

На правах рукописи

Бабенко Дмитрий Александрович

A handwritten signature in black ink, enclosed in an oval shape. The signature appears to be 'Д. А. Бабенко'.

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ХРАНЕНИЯ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ МЕДНЫХ РУД**

*Специальность 25.00.36 – Геоэкология (в горно-
перерабатывающей промышленности)*

**Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Пашкевич Мария Анатольевна

Официальные оппоненты:

Стась Галина Викторовна

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», кафедра геотехнологий и строительства подземных сооружений, доцент;

Семячков Александр Иванович

доктор геолого-минералогических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук, Центр природопользования и геоэкологии, руководитель.

Ведущая организация – Научно-производственная корпорация «Механобр-техника» (акционерное общество), г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится 23 сентября 2021 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.06 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 23 июля 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ИВАНОВ
Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Согласно государственному докладу Министерства природных ресурсов и экологии РФ, в настоящее время в Российской Федерации образуется более 7,5 млрд тонн производственных отходов, причём за последние 20 лет эти значения увеличились в 4 раза. Среди отраслей промышленности горнодобывающая и горно-перерабатывающая отрасли являются наиболее отходоёмкими. Так, в результате добычи и переработки полезных ископаемых образуется 93% промышленных отходов от общего количества в РФ.

Среди отходов горного производства одними из наиболее опасных являются отходы обогащения сульфидных руд тяжелых металлов. Наиболее распространённым способом складирования данных отходов является их размещение в специально сконструированных гидротехнических сооружениях – хвостохранилищах. Эксплуатация данных гидротехнических сооружений сопровождается образованием кислых дренажных вод из жидкой фазы отходов и вод инфильтрационного происхождения, вследствие окисления сульфидной серы. В результате утечек дренажных вод через основание и дамбы хранилищ происходит формирование гидрохимических ореолов и потоков загрязнения со значениями водородного показателя $pH = 2-3$.

Несмотря на достаточную изученность процессов складирования отходов горнодобывающей и горно-перерабатывающей промышленности, до настоящего времени актуальной задачей является разработка экологически эффективных и экономически целесообразных средозащитных мероприятий по длительному снижению негативного воздействия хвостохранилищ на компоненты природной среды с одновременной консервацией ценных компонентов в потенциальных техногенных месторождениях.

Объектом настоящего исследования является хвостохранилище Гайского горно-обогатительного комбината, введённое в эксплуатацию в 1966 году, которое представляет собой гидротехническое сооружение косогорного типа, с намывным

способом складирования материала (хвостов флотации). В связи с использованием вновь образующихся отходов обогащения для рекультивации отработанного карьера №2, а также запуском комплекса пастового сгущения для рекультивации карьеров №1 и №3 исключается необходимость в эксплуатации хвостохранилища. Помимо отрицательного воздействия на окружающую природную среду, отходы обогащения, размещенные в хвостохранилище, имеют потенциальную ценность в качестве техногенного сырья для комплексного извлечения полезных ископаемых, поэтому возникает необходимость его консервации.

Степень разработанности темы исследования

Вопросу воздействия предприятий горной отрасли на окружающую среду, рациональному и комплексному использованию сырья посвящены работы таких учёных, как В.А. Чантурия, И.В. Шадрюнова, А.И. Семячков, М.А. Пашкевич, А.М. Гальперин, В. Фёрстер, Х.-Ю. Шеф, К. Дребенштедт.

Опыт использования геосинтетиков, геомембран и бентонитовых матов в гражданском строительстве описан в работах Ю. Шлее, Х. Н. Никогосова, А. А. Ткачева, И.П. Гамеляк, Е.А. Шевчук, R. M. Koerner, Daniel D. E. Final.

Оценке безопасности хвостохранилищ, шламонакопителей с применением противofильтрационных элементов из полиэтиленовой плёнки посвящены работы Г.Г. Круглова, С.П. Гатилло, М.Е. Минчуковой, Б.А. Богатова, А.Д. Смычника, С.Ф. Шемет.

Известны работы В.Д. Глебова, И. Е. Кричевского, В.А. Бородина, Н. А. Кильдишева в области использования пластмасс в гидротехническом строительстве.

Вопросы нормативного регулирования применения и производства полимерных материалов на территории РФ решены О.И. Гладштейном, И. И. Лонкевичем, О. Лапиной.

Изучению реологии полимеров посвящены работы Г.В. Виноградова, А.Я. Малкина, структура и прочность полимеров описаны в работе В.Е. Гуль, физикохимия полимеров изучена в работе А.А. Тагер, химические реакции полимеров описаны Е. Феттес.

Несмотря на распространенность использования полимерных материалов в качестве основы гидроизоляционных материалов при строительстве объектов размещения отходов различных производств, на сегодняшний день практически не изучены возможности применения вторичных полимеров в качестве гидроизоляционного материала.

Тема диссертации на соискание степени кандидата технических наук соответствует областям исследования паспорта научной специальности 25.00.36 – Геоэкология (в горно-перерабатывающей промышленности) в пунктах 3.6 и 3.10.

Цель работы: обеспечение экологически безопасной консервации потенциального техногенного месторождения медных руд после вывода из эксплуатации объекта складирования отходов обогащения.

Идея работы: проведение консервации хвостохранилища ПАО «Гайский ГОК» с использованием противофильтрационного экрана, включающего гидроизолирующий слой из вторично переработанного полиэтилена низкого давления устойчивого к химическому воздействию.

