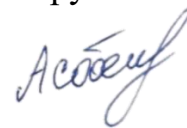


На правах рукописи



Собенин Артем Вячеславович

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

Специальность 2.8.7. «Теоретические основы проектирования
горнотехнических систем»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2025

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт горного дела» Уральского отделения Российской академии наук» (**ИГД УрО РАН**)

Научный руководитель:

Антонинова Наталья Юрьевна, кандидат технических наук, заведующая лабораторией экологии горного производства, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела УрО РАН

Официальные оппоненты:

Пикалов Вячеслав Анатольевич, доктор технических наук, начальник отдела методического обеспечения ООО «НТЦ-Геотехнология»

Данилов Александр Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры геоэкологии, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

Защита состоится 3 июля 2025 года., в 14:00 на заседании диссертационного совета Д **24.1.503.01** на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук по адресу: 620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, д.58. тел/факс: 8 (343) 350-50-51; e-mail: direct@igduran.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук: <http://diss.igduran.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
кандидат технических наук



А.А. Панжин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

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

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

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

Цель работы:

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

Идея работы:

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

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

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

Задачи:

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

Научная новизна:

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

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

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

Методы исследований

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

Теоретическая и практическая значимость работы:

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

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

3. Результаты диссертационной работы подтверждены патентами на изобретение:

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

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

Реализация основных положений работы:

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

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

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

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

Положения, выносимые на защиту:

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

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

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

Степень достоверности и апробация результатов

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

Апробация результатов

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

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

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

Публикации

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

Структура диссертации

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

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

Благодарности

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

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит общую характеристику работы, обосновывающую её актуальность, а также формулировку цели, идеи, научной новизны и практической значимости исследования.

Первая глава посвящена анализу особенностей функционирования горнотехнических систем при разработке медноколчеданных месторождений Свердловской области. Обозначена проблема водоотведения и водоочистки как элемента горнотехнической системы на всех этапах жизненного цикла месторождения, вызванная высоким содержанием тяжелых металлов в сточных водах, одним из источников которых являются объекты размещения отходов. Особое внимание уделено наиболее эффективным технологиям очистки сточных вод, включая состав используемых реагентов, сорбентов и необходимого оборудования в целях обеспечения качества проектной документации с учетом экологической безопасности.

Вторая глава. В главе дана характеристика объекта исследования, приводятся результаты исследования между элементами горнотехнической системы в динамике их развития с учетом экологического фактора. Описаны методы изучения влияния элементов ГТС на окружающую среду и процессы самовосстановления биологических растительных ресурсов. Для исследований использовали методы отбора и пробоподготовки, физико-химического анализа проб воды, растений и почвы, а также методики оценки влияния загрязняющих веществ на растительные организмы. Обоснована необходимость совершенствования организации производственных процессов при водоотведении и водоочистке в связи с особенностями функционирования горнотехнических систем при разработке медноколчеданных месторождений.

В третьей главе приводится обоснование эффективных параметров технологии очистки сточных вод от тяжелых металлов, образующихся при разработке

медноколчеданных месторождений. Рассматривается применение отходов железо-магниевого производства (ЖМКС) и отходов производства гуминовых препаратов (ОГП) в качестве реагентов и сорбентов для повышения степени извлечения тяжелых металлов из высокоминерализованных сточных вод. Ключевым является изучение закономерностей процесса удаления металлов с использованием отходов горнодобывающей промышленности.

Четвертая глава посвящена разработке практических технико-технологических рекомендаций по совершенствованию систем водоотведения и водоочистки при разработке медноколчеданных месторождений с учетом особенностей функционирования горнотехнических систем. На основе проведенного анализа обоснована экономическая эффективность предложенных решений, направленных на снижение негативного воздействия на окружающую среду и оптимизацию затрат при эксплуатации горнотехнических систем. В результате реализации разработанных рекомендаций достигается значительное снижение затрат на очистку сточных вод - с 119,15 руб/м³ до 4,20 руб/м³.

В **заключении** сформулированы ключевые научные и практические выводы, являющиеся итогом проведенного исследования.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях.

Первое защищаемое положение

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

Свердловская область один из старопромышленных горнодобывающих регионов РФ. Кроме того, в области сосредоточена треть медеперерабатывающих мощностей России. По состоянию на 01.01.2024 учтено 24 месторождения различных генетических типов с суммарными запасами меди категории А+В+С1 – 2310,9 тыс. т, категории С2 – 253,7 тыс. т, забалансовыми – 1869,70 тыс. т и 3 техногенных месторождения с суммарными запасами меди категорий А+В+С1 – 26,4 тыс. т, категории С2 – 25,5 тыс. т, забалансовыми – 52,2 тыс. т. В 2023 г. разрабатывались месторождения: Песчанское, Волковское, Ново-Шемурское, Сафьяновское, Гумешевское медистых глин, Северо-Калугинское. Добыто 69 тыс. т меди, потеряно 3,1 тыс. т меди. Погашено из забалансовых запасов 1,8 тыс. т меди.

В основном медные руды представлены двумя типами месторождений: медно-колчеданными и скарновыми медно-магнетитовыми. Основной минерал колчеданных руд – пирит (FeS_2), составляющий 50-90% объема руды. Ценные минералы – халькопирит (CuFeS_2) и сфалерит (ZnS), что предопределяет качественный состав образуемых отходов. Следовательно, объекты размещения отходов, как элементы горнотехнических систем (ГТС), являются источником поступления компонентов-загрязнителей в окружающую среду, негативно влияющих на растительность, произрастающую в границах ГТС и далеко за её пределами. Анализ почво-грунтов, отобранных в районе законсервированной группы Кабанских месторождений, разрабатываемых открытым способом, подтверждает наличие существенного загрязнения в связи с превышением ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) для меди (185,37 – 814,83 мг/кг) и цинка (58,30 – 201,25 мг/кг) согласно действующим санитарно-гигиеническим нормам. Кроме того, в связи с отсутствием в границах ГТС системы водоотведения и водоочистки зафