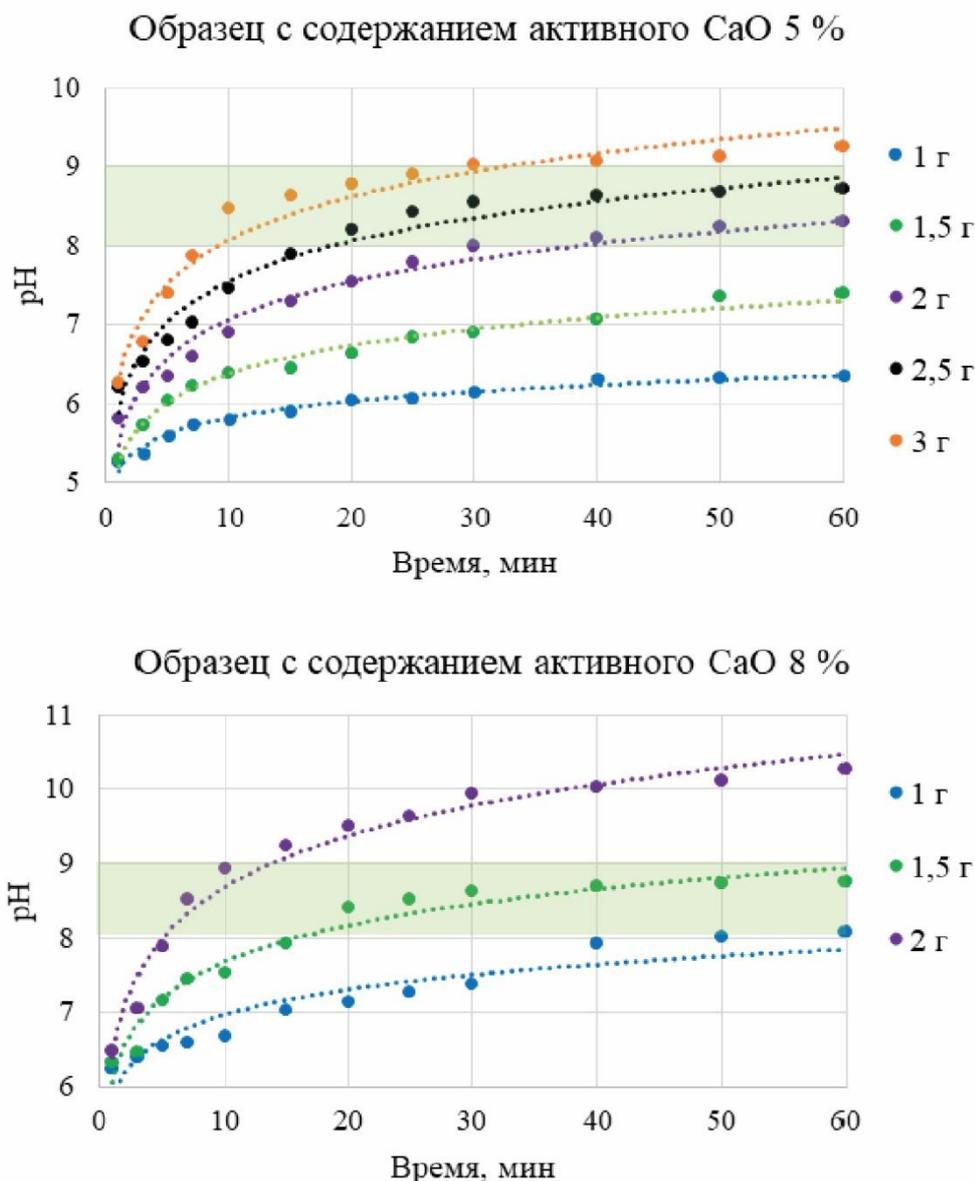


Рисунок 3.4 – Зависимость pH модельного раствора от времени контакта и массы навески

Пропорционально увеличенные оптимальные дозы образцов с содержанием активного СаО 5 % и 8 % смешивались с модельным раствором объемом 2 дм<sup>3</sup> на магнитной мешалке в течении 30 минут (оптимальное время контакта). После чего суспензии фильтровались с помощью вакуумного насоса. Полученные осадки высушивались в сушильном шкафу при температуре 105 °С до постоянной массы для дальнейшего анализа.

В фильтратах определяли остаточное содержание катионов металлов, кальция и магния с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно

связанной плазмой Shimadzu ICPE-9000. Концентрации сульфатов и хлоридов определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с помощью жидкостного хроматографа Shimadzu LC-20 Prominence [31]. Эффективность очистки модельного раствора от катионов металлов определялась по формуле 3.1:

$$\eta = \frac{C_{\text{исх}} - C_{\text{ост}}}{C_{\text{исх}}} \cdot 100 \% \quad (3.1)$$

где  $C_{\text{исх}}$  – исходная концентрация катиона металла в растворе, мг/дм<sup>3</sup>;

$C_{\text{ост}}$  – остаточная концентрация катиона металла в растворе после контакта с реагентом, мг/дм<sup>3</sup>.

Результаты расчетов эффективности очистки модельного раствора от катионов металлов представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Эффективность очистки модельного раствора от катионов металлов

Катионы	Al	Cd	Cu	Fe	Mn	Zn
Образец с содержанием активного СаО 5 %	> 99	91	> 99	> 99	91	> 99
Образец с содержанием активного СаО 8 %	> 99	93	> 99	> 99	91	> 99

Из таблицы 3.4 видно, что максимальная эффективность очистки достигается по катионам алюминия, меди, железа и цинка и составляет более 99 %. Катионы кадмия осаждаются с помощью реагента с эффективностью 91-93 %, катионы марганца – 91 %.

При повторном использовании очищенных вод в технологическом процессе или сбросе в водные объекты необходимо снизить содержание взвешенных веществ до минимально возможного. На содержание взвешенных веществ наибольшее влияние оказывает дисперсность золы от сжигания ТКО, используемых в качестве реагента, а также образующиеся гидроксиды металлов.

Для увеличения скорости и эффективности осаждения взвешенных веществ из воды применяются методы коагуляции и флокуляции. В качестве коагулянтов обычно используют сульфат алюминия, сульфат железа, хлорид железа и их смеси. Коагулянты образуют в воде хлопья гидроксидов металлов. Перечисленные соли присутствуют в исходном модельном растворе и могут

выступать в роли коагулянта, образуя гидроксиды алюминия и железа, которые дополнительно улавливают и соосаждают гидроксиды кадмия, меди, марганца и цинка.

Для интенсификации процесса образования хлопьев алюминия и железа и ускорения скорости их осаждения за счет слипания коллоидных частиц используют флокулянты, наиболее популярным из которых является полиакриламид. Ранее на очистных сооружениях предприятия также использовался полиакриламид.

Определение оптимальной и эффективной дозировки флокулянта проводилось в лабораторных условиях путем ввода различных объемов флокулянта и дальнейшего определения остаточного содержания взвешенных веществ в определенный промежуток времени.

В лабораторные стаканы объемом  $250 \text{ см}^3$  помещался исходный модельный раствор, в каждый из которых добавлялась навеска образца с содержанием активного СаО 5 % или образца с содержанием активного СаО 8 % золы от сжигания ТКО. Масса навески бралась исходя из объема модельного раствора и оптимальной дозировки каждого из образцов для обеспечения диапазона рН 8-9 и осаждения гидроксидов металлов. Далее стаканы устанавливались на магнитную мешалку, где перемешивались в течение 30 минут для протекания реакции нейтрализации и образования гидроксидов металлов.

По истечении указанного времени в растворы вводился флокулянт полиакриламид с концентрацией 0,1 % в следующих объемах: 0,25, 0,5, 0,75, 1,0, 2,0, 3,0  $\text{см}^3$ . После перемешивания флокулянта с раствором осадок отстаивался в течение 15 минут. Дальнейший отбор проб для определения содержания взвешенных веществ проводился на одной и той же высоте относительно уровня пола. Измерение взвешенных веществ проводилось с помощью портативного многопараметрического измерителя мутности и удельной концентрации ионов Нанпа. Графики зависимости концентрации взвешенных веществ от времени осаждения и количества внесенного флокулянта представлены на рисунке 3.5.

Исходная концентрация взвешенных веществ в растворе при использовании образца 1 составляет 200 мг / дм<sup>3</sup>, образца 3 – 147 мг / дм<sup>3</sup>. Без добавления флокулянта содержание взвешенных веществ в растворе с образцом 2 и образцом 3 спустя 2 часа отстаивания снижается до 96 и 58 мг / дм<sup>3</sup> соответственно.

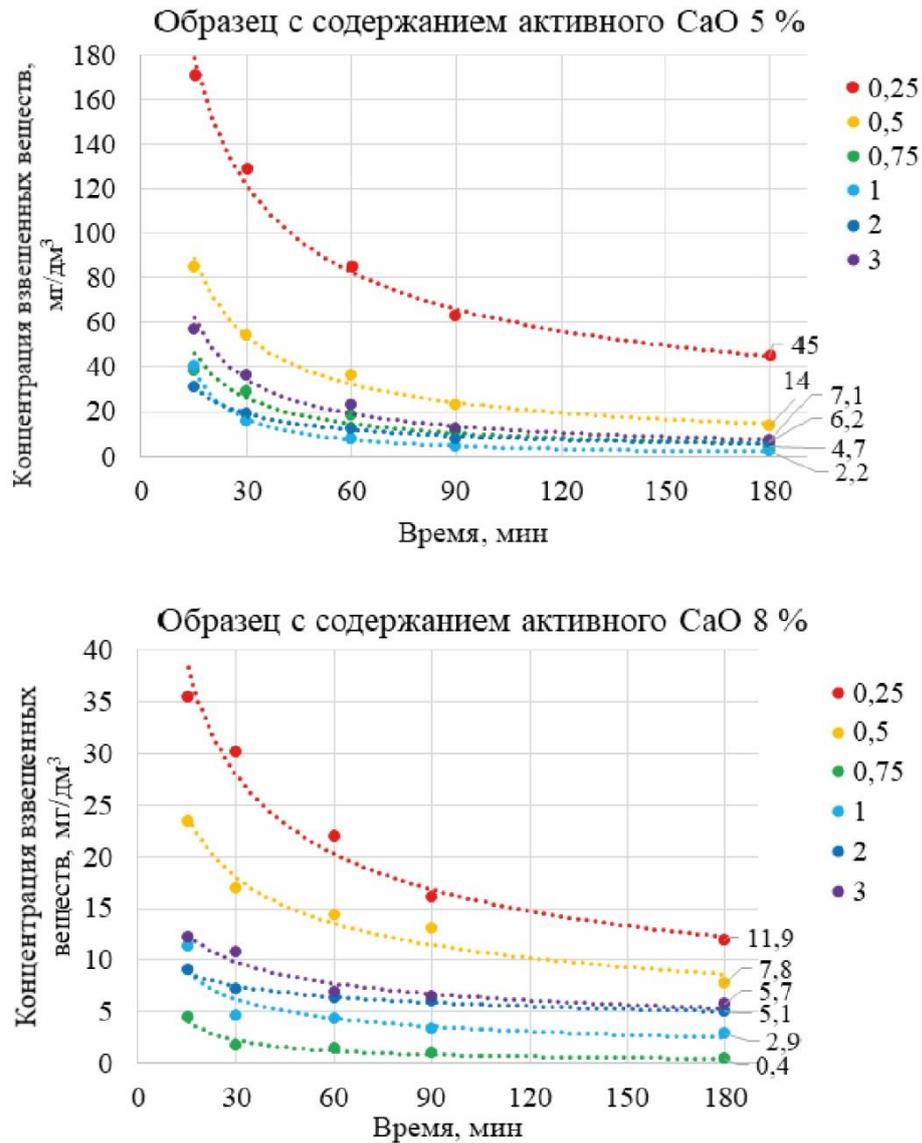


Рисунок 3.5 – Кинетика осаднения взвешенных веществ в зависимости от дозы флокулянта

Из графиков зависимости концентрации взвешенных веществ от времени видно, что минимальная концентрация взвешенных веществ для обоих образцов достигается при добавлении флокулянта в дозировке 0,75-1 см<sup>3</sup> на 250 см<sup>3</sup>

исходного раствора ( $3-4 \text{ дм}^3 / \text{м}^3$ ) при последующем отстаивании в течение 2 часов, что является стандартной продолжительностью для производственных отстойников. Эффективность очистки в таком случае достигает 97-99 % относительно начального содержания взвешенных веществ в растворе при снижении их концентрации до  $0,4-4,7 \text{ мг} / \text{дм}^3$ , в то время как эффективность осаждения взвешенных веществ без добавления флокулянта спустя 2 часа составляет лишь 52 и 60 %.

### 3.2.4 Химический состав осадка и оценка степени вымываемости металлов

Как говорилось ранее, основным недостатком реagentного метода очистки является образование шлама – осадка после нейтрализации и осаждения гидроксидов металлов из сернокислых сточных вод.

Определение химического состава проводилось в Научном центре «Экосистема» с применением метода методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии с использованием X-ray дифрактометра Shimadzu XRF-1800. Результаты анализа представлены в таблице 3.7. По результатам химического анализа осадка видно, что в осадке происходит накопление металлов, поступающих из загрязненных вод.

Таблица 3.7 - Процентное содержание металлов в осадке

Наименование показателей	Единицы измерения	Результаты анализа	
		Образец (СаО 5 %)	Образец (СаО 8 %)
Массовая доля оксида алюминия	%	15,65	16,55
Массовая доля оксида железа	%	5,16	12,86
Массовая доля цинка	мг/кг	15 487,7	15 246,9
Массовая доля меди	мг/кг	2 240	3 120
Массовая доля кадмия	мг/кг	Менее 0,05	9,88
Массовая доля марганца	мг/кг	5 035	11 464

Для того чтобы исключить загрязнение окружающей среды металлами от складирования и утилизации шламов при воздействии на них атмосферных

осадков (рН 4,5-6) и шахтных вод (рН 4), необходимо провести оценку степени вымываемости металлов при данных рН.

Осадки, высушенные в сушильном шкафу до постоянной массы, измельчались в фарфоровой ступке. Навески осадков помещались в лабораторные стаканы в соотношении 1:25 с экстрагирующими растворами в виде дистиллированной воды и разбавленной серной кислоты. Растворы с навесками перемешивались в течении часа, после чего отфильтровывались через фильтр «синяя лента» и анализировались на содержание металлов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой с использованием атомно-эмиссионного спектрометра Shimadzu ICPE-9000. Каждый опыт был проведен дважды для усреднения результатов.

Степень вымываемости (%) катионов металлов из осадков определялась по формуле 3.2.

$$\alpha = \frac{C_{\text{общ}} - C_{\text{р-р}}}{C_{\text{общ}}} \quad (3.2)$$

где  $C_{\text{общ}}$  – общее содержание катиона металла в осадке, %;

$C_{\text{р-р}}$  – количество катиона металла, перешедшего в раствор, %.

Результаты расчетов степени вымываемости катионов металлов из осадков представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 - Степень вымываемости катионов металлов из осадков

Реагент	рН	Степень вымываемости, %					
		Al	Cd	Cu	Fe	M	Zn
<b>Образец (СаО 5 %)</b>	6-7	0,42	отсутствует	0,018	0,0002	0,0075	0,0007
	4	1,67	отсутствует	0,022	0,0001	0,0085	0,0007
<b>Образец (СаО 8 %)</b>	6-7	0,49	отсутствует	0,020	0,0003	0,0005	0,0002
	4	1,61	отсутствует	0,020	0,0002	0,0002	0,0002

По результатам полученной степени вымываемости катионов металлов из осадков видно, что катионы алюминия интенсивнее переходят в раствор, чем другие металлы, в особенности, при влиянии более кислых вод. На вымываемость

остальных катионов металлов рН экстрагирующего раствора не оказывает существенного влияния.

Таким образом, в среднем, из осадка в раствор переходит около 0,02 % меди, 0,0002 % железа, 0,004 % марганца, 0,0005 % цинка и менее 1,7 % алюминия, что меньше вымываемости металлов из исходной золы от сжигания ТКО в 34 раза для Al, 9,8 раз для Cu, 9,5 раз для Fe, 180 раз для Mn и 1400 раз для Zn. Это говорит о возможности безопасного складирования и утилизации золы от сжигания ТКО после их использования в качестве реагента для нейтрализации и осаждения металлов из сернокислых загрязненных сточных вод.

При этом, в общем, после нейтрализации и осаждения гидроксидов металлов из сернокислых дренажных вод хвостохранилища в осадке сохраняется порядка 15 кг цинка, 2-3 кг меди, до 45 кг железа, до 12 кг марганца, порядка 67 кг алюминия и до 0,009 кг кадмия на 1 тонну осадка.

Проведенные лабораторные исследования подтверждают возможность использования реагентного метода с использованием золы от сжигания ТКО с содержанием активного CaO 5-8 % для очистки сернокислых дренажных вод хвостохранилища Сибайского ГОК от катионов алюминия, кадмия, меди, железа, марганца и цинка с последующей возможной утилизацией осадка без вреда окружающей среде и с сохранением полезных компонентов.

### **3.3 Выводы к третьей главе**

1. В настоящее время в России актуальной является идея термического обезвреживания ТКО с целью использования энергетического потенциала отходов и сокращения площадей, выделяемых под полигоны открытого хранения отходов.

2. Основная проблема сжигания ТКО является образование содержащей водорастворимые формы тяжелых металлов золошлаковой смеси, пути утилизации которой в настоящее время не являются экологически безопасными.

3. Проведенными исследованиями доказано, что для очистки сернокислых вод, загрязненных металлами, применение золы от сжигания ТКО с

содержанием активного оксида кальция 5-8 % с достижением равновесного значения рН 8-9 в течение 30 минут позволяет достичь эффективности очистки по Al, Cu, Fe, Zn более, чем 99 %, Cd – 91-93 %, Mn – 91 %.