Для достижения цели работы были поставлены и последовательно выполнены следующие **задачи:**

1) выявление механизма формирования техногенных гидрогеохимических ореолов в районе расположения хвостового хозяйства Гайского горно-обогатительного комбината.

2) оценка свойств хвостов обогащения Гайского горно-обогатительного комбината в аспекте их отнесения к потенциальному минеральному сырью.

3) разработка способов снижения негативного воздействия хвостового хозяйства на компоненты природной среды.

4) разработка новых кислотоустойчивых материалов для гидроизоляции хвостохранилища Гайского горно-обогатительного комбината.

5) эколого-экономическое обоснование эффективности предлагаемого способа изоляции.

Научная новизна

1. Выявлены закономерности водной миграции загрязняющих компонентов с территории хвостохранилища Гайского ГОКа, а также потерь полезных компонентов из заскладированных отходов обогащения в зависимости от кислотно-щелочных условий (рН) и характера окислительно-восстановительной обстановки (Eh).

2. Установлены зависимости эксплуатационных характеристик экранирующих материалов из вторично переработанных полимеров (полиэтилен низкого давления, полиэтилен высокого давления, полипропилен) от условий их изготовления и режимов эксплуатации.

Методология и методы исследования

В качестве основных методов исследований применялись:

- системный анализ источников и факторов негативного воздействия объекта исследования на поверхностные и подземные воды;
- химико-аналитические, экспериментальные методы исследования в лабораторных и полевых условиях;
- математическая статистика, материальное (натурное и аналоговое) моделирование, картирование при помощи ГИС-технологий;
- эколого-экономическая оценка.

Теоретическая и практическая значимость

Разработано средозащитное мероприятие, заключающееся в экранировании минеральных отходов предприятий минерально-сырьевого комплекса с использованием материала на основе вторично переработанного полиэтилена низкого давления. Предложено направление утилизации вторично переработанного полиэтилена низкого давления. Обоснована консервация хвостохранилища ПАО «Гайский горно-обогатительный комбинат» как потенциального техногенного полиметаллического месторождения. Рассчитан эколого-экономический эффект от мероприятий по консервации хвостохранилища ПАО «Гайский горно-обогатительный комбинат».

Защищаемые положения:

1. Функционирование хвостохранилища ПАО «Гайский горно-обогатительный комбинат» сопровождается потерями потенциального техногенного сырья в результате водной эрозии с формированием техногенного гидрогеохимического ореола загрязнения, площадью более 840 га, высококонтрастного по загрязняющим веществам: $K_{c_{Al}} = 515$; $K_{c_{Cu}} = 396$; $K_{c_{Zn}} = 30,2$; $K_{c_{Fe}} = 1216$; $K_{c_{Mn}} = 23,8$; $K_{c_{Ni}} = 5,7$; $K_{c_{Pb}} = 11,2$.

2. Необходимость консервации техногенного месторождения, представленного отходами обогащения Гайского ГОКа обусловлена содержанием в них ценных компонентов: золота – 0.6 г/т (запасы порядка 50 т), серебра – 3.8 г/т (запасы порядка 300 т), меди – 0,17 % (запасы порядка 140 тыс. т), цинка – 0.7 % (запасы порядка 140 тыс. т).

3. Защита окружающей среды и сохранение потенциального минерального сырья в отходах обогащения на этапе завершения эксплуатации хвостохранилища Гайского ГОКа должно достигаться путём его консервации с применением конструкции противофильтрационного экрана, состоящего из выравнивающего слоя скальных грунтов, подстилающего слоя песка крупностью не более 3 мм и $K_f = 10^{-4}$ м/с, мощностью до 0,15 м, полиэтилена низкого давления, толщиной слоя 3,0-4,0 мм, изготовленного при температуре исходного материала 160-190°C, дренажного слоя из песка крупностью не более 3 мм и $K_f = 10^{-4}$ м/с толщиной до 0,15 м, слоя грунта мощностью 0,15-0,3 м и системы водоотводных канав по периметру хвостохранилища для сбора и отвода ливневых вод.

Степень достоверности результатов, изложенных в диссертации, подтверждается значительным объёмом фактического материала, использованием современных физико-химических методов анализа и компьютерного моделировании, сходимостью полученных результатов с исследованиями других авторов.

Апробация работы проведена на научно-практических мероприятиях с докладами на 7-й Международной научно-практической конференции молодых учёных и студентов: «Опыт прошлого – взгляд в будущее» (г. Тула, 2017 г.), 58th Konferencja

Studenckich Kół Naukowych Pionu Górniczego AGH (г. Краков, 2017 г.), XVII Всероссийской конференции-конкурсе студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2019 г.), XV International forum-contest of students and young researches “Topical Issues Of Rational Use Of Natural Resources” (г. Санкт-Петербург, 2019 г.), 70th Berg-Und Huttenmannischer TAG 2019 (г. Фрайберг, 2019).

Личный вклад автора заключается в проведении литературного и патентного анализа по теме исследования; выполнении полевых работ по опробованию подземных и поверхностных вод, отходов производства, транспортированию проб в лабораторию и проведении аналитических исследований; изготовлении образцов гидроизоляционного материала и определении его физико-механических свойств и стойкости к воздействию агрессивных химических сред.

Публикации по работе

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 10 печатных работах, 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 (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о регистрации права на программу для ЭВМ.

Объем и структура работы: диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка. Содержит 116 страниц машинописного текста, 12 рисунков, 21 таблиц и список литературы из 62 наименований.