4. Определение кинетики осаждения взвешенных веществ показало, что использование полиакриламида в объеме 3-4 см<sup>3</sup> на 1 дм<sup>3</sup> очищаемой воды и отстаивании взвеси в течение 2 часов, позволяет достичь 97-99 % эффективности. при снижении исходной концентрации с 150-200 мг/дм<sup>3</sup> до 0,4-4,7 мг/дм<sup>3</sup>.

5. Изученная в лабораторных условиях степень вымываемости металлов из осадка реагентной очистки сточных дренажных вод хвостохранилища ниже, чем из исходной золы от сжигания ТКО в  $n \cdot 10^{1-3}$  раз, что говорит о возможности безопасного складирования и утилизации золы от сжигания ТКО после их использования в качестве реагента для нейтрализации и осаждения металлов из сернокислых загрязненных сточных вод.

6. Использование золы от сжигания ТКО для нейтрализации и осаждения гидроксидов металлов из сернокислых дренажных вод хвостохранилища Сибайского ГОК позволяет сохранить в 1 тонне осадков порядка 15 кг цинка, 2-3 кг меди.

## **ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕКИ КАРАГАЙЛЫ**

Комплексное мероприятие по ликвидации последствий загрязнения р. Карагайлы в общем виде состоит из двух ключевых моментов: предотвращения попадания сернокислых дренажных вод хвостохранилища Сибайского ГОКа в природные водные ресурсы и вторичного загрязнения речных вод в результате миграции металлов из техногенных наносов в донных отложениях.

К основным этапам осуществления предлагаемого средозащитного мероприятия относятся:

- 1) каптирование и отвод сернокислых дренажных вод хвостохранилища для дальнейшей очистки;
- 2) очистка воды с использованием золы от сжигания ТКО;
- 3) высушивание осадка и его дальнейшая утилизация;
- 4) изъятие, обезвоживание и утилизация техногенных наносов в донных отложениях реки Карагайлы.

При разработке технологического решения по ликвидации последствий загрязнения реки учитывалась возможность использования имеющихся технологических условий, что позволит минимизировать затраты на строительство специальных очистных сооружений. Также учитывалось наличие инвестиций г. Сибай на проект «Реконструкции сооружений по очистке шахтных и подотвальных вод Сибайского и Камаганского месторождений».

### **4.1 Каптирование и отвод сернокислых дренажных вод хвостохранилища для дальнейшей очистки**

В настоящий момент сбор дождевых и талых вод происходит в нагорной канаве, расположенной с южной стороны хранилища, после чего по нагорным канавам с восточной и западной частей хвостохранилища воды попадают в р. Карагайлы или на рельеф. Кислые фильтрационные воды поступают в

дренажную канаву на северной стороне, где происходит их накопление и сток в р. Карагайлы.

Во избежание данной ситуации предлагается оформить дренажную канаву на северной части хвостохранилища аналогично имеющимся нагорным канавам, а также обеспечить временное накопление воды для дальнейшего отвода на очистные сооружения (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Предлагаемое расположение водоотводного канала и накопителя воды

Так как имеющаяся дренажная канава имеет типоразмеры, необходимые для отвода воды, но в настоящий момент канава размывта и заросла травой, то основной задачей является очистка канавы путем планирования требуемых откосов. Для предотвращения повторного размывта предлагается крепление дна и откосов канавы щебнем фракции св.20 до 40 мм ГОСТ 8267-93, с маркой по прочности не ниже 400, по морозостойкости не ниже F150 (слоем 0,20 м), аналогично используемому для устройства нагорной канавы 4 отсека. Места перехода через технологический проезд и отведение вод в накопитель воды предлагается выполнить из железобетонных труб.

Для планировки откосов предлагается использовать экскаватор-планировщик, имеющийся на предприятии. Укладка щебня производится вручную.

С учетом протяженности водоотводного канала (3 500 м), ширины (1,5 м) и планируемого слоя снимаемых отложений (0,2 м) объем извлекаемого грунта составит 1 050 м<sup>3</sup>. Извлекаемый грунт используется для планирования откосов, поэтому его дальнейшая транспортировка не предусматривается. Объем щебня на крепление дна и откосов канавы составит 2 100 м<sup>3</sup> или 10 500 м<sup>2</sup>.

Средняя производительность экскаватора-планировщика составляет 100 м<sup>3</sup>/час, тогда на планировку водоотводного канала потребуется около 11 часов. Средний расход дизельного топлива составляет 7 л/час, тогда общие затраты топлива за 11 часов составят 77 литров.

Изоляцию грунта от воздействия загрязненных дренажных вод предлагается выполнять в виде геомембраны. С учетом длины реконструируемой канавы и высоты стенок площадь покрытия составит около 7 000 м<sup>2</sup>.

Для организации двух технологических переездов и слива в накопитель воды потребуется 3 трубы диаметром 800 мм, длиной 5 м. Для укладки труб предлагается использовать технику, а именно автокраны грузоподъемностью 20 т (КС 4574), имеющиеся на предприятии.

Для накопления воды и дальнейшего осуществления транспортировки до очистных сооружений предприятия, предлагается организация накопителя воды в виде пруда, дно и стенки которого подготовлены и изолированы от загрязненных вод геомембраной.

Максимальный объем, поступающих загрязненных вод составляет около 10 672 м<sup>3</sup> в сутки (в период половодья). Максимальная длительность периода половодья – 30 суток, тогда общий объем воды за данный период составит 320 169 м<sup>3</sup>. Максимальная производительность комплекса очистных сооружений составляет 10 200 м<sup>3</sup>/сут или 306 000 м<sup>3</sup> за период половодья. С учетом откачки суточного объема воды на очистные сооружения максимальный объем накопленных за период половодья воды составит 14 169 м<sup>3</sup>. Таким образом типоразмер накопителя воды с запасом по объему 5 % составит 70×70×3,04 м<sup>3</sup> (длина×ширина×высота). Исходя из площади покрытия выбранного накопителя воды, расход геомембраны составит порядка 5 752 м<sup>2</sup>.

Для организации пруда-накопителя предлагается использовать технику, с помощью которой производится организация 4 отсека хвостохранилища, в том числе нагорной канавы, технологических переездов и т.д.: экскаватор с ковшом емк. 0,5 м<sup>3</sup>, самосвал БелАЗ-75405.

Для извлечения грунта накопителя объемом 14 900 м<sup>3</sup> при производительности одного экскаватора 22 м<sup>3</sup>/час с учетом рабочей смены машиниста равно 8 часов и двухсменного рабочего дня, запланированные работы будут проведены за 15 дней при работе 3 экскаваторов.

Для экскаватора расход топлива при стандартных условиях составляет 175 л на 1 000 м<sup>3</sup> извлекаемого грунта. Тогда общий расход топлива на извлечение грунта экскаваторами составит 2 608 л.

Расстояние, по которому будет происходить транспортировка грунта до временного отвала, составляет 1 км. Максимальная скорость самосвала БелАЗ составляет 50 км/час. Грузоподъемность БелАЗа составляет 30 тонн, с учетом средней плотности грунта (2 т/м<sup>3</sup>), объем грунта, вмещаемый одним самосвалом составит 15 м<sup>3</sup>. С учетом всех перечисленных показателей, примем, что для попеременной загрузки грунта 3 экскаваторами потребуется 6 единиц самосвалов.

Расход топлива на 100 км для БелАЗ 75405 составляет 100 л. Для перевозки 14 900 м<sup>3</sup> грунта каждому из шести БелАЗов необходимо сделать 166 рейсов в одну и 166 рейсов в другую сторону, исходя из этого общее количество потребляемого топлива составит 1 992 л.

Дальнейшая транспортировка накопленной воды осуществляется с использованием имеющегося трубопровода и насосных станций предприятия.

#### **4.2 Модернизация очистных сооружений и обезвоживание осадка**

Осветленная вода хвостохранилища Сибайского ГОК используется в условиях подразделения обогатительной фабрики предприятия, остальные подразделения предприятия для технологических нужд (реагентное отделение очистных сооружений, гидрозатворы, охлаждение оборудования и т.д.)

используют воду реки Худолаз. Средний объем забираемой речной воды составляет 600 000 м<sup>3</sup> в год.

Годовой объем стока дренажных вод хвостохранилища составляет около 700 тыс. м<sup>3</sup>, очистка которого до требуемых показателей технической воды позволит использовать 600 тыс. м<sup>3</sup> на нужды предприятия, исключая забор речной воды.

Минимальные требования к воде, пригодной для технологических нужд отражены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Требования к содержанию загрязняющих веществ в технической воде

Показатели	Ед. измерения	Значения показателей для воды
рН		6-9
Минерализация	мг/дм <sup>3</sup>	< 3000
Алюминий		< 0,5
Железо		< 0,3
Кадмий		< 0,01
Медь		< 1,0
Марганец		< 5,0
Цинк		< 5,0
Общая жесткость		мг-экв/дм <sup>3</sup>
Сульфаты	мг/дм <sup>3</sup>	< 2000
Хлориды		< 350
Взвешенные вещества		< 5
Нефтепродукты		< 1

Для снижения показателей до требуемых планируется использование аппаратной базы временно недействующих очистных сооружений предприятия с заменой известкового молока на реагент в виде золы от сжигания ТКО.

Технология комплексной очистки воды от нефтепродуктов, взвешенных веществ и металлов представлена на рисунке 4.2.

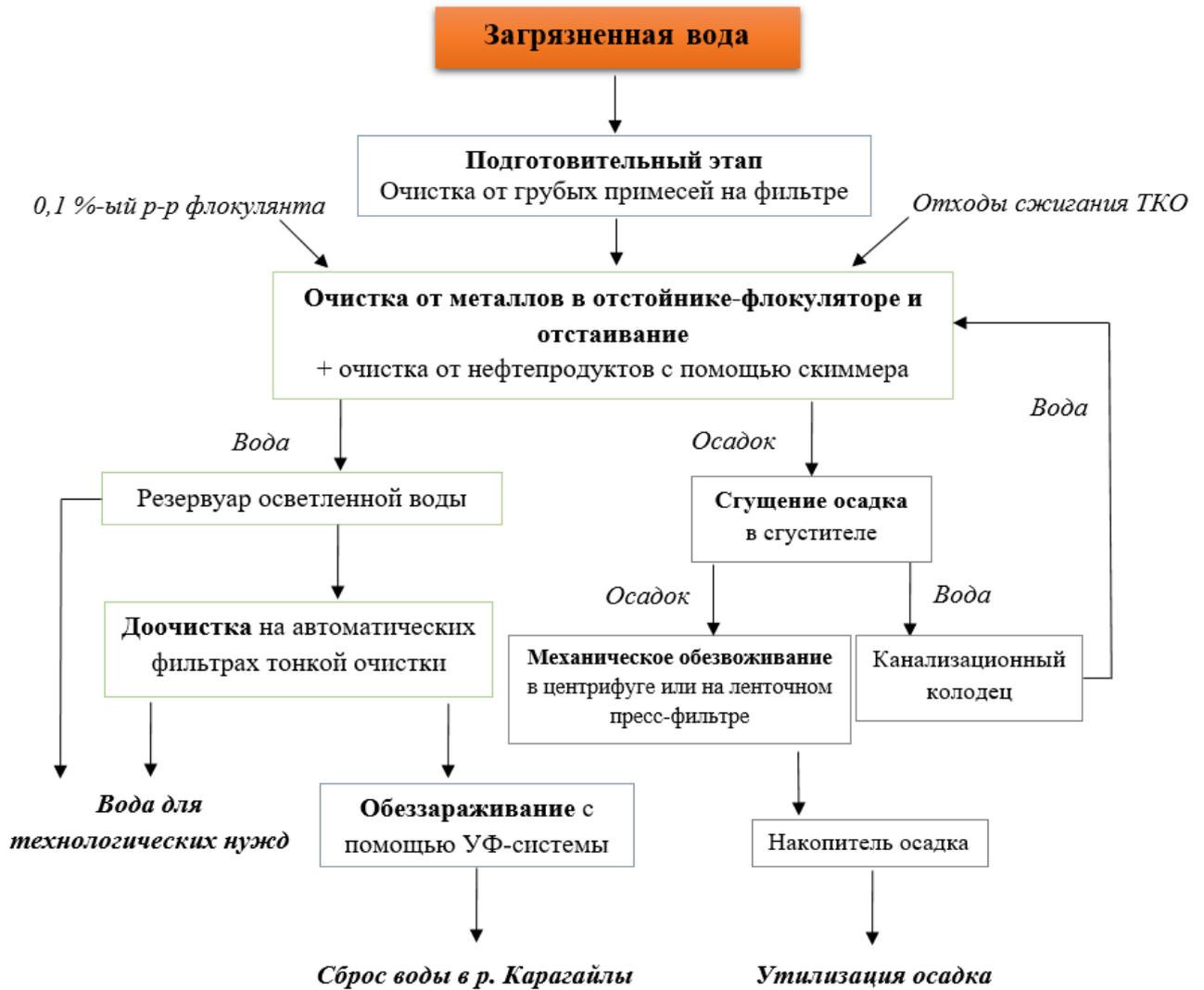


Рисунок 4.2 – Схема комплексной очистки сточных дренажных вод хвостохранилища

Подготовительный этап заключается в механической очистке воды от грубых примесей на автоматическом фильтре со степенью фильтрации 200 мкм. После подготовки вода поступает на первую ступень очистки в отстойнике-флокуляторе методом осаждения нерастворимых примесей.

Ранее технологической схемой предусматривалось приготовление раствора известкового молока в реактентном цехе. Негашеная известь при этом смешивалась с водой, после чего раствор дополнительно разбавлялся водой до рабочей концентрации. Зола от сжигания ТКО в качестве реагента допускается дозировать непосредственно в отстойник-флокулятор с очищаемой водой, что

сокращает объем воды, используемой для приготовления известкового молока и, соответственно, объем осветленной воды. Также прямое дозирование сокращает траты электроэнергии на приготовление раствора реагента.

При объеме поступающих на очистку вод расход реагента в виде золы от сжигания ТКО составит 7-17,5 тыс. тонн в год при содержании активного СаО 5-8 %, что позволит вторично использовать порядка 10-20 % образующейся за год золы одного мусоросжигательного завода (как пример взят московский МСЗ №3).

рН среды в отстойнике-флокуляторе дополнительно контролируется для обеспечения корректировки дозы реагента на поступивший объем загрязненных вод. Перемешивание суспензии «вода-реагент» осуществляется в течение 30 минут для обеспечения образования практически нерастворимых гидроксидов металлов.

Для лучшего осаждения гидроксидов металлов и взвешенных веществ (в том числе от золы сжигания ТКО) в сточные воды вводится 0,1 %-ный раствор флокулянта полиакриламид в количестве, обеспечивающем выпадение крупных флокул. Приготовление раствора осуществляется в гидравлических мешалках объемом 8 м<sup>3</sup> с использованием хозяйственно-питьевой воды (в период пуска схемы) или очищенной водой после первой ступени очистки. При дозировании рабочего раствора флокулянта из одной гидравлической мешалки в другой мешалке осуществляется его приготовление. С учетом определенного экспериментальным путем объема 0,1 % флокулянта, максимальный расход 100 % исходного флокулянта составит 2,8 тонн в год.

После добавления раствора флокулянта в отстойнике-флокуляторе происходит их осаждение под действием силы тяжести и разделение среды на фазы: осветленная вода и осадок.

Конструктивные особенности отстойника-флокулятора обеспечивают сочетание в нем отстойной зоны и камеры флокуляции с тонкослойными модулями, что гарантирует высокую стабильность процесса очистки при изменяющихся расходе, концентрации примесей и температуры воды. Изменение

направления и скорости движения воды в тонкослойных модулях отстойника обеспечивает эффективное разделение смеси.

Отстойник-флокулятор снабжен скребковым механизмом, работающим в периодическом режиме. В днище отстойника-флокулятора предусмотрены приемки для осадка. Продолжительность отстаивания сточных вод в отстойнике принимается в зависимости от скорости осаждения взвеси и составляет 2 часа.

Технологической схемой также предусмотрена очистка от плавающих нефтепродуктов с поверхности воды. Для этого в отстойнике-флокуляторе применяется скиммер, с помощью которого удаляются как самые легкие (бензин, керосин), так и густые фракции (мазут, жиры). Принцип действия скиммера основан на адгезии (прилипанию) нефтепродуктов к поверхности коллектора, выполненного в виде замкнутой гибкой трубки и специального эластомера с гладкой поверхностью. Механическая часть скиммера обеспечивает непрерывное движение коллектора и сбор нефтепродуктов с его поверхности. Для сбора нефтепродуктов предусмотрен пластиковый контейнер объемом 2 м<sup>3</sup>, что обеспечивает простое и надежное транспортирование этого отхода. Собранные нефтепродукты отправляются на регенерацию в специализированное предприятие.

Осветленная вода из отстойника-флокулятора самотеком поступает в резервуар осветленной воды объемом 50 м<sup>3</sup>, из которого центробежным насосом подается на вторую ступень – доочистку на автоматических фильтрах тонкой очистки. Вода поступает на крупную фильтрующую сетку и проходит через мелкую сетку изнутри наружу. Таким образом, шлам остается наверху, где автоматически удаляется с сетки и выбрасывается в сгуститель.

Контроль за качеством воды осуществляется на выходе из отстойника-флокулятора и после фильтров. В случае удовлетворения показателей качества воды на выходе из отстойника-флокулятора требованиям к технической воде, проектом предусматривается байпасная линия выпуска осветленных стоков из резервуара, минуя фильтры 2-й ступени очистки.

В виду того, что вода для технологических нужд составляет около 85 % от общего объема поступающих на очистку вод, 15 % воды отправляется на обеззараживание. Ранее проектом предусматривалась дезинфекция раствором гипохлорита натрия с помощью установки дозирования, включающую в себя резервуар с мешалкой объемом 1 м<sup>3</sup> и дозирочный насос. Несмотря на доступность, дешевизну и простоту применения хлорсодержащего реагента, при взаимодействии с различными веществами в воде образуются токсичные соединения хлора, которые при поступлении в природные водные объекты приводят к негативным изменениям в экологической системе водоемов и мутагенным воздействиям на животный и растительный мир. Оптимальной средой для наивысшей степени обеззараживающего действия гипохлорита натрия является нейтральная (рН 7). Также раствор гипохлорита натрия является щелочным (рН 9-10), что приводит к общему увеличению рН осветленной воды. В случае с реагентной очисткой с использованием золы от сжигания ТКО рН обеззараженной воды составит более 9, что недопустимо для дальнейшего сброса. Также высокое содержание хлоридов в воде приводит к коррозии медных, алюминиевых, стальных труб.

В настоящее время наиболее результативными методами обеззараживания воды являются физические, один из которых – ультрафиолетовое (УФ) излучение. УФ излучение воздействует на клетки, меняя структуру ДНК, в результате чего клетка микроорганизма погибает. Установки для УФ излучения состоят из ламп, помещенных в кварцевые чехлы для защиты от контакта с водой. Лампы с чехлами помещены в корпус из нержавеющей стали (рисунок 4.3).

На эффективность обеззараживания сточных вод УФ излучением влияют высокие концентрации взвешенных веществ. Нефтепродукты в большом количестве влияют на длительность промывки кварцевых чехлов. На предшествующих стадиях очистки данный факторы сведены к минимуму.

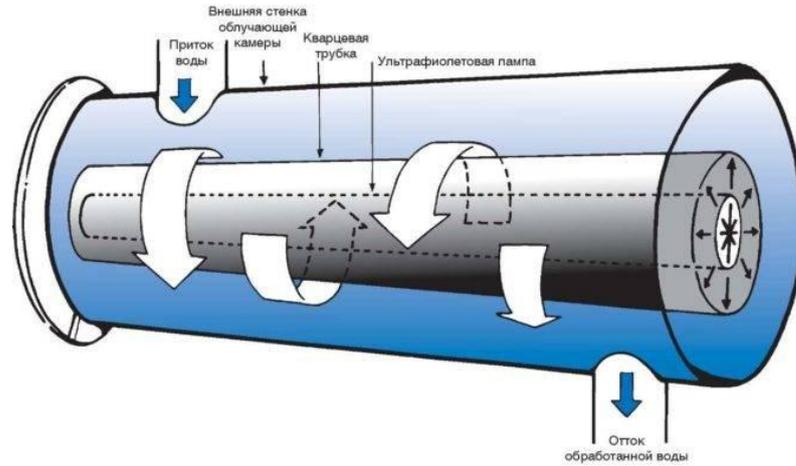


Рисунок 4.3 – Модуль установки УФ излучения

На месте размещения станции обеззараживания гипохлоратом натрия предлагается разместить амальгамную лотковую УФ-систему с производительностью  $150 \text{ м}^3/\text{час}$  со средней дозой  $40 \text{ мДж}/\text{см}^2$  (рисунок 4.4). Лотковые модули устанавливаются горизонтально вдоль течения воды. Габаритные размеры установки составят  $2 \times 0,18 \times 0,6 \text{ м}$ , потребляемая мощность 10 ламп составит 3,5 кВт. При необходимости производительность установки может увеличиваться до  $20\,000 \text{ м}^3/\text{час}$  путем добавления дополнительных модулей в секцию. Ресурс лампы составляет 12 000 часов [67].



Рисунок 4.4 – Лотковая УФ-система

Приемник очищенных сточных вод – р. Карагайлы – является объектом рыбохозяйственного значения. В контрольном створе, на расстоянии менее 500 метров от места сброса сточных вод, должны соблюдаться значения нормативов качества вод [53]. В данном створе концентрации загрязняющих веществ при разбавлении потоком природных вод не должны превышать предельно допустимые концентрации, либо условные фоновые (если такие установлены). Расчетные формулы кратности основного разбавления приведены в приложении Г.

Расход р. Карагайлы зависит от периода года, так минимальный расход наблюдается в летний (август) и зимний периоды –  $0,075 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $0,06 \text{ м}^3/\text{с}$  соответственно. Максимальный расход реки приходится на период паводков (апрель) и составляет  $40 \text{ м}^3/\text{сек}$ . Коэффициент извилистости реки на участке до контрольного створа составляет 1,11. Сброс производится через один оголовок в стрежень реки. Расчет разбавления велся на средний максимальный расход реки ( $12,8 \text{ м}^3/\text{сек}$ ).

Исходя из того, что расход реки в летний и зимний период сопоставим со средним предполагаемым расходом и минимальной скоростью течения сточных вод в трубе, разбавление к контрольному створу составит около 2,6 раз, что не позволит снизить концентрации сульфат-ионов, ионов кальция, меди, марганца и цинка до нормативов ПДК<sub>р.х.</sub>. Поэтому сброс очищенных сточных вод следует вести со средним расходом  $0,04 \text{ м}^3/\text{с}$  в период половодья, что позволит достичь коэффициента разбавления в контрольном створе около 320 раз. В таком случае, содержание ионов кальция, сульфат-ионов и ионов металлов в контрольном створе будет соответствовать требованиям к ПДК<sub>р.х.</sub> (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Содержание загрязняющих веществ в контрольном створе при разбавлении

Показатели	Ед. измерения	ПДК <sub>р.х.</sub> [54]	Концентрация в контрольном створе
Алюминий	мг/дм <sup>3</sup>	0,04	0,00031
Железо		0,1	0,00007

## Продолжение таблицы 4.2

Кадмий	мг/дм <sup>3</sup>	0,005	0,00003
Медь		0,001	0,00003
Марганец		0,01	0,00991
Цинк		0,01	0,00028
Кальций		180	1,80
Хлориды		300	1,12
Сульфаты		100	6,23
Взвешенные вещества		$C_{\phi}+0,25$	0,013

При мощности очистных сооружений 10 200 м<sup>3</sup>/сут, общий объем очищенных сточных вод за период половодья составит 306 000 м<sup>3</sup>, из которых 100 000 м<sup>3</sup> подвергается обеззараживанию с возможным осуществлением производительности 0,04 м<sup>3</sup>/сек. С учетом среднего расхода сточной воды (0,04 м<sup>3</sup>/сек) при осуществлении сброса в р. Карагайлы временное накопление обеззараженной воды для обеспечения требуемого расхода не требуется.

После всех стадий очистки осадок, выделяющийся в отстойнике-флокуляторе, периодически откачивается в сгуститель, где он уплотняется в условиях непрерывного ворошения. Часть осадка из отстойника-флокулятора возвращается вместе с поступающим потоком воды на очистку обратно в отстойник-флокулятор. Такой прием сокращает общий расход флокулянта и улучшает процесс флокуляции.

Сгущение осадка в сгустителе осуществляется в течение 5 часов от момента загрузки шлама до начала выгрузки. Сгуститель оборудован камерой флокуляции, тонкослойными элементами и скребковым механизмом, работающим в постоянном режиме при медленном вращении. Осветленная вода из сгустителя через переливные штуцера направляется в канализационный колодец.

В этот же колодец собирается вода от переливных линий гидравлических мешалок, остаток шламowego осадка из отстойника-флокулятора, вода из

кругового коллектора отстойника-флокулятора. Из колодца стоки погружным насосом откачиваются в отстойник флокулятор на доочистку.

Сгущенный осадок в сгустителе с влажностью 92 % винтовым насосом периодически подается в центрифугу или, в случае отказа работы центрифуги, на ленточный пресс-фильтр для механического обезвоживания. После обезвоживания осадок со влажностью 65-75 % с помощью винтового насоса направляется в накопитель кека, из которого выгружается с помощью винтового насоса с загрузочной воронкой и ворошителя периодически, по мере заполнения накопителя, выгружается в автомобиль. Далее обезвоженный осадок (кек) направляется на утилизацию.

Низкая степень вымываемости металлов из кека по сравнению с исходной золой от сжигания ТКО, позволяет рассмотреть осадок как компонент закладочного материала штрековых шахтных выработок.

Таким образом, зола от сжигания ТКО, прежде чем утилизировать, можно использовать вторично в качестве реагента для нейтрализации и очистки сернокислых дренажных вод. Химическое осаждение металлов из загрязненных вод и водорастворимых форм металлов из золошлаковых отходов способствует сохранению полезных компонентов в осадке, а также снижению степени их вымываемости по сравнению с исходной золой от сжигания ТКО.

#### **4.3 Изъятие, обезвоживание и утилизация техногенных наносов в донных отложениях**

По результатам мониторинга были выделены два участка реки, где в техногенных наносах донных отложений накоплено наибольшее количество металлов: участок после отвалов и точки сброса сточных вод очистных сооружений и участок от хвостохранилища до места впадения р. Карагайлы в р. Худолаз. Протяженность участков составляет около 700 и 2 000 метров соответственно с шириной по дну – 4 метра и глубиной изъятия около 0,5 метров. Примерный объем донных отложений составит 5 500 м<sup>3</sup>.

Извлечение, обезвоживание и сохранение донных отложений позволит в дальнейшем использовать их для доизвлечения тяжелых металлов. Содержание меди на первом выделенном участке достигает 0,56 %, цинка – 0,27 %. Техногенные наносы второго участка содержат до 0,21 % меди и до 0,44 % цинка. При этом содержание меди и цинка в донных отложениях сопоставимо с содержанием данных металлов в забалансовых медно-колчеданных рудах Южного Урала. Забалансовые запасы, в среднем, содержат 0,5 % меди и 0,39 % цинка.

В настоящее время очистка водных объектов от донных отложений может осуществляться ручным, взрывным, механизированным и гидромеханизированным методами (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Способы изъятия донных отложений и их характеристики

Способ	Характеристики
Ручной	Редко применим. Необходим для извлечения донных отложений высокого качества, которые используются, например для медицинских или косметических целей
Взрывной	Редко применим. Может применяться на крупных реках для поддержания судоходных глубин. Для городских водоемов способ опасен и сложен в исполнении
Механизированный	Нечасто применим. Способ осуществляется с использованием ковшового экскаватора, канатно-экскаваторных установок. Данный способ имеет длительный подготовительный этап работ, включающий подготовку трасс для обеспечения свободного перемещения опор установок и др. Также способ может требовать осушение водоемов.
Гидромеханизированный	Широко применим. Способ осуществляется с использованием землесосных снарядов (земснаряды), которые представляют собой плавучую машину (судно), предназначенную для выемки и гидротранспортирования грунта со дна водоемов, действующую по принципу всасывания, и оборудованную средствами для рабочих перемещений, необходимых в ходе разработки грунта. Данный способ подходит для применения в городской среде.

На сегодняшний день гидромеханизированный способ является менее затратным и более экологичным, поэтому для реализации работ по очистке дна водного объекта был принят гидромеханизированный способ, обеспечивающей подъем донных отложений при помощи земснаряда. Осушение водного объекта не требуется, территория подвергается меньшему стрессу.

Принцип работы земснаряда заключается в размыве донных отложений напором воды и последующим транспортированием образующейся пульпы с помощью центробежного грунтового насоса. Интенсивность засасывания донных отложений из-под воды зависит от их гранулометрического состава, связности грунта и, как следствие, сопротивления грунта размыву, параметров потока на входе во всасывающий патрубок и высоты забоя. Чаще всего на интенсивность засасывания влияют корни водной растительности, поэтому предварительно производится их механическое рыхление.

Глубина изъятия донных отложений (около 0,5 метров) определяет мощность земснаряда. Габариты земснаряда должны обеспечивать мобильность и доступность, поэтому для изъятия был выбран земснаряд «Ручной мини земснаряд (мини драга) Piranha Pump» (рисунок 4.5).



Рисунок 4.5 - Ручной мини земснаряд

Выбранный мини земснаряд прост в работе и не требует наличия квалифицированного персонала. Привлечение сторонней организации на проведение данного вида работ, включающая в себя аренду земснаряда, оплату работы специалиста, транспортировку оборудования, менее выгодно, чем покупка и доставка мини земснаряда, т.к. в городе Сибай услуга по аренде мини земснарядов не предоставляется. При покупке мини земснаряда возможно

продолжение очистки дна водоемов других участков, отстойников, что будет включать только эксплуатационные затраты.

Данная модель земснаряда переносная, имеет общую мощность до 16.5 л.с., производительность до 30 м<sup>3</sup>/час по сухому остатку, глубину забора пульпы до 6 м, высотой подъема от уровня воды до 32 м, дальностью выброса пульпы до 350 м. Двигатели насоса работают на бензиновом топливе, расход которого составляет 3,2 литра за час работы. Данная модель выпускается без рамы и понтонов, поэтому может устанавливаться на лодках или экономичных рамах, что удобно для при небольшой глубине реки. Высокое содержание сухого вещества в пульпе и регулируемое давление, создаваемые специально разработанными насадками мини земснаряда, позволяют быстро и эффективно наполнять геотубы и геоконтейнеры с различными показателями прочности на разрыв [35].

Таким образом, на изъятие около 5 500 м<sup>3</sup> донных отложений в естественной залежи с учетом производительности земснаряда и затраты времени на его маневры (около 30 % от общего времени) потребуется 238 часов. При продолжительности рабочей смены 8 часов, общее количество смен составит 30. Затраты топлива составят 762 л.

Объем перекачиваемых донных отложений становится в 2-5 раз больше объема донных отложений в естественной залежи по причине их разбавления водой средствами гидромеханизации. Высокая влага и значительное содержание металлов в донных отложениях является основной проблемой их утилизации. В связи с этим возникает необходимость обезвоживания отложений для придания пригодного для транспортировки и утилизации вида и в целях ограничения поступления вредных веществ в окружающую среду.

В настоящее время часто используются аппаратное обезвоживание (с применением фильтр-прессов, центрифуг, вакуум-фильтров) и естественная сушка донных отложений на наливных картах. Аппаратный метод не мобилен для локальной очистки водных объектов. К тому же данный метод требует больших капитальных и эксплуатационных расходов. Обезвоживание донных отложений

на картах требует выделения значительных площадей, которые зачастую отсутствуют на территории промагломераций [79].

Широкое распространение получили методы обезвоживания в геосинтетических конструкциях - геотубах. Использование этого метода не требует отчуждения значительных площадей прибрежных земель под производство работ по обезвоживанию, что не приводит к значительным капитальным затратам. Кроме этого, отсутствие громоздких и энергоемких комплектующих позволяет проводить работы в полевых условиях, в том числе труднодоступных местах.

Первоначально в геотубах происходит активная стадия водоотдачи, где уходит до 20 % воды. Далее, благодаря испарению через большую площадь геотубы, происходит продолжение обезвоживания техногенных осадков. Кроме того, геотубы не впитывают атмосферные осадки, и шлам не подвергается повторному обводнению.

После выделения основной воды, которая разбавляла донные отложения при их извлечении, выделяют следующие периоды обезвоживания донных отложений в геотубах: через 1 месяц (влажность около 75 %), через летне-осенний период (влажность 65-70 %); через годовой цикл с промораживанием, оттаиванием, естественной подсушкой (влажность 55-60 %).

Типоразмеры геотуб выбирались, исходя из необходимости их дальнейшей транспортировки в места складирования с помощью техники предприятия (например, БелАЗ-75405). Были выбраны следующие типоразмеры контейнеров: периметр (в поперечном сечении) геотуб (P) – 10 м; длина геотубы в незаполненном состоянии (L) – 3,5 м. Объем, который может вместить один контейнер, составит 28,14 м<sup>3</sup>.

Геотубы заполняются пульпой в несколько этапов (каждый раз не выше максимально допустимой высоты свода тубы, прописанной для каждого типоразмера туб на основании прочностных расчетов). После заполнения одной тубы до допустимой высоты, заполняются следующие пустые тубы. К уже

заполненным возвращаются после частичной консолидации осадка. Обычно консолидация осуществляется до достижения тугопластичной консистенции.

Расчет количества геотуб ведетс я исходя из объема исходных донных отложений без учета их разбавления водой. Для закладки конечного объема осадка потребуется 194 геотубы.

Подготовительный этап перед наполнением геотуб является организация временных площадок для их укладки с обеспечением продольного и поперечного уклона для более эффективного сбора и отвода отфильтрованной воды. Схематичный пример организации площадки представлен на рисунке 4.6.