Благодарности. Автор благодарен научному руководителю профессору М.А. Пашкевич за постоянную поддержку при написании диссертации, сотрудникам центра коллективного пользования Горного университета за помощь в организации и проведении исследований, коллективу кафедры геоэкологии, а также начальнику отдела охраны окружающей среды АО «Механобр

инжиниринг» М.Б. Григорьевой за ценные советы в процессе проведения исследований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации раскрывается актуальность темы, производится постановка цели и задач исследования, перечисляются использованные методы и исходные данные, обосновывается теоретическая и практическая важность выполненных исследований.

В первой главе представлен литературный обзор, патентный анализ, посвященный вопросу негативного воздействия хвостохранилищ медных руд на компоненты природной среды, а также способам консервации хвостохранилищ и иных объектов размещения отходов производства, необходимые сведения о предприятии.

Во второй главе представлены результаты опробования подземных и поверхностных вод в районе расположения хвостового хозяйства. Выявлено наличие гидрохимического ореола загрязнения тяжелыми металлами с высокими коэффициентами контрастности. Проведены исследования по определению ценности в качестве техногенного сырья и степени опасности отходов обогащения.

В третьей главе представлены результаты исследований физико-механических свойств вторично переработанных полимеров, их химической стойкости к воздействию агрессивных кислот и щелочной сред. Определены типовые кривые линии относительного удлинения от прикладываемого давления образцов вторично переработанного полиэтилена низкого давления, полиэтилена высокого давления и полипропилена, изготовленных в диапазоне температур 160-240°C с шагом 10°C.

В четвёртой главе предложена конструкция противofильтрационного экрана для консервации хвостохранилища. Приводится расчёт эколого-экономического эффекта при проведении консервации хвостохранилища с применением противofильтрационного экрана из вторично переработанного полиэтилена низкого давления.

1. Функционирование хвостохранилища ПАО «Гайский горно-обогатительный комбинат» сопровождается потерями

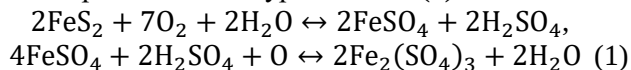
потенциального техногенного сырья в результате водной эрозии с формированием техногенного гидрогеохимического ореола загрязнения, площадью более 840 га, высококонтрастного по загрязняющим веществам: $K_{cAl} = 515$; $K_{cCu} = 396$; $K_{cZn} = 30,2$; $K_{cFe} = 1216$; $K_{cMn} = 23,8$; $K_{cNi} = 5,7$; $K_{cPb} = 11,2$.

ПАО «Гайский горно-обогатительный комбинат» (далее – Гайский ГОК) входит в АО «Уральская горно-металлургическая компания», расположен в Оренбургской области, административном центре Гайского района – городе Гай. На предприятии производительностью 8 млн. тонн по руде, перерабатываются медные руды месторождений «Гайское», «Осеннее», «Летнее» с получением медного, цинкового концентратов. Гайское месторождение является крупнейшим месторождением Южного и Среднего Урала, запасы меди категории А+В+С₁ составляют более 4,3 млн. т. Около 10 % добычи цинка в стране обеспечивает Гайский ГОК.

В результате обогащения руды методом флотации на обогатительной фабрике образуются отходы производства – хвосты флотации, представляющие собой пульпу с соотношением твёрдого к жидкому 1:5,1. Твёрдая часть пульпы представлена мелкозернистым песком, плотностью 2,3 т/м³, со средневзвешенным диаметром 0,1 мм. Минеральный состав сложен кварцем, пиритом, хлоритом, глинисто-гидрослюдистыми образованиями, сфалеритом, арсенопиритом, ковеллином. Химический состав представлен оксидами кремния, алюминия, кальция, натрия, магния, титана, сульфидным и окисленным железом, медью, цинком, серой. В год образуется порядка 50 млн т пульпы, из которой извлекается крупнозернистая фракция хвостов для приготовления закладочной смеси, а оставшаяся часть направляется на рекультивацию отработанного карьера №2. В настоящее время проводятся пусконаладочные работы комплекса пастового сгущения для размещения отходов в отработанных карьерах №№1, 3. До реализации проекта рекультивации отработанного карьера складирование пульпы осуществлялось намывным способом в хвостохранилище косогорного типа, проектной площадью поверхности складировемого материала 171 га, с полезным объёмом 52,5 млн. м³. За время

эксплуатации хвостохранилища в нём накоплено около 80 млн. т хвостов флотации.

Под действием атмосферных осадков и окислительных процессов происходит формирование дренажных вод, насыщенных растворимыми формами металлов. Общий вид происходящих химических реакций представляется уравнением (1):



Несмотря на то, что в основании хвостохранилища делювиальные макропористые лёссовидные суглинки и песчано-глинистые породы юрского и третичного возраста с низкими коэффициентами фильтрации, а пионерная дамба хвостохранилища выполнена из суглинистых грунтов без механического уплотнения с дальнейшей отсыпкой скальным грунтом, из-за особенности химических реакций, протекающих в лежалых хвостах обогащения, и конструкции хвостохранилища, происходит трансформация и миграция токсичных веществ в подземные воды. В связи с этим возникает необходимость в определении степени влияния хвостохранилища на подземные и поверхностные воды.

Пробы подземных вод отбирались из наблюдательных скважин вручную специальным приспособлением (пробоотборником) в полимерные ёмкости, консервировались концентрированной азотной кислотой до $\text{pH} < 2$, охлаждались и транспортировались в соответствии с ГОСТ 31861-2012. Пробы анализировались в аккредитованном центре коллективного пользования Горного университета методом оптической спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой.

Результаты опробования подземных вод в районе расположения хвостового хозяйства позволили определить сульфатные (рудничные) воды с концентрацией $\text{Fe}_{\text{общ}}$ более 20 г/дм^3 и $\text{Al}_{\text{общ}}$ более 4 г/дм^3 , а также сульфатно-хлоридные (ореольные) воды, в которых наблюдается превышение нормативов качества воды рыбохозяйственного значения (ПДКр.х.) $\text{Fe}_{\text{общ}}$, $\text{Cu}_{\text{общ}}$, $\text{Zn}_{\text{общ}}$, $\text{Pb}_{\text{общ}}$, $\text{Ni}_{\text{общ}}$, $\text{Mn}_{\text{общ}}$, $\text{Al}_{\text{общ}}$, сульфат-иона.

Отбор поверхностных вод производился из ближайшего водного объекта – ручья Ялангас – притока второго порядка реки

Урал, впадающего в реку Сухая Губерля. Питание ручья происходит за счет талых снеговых вод, а также грунтовых вод. Поверхностные воды характеризуются повышенными концентрациями $Fe_{общ}$, $Si_{общ}$, $Zn_{общ}$, $Mn_{общ}$, хлорид-иона, сульфат-иона на расстоянии 2000 м выше точки сброса сточных вод из хвостохранилища, однако на расстоянии 500 м ниже точки сброса сточных вод (в настоящее время сброс не осуществляется) кратность превышения ПДКр.х. вышеуказанных веществ увеличивается, также появляется превышение ПДКр.х. алюминия. Рассчитан удельный комбинаторный индекс загрязненности (УКИЗВ) для ручья Ялангас, равный 5,84, который в соответствии с РД 52.24.643-2002 характеризует воду в ручье как грязную (класс качества 4а).

Подземные воды в районе расположения хвостохранилища также характеризуются повышенным содержанием $Fe_{общ}$, $Si_{общ}$, $Zn_{общ}$, $Pb_{общ}$, $Ni_{общ}$, $Mn_{общ}$, $Al_{общ}$, сульфат-иона, что свидетельствует о частичной разгрузке подземных вод в руч. Ялангас. Результаты анализа природных вод представлены в таблице 1. Карта-схема отбора проб представлена на рисунке 1.

Загрязнение подземных и поверхностных вод тяжёлыми и другими металлами возможно объяснить растворением сульфидных минералов и алюмосиликатов, входящих в состав отходов, в кислых дренажных водах. Кислые дренажные воды образуются в результате фильтрации атмосферных осадков через хвостохранилище, где под действием воды и кислорода происходит разрушение сульфидных минералов с образованием сульфатов тяжёлых и других металлов, миграция которых тесно связана с показателем pH.

В этой связи проведёнными исследованиями установлено, что происходит миграция загрязняющих компонентов, сопровождающаяся загрязнением подземных и поверхностных вод.

2. Второе защищаемое положение: необходимость консервации техногенного месторождения, представленного отходами обогащения Гайского ГОКа, обусловлена содержанием в них ценных компонентов: золота – 0.6 г/т (запасы порядка 47.9 т), серебра – 3.8 г/т (запасы порядка 303.4 т), меди – 0.17 % (запасы порядка 137726.8 т), цинка – 0.7 % (запасы порядка 135726.8 т).

Для определения ценности в качестве техногенного сырья и степени опасности отходов обогащения произведён их отбор и анализ. Отбор производился путём формирования объединенной пробы в соответствии с ПНД Ф 12.1:2.2.2.3:3.2-03. Всего отобрано две пробы: свежие – в точке выпуска отходов обогащения в хвостохранилище, так как в этом месте они имеют наиболее усредненный состав и лежалые – приблизительно 10-ти летнего срока складирования. Проведён гранулометрический анализ «свежих» хвостов обогащения ситовым методом, по результатам которого выделены классы крупности: <0,010 мм — 16,31 % мас., 0,040–0,010 мм — 32,52 % мас., 0,071 — 0,040 мм — 35,83 % мас., > 0,071 мм — 10,56 % мас. Затем определен компонентный состав отходов обогащения по классам крупности при помощи волнодисперсионного спектрометра Shimadzu XRF-1800. Общим для каждого класса крупности является преобладание железа, серы, алюминия и кремния. Содержание оксида кремния с повышением класса крупности увеличивается почти вдвое.

При помощи методов оптической спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (Shimadzu ICPE-9000) и атомно-абсорбционной спектроскопии (ContrAA 800) определено содержание подвижных форм токсичных и ценных элементов, а также их валовое содержание. Практически для всех подвижных форм элементов концентрации в свежих хвостах обогащения превышают концентрации в лежалых. Содержание растворимых в воде форм элементов в свежих хвостах обогащения выше концентраций в лежалых хвостах для алюминия, бария, хрома, меди, железа, серы, цинка. Большая часть полезных компонентов содержится в классе крупности >0,040–0,000 мм, что в целом соответствует результатам исследований хвостов обогащения медных месторождений на других объектах.

В соответствии с классификацией, разработанной Институтом проблем комплексного освоения недр РАН (ИПКОН РАН), хвосты флотации обогатительной фабрики Гайского ГОКа относятся к техногенному сырью. В качестве технологии переработки рекомендуется применение гидрометаллургии (выщелачивание, экстракция) и комбинированные процессы

(физико-химические способы обогащения с химико-металлургическими методами). Содержание меди, цинка, золота, серебра в анализируемых пробах достаточное для вовлечения отходов обогащения Гайского ГОКа во вторичную переработку в ближайшем будущем. Кроме количественного содержания полезных компонентов важна также форма их нахождения в отходах обогащения.