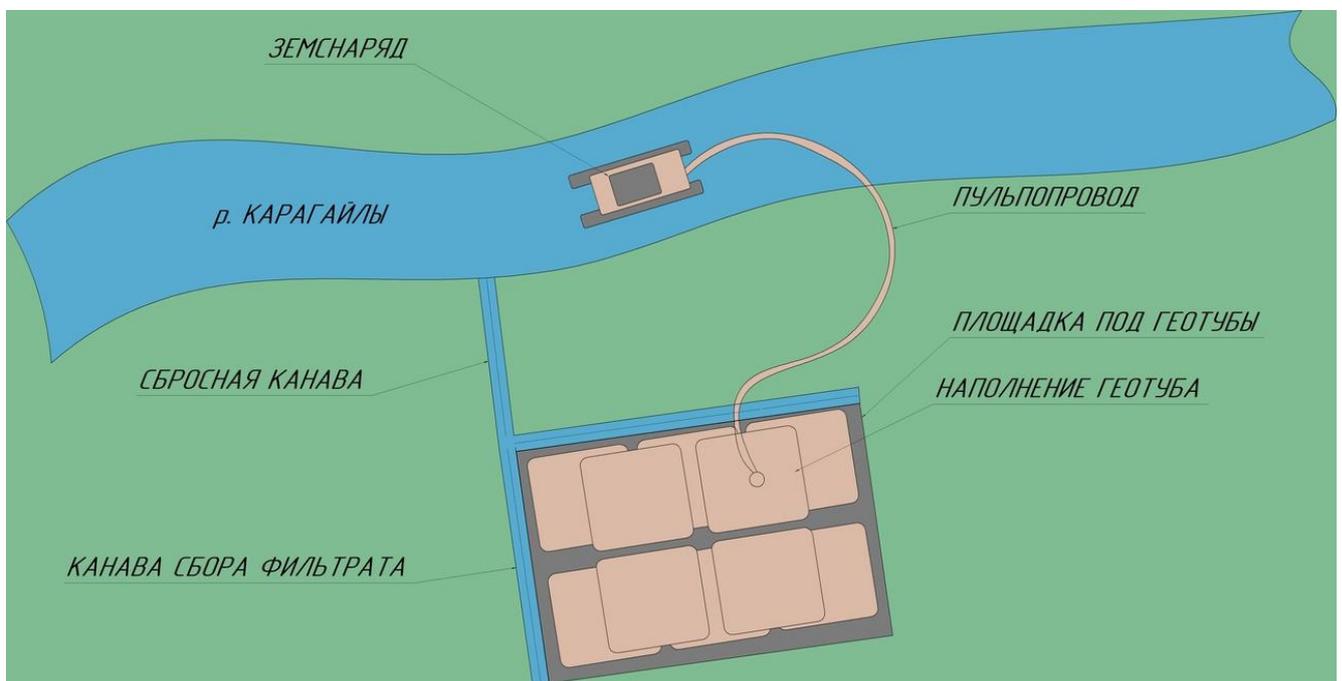


Рисунок 4.6 – Схема организации мероприятия по обезвоживанию донных отложений

Для обеспечения дренажа необходимо произвести укладку щебня. С двух сторон от дренажных площадок (рисунок 4.6), а также для сброса воды в реку организуются дренажные канавы для сбора фильтрата. По контуру площадки на заключительном этапе производится обвалование. При проведении работ по наполнению геотуб возможно их складирование друг на друга, что позволит сократить территорию для размещения дренажной площадки.

Для удобства предлагается организовать три дренажные площадки, одну – на участке 700 м, две другие на участке 2 000 м. Учитывая параметры геотуб и их укладку в 2-3 слоя, выбраны следующие размеры площадки  $14 \times 16 \text{ м}^2$ ,  $14 \times 20 \text{ м}^2$ ,  $14 \times 20 \text{ м}^2$ . С учетом высоты слоя укладки щебня - 0,2 м, общий объем материала составит  $784 \text{ м}^3$ , общая площадь составит  $3 920 \text{ м}^2$ . Для организации канавы для отвода воды примем расход щебня равный 5 % от общего объема материала ( $39,2 \text{ м}^3$ ).

При средней плотности донных отложений, представленных заиленными песками,  $1 500 \text{ кг/м}^3$  масса одной геотубы после отхождения основной жидкости и всех четырех этапов обезвоживания составит 4 950 тонн, объем –  $3 300 \text{ м}^3$ .

После завершения технологических процессов заполнения геотуб и консолидации осадка осуществляется захоронение кека (обезвоженного осадка) непосредственно в уложенных геотубах или распарывание ткани геотуб, а кек увозится на полигон.

Так как донные отложения р. Карагайлы содержат аномальные концентрации металлов, то после их обезвоживания предлагается транспортировка геотуб для строительства 4 отсека хвостохранилища предприятия с целью обеспечения возможности их вторичной переработки.

Для погрузки и транспортировки обезвоженных геотуб планируется использование автокранов грузоподъемностью 30 т (КС 55715) и самосвалов БелАЗ-75405 грузоподъемностью 30 т и объемом кузова до  $19,2 \text{ м}^3$  с «шапкой».

Транспортировка геотуб будет осуществляться по маршруту, протяженностью около 3 км. В расчетах для погрузки геотуб учитывался 1 автокран и 4 самосвала, попеременно перевозящие геотубы. Примем время на загрузку самосвала, транспортировку геотуб до хвостохранилища, разгрузку и обратный ход самосвала 30 минут.

При работе четырех самосвалов, каждый из которых транспортирует 2 геотуба в час, потребуется 25 часов для транспортировки 194 геотуб. Общее пройденное расстояние составит около 80 км, расход топлива самосвалами

составит около 580 л. Расход топлива автокраном составляет 9 л/час, тогда общее потребление топлива автокраном на погрузку геотуб составит 225 л.

#### **4.4 Эколого-экономическая оценка организации комплексного средозащитного мероприятия**

Эколого-экономическая эффективность применения предлагаемых мероприятий по ликвидации накопленного вреда р. Карагайлы складывается из показателей предотвращенного ущерба на водные ресурсы и экономической выгоды от внедрения предлагаемых технологий с учетом капитальных и эксплуатационных затрат на реализацию средозащитного мероприятия.

В экономическом аспекте выгода также достигается за счет увеличения ресурсов чистой воды и возможности использования очищенной воды для технических нужд, исключая водозабор из природных источников. Изъятие и консолидация донных отложений позволят ликвидировать вторичное загрязнение водных объектов металлами, переходящими в водную толщу, а также обеспечат сохранность значительного количества металлов для возможного дальнейшего извлечения.

Использование золы от сжигания ТКО в качестве реагента для нейтрализации и осаждения металлов из загрязненных вод позволяет не просто утилизировать исходные отходы, но и получить вторичную выгоду. Также положительный эффект достигается за счет снижения вымываемости тяжелых металлов из осадка реагентной очистки, что говорит о возможности его использования в качестве компонента закладочного материала штрековых шахтных выработок отработанных месторождений.

Помимо экономической выгоды, при реализации мероприятий по ликвидации последствий негативного воздействия техногенных массивов предприятия происходит сохранение качественной воды для комфортного пользования населением.

#### 4.4.1 Расчет затрат на проведение работ по каптированию и отводу сточных дренажных вод на очистку

Затраты на планировку откосов водоотводного канала включают в себя затраты на топливо и заработную плату машинисту экскаватора-планировщика. При средней стоимости дизельного топлива 57,2 руб. и часа работы машиниста 400 руб. затраты составят 8 805 руб. (формула 4.1).

$$Z_{\text{откос}} = 77 \cdot 57,2 + 11 \cdot 400 = 8\,805 \text{ руб.} \quad (4.1)$$

Стоимость одного кубического метра выбранного типа щебня составляет 154 руб. Стоимость работ по укладке щебня с толщиной слоя 0,2 м составляет 200 руб/м<sup>2</sup>. Стоимость квадратного метра геомембраны — 120 руб, укладки — 20 руб/м<sup>2</sup>. Затраты на укрепление дна и откосов водоотводного канала составят 3 403,4 тыс. руб. (формула 4.2).

$$\begin{aligned} Z_{\text{укрепление}} &= 2\,100 \cdot 154 + 10\,500 \cdot 200 + 7\,000 (120 + 20) \\ &= 3\,403,4 \text{ тыс. руб.} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Затраты на организацию технологических переездов и слива в накопитель рассчитываются исходя из средней стоимости одной трубы 15 000 руб. и стоимости ее укладки с помощью имеющейся на предприятии техники (10 % от стоимости трубы) и составят 49 500 руб. (формула 4.3).

$$Z_{\text{трубы}} = 3 \cdot (15\,000 + 15\,000 \cdot 0,1) = 49\,500 \text{ руб.} \quad (4.3)$$

Затраты на организацию накопителя воды состоят из затрат на топливо экскаваторов и самосвалов, заработную плату водителям и машинистам техники, затрат на геомембрану и ее укладку. С учетом стоимости дизельного топлива 57,2 руб., средней стоимости рабочей смены 3 200 руб., стоимости квадратного метра геомембраны 120 руб., подготовку основания под укладку геомембраны 50 руб/м<sup>2</sup>, укладку геомембраны 20 руб/м<sup>2</sup> затраты составят 2 125 тыс. руб. (формула 4.4).

$$\begin{aligned} Z_{\text{накопитель}} &= (2\,608 + 1\,992) \cdot 57,2 + 270 \cdot 3\,200 + 5\,752 \\ &\times (120 + 50 + 20) = 2\,125 \text{ тыс. руб.} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Общие затраты на организацию водоотводного канала и накопителя воды составят 4 607,71 тыс.руб. (формула 4.5).

$$Z_{\text{капт.}} = 8,81 + 3\,403,4 + 49,5 + 2\,125 = 5\,586,71 \text{ тыс. руб.} \quad (4.5)$$

#### 4.4.2 Расчет затрат на очистку сточных дренажных вод хвостохранилища

Экономический эффект при сокращении среднегодовых затрат на очистку загрязненных водных ресурсов следует рассматривать по величине себестоимости реагентов и капитальных и постоянных эксплуатационных затрат на дополнительные установки. Себестоимость извести строительной молотой (негашеная кальциевая 3 сорта) ГОСТ 9179-77 составляет, в среднем, 4 800 рублей за 1 тонну. Расход извести на нейтрализацию и очистку ранее поступавших шахтных и подотвальных вод в таком же объеме (700 тыс. м<sup>3</sup>/год) составлял 490 тонн в год. Таким образом затраты на известь составляли порядка 2,352 млн рублей в год. Расход флокулянта полиакриламида (100 %) ориентировочно составлял 8,4 т/год (без рецикла), с учетом стоимости 1 кг флокулянта 350 рублей, затраты на флокуляцию составляли 2,94 млн руб в год. Расход гипохлорита натрия составлял около 0,3 т/год, с учетом стоимости 1 тонны реагента, равной 14 200 рублей, затраты на обеззараживание осветленной воды составляли 4 255 рублей в год (расчет осуществлялся на объем 100 000 м<sup>3</sup>).

В настоящее время зола от сжигания ТКО, как продукт, отсутствует на рынке, тем не менее проблема ее образования и дальнейшей утилизации остается актуальной как для самих производителей золы, так и для государства. Ввиду отсутствия стоимости единицы золы от сжигания ТКО и наличия заинтересованности производителей золы в ее утилизации, затраты на покупку и транспортировку золы в рамках данного проекта не учитывались.

Затраты на флокулянт, с учетом расхода и стоимости единицы массы, составят 980 000 руб. (формула 4.6).

$$Z_{\text{флокулянт}} = 2\,800 \cdot 350 = 980\,000 \text{ руб.} \quad (4.6)$$

Капитальные затраты на лотковую УФ-систему составят 1 176 000 рублей. Постоянные эксплуатационные затраты состоят из потребления электроэнергии,

равной 2 520 кВт в год, при использовании системы 30 суток в год в период осуществления сброса воды в водоток. С учетом примерной стоимости электроэнергии региона равной 3,69 руб. за 1 кВт, затраты на электроэнергию составят 9 300 руб. (формула 4.7).

$$Z_{\text{эл}} = 2\,520 \cdot 3,69 = 9\,300 \text{ руб.} \quad (4.7)$$

Несмотря на то, что концентрации ионов металлов в сточных дренажных водах хвостохранилища в несколько раз выше содержания металлов в подотвальных и шахтных водах, поступавших на очистку, расчет экономического эффекта по текущим затратам проведен на равный объем исходной сточной воды и составляет 3 131 тыс. руб. (формула 4.8).

$$Э_{\text{очистка воды}} = 5\,296,3 - 2\,165,3 = 3\,131 \text{ тыс. руб.} \quad (4.8)$$

Дополнительный экономический эффект, предполагаемый в результате применения комплексного мероприятия по каптированию, отводу и очистке сточных дренажных вод хвостохранилища, заключается в сокращении забора воды из р. Худолаз для технических нужд предприятия. Ставка платы за забор (изъятие) водных ресурсов из речного бассейна р. Урал на территории республики Башкортостан составляет 354 руб. за 1 000 м<sup>3</sup> [52]. Тогда экономический эффект составит 212 400 руб. (формула 4.9).

$$Э_{\text{р.Худолаз}} = 600 \cdot 354 = 212\,400 \text{ руб.} \quad (4.9)$$

#### **4.4.3. Расчет затрат на изъятие, обезвоживание и утилизацию донных отложений**

##### ***Расчет затрат на изъятие донных отложений.***

На сегодняшний день стоимость предлагаемой модели земснаряда составляет 850 000 руб.

С учетом расхода топлива двигателя насоса и стоимости дизельного топлива 57,2 руб., затраты на топливо составят 43 586 руб. (формула 4.10).

$$Z_{\text{топливо}} = 762 \cdot 57,2 = 43\,586 \text{ руб.} \quad (4.10)$$

Затраты на заработную плату машинисту земснаряда, а также оператору по наполнению геотуб при стоимости рабочей смены 3 000 руб. составят 180 000 руб. (формула 4.11).

$$Z_{\text{зп}} = 2 \cdot 30 \cdot 3\,000 = 180\,000 \text{ руб.} \quad (4.11)$$

Общие затраты на изъятие донных отложений составят 1 073, 6 руб. (формула 4.12).

$$Z_{\text{изъятие}} = 850\,000 + 43\,586 + 180\,000 = 1\,073,6 \text{ руб.} \quad (4.12)$$

***Расчет затрат на проведение работ по обезвоживанию донных отложений.***

Стоимость одного кубического метра выбранного типа щебня составляет 154 рублей. Стоимость работ по укладке щебня с толщиной слоя 0,2 м составляет 200 руб/м<sup>2</sup>. Примем затраты на организацию дренажных канав и обвалование контуров площадок как 5 % от общей стоимости работ по укладке щебня. Общие затраты на организацию дренажных площадок составят 949 973 руб. (формула 4.13).

$$Z_{\text{дренаж}} = (784 + 39,2) \cdot 154 + 3\,920 \cdot 200 \cdot 1,05 = 949\,973 \text{ руб.} \quad (4.13)$$

Общее количество контейнеров составляет 194 штуки. Размер одного контейнера составляет 3,2×3,5 м. Средняя стоимость погонного метра геосинтетического материала для пошива геотуб (1 п.м. ≈ 4 м) составляет 1000 рублей. Стоимость геотуб составит 679 000 руб. (формула 4.14).

$$Ц_{\text{г}} = K_{\text{г}} \cdot Ц_{\text{п.м.}} \cdot l = 679\,000 \text{ руб.} \quad (4.14)$$

где  $K_{\text{г}}$  – количество геотуб;

$Ц_{\text{п.м.}}$  -стоимость погонного метра геосинтетического материала;

$l$  – длина контейнера.

Затраты на заработную плату оператору по наполнению геотуб учитывались ранее. Общие затраты на обезвоживание донных отложений составят 1 628,97 тыс.руб. (формул 4.15).

$$Z_{\text{обезвоживание}} = 949,973 + 679 = 1\,628,97 \text{ тыс. руб.} \quad (4.15)$$

### ***Расчет затрат на транспортировку геотуб***

Затраты на транспортировку геотуб состоят из затрат на топливо и заработной платы водителям и машинистам техники. С учетом стоимости дизельного топлива 57,2 руб., средней стоимости рабочего часа 400 руб., затраты на транспортировку геотуб составят 96 046 руб. (формула 4.16).

$$Z_{\text{транспортировка}} = (580 + 225) \cdot 57,2 + 5 \cdot 25 \cdot 400 = 96\,046 \text{ руб.} \quad (4.16)$$

В таблице 4.4 представлены суммарные единовременные и текущие затраты на каждом этапе разработанного водоохранного мероприятия.

Таблица 4.4 – Единовременные и текущие затраты на внедрение разработанных водоохранных мероприятий

<b>Единовременные затраты, тыс. руб</b>	<b>Текущие затраты, тыс. руб в год</b>
<b>Строительство водоотводного канала и накопителя воды</b>	
5 586,71	-
<b>Очистка воды</b>	
1 176	989,3
<b>Подготовка площадок для геотуб</b>	
949,97	-
<b>Изъятие донных отложений</b>	
1 073,6	-
<b>Обезвоживание донных отложений</b>	
679	-
<b>Транспортировка геотуб</b>	
96,046	-
<b>ИТОГО</b>	
9 561,33	989,3

Срок окупаемости единовременных затрат на средозащитное мероприятие рассчитывался исходя из текущих затрат предприятия на очистку воды, а также сокращения плату за забор технической воды из реки Худолаз, и составляет 2 года 11 месяцев (формула 4.17).

$$CO = \frac{8\,561\,326}{3\,131\,000 + 212\,400} = 2 \text{ года } 11 \text{ месяцев} \quad (4.17)$$

При реализации инвестиционного проекта г. Сибая «Реконструкция сооружений по очистке шахтных и подотвальных вод Сибайского и Камаганского месторождений» возможно рассмотрение установки УФ-системы за счет средств инвестиций, что позволит сократить срок окупаемости комплексного средозащитного мероприятия на 6 месяцев.

Дальнейшее использование золы от сжигания ТКО в качестве реагентов для нейтрализации и осаждения металлов загрязненных вод, а также модернизация этапа обеззараживания вод путем замены реагентного способа на УФ-систему позволят сократить текущие затраты на 4 307 тыс. рублей ежегодно.