Согласно результатам исследований, проведённых организациями, специализирующимися на разработке технологий по переработке техногенного сырья, золото в медных рудах в основном находится в тесной ассоциации с пиритом (законсервировано в кристаллической решётке) и в меньшей степени связано с сульфидами меди. Порядка 25 % может составлять цианируемая форма соединения золота в хвостах обогащения, порядка 75 % – связанное с пиритом или халькопиритом, причём в свежих хвостах обогащения этот процент меньше, чем в лежалых.

Сравнение концентраций химических элементов в хвостах обогащения и природных водах подтверждают наличие миграции химических элементов из хвостохранилища. Происходит потеря полезных компонентов и распространение токсичных элементов. С инфильтрационными водами в подземные вымываются ценные (медь, цинк, серебро, золото) и опасные (алюминий, железо, свинец, марганец, никель) элементы. Они оказывают вредное воздействие на человека и животных.

Определены концентрации валовых и растворимых форм элементов в отходах обогащения. Суммарная относительная погрешность измерений методик измерений ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 и М-МВИ-80-2008 составляет ± 30 % при доверительном уровне 95%. Результаты с учетом погрешности представлены на рисунке 4.

Результаты проведенных исследований показали наличие гидрогеохимического ореола загрязнения, источником которого является хвостохранилище Гайского ГОКа. Кроме того, отходы обогащения содержат достаточные концентрации золота (0,6 г/т), серебра (3,8 г/т), меди (0,17 %), цинка (0,7 %) для их извлечения в будущем. В связи с этим, при выводе хвостохранилища Гайского ГОКа из эксплуатации, предлагается его консервация для

сохранения ценных компонентов и предотвращения загрязнения природных вод.

3. Защита окружающей среды и сохранение потенциального минерального сырья в отходах обогащения на этапе завершения эксплуатации хвостохранилища Гайского ГОКа должно достигаться путём его консервации с применением конструкции противofильтрационного экрана, состоящего из выравнивающего слоя скальных грунтов, подстилающего слоя песка крупностью не более 3 мм и $K_f = 10^{-4}$ м/с, мощностью до 0,15 м, полиэтилена низкого давления, толщиной слоя 3,0-4,0 мм, изготовленного при температуре исходного материала 160-190°C, дренажного слоя из песка крупностью не более 3 мм и $K_f = 10^{-4}$ м/с толщиной до 0,15 м, слоя грунта мощностью 0,15-0,3 м и системы водоотводных канав по периметру хвостохранилища для сбора и отвода ливневых вод.

Отходы с содержанием пластика являются самыми быстро накапливающимися отходами в структуре ТКО. Объём образования отходов в мире превышает 300 млн тонн в год. Из них около 19 % приходится на полиэтилен высокого давления, около 18 % – на полипропилен, и около 13 % на полиэтилен низкого давления (синтетические полимеры). В Европе утилизация пластиковых отходов достигает 40 %, в Китае 25 %, в США 9 %. В Российской Федерации образование отходов с содержанием пластмасс достигает 3,6 млн тонн в год, из которых только 450 тыс. тонн (около 12 %) собираются для вторичной переработки.

Синтетические полимеры сохраняют свои свойства при переработке и представляют экологическую угрозу из-за длительного времени разложения. Вовлечение данных видов отходов во вторичную переработку с целью создания противofильтрационных материалов поможет эффективно утилизировать данный вид отходов.

Представлены результаты исследований физико-механических свойств вторично переработанных полиэтилена низкого давления, полиэтилена высокого давления, полипропилена, их химической стойкости к воздействию агрессивных кислот и

щелочной сред. Определены типовые кривые линии относительного удлинения от прилагаемого давления образцов вторично переработанного полиэтилена низкого давления (HDPE), полиэтилена высокого давления (LDPE) и полипропилена (PP), изготовленных в диапазоне температур 160-240 °C с шагом 10 °C, рисунок 2.

Наиболее подходящими прочностными характеристиками обладает полиэтилен низкого давления, изготовленный в диапазоне температур 160-190 °C, так как при данном температурном диапазоне достигается наиболее полная гомогенизация материала, обеспечивающая прочность, и наблюдается максимальное относительное удлинение при разрыве. Снижение характеристик при температуре более 190 °C связано с термической деструкцией макромолекул полимеров. Так, при температуре изготовления полиэтилена низкого давления 210 °C наблюдается снижение относительного удлинения при разрыве с 72 % до 16 %, а при температуре 240 °C – до 10 %.

Оценка химической стойкости проводилась для полиэтилена низкого давления, поскольку он показал лучшие по сравнению с рассматриваемыми вариантами прочностные свойства. Образцы полиэтилена низкого давления помещались в агрессивную среду ($\text{pH} < 2$ и $\text{pH} > 12$), далее происходило наблюдение с фиксированием изменения их массы и линейных размеров. Испытание проводилось в течение 16 недель, промежуточный контроль изменения массы образцов и их линейных размеров осуществлялся в соответствии с приведенными рекомендациями со следующими интервалами: 1-2-4-8-16 недель. За указанный период времени у образцов отсутствовали визуальные изменения, сохранились линейные размеры, со второй недели эксперимента произошло незначительное увеличение массы на 0,2 %. После опыта образцы подверглись разрушению на испытательной машине Tinius Olsen HK75S. Изменений прочностных характеристик не зафиксировано.