#### 4.4.4 Определение величины предотвращенного экологического ущерба

Оценка величины предотвращенного ущерба от загрязнения водной среды проводится на основе региональных показателей удельного ущерба, представляющих собой удельные стоимостные оценки ущерба на единицу (1 условную тонну) приведенной массы загрязняющих веществ (формулы 4.18, 4.19) [9].

$$U_{\text{пр}}^B = \sum_J^N U_{\text{удр}j}^B \cdot \Delta M_r^B \cdot K_{\text{э}}^B \cdot J_D \quad (4.18)$$

$$\Delta M_r^B = M_1^B - M_2^B \quad (4.19)$$

где  $U_{\text{пр}}^B$  - эколого-экономическая оценка величины предотвращенного ущерба водным ресурсам в рассматриваемом  $r$ -том регионе, тыс. руб./год;

$U_{\text{удр}j}^B$  - показатель удельного ущерба (цены загрязнения) водным ресурсам, наносимого единицей (условная тонна) приведенной массы загрязняющих веществ на конец расчетного периода для  $j$ -го водного объекта в рассматриваемом  $r$ -том регионе, руб./усл. тонну,  $U_{\text{удр}j}^B = 6818,2$  руб./усл. тонн; [9]

$M_1^B, M_2^B$  - приведенная масса сброса загрязняющих веществ в водные объекты рассматриваемого региона, соответственно, на начало и конец расчетного периода, тыс. усл. тонн;

$\Delta M_r^B$ - приведенная масса загрязняющих веществ, снимаемых (ликвидируемых) в результате природоохранной деятельности и осуществления соответствующих водоохранных мероприятий в  $r$ -том регионе в течение расчетного периода, тыс. усл. тонн/год;

$K_3^B$ - коэффициент экологической ситуации и экологической значимости состояния водных объектов по бассейнам основных рек;  $K_3^B=1,14$ ; [9]

$J_d$  - индекс-дефлятор по отраслям промышленности, устанавливаемый Минэкономки России на рассматриваемый период и доводимый Госкомэкологией России до территориальных природоохранных органов.  $J_d=93,8$ .

Приведенная масса загрязняющих веществ для  $k$ -го конкретного объекта или направления водоохранной деятельности в регионе рассчитывается по формуле 4.20.

$$M_K^B = \sum_{j=1}^N m_i^B \cdot K_{3i}^B \quad (4.20)$$

где  $m_i^B$ - масса фактического сброса  $i$ -го загрязняющего вещества или группы веществ с одинаковым коэффициентом относительной эколого-экономической опасности в водные объекты рассматриваемого региона, т/год;

$K_{3i}^B$ - коэффициент относительной эколого-экономической опасности для  $i$ -го загрязняющего вещества или группы веществ; [9]

$i$  - номер загрязняющего вещества или группы веществ;

$N$  - количество учитываемых загрязняющих веществ.

Масса загрязняющих веществ на начало периода брались исходя из объема образующихся сточных дренажных вод хвостохранилища за год и концентраций, полученных в результате мониторинга. Масса загрязняющих веществ на конец периода брались исходя из общего объема сбрасываемых вод с очистных сооружений и концентраций, полученных после очистки без учета разбавления природной водой. Расчет предотвращенного экологического ущерба представлен в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Расчет предотвращенного экологического ущерба

Al	Fe	Mn	Zn	Cd	Cu	N	$\Delta M_i$	$Ууд_{ij}$	$Унр_i$
$K_{Э}^B$									
1	90			250	550	6	83,95 тыс. усл. тонн/год	6818,2 руб./усл. тонн	61,208 млрд руб.
$m_i^B$ (т/год)(было)									
503,2	109,4	123,5	425,8	0,528	61,6				
$m_i^B$ (т/год)(стало)									
0,22	0,047	0,836	0,197	0,022	0,019				

#### 4.5 Выводы к четвертой главе

1. Ликвидация накопленного вреда донным отложениям р. Карагайлы должна производиться путём изъятия техногенных осадков и донных отложений р. Карагайлы гидромеханизированным способом с их обезвоживанием и консолидацией в геотубах для консервации потенциального минерального сырья.

2. Предотвращение поступления металлов в малый природный водоток и, как следствие, загрязнения речных вод и образования техногенных наносов следует проводить путем проведения работ по каптированию и отводу кислых дренажных вод хвостохранилища на очистку.

3. Очистку вод планируется проводить на имеющихся на предприятии сооружениях для реагентной очистки с обеспечением замены известкового молока на золу от сжигания ТКО с содержанием активного CaO 5-8 %, что позволит использовать очищенную воду для технологических нужд.

4. Низкая степень вымываемости металлов из осадка по сравнению с исходной золой от сжигания ТКО, позволяет рассмотреть его как компонент закладочного материала штрековых шахтных выработок.

5. Единовременные затраты на ликвидацию техногенных наносов реки составят 2,8 млн. руб., на каптирование и очистку дренажных вод — 6,8 млн. руб., при этом размер предотвращенной платы за забор речной воды для технологических нужд составит 212,4 тыс.руб/год, а размер предотвращенного экологического ущерба — 61,2 млрд.руб/год.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается комплексное решение актуальной научной задачи – ликвидации последствий загрязнения малых природных водотоков металлами, выносимыми с территорий сульфидсодержащих техногенных массивов.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Исследованы процессы трансформации состава и свойств природных и сточных вод, донных отложений, которые позволили определить участки с формированием природных и техногенных геохимических барьеров.

2. Установлено, что при воздействии атмосферных осадков на хвостовое хозяйство Сибайского ГОКа, происходит образование дренажных стоков, загрязненных металлами, разгрузка которых в р. Карагайлы приводит к формированию гидро- и литохимического потоков загрязнения.

3. Экспериментальным путем определена доза золы от сжигания ТКО с содержанием активного СаО 5-8 % и время контакта для нейтрализации и очистки дренажных вод от металлов и взвешенных веществ с требуемой эффективностью.

4. Разработано комплексное средозащитное мероприятие по ликвидации источника вторичного загрязнения р. Карагайлы – техногенных наносов, а также по предотвращению стока дренажных вод в реку и их очистке от металлов золой от сжигания ТКО, реализация которой может быть проведена на имеющихся сооружениях реагентной очистки.

Дальнейшее развитие темы диссертации предполагает проведение исследований, направленных на разработку технологии утилизации осадка, образующегося в результате очистки сточных вод от металлов.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Авдохин, В. М. Основы обогащения полезных ископаемых. Учебник. В 2 т. Том 2. Технологии обогащения полезных ископаемых / В. М. Авдохин. – 4-е изд., стер. – М. : Изд-во Горная книга, 2017. – 312 с.
2. Артамонова, С.В. Геоэкологическая оценка качества водоисточников, расположенных в зоне Гайского обогатительного комбината / С.В. Артамонова, А.Ж. Калиев // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2017. – №6 (68). – С.210-212.
3. Ахмадуллина, Ф. Ю. Реагентная очистка сточных вод от тяжелых металлов: теоретические основы, материальные расчеты : учебное пособие / Ф. Ю. Ахмадуллина, Л. А. Федотова, Р. К. Закиров; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2016. – 92 с.
4. Валуев, Д.В. Технологии переработки металлургических отходов: учебное пособие / Д. В. Валуев, Р.А. Гизатулин ; Юргинский технологический институт. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 196 с.
5. Виноградов, А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах / А.П. Виноградов ; Акад. наук СССР. Ин-т геохимии и аналит. химии им. В. И. Вернадского. – 2-е изд., доп. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1957. – 238 с.
6. Влияние разработки Сибайского месторождения (Южный Урал) на трансформацию потока металлов в подчиненных ландшафтах / А.Ю. Опекунов, М.Г. Опекунова, В.В. Сомов [и др.] // Вестник московского университета. Серия 5. География. – 2018. - №1. – С. 14-24.
7. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3 ч. Ч. 2. Водопровод и канализация / Ю. Н. Саргин, Л. И. Друскин, И. Б. Покровская и др. ; Под ред. И. Г. Староверова и Ю. И. Шиллера. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1990. – 247 с.

8. Воздействие предприятий минерально-сырьевого комплекса Урала на водные ресурсы / З.М. Боброва, О.Ю. Ильина, Г.А. Студенок [и др.] // Известия УГГУ. - 2016. - №1 (41). – С. 62-66.
9. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба / Гос. комитет Рос. Федерации по охране окр. среды. – М., 1999. – 41 с.
10. Геохимия окружающей среды / Ю. Е. Сает, Б. А. Ревич, Е. П. Янин [и др.] – М.: Недра, 1990. – 335 с.
11. Горное дело и охрана окружающей среды : учебник для вузов / М.Е. Певзнер, Л.А. Малышев, А.Д. Мельков [и др.] – 3-е изд., стер. – М.: Изд-во МГГУ, 2001. – 300 с.
12. Городниченко, В.И. Основы горного дела / В. И. Городниченко, А. П. Дмитриев. – М. : Горная Книга ; М. : Изд-во Московского гос. горного ун-та, 2008. – 510 с.
13. ГОСТ 17.1.5.01-81 Охрана природы (ССОП). Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. – Введ. 01.01.1982 г. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 2002 г.
14. ГОСТ 17.1.5.04-81 Охрана природы. Гидросфера. Приборы и устройства для отбора, первичной обработки и хранения проб природных вод. Общие технические условия. – Введ. 01.01.1984 г. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 2003 г.
15. ГОСТ 22688-77 Известь строительная. Методы испытаний. – Введ. 01.01.1979 г. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 1997 г.
16. ГОСТ 9326-2002 (ИСО 587-97) Топливо твердое минеральное. Методы определения хлора. – Введ. 01.01.2004 г. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 2002 г.
17. ГОСТ Р 54239-2018 (ИСО 23380:2013) Национальный стандарт Российской Федерации. Топливо твердое минеральное (для определения доли Zn, Cu, Cd, Ni, Pb, Cr, Mo, V). – Введ. 01.04.2019 г. – М.: Стандартинформ. – 2018 г.

18. ГОСТ Р 55879-2013 Национальный стандарт Российской Федерации. Топливо твердое минеральное. Определение химического состава золы методом рентгенофлуоресцентной спектрометрии. – Введ. 01.01.2015 г. – М.: Стандартиформ. – 2019 г.

19. ГОСТ Р 59024-2020 Вода. Общие требования к отбору проб. – Введ. 01.06.2022 г. – М.: ФГБУ "РСТ". – 2022.

20. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году»: [Электронный ресурс] // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации : официальный сайт. – 2022. – URL: [https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye\\_doklady/gosudarstvennyy\\_doklad\\_o\\_soyanii\\_i\\_ob\\_okhrane\\_okruzhayushchey\\_sredy\\_rossiyskoy\\_federatsii\\_v\\_2021/](https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_soyanii_i_ob_okhrane_okruzhayushchey_sredy_rossiyskoy_federatsii_v_2021/) (дата обращения: 15.11.2022).

21. Государственный доклад «О состоянии природных ресурсов и окружающей среды республики Башкортостан в 2021 году»: [Электронный ресурс] // Министерство природопользования и экологии Республики Башкортостан: официальный сайт. – 2022. - URL: <https://ecology.bashkortostan.ru/presscenter/lectures/1593/> (дата обращения: 15.11.2022).

22. Гребенюк, В. Д. Состояние и перспективы развития методов очистки сточных вод гальванических производств / В. Д. Гребенюк, Т. Т. Соболевская, А. Г. Махно // Химия и технология воды. – 1989. – Т. 11. - № 5. – С. 407-421.

23. Захарова, В.Я. Геоэкологические прогнозы условий разработки Южно-Уральских медноколчеданных месторождений / В.Я. Захарова, Е.Н. Сквалецкий // Проблемы региональной экологии. – 2011. – № 5. – С. 34–37.

24. Иовенко, Э.Н. Справочник по охране труда и технике безопасности в химической промышленности. Общие положения, устройство и содерж. пром. предприятий / Э. Н. Иовенко, М. И. Кац, А. И. Родионова; Под ред. В. И. Пряникова. – М. : Химия, 1971. – 511 с.

25. Кабата-Пендиас, А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Кабата-Пендиас, Х. Пендиас; пер. с англ. Д. В. Гричук, Е.П. Янина. – М.: Мир, 1989. – 439 с.
26. Ковда, В.А. Микроэлементы в почвах Советского Союза / В. А. Ковда, И. В. Якушевская, А. Н. Тюрюканов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1959. – 67 с.
27. Колчеданные месторождения мира / М. Б. Бородаевская, Д. И. Горжевский, А. И. Кривцов и др.; Под ред. акад. В. И. Смирнова. – М.: Недра, 1979. – 284 с.
28. Крейнин, Е.В. Подземная газификация угля как экологически чистая технология его добычи и использования / Е.В. Крейнин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – № 4. – С. 256-262.
29. Куликова, М.А. Обоснование необходимости формирования защитного экрана для отсыпки отвалов при разработке месторождений / М.А. Куликова // Записки Горного института. – 2013. – №203. – с. 185-189.
30. Лурье, Ю. Ю. Справочник по аналитической химии / Ю. Ю. Лурье. – 2-е изд. – М. : Химия, 1965. – 390 с.
31. М-02-1805-09 Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  в пробах природной, питьевой и сточной воды методом ионной хроматографии. – СПб.: ООО «АНАЛИТ ПРОДАКТС». – 2009 г.
32. М-МВИ-80-2008 Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложений методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии / ООО «Мониторинг» . – СПб., 2008. – 27 с.
33. Малые реки: современное состояние и экологические проблемы: Аналит. Обзор / Б. П. Ткачев, В. И. Булатов. – Новосибирск : ГПНТБ СО РАН, 2002. – 114 с.
34. Милютина, Н.О. Управление ресурсным потенциалом твердых коммунальных отходов для снижения геоэкологического воздействия полигонов:

дис. ... кан. техн. наук: 25.00.36 / Милютин Наталья Олеговна. – СПб., 2021. – 143 с.

35. Мини земснаряды для берегоукрепления георешеткой, габионами, геотубами, шпунтом: [Электронный ресурс] // bizorg.su [сайт] – URL : <https://bizorg.su/zemsnaryady-dragi-zemlesosy-r/p44493-mini-zemsnaryady-dlya-beregoukrepleniya-georeshetkoj-gabionami-geotubami-shpuntom> (дата обращения: 22.12.2022).

36. Нуреев, Р.Р. Мониторинг, оценка и возможные направления снижения негативного воздействия отходов обогащения медных руд на компоненты природной среды / Р.Р. Нуреев, П.А. Харько // Сборник тезисов докладов IV Международной научно практической конференции «Горное дело в XXI веке: Технологии, наука, образование». - Санкт-Петербург. – 2021. – С. 154.

37. Опекунов, А.Ю. Миграция тяжелых металлов в техногенных потоках рассеяния Сибайского медноколчеданного месторождения. Геохимия ландшафтов (к столетию А.И.Перельмана) / А.Ю. Опекунов, Е.С. Митрофанова Е.С. // Докл.Всеросс.научн.конф., Москва. – 2016. – С. 53-57.

38. Орехова, Н.Н. Научное обоснование и разработка технологии комплексной переработки и утилизации техногенных медно-цинковых вод горных предприятий: дис. ... д-ра. техн. наук: 25.00.13, 25.00.36 / Орехова Наталья Николаевна ; – Магнитогорск, 2014. – 388 с.

39. Орлова, А.М. Современные проблемы твердых бытовых отходов : монография / А. М. Орлова. – М.: МГСУ, 2010. – 216 с.

40. Оценка воздействия на окружающую среду предприятий горной промышленности / А.В. Воробьев, К.Г. Каргинов, С.А. Ананикян [и др.] // Экологическая экспертиза. – 2002. – № 3. – С. 96-104.

41. Панасюгин, А. С. Влияние коллоидно-химического состояния ионов тяжелых металлов на морфологию и фазовый состав их оксидных форм (соединения  $Al^{3+}$ ) / А.С. Панасюгин, С.Л. Римошевский, Д.П. Михалап // Литье и металлургия. – 2005. – № 3. – С. 64–68.

42. Паспорт приоритетного проекта "Снижение негативного воздействия на окружающую среду посредством ликвидации объектов накопленного вреда окружающей среде и снижения доли захоронения твердых коммунальных отходов": [Электронный ресурс] // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации : официальный сайт. – 2016. – URL:<http://static.government.ru/media/files/B3JtWzMSWVANHTd6plVchwnOLWEYmF9f.pdf> (дата обращения: 11.01.2022).

43. Патент № 2096349 Российская Федерация, МПК C02F 11/14(2006.01), C02F 1/62(2006.01), C02F 11/12(2006.01), C02F 101/20(2006.01), C02F 103/00(2006.01). Способ получения шламов очистки, содержащих металлы сточных вод: № 96102206/25: заявл. 06.02.1996: опубл. 20.11.1997 / Гофман Я.А., Любченко Е.А., Гаврилов Е.А., Колесников Ю.В., Батура Ю.И.; заявитель Гофман Яков Аронович – 6 с.

44. Патент № 2170708 Российская Федерация, МПК C02F 1/66(2006.01), C02F 1/62(2006.01), C02F 101/20(2006.01), C02F 103/16(2006.01), C02F 103/36(2006.01). Способ получения реагента для нейтрализации и очистки сточных вод: № 2000102396/12: заявл. 31.01.2000: опубл. 20.07.2001 / Косов В.И., Баженова Э.В.; заявитель Тверской государственный технический университет. – 8 с.: 1 ил.

45. Патент № 2779420 Российская Федерация, МПК C02F 1/61 (2006.01), C02F 1/616 (2006.01), C02F 103/16 (2006.01). Способ очистки подотвальных вод от ионов железа и меди: № 2022104784: заявл. 24.02.2022: опубл. 06.09.2022 / Смирнов Ю.Д., **Харько П.А.**, Пашкевич М.А.; заявитель СПГУ. – 10 с.: 1 ил.

46. Пашкевич, М.А. Применение композитной смеси для очистки кислых дренажных вод хвостового хозяйства от металлов / М.А. Пашкевич, **П.А. Харько** // Обогащение руд. – 2022. – № 4. – С. 40-47.

47. Пашкевич, М.А. Техногенные массивы и их воздействие на окружающую среду : монография / М. А. Пашкевич . – СПб. : Изд-во СПГИ, 2000. – 230 с.

48. Пешков, А.М. Обоснование требований к качеству руд и техногенного сырья при комплексном освоении медно-колчеданных месторождений Урала: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.21 / Пешков Алексей Михайлович. – Москва, 2014. – 160 с.

49. Плохов, А.С. Исследование влияния хвостового хозяйства медно-колчеданного месторождения на поверхностные воды / А.С. Плохов, **П.А. Харько**, М.А. Пашкевич // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 4. – С. 57-68.

50. Поджайски, М.Ф. Проблематика рекультивации после добычи и обогащения рудного сырья с точки зрения конкретного разрешенного случая / М.Ф. Поджайски // Рекультивация ландшафтов, нарушенных промышленной деятельностью: сборник трудов IX Междунар. симпоз.: в 3 т. – Компольт; Дьендьош: НИИ аграрный ун-т. – 1988. – Т. 2. – С. 386-396.

51. Пономаренко, О.И. Методы контроля природных объектов и мониторинг окружающей среды: учебно-методическое пособие / О. И. Пономаренко, М. А. Ботвинкина. — Алматы: Казахский национальный университет им. аль-Фараби, 2011. — 189 с.

52. Постановление Правительства РФ от 26 декабря 2014 г. N 1509 О ставках платы за пользование водными объектами, находящимися в федеральной собственности, и внесении изменений в раздел I ставок платы за пользование водными объектами, находящимися в федеральной собственности: [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал правовой информации [www.pravo.gov.ru](http://www.pravo.gov.ru). – URL : О ставках платы за пользование водными объектами, находящимися в федеральной собственности, и внесении изменений в раздел I ставок платы за пользование водными объектами, находящимися в федеральной собственности ([pravo.gov.ru](http://pravo.gov.ru)) (дата обращения: 13.12.2022).

53. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 29 декабря 2020 года № 1118 Об утверждении Методики разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей: [Электронный ресурс] // Официальный интернет-

портал правовой информации [www.pravo.gov.ru](http://www.pravo.gov.ru). – URL : Об утверждении Методики разработки нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в водные объекты для водопользователей ([pravo.gov.ru](http://pravo.gov.ru)) (дата обращения: 13.12.2022).

54. Приказ Минсельхоза от 13 декабря 2016 г. № 552 Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения: [Электронный ресурс] // Официальный интернет-портал правовой информации [www.pravo.gov.ru](http://www.pravo.gov.ru). – URL : Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения ([pravo.gov.ru](http://pravo.gov.ru)) (дата обращения: 13.04.2022).

55. Пучков, Л.А. Россия в горнодобывающем мире / Л.А. Пучков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 5. – С. 5–10.

56. Раздельное осаждение металлов из высококонцентрированных растворов гранулированным магниезильно-силикатным реагентом / И.П. Кременецкая, Т.К. Иванова, Б.И. Гуревич [и др.] // Вестник МГТУ. – 2021. – Т.24. – №1. – С. 118-130.

57. РД 52.24.353-2012 Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод. – Введ. 02.04.2012 г. – Министерство природных ресурсов и экологии РФ; Росгидромет. - Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ "ГХИ". – 2012 г.

58. Решетняк, О.С. Донные отложения как источник вторичного загрязнения речных вод металлами (по данным лабораторного эксперимента) / О.С. Решетняк, В.Е. Закруткин // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки . – 2016 . – №4 . – С. 104-111.

59. Русло реки Карагайлы в Сибее расчистят: [Электронный ресурс] // [bashinform.ru](http://bashinform.ru) [сайт]. – 2014. – URL: <http://www.bashinform.ru/news/668068-ruslo-reki-karagayly-v-sibae-raschistyat-i-rasshiryat/> (дата обращения 14.04.2020).

60. Смирнов, Д.Н. Очистка сточных вод в процессах обработки металлов / Д. Н. Смирнов, В. Е. Генкин. - 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Metallurgiya, 1989. – 223 с.
61. Смирнов, С.С. Зона окисления сульфидных месторождений / С.С. Смирнов; Акад. Наук СССР. – 2-е изд. - М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1951. – 336 с.
62. СНиП 2.04.03-85 Канализация. Наружные сети и сооружения. — М.: ФГУП ЦПП, 2006. – 87 с.
63. Сомов, В.В. Миграция и аккумуляция тяжелых металлов в природных и антропогенно преобразованных ландшафтах башкирского зауралья : дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.36 / Сомов Всеволод Владимирович. – СПб., 2018. – 131 с.
64. Стефунько, М.С. Обоснование методов предупреждения и ликвидации загрязнения горнопромышленного региона кадмием : дис. ... канд. техн. наук: 25.00.36 / Стефунько Мария Сергеевна. – Москва, 2019. – 126 с.
65. Тяжелые металлы в почвах и растениях Южного Урала. I. Экологическое состояние фоновых территорий / М.Г. Опекунова, Н.В. Алексеева-Попова, И.Ю. Арестова [и др.] // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7, Геология. География. – 2001. – Т. 4. – №31. – С. 45–53.
66. УГМК продала Худолазское месторождение известняка: [Электронный ресурс] // pravdapfo.ru [сайт]. – 2020. – URL: УГМК продала Худолазское месторождение известняка — Правда ПФО (pravdapfo.ru) (дата обращения: 11.01.2022).
67. УФ системы. Промышленные системы обеззараживания воды и воздуха: [Электронный ресурс] // uv-systems.ru [сайт]. – URL: <http://www.uv-systems.ru/dirtywaterclean/lots> (дата обращения: 22.12.2022)
68. Филатова, Е.Г. Обзор технологий очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов, основанных на физико-химических процессах / Е.Г. Филатова // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2015. – №2 (13). – С. 97-109.

69. Формирование шахтных вод и анализ способов их очистки / А.А. Куликова, Ю.А. Сергеева, Т.И. Овчинникова [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 7. – С. 135-145.
70. Фридланд, В.М. Черноземы СССР / В. М. Фриланд, В. А. Носин, И. И. Лебедева. – М.: Колос, 1978. – 305 с.
71. **Харько, П.А.** Изучение воздействия медно-колчеданных месторождений на химический и минералогический состав донных отложений малых рек / П.А. Харько // Материалы XXI Международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке» имени выдающихся химиков Л.П. Кулева и Н.М. Кижнера, посвященной 110-летию со дня рождения профессора А.Г. Стромберга, Томск, Томский политехнический университет. – 2020. – С. 501-502.
72. **Харько, П.А.** Обоснование применения и разработка комплекса мероприятий по защите природных вод в районе расположения хвостовых хозяйств на примере горно-обогатительных комбинатов Южного Урала / П.А. Харько, Д.А. Бабенко // Московский экономический журнал. – 2019 – №9. – С.113-124.
73. **Харько, П.А.** Анализ возможности использования ионообменной смолы для очистки воды от ионов меди, цинка, железа, алюминия и марганца / П.А. Харько // Сборник научных трудов II международной научно-практической конференции «Измерительная техника и технологии контроля параметров природных и техногенных объектов минерально-сырьевого комплекса», Санкт-Петербург, СПбГУ. – 2019. – с. 39-41.
74. **Харько, П.А.** Возможность применения геохимических барьеров на основе известняка для очистки подотвальных вод от металлов / П.А. Харько, Р.Р. Нуреев, М.А. Пашкевич // Вестник Евразийской науки. - 2020. – Т. 12. - №6. – С. 1-9.
75. **Харько, П.А.** Изучение воздействия медно-колчеданных месторождений на химический и минералогический состав донных отложений малых рек // П.А. Харько // Сборник тезисов XVIII Всероссийской конференции-

конкурса студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования», Санкт-Петербург, СПГУ. – 2020 – С. 375.

76. Харько, П.А. Оценка воздействия медно-колчеданных месторождений на формирование минерального состава донных отложений малых рек / П.А. Харько, А.С. Плохов // Вестник евразийской науки (интернет-журнал). - 2019. – Т. 11. - №6. – С. 1-9.

77. Харько, П.А. Трансформация состава аллювиальных отложений в зоне воздействия техногенных массивов, формирующихся при добыче и переработке медно-колчеданных руд / П.А. Харько, М.А. Пашкевич // Сборник тезисов докладов X Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: эффективное освоение месторождений полезных ископаемых», Санкт-Петербург, СПГУ. – 2020 – С. 61-62.

78. Чалов, Р.С. Руслевой режим рек Северной Евразии (в пределах бывшего СССР) / Р. С. Чалов, В. М. Евстигнеев, А. А. Зайцев и др. – М., 1994. – 326 с.

79. Шабанов, В.А. Изучение процесса низкотемпературного обезвоживания донных отложений в геоконтейнерах / В.А. Шабанов, А.В. Шабанова, О.О. Шипулина //Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – №8 (50).- Ч.2. – С. 69-74.

80. Шишелова, Т.И. Применение золы-уноса ТЭЦ ОАО «ИРКУТСКЭНЕРГО» для химической мелиорации кислых почв / Т.И. Шишелова, М.Н. Самусева // Успехи современного естествознания. – 2004. – № 12. – С. 85-86.

81. Штриплинг, Л.О. Основы очистки сточных вод и переработки твердых отходов : учебное пособие. Л. О. Штриплинг, Ф. П. Туренко. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2005. – 193 с.

82. Щуклин, П.В. Анализ основных направлений очистки производственных сточных вод от ионов тяжелых металлов / П.В. Щуклин, Е.Ю. Ромахина // Вестник ПГТУ. Урбанистика. – 2011. – № 3. – С. 108–118.

83. Экологическая оценка загрязнения тяжелыми металлами почв промышленных зон города Сибай / Р.Ф. Хасанова, Я.Т. Суяндукров, И.Н. [и др.] // Вестник ОГУ. – 2017. – № 12 (212). – С. 74-77.

84. Энергетический бюллетень. Энергетическая утилизация твердых бытовых отходов: [Электронный ресурс] // Аналитический центр при правительстве Российской Федерации : официальный сайт. – 2017. – № 48. - URL: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/13175.pdf> (дата обращения: 13.04.2022).

85. Янин, Е.П. Введение в экологическую геохимию / Е. П. Янин - М.: ИМГРЭ, 1999. – 68 с.

86. Янин, Е.П. Геохимические особенности малых рек сельскохозяйственных ландшафтов Е.П. Янин // География и природ. ресурсы. – 1985. – № 1. – С. 167 - 168.

87. Alekseenko, A.V. Novorossiysk agglomeration landscapes and cement production: Geochemical impact assessment / A.V. Alekseenko, M.A. Pashkevich - DOI: 10.1088/1755-1315/43/1/012050 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Institute of Physics Publishing. – 2016. – №43. – PP. 1-6.

88. Borowski, G. Comparison of the processing conditions and the properties of granules made from fly ash of lignite and coal / G. Borowski, M.Ozga – DOI: 10.1016/j.wasman.2020.01.024 // Waste Management. – 2020. – Vol. 104. – PP. 192-197.

89. Czop, M. Analysis of the possibility of using slags from the thermal treatment of municipal waste as potential component of cement – case study / M. Czop, B. Łaźniewska-Piekarczyk, M. Kajda-Szcześniak – DOI: 10.3390/ma14216491 // Materials. – 2021. – Vol. 14. – p. 6491.

90. Dold, B. Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing / B. Dold, L. Fontboté - DOI:10.1016/S0375-6742(01)00174-1 // Journal of Geochemical Exploration. - 2001. - Т. 74. - № 1–3. - PP. 3-55.

91. Finch, J. W. The circulation of underground aqueous solutions and the deposition of lode ores / J.W. Finch // Colorado Sei. Soc., Proc. – 1904. – Vol. 7. - PP. 193-252.

92. Ljungberg, J. The geochemical dynamics of oxidising mine tailings at Laver, Northern Sweden / J. Ljungberg, B. Öhlander - DOI: 10.1016/S0375-6742(01)00175-3 // Journal of Geochemical Exploration. – 2001. – T. 74. – № 1-3. – P. 57–72.

93. **Kharko, P.A.** Bottom sediments in a river under acid and alkaline wastewater discharge / P.A. Kharko, V.A. Matveeva - DOI: 10.12912/27197050/134870 // Ecological Engineering and Environmental Technology. – 2021. – Vol. 22. – PP. 35-41.

94. Patterns of soil contamination, erosion and river loading of metals in a gold mining region of northern Mongolia / J. Jarsjö, S.R. Chalov, J. Pietroń [et al.] - DOI: 10.1007/s10113-017-1169-6 // Regional Environmental Change. Springer Verlag. - 2017. – Vol. 17. – № 7. – PP. 1991–2005.

95. The use of municipal solid waste incineration ash in various building materials: A Belgian point of view / A.M. Joseph, R. Snellings, P. Van den Heede [et. al] – DOI: 10.3390/ma11010141 // Materials. – 2018. – Vol. 11. – PP. 141-170.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Графики накопления металлов в донных отложениях