Предлагается осуществить консервацию хвостохранилища Гайского ГОКа с применением вторично переработанного полиэтилена низкого давления толщиной 3-4 мм, изготовленного при температуре 160-190 °C в составе конструкции

противофильтрационного экрана, состоящего из выравнивающего слоя из скальных грунтов, подстилающего слоя песка крупностью не более 3 мм и $K_f = 10^{-4}$ м/с, мощностью до 0,15 м, полиэтилена низкого давления, толщиной слоя 3,0-4,0 мм, дренажного слоя из песка крупностью не более 3 мм и $K_f = 10^{-4}$ м/с мощностью до 0,15 м, слоя грунта мощностью 0,15-0,3 м и системы водоотводных канав по периметру хвостохранилища для сбора и отвода ливневых вод. Предварительно необходимо провести осушение существующего прудка хвостохранилища. Нанесение покрытия с уклоном порядка 3° позволит системе водоотводных каналов принимать чистые фильтрационные стоки и отводить их в русло существующего водного объекта – руч. Ялангас. Консервация хвостохранилища Гайского ГОКа указанным способом позволит сохранить ценные компоненты и предотвратить формирование техногенного гидрогеохимического потока. Конструкция противофильтрационного экрана изображена на рисунке 3.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ № 255 от 3 марта 2017 г. размер ущерба, который может быть нанесен поверхностным водам и подземным водам, определяется как размер платы за сверхлимитный сброс (с применением повышающего коэффициента 25). Ставки платы принимались в соответствии с Постановлением Правительства РФ № 913 (с учётом дополнительного коэффициента 1,08 на 2021 год). Поскольку при проведении консервации хвостохранилища на площади около 170 га с применением противофильтрационного экрана из вторично-переработанного полиэтилена низкого давления безвозвратная фильтрация с территории хвостохранилища исключается, размер предотвращённого вреда природным водам равняется размеру возможного ущерба и составит 4,16 млн. рублей в год.

При консервации хвостохранилища с применением конструкции противофильтрационного экрана из вторично-переработанного полиэтилена низкого давления, удельная стоимость работ составит порядка 335 руб./м².

Ориентировочная стоимость потенциального техногенного сырья, накопленного в хвостохранилище, с учётом цен,

установленных на Лондонской бирже металлов по состоянию на июнь 2021 года, оценивается порядка 5 млрд. долларов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, содержащую новое решение актуальной проблемы обеспечения экологической безопасности при хранении отходов обогащения медных руд Гайского месторождения после прекращения эксплуатации хвостохранилища путем его консервации с применением в качестве противифльтрационного покрытия материала, изготовленного из вторично переработанного полиэтилена низкого давления.

Основные выводы работы, отражающие научную и практическую значимость, заключаются в следующем:

1) Выявлены условия формирования техногенного гидрогеохимического потока в районе расположения хвостового хозяйства ПАО «Гайский горно-обогатительный комбинат».

2) Произведена оценка свойств хвостов обогащения Гайского горно-обогатительного комбината в аспекте их отнесения к потенциальному минеральному сырью.

3) Разработан способ снижения негативного воздействия хвостового хозяйства на компоненты природной среды с применением новых кислотоустойчивых материалов для гидроизоляции хвостохранилища ПАО «Гайский горно-обогатительный комбинат».

4) В соответствии с действующим законодательством РФ рассчитан предотвращенный экологический ущерб, который составил 4,16 млн рублей в год, а также определена удельная стоимость работ при проведении консервации хвостохранилища с применением в качестве противифльтрационного экрана конструкции из вторично переработанного полиэтилена низкого давления, которая составляет 335 руб./м².

Перспективы дальнейшего развития темы диссертации состоят в детальном изучении форм нахождения полезных компонентов в отходах обогащения Гайского ГОКа с целью подбора наиболее оптимальной технологии обогащения и переработки техногенного сырья.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК

1. **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 - DOI 10.24411/2413-046X-2019-19056 // Московский экономический журнал. – 2019. – № 9. – С. 11.

2. **Почечун, В.А.** Применение системного подхода при изучении природно-техногенных геосистем / В.А. Почечун, Ю.Л. Мельчаков, Д.А. Бабенко // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2014. – Т. 19. – № 5. – С. 1551-1554.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. **Babenko, D.** The use of secondary polymers to ensure environmental safety storage of mineral waste ore-dressing and processing enterprise in the Southern Urals (2020) - DOI 10.1201/9781003017226-15 // Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues-Proceedings of the Russian- German Raw Materials Dialogue: A Collection of Young Scientists Papers and Discussion. – 2019. – pp. 103-107.

4. **Babenko, D.A.** Water quality management at the tailings storage facility of the Gaisky mining and processing plant / Babenko D.A., Pashkevich M.A., Alekseenko A.V. // Rocznik Ochrona Srodowiska. – 2020. – No 22 (1). – pp. 214-225.

5. **Babenko, D. A.** Study of the composition and properties of the copper ore processing tailings of pjsc gaysky mining and processing plant / Babenko, D.A., Pashkevich, M. A. – DOI 10.17580/or.2021.02.08 // Obogashchenie Rud. – 2021. – No 2. – pp. 47-52.

Публикации в прочих изданиях:

6. **Бабенко, Д.А.** Использование вторичных полимеров для обеспечения экологической безопасности складирования минеральных отходов горно-обогатительного комбината Южного Урала // Опыт прошлого – взгляд в будущее: 7-я Международная

научно-практическая конференция молодых ученых и студентов: материалы конференции, Тула, 02-03 ноября 2017 года. - Тула: Тульский государственный университет, 2017. - С. 271-275.

7. **Babenko, D.** Reducing the negative impact of technogenic massifs' hazardous wastes on the quality of environmental components // 58 Konferencja Studenckich Kół Naukowych Pionu Górniczego AGH. – Krakow. – 1-9 grudnia. – 2017. – p. 120.

8. **Бабенко, Д.А.** Проблемы обеспечения экологической безопасности при складировании отходов обогащения медных руд // XVII Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов: сборник тезисов, Санкт-Петербург, 27-29 марта 2019 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2019. – С. 86.

9. **Babenko, D.** Reducing the negative impact of technogenic massifs' hazardous wastes on the quality of environmental components / Babenko D., Pashkevich M. // The volume of XV International forum-contest of students and young researches "Topical Issues Of Rational Use Of Natural Resources", Saint-Petersburg, 13th-19th March, 2019. - Saint-Petersburg: Saint-Petersburg Mining University, 2019. – p. 271.

10. **Babenko, D.** The use of secondary polymers to ensure environmental safety storage of mineral waste ore-dressing and processing enterprises // Scientific reports on resource issues. Volume 1. Technische Universität Bergakademie Freiberg, June 5th-7th 2019. - Freiberg: Medienzentrum der TU Bergakademie Freiberg, 2019. – pp. 160-164.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

11. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020612187 Российская Федерация.** Программа для комплексной оценки степени загрязнённости поверхностных вод: № 2020611124: заявл. 05.02.2020: опубл. 18.02.2020 / Д.А. Бабенко, Г.Д. Горелик, М.А. Пашкевич; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».



Рисунок 1 – Карта-схема расположения точек отбора проб

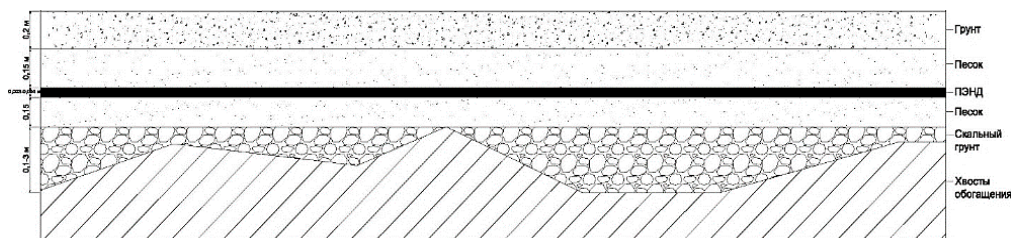
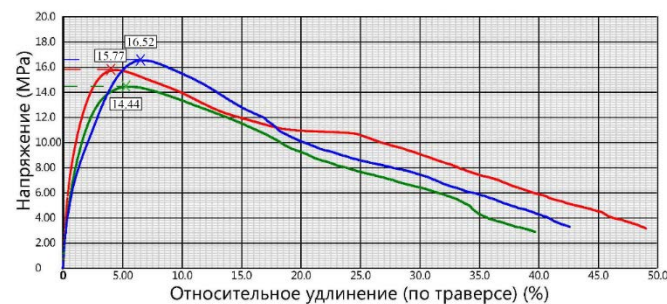


Рисунок 3 – Конструкция противодиффузионного экрана

Таблица 1 – Результаты анализов поверхностных и подземных вод

Наименование точки отбора	Коэффициент контрастности ПДКр.х.								
	Al	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Sr	Zn	Сульфат-ион
Точка А	н.о.	16	6,71	3,89	н.о.	н.о.	3,3	1,2	15,34
Точка Б	12,33	170	12,7	12,4	0,2	0,5	8,35	16,8	15,33
5	29	73	44	16,1	1,2	2,5	7,8	2,3	21,6
17	24,48	149	613	10,9	3,2	6,17	3,35	2,9	18,35
11ф	515	396	1216	23,8	5,7	11,17	5,15	30,2	4,69
ОВ	153,5	3960	295	50,3	6,1	11,5	4,58	447	26,3
КВ	8300	184000	1830	337	114	7,67	6,83	19100	65,43
Точка сброса	169,25	2850	492	56,7	5,6	1,83	3,83	293	41,04



Температура изготовления 170-190 °C



Температура изготовления 200-220 °C

Рисунок 2 – Кривые линии прочности образцов вторично переработанного ПЭНД, изготовленных при различных температурах

Результаты измерения валового содержания элементов в хвостах обогащения

Параметр	Al	Ba	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	S	Sr	Ti	Zn	As	Au	Ag
Содержание в пробах:																			
холостой, мг/л	25,6	0,749	3,36	0,0084	0,0243	0,0355	3,58	6,43	4,31	0,166	3,52	0,0488	4,1	1,53	1,31	0,019	0,05	—	—
Н.1, мг/кг	17240	153,1	6894	9,76	3,16	1706,45	187642	6097	3879	49,3	14848	18,52	169590	45	450	675,1	130	0,1845	1,6003
Н.2, мг/кг	15040	189,1	8074	9,66	3,04	1756,45	185642	5977	3389	49,2	14648	17,62	167590	43	471	687,1	125	0,1987	1,9182
$\bar{X}$	16140	171,1	7484	9,71	3,1	1731,45	186642	6037	3634	49,25	14748	18,07	168590	44	460,5	681,1	127,5	0,1916	1,7593
d, %	14	21	16	1	4	3	1	2	13	0,2	1	5	1	5	5	2	4	7	18
Δ	4842	51	2245	3	1	519	55993	1811	1090	15	4424	5	50577	13	138	204	38	0,01	0,09
Содержание в пробах:																			
С.1, мг/кг	20440	117,1	9964	10,56	7,21	1766,45	171642	5647	3339	98,4	13548	18,82	157590	11	559	974,1	116	0,1251	3,1531
С.2, мг/кг	21040	107,1	9764	10,56	7,17	1796,45	175642	5757	3339	102,4	14348	18,72	159590	14	590	1008,1	117	0,1802	3,0121
$\bar{X}$	20740	112,1	9864	10,56	7,19	1781,45	173642	5702	3339	100,4	13948	18,77	158590	12,5	574,5	991,1	116,5	0,1527	3,0827
d, %	3	9	2	0	1	2	2	2	0	4	6	1	1	24	5	3	1	36	5
Δ	6222	34	2959	3	2	534	52093	1711	1002	30	4184	6	47577	4	172	297	35	0,05	1