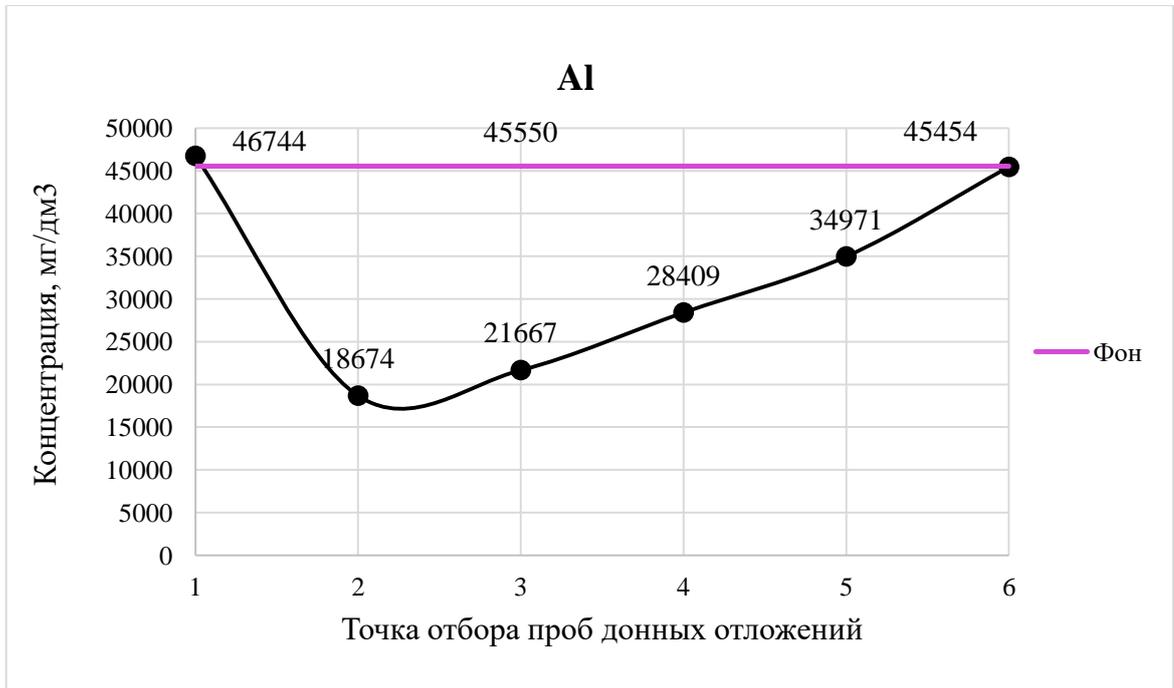


Рисунок А.1 – График накопления алюминия в донных отложениях

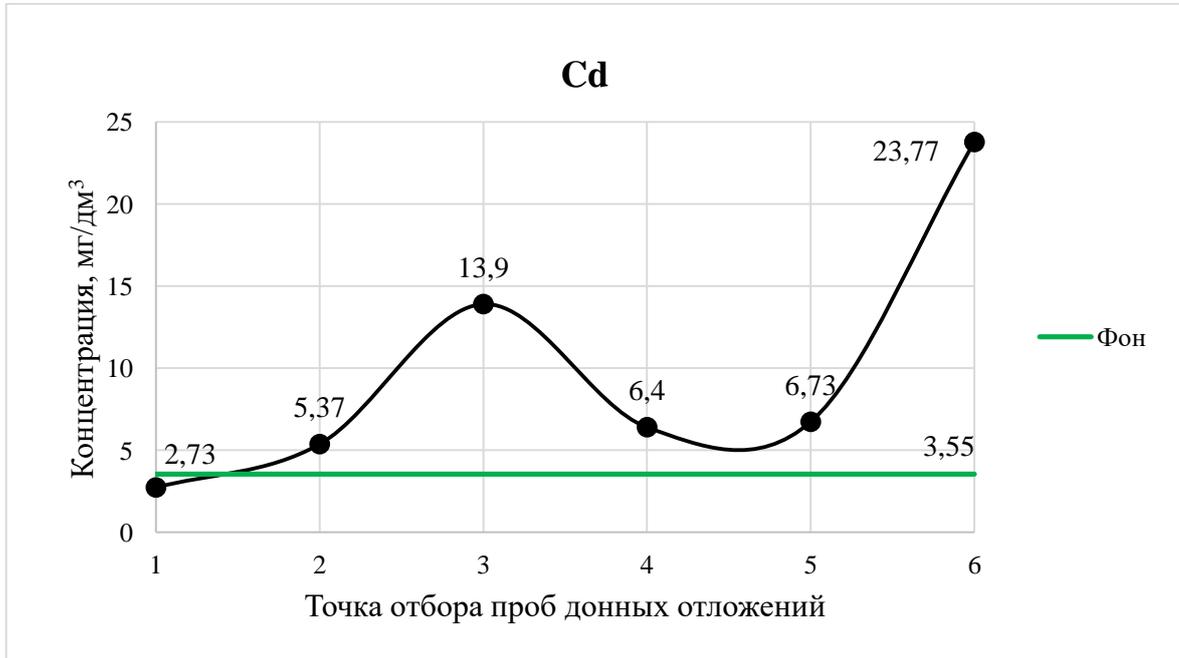


Рисунок А.2 – График накопления кадмия в донных отложениях

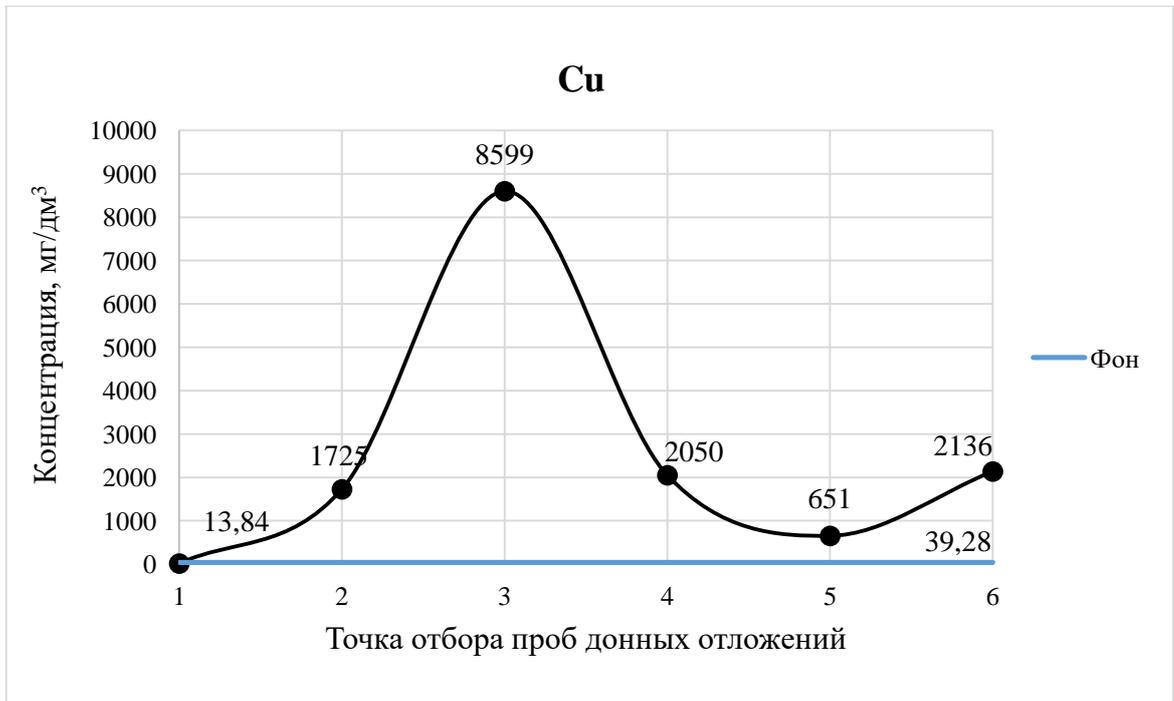


Рисунок А.3 – График накопления меди в донных отложениях

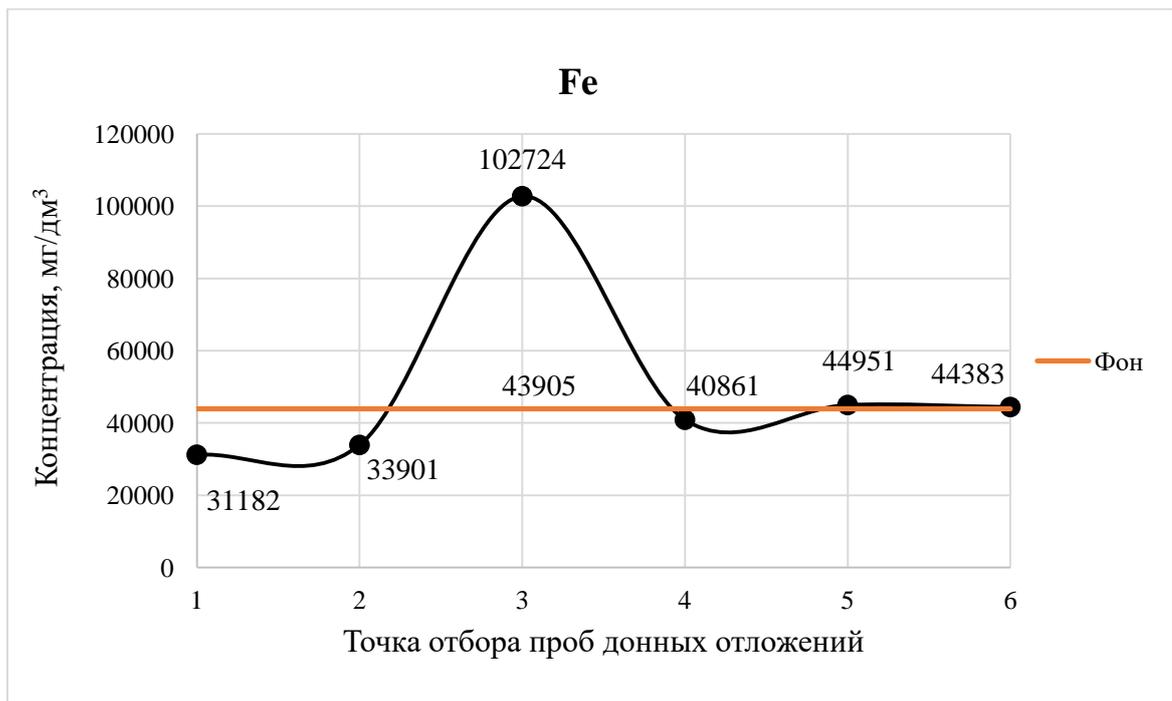


Рисунок А.4 – График накопления железа общего в донных отложениях

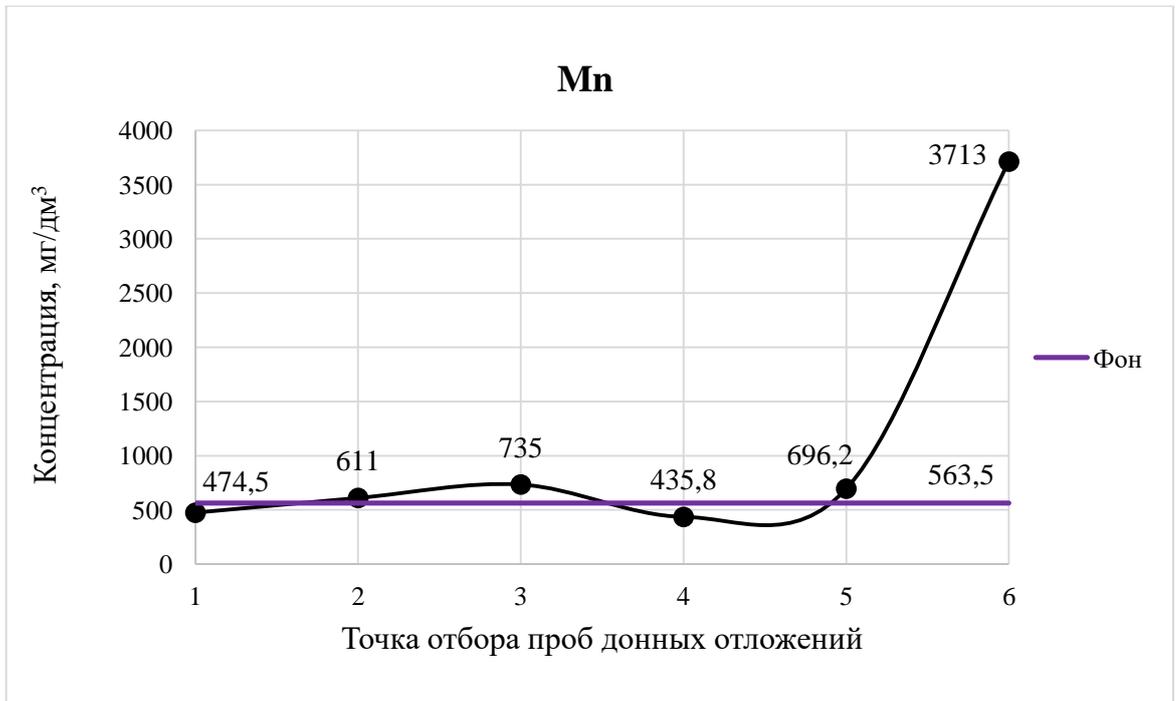


Рисунок А.5 – График накопления марганец в донных отложениях



Рисунок А.6 – График накопления цинка в донных отложениях

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Фазовый состав проб донных отложений

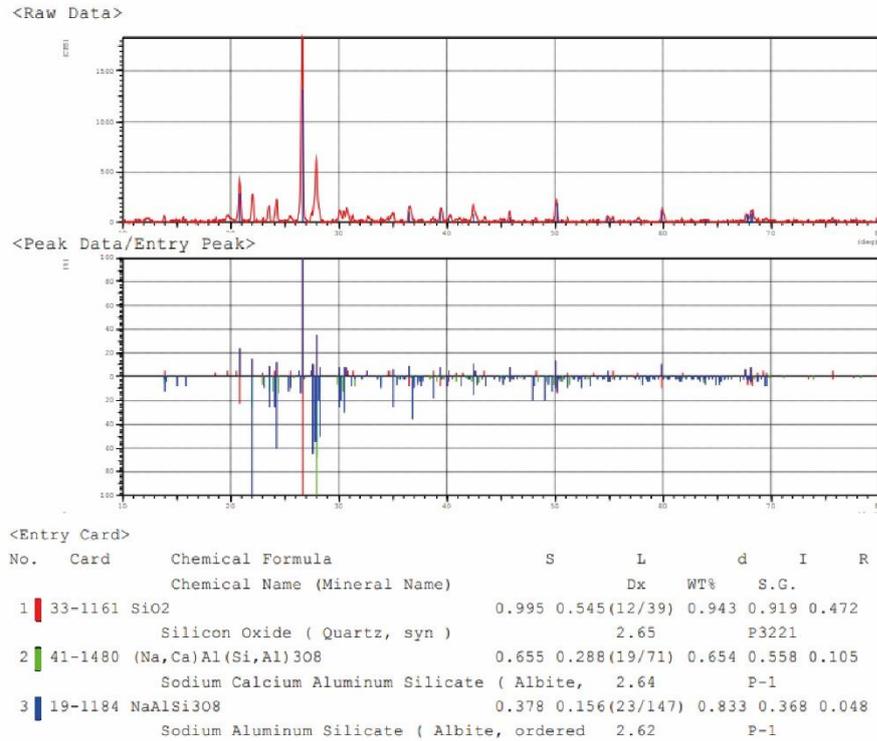


Рисунок Б.1 – Фазовый состав проб донных отложений ДО 1

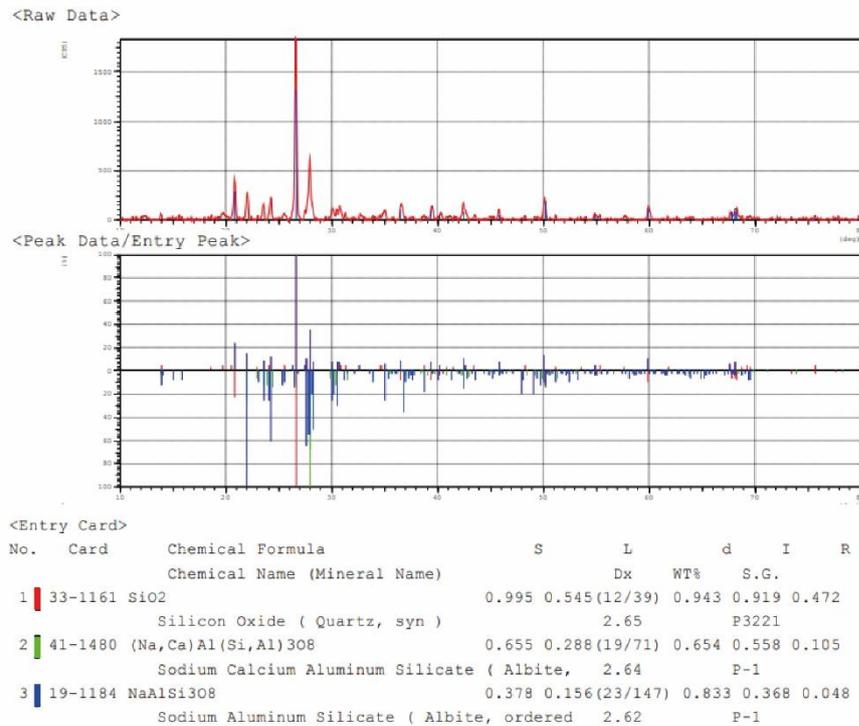


Рисунок Б.2 – Фазовый состав проб донных отложений ДО 2

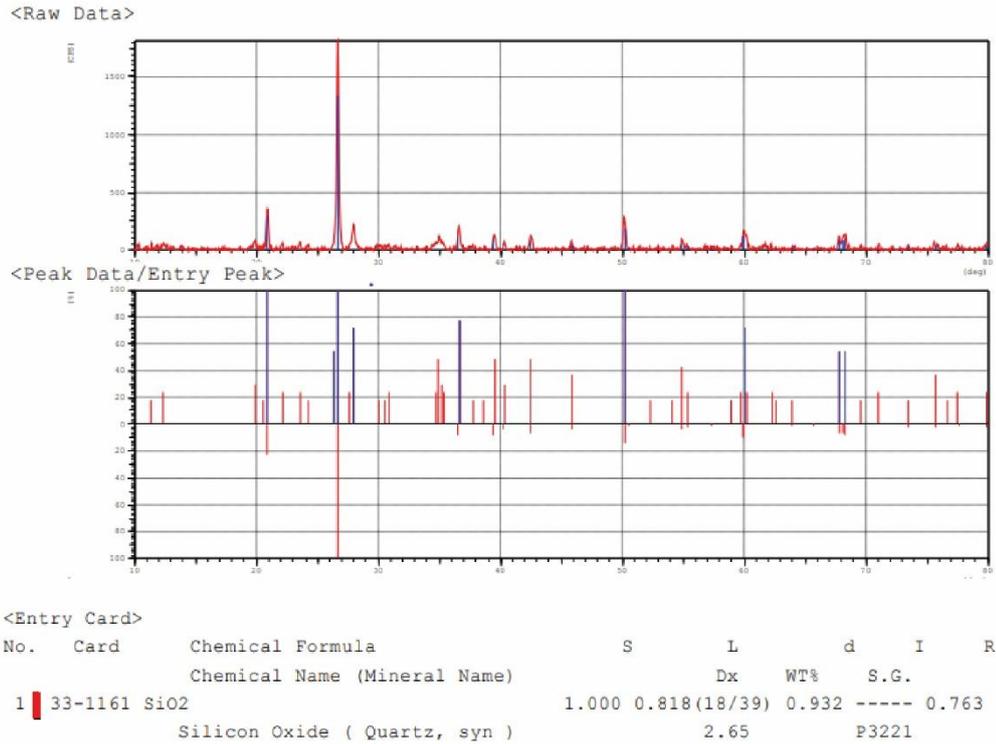


Рисунок Б.3 – Фазовый состав проб донных отложений ДО 4

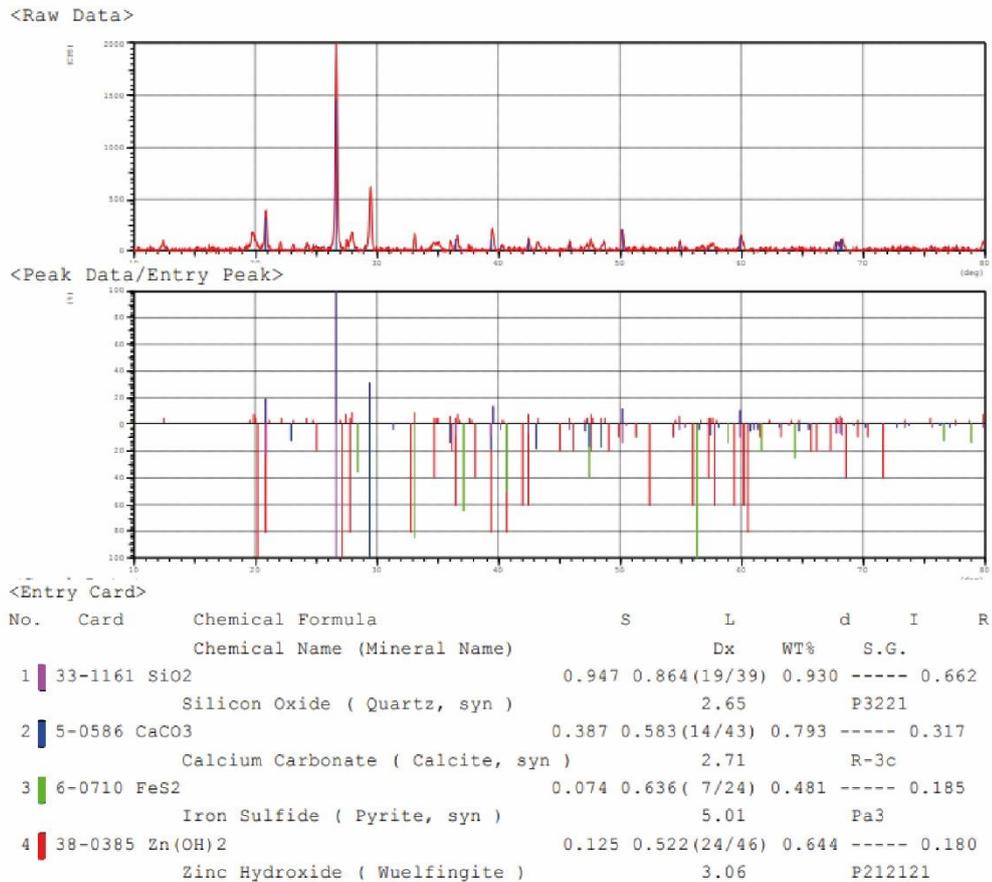


Рисунок Б.4 – Фазовый состав проб донных отложений ДО 5

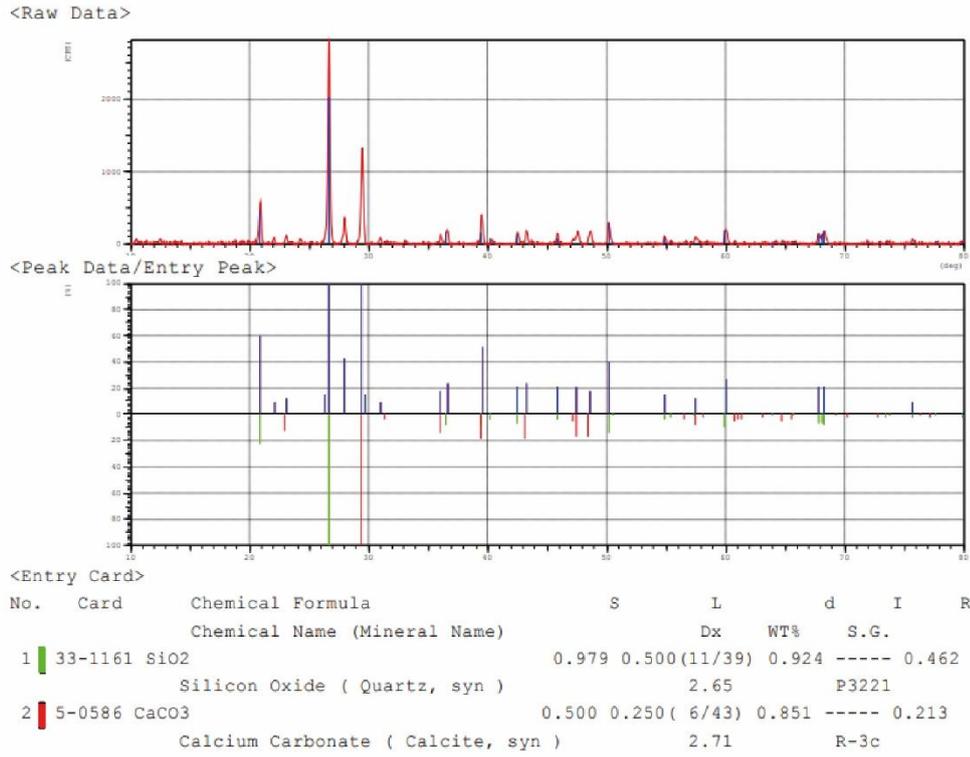


Рисунок Б.5 – Фазовый состав проб донных отложений ДО 6

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Фазовый состав образцов золы от сжигания ТКО