Результаты измерения содержания подвижных форм элементов в хвостах обогащения

Параметр	Al	Ba	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	S	Sr	Ti	Zn
Содержание в пробе Н.1, мг/кг	106,00	4,90	3700,00	0,48	0,75	592,00	590,00	15,88	346,00	36,60	16,34	1,38	1,18	4460,00	2,76	0,06	184,60
Содержание в пробе Н.2, мг/кг	109,40	5,26	3480,00	0,49	0,76	610,00	648,00	18,48	346,00	36,60	15,56	1,43	1,25	4320,00	2,72	0,05	184,80
$\bar{X}$	107,70	5,08	3590,00	0,48	0,76	601,00	619,00	17,18	346,00	36,60	15,95	1,41	1,21	4390,00	2,74	0,05	184,70
d, %	3,16	7,09	6,13	2,49	1,58	3,00	9,37	15,13	0,00	0,00	4,89	3,13	5,78	3,19	1,46	26,42	0,11
Δ	32,31	1,52	1077,00	0,14	0,23	180,30	185,70	5,15	103,80	10,98	4,79	0,42	—	1317,00	0,82	0,02	55,41
Содержание в пробе С.1, мг/кг	111,20	8,62	7900,00	1,26	0,76	358,00	1676,00	46,00	448,00	102,60	29,60	2,34	9,18	5280,00	7,98	0,52	350,00
Содержание в пробе С.2, мг/кг	113,80	9,04	7560,00	1,31	0,79	364,00	1676,00	46,80	454,00	103,00	30,80	2,38	9,70	4980,00	8,16	0,48	354,00
$\bar{X}$	112,50	8,83	7730,00	1,28	0,77	361,00	1676,00	46,40	451,00	102,80	30,20	2,36	9,44	5130,00	8,07	0,50	352,00
d, %	2,31	4,76	4,40	3,59	3,88	1,66	0,00	1,72	1,33	0,39	3,97	1,69	5,51	5,85	2,23	6,40	1,14
Δ	33,75	2,65	2319,00	0,38	0,23	108,30	502,80	13,92	135,30	30,84	9,06	0,71	0,47	1539,00	2,42	0,15	105,60

Результаты измерения содержания растворимых форм элементов в хвостах обогащения

Параметр	Al	Ba	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	S	Sr	Ti	Zn
Содержание в пробе Н.1, мг/кг	163,50	0,22	2605,00	0,71	0,11	585,00	176,00	5,30	291,00	40,35	18,50	1,74	0,39	3605,00	1,59	0,03	206,50
Содержание в пробе Н.2, мг/кг	156,50	0,13	2560,00	0,76	0,11	585,00	157,50	4,83	295,00	39,80	17,75	1,87	0,48	3545,00	1,63	0,03	208,50
$\bar{X}$	160,00	0,17	2582,50	0,73	0,11	585,00	166,75	5,06	293,00	40,08	18,13	1,80	0,43	3575,00	1,61	0,03	207,50
d, %	4,38	52,30	1,74	6,14	4,03	0,00	11,09	9,38	1,37	1,37	4,14	7,22	19,65	1,68	2,80	20,69	0,96
Δ	48,00	0,05	774,75	0,22	0,03	175,50	50,03	1,52	87,90	12,02	5,44	0,54	0,13	1072,50	0,48	0,01	62,25
Содержание в пробе С.1, мг/кг	1,98	0,08	2930,00	0,99	0,03	14,65	9,60	6,55	299,50	73,50	35,65	2,26	Н. о.	3235,00	2,78	0,03	194,00
Содержание в пробе С.2, мг/кг	1,46	0,04	2970,00	1,05	0,04	15,75	6,30	6,20	304,00	74,50	34,55	2,34	Н. о.	3270,00	2,76	0,03	201,50
$\bar{X}$	1,72	0,06	2950,00	1,02	0,03	15,20	7,95	6,38	301,75	74,00	35,10	2,30	Н. о.	3252,50	2,77	0,03	197,75
d, %	30,32	68,80	1,36	5,41	33,33	7,24	41,51	5,49	1,49	1,35	3,13	3,49	Н. о.	1,08	0,54	12,31	3,79
Δ	0,51	0,02	885,00	0,31	0,01	4,56	2,39	1,91	90,53	22,20	10,53	0,69	Н. о.	975,75	0,83	0,01	59,33

$\bar{X}$ – среднее значение массовой доли элемента для двух определений; d – предел повторяемости результатов параллельных измерений ($d \leq 30\%$); Δ – границы суммарной абсолютной погрешности измерения массовой доли элемента (при доверительной вероятности $P = 0,95$).

Рисунок 4 – Результаты измерения валовых и растворимых форм элементов в хвостах обогащения