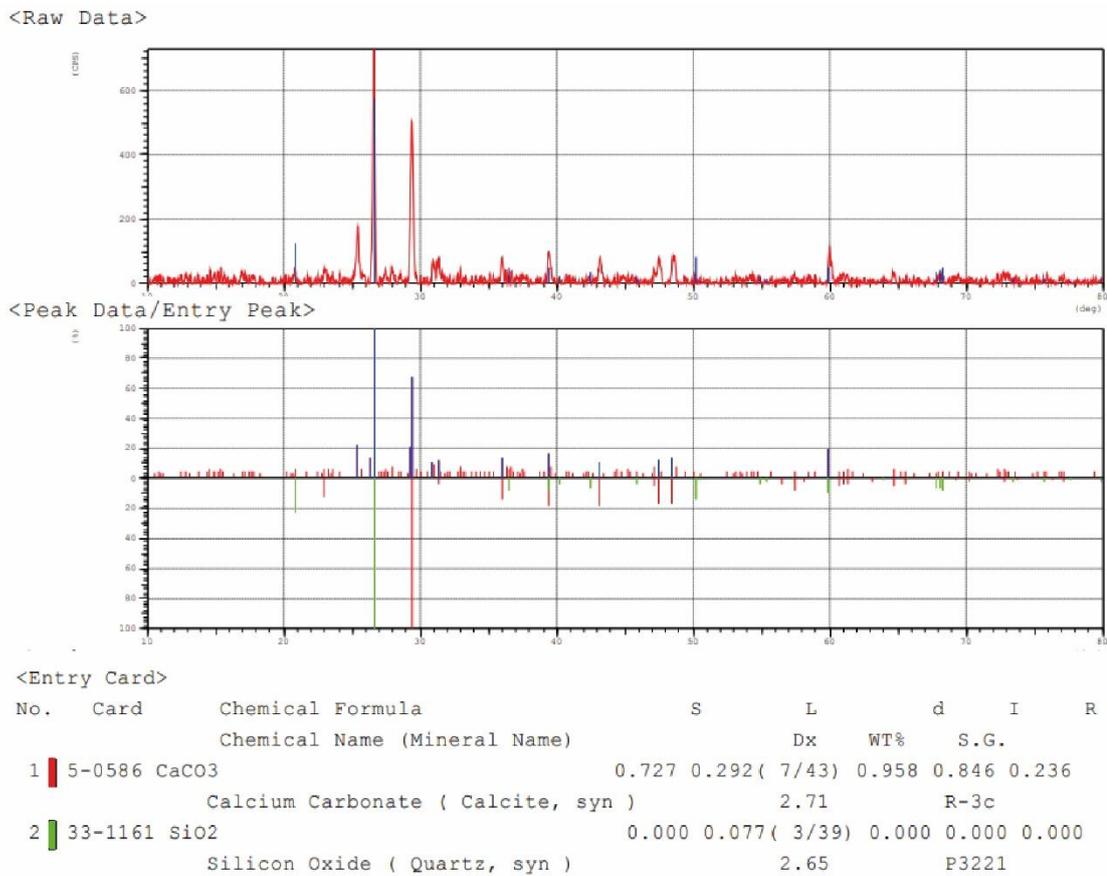
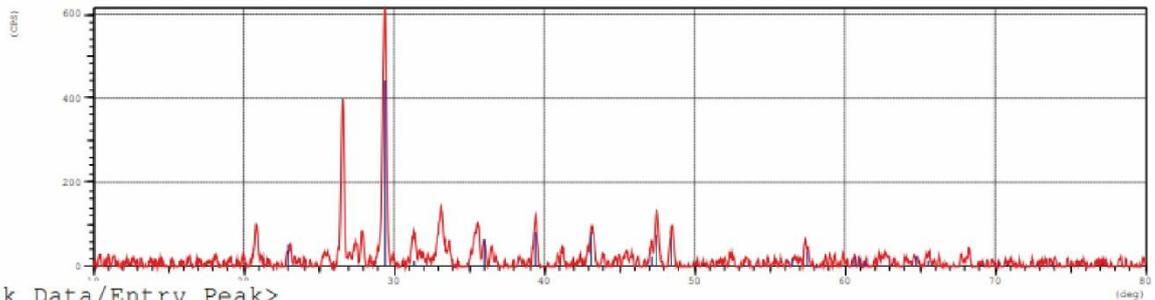
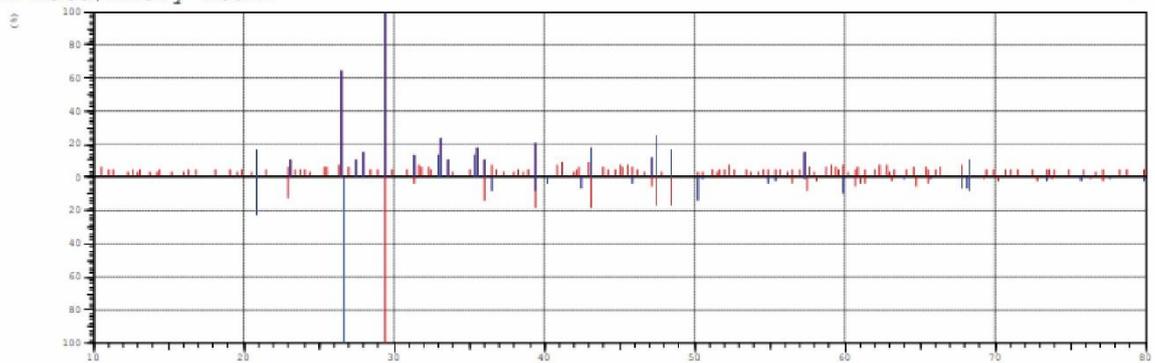


Рисунок В.1 – Фазовый состав золы от сжигания ТКО. Образец 1

&lt;Raw Data&gt;



&lt;Peak Data/Entry Peak&gt;

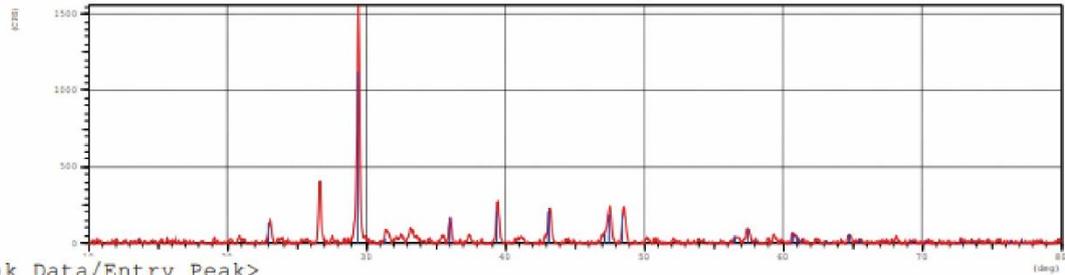


&lt;Entry Card&gt;

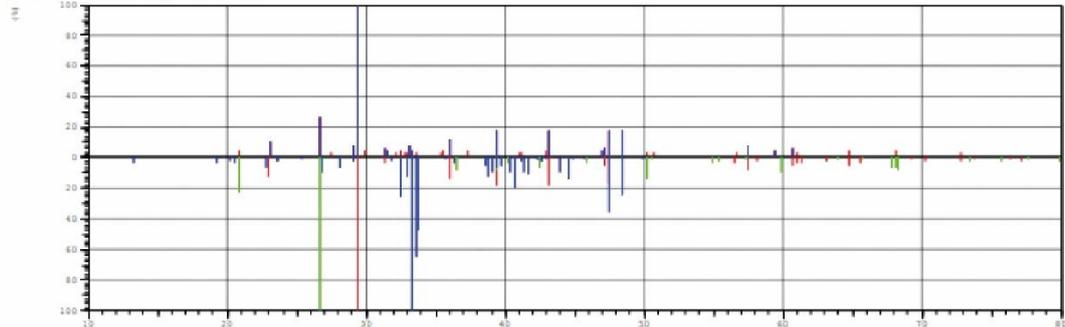
No.	Card	Chemical Formula	S	L	d	I	R
		Chemical Name (Mineral Name)	Dx		WT%	S.G.	
1	5-0586	CaCO <sub>3</sub>	0.967	0.417(10/43)	0.912	-----	0.310
		Calcium Carbonate ( Calcite, syn )		2.71			R-3c
2	33-1161	SiO <sub>2</sub>	0.650	1.000( 1/39)	0.841	-----	0.841
		Silicon Oxide ( Quartz, syn )		2.65			P3221

Рисунок В.2 – Фазовый состав золы от сжигания ТКО. Образец 2

&lt;Raw Data&gt;



&lt;Peak Data/Entry Peak&gt;



&lt;Entry Card&gt;

No.	Card	Chemical Formula	S	L	d	I	R
		Chemical Name (Mineral Name)	Dx	WT%	S.G.		
1	5-0586	CaCO <sub>3</sub>	0.977	0.458 (11/43)	0.931	0.941	0.402
		Calcium Carbonate ( Calcite, syn )		2.71	R-3c		
2	33-1161	SiO <sub>2</sub>	0.000	0.077 ( 3/39)	0.000	0.000	0.000
		Silicon Oxide ( Quartz, syn )		2.65	P3221		
3	35-0591	Ca <sub>3</sub> Mg(SiO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0.372	0.239 (11/47)	0.737	0.240	0.042
		Calcium Magnesium Silicate ( Merwinite, sy		3.31	P21/a		

Рисунок В.3 – Фазовый состав золы от сжигания ТКО. Образец 3

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Расчет кратности основного разбавления сточных вод

Кратность основного разбавления  $n_0$  определяется по формуле Г.1.

$$n_0 = \frac{q + \gamma \cdot Q}{q}, \quad (\text{Г.1})$$

где  $q$  – максимальный расход сточных вод, м<sup>3</sup>/с

$Q$  - расчетный расход водотока, м<sup>3</sup>/с;

$\gamma$  - коэффициент смешения, показывающий, какая часть речного расхода смешивается со сточными водами в максимально загрязненной струе расчетного створа, определяемый по формуле Г.2.

$$\gamma = \frac{1 - e^{-\alpha^3 \sqrt{l}}}{1 + \frac{Q}{q} \cdot e^{-\alpha^3 \sqrt{l}}}, \quad (\text{Г.2})$$

где  $l$  - расстояние от выпуска до расчетного створа по фарватеру, м;

$\alpha$  - коэффициент, учитывающий гидравлические условия в реке, определяемый по формуле Г.3.

$$\alpha = \varphi \cdot \xi \cdot \sqrt[3]{\frac{D}{q}}, \quad (\text{Г.3})$$

где  $\varphi$  - коэффициент извилистости (отношение расстояния до контрольного створа по фарватеру к расстоянию по прямой);

$\xi$  - коэффициент, зависящий от места выпуска сточных вод (при выпуске у берега  $\xi = 1$ , при выпуске в стрежень реки  $\xi = 1,5$ );

$D$  - коэффициент турбулентной диффузии, м<sup>2</sup>/с.

Для летнего времени коэффициент турбулентной диффузии определяется по формуле Г.4.

$$D = \frac{g \cdot \vartheta \cdot H}{31 \cdot n_{ш} \cdot C^2}, \quad (\text{Г.4})$$

где  $g$  - ускорение свободного падения,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;

$\vartheta$  - средняя скорость течения реки, м/с;

$H$  - средняя глубина реки, м;

$n_{ш}$  - коэффициент шероховатости ложа реки, определяемый по справочным данным;

$C$  - коэффициент (м<sup>0,5</sup>/с), определяемый по формуле Г.5 (при  $H \leq 5$  м)

$$C = \frac{R^y}{n_{ш}}, \quad (\text{Г.5})$$

где  $R$  - гидравлический радиус потока, м ( $R \approx H$ ).

Коэффициент  $y$  определяется по формуле Г.6

$$y = 2,5 \cdot \sqrt{n_{ш}} - 0,13 - 0,75 \cdot \sqrt{R} \cdot (\sqrt{n_{ш}} - 0,1) \quad (\text{Г.6})$$

Исходные данные для расчета представлены в таблице Г.1.

Таблица Г.1 – Исходные данные для расчета

$q$ , м <sup>3</sup> /с	$Q$ , м <sup>3</sup> /с	$l$ , м	$\varphi$	$\xi$	$\vartheta$ , м/с	$H$ , м	$n_{ш}$	$R$ , м
0,04	12,8	500	1,11	1,5	3,2	1	0,05	1

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

## Акт внедрения результатов диссертационной работы на производственном объекте



ООО «Компания «ГрандПроект»

Утверждаю

Генеральный директор  
ООО «Компания «ГрандПроект»  
Горюнова Татьяна Валерьевна

Дата « 07 » 2020



АКТ

о внедрении (использовании) результатов  
кандидатской диссертации  
Харько Полины Александровны  
по научной специальности (1.6.21, Геоэкология)

Комиссия (НТС, рабочая, специальная) в составе:

Председатель: Горюнова Татьяна Валерьевна;

Члены комиссии: Шматова Анна Константиновна, Нгуен Май Лан.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «**Ликвидация последствий загрязнения малых природных водотоков в зоне воздействия техногенных массивов минерально-сырьевого комплекса**», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в Проекте технической документации на новую технологию деятельности ООО Фирма «ЭКОТРАК» при разработке в виде:

- экспериментальных данных по определению оптимальной дозы реагента в виде отходов сжигания ТКО и времени равновесного значения водородного показателя, обеспечивающие очистку сильно концентрированных сточных вод, а также вод, содержащих специфические и токсичные загрязняющие вещества, от металлов;
- экспериментальных данных по исследованию способности отходов сжигания ТКО к нейтрализации и очистке производственных сточных вод от металлов, что позволяет снижать содержание ионов металлов с эффективностью 91-99%;

– рекомендаций по технологическому оформлению сбора и отвода инфильтрационных вод техногенных массивов.

Решение о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертации утверждено протоколом № 07/02-2023 от 07.02.2023. Дата начала внедрения 14 февраля 2023.

Использование указанных результатов позволит:

- снизить негативное воздействие инфильтрационных вод техногенных массивов, содержащих токсичные загрязняющие вещества, на компоненты природной среды, за счет их сбора и отвода на нейтрализацию и очистку от металлов с использованием отходов сжигания ТКО;
- вторично использовать отходы сжигания ТКО, тем самым сократив затраты на реагенты.

Результаты внедрялись при выполнении НИР и ОКР по теме «Технология обработки и утилизации отходов, образующихся при сборе и обработке сточных вод, вод систем оборотного водоснабжения, инфильтрационных вод и отходов при обслуживании сооружений для сбора и отвода инфильтрационных вод объектов захоронения твердых коммунальных отходов».

**Председатель комиссии**

Генеральный директор

ООО «Компания «ГрандПроект»



Горюнова Т.В.

**Члены комиссии:**

Главный эколог



Шматова А.К.

Инженер-эколог

Нгуен М.Л.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

## Патент

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2779420

**СПОСОБ ОЧИСТКИ ПОДОВАЛЬНЫХ ВОД ОТ  
ИОНОВ ЖЕЛЕЗА И МЕДИ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
"Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Смирнов Юрий Дмитриевич (RU), Харько Полина  
Александровна (RU), Пашкевич Мария Анатольевна (RU)*

Заявка № 2022104784

Приоритет изобретения 24 февраля 2022 г.

Дата государственной регистрации  
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 06 сентября 2022 г.

Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает 24 февраля 2042 г.

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

Электронный документ подписан квалифицированным подписью  
Сертификат 08849027914-010194edba24140bc7  
Подпись: **Зубов Юрий Сергеевич**  
Действителен с 20.08.2021 по 20.08.2023

Ю.С. Зубов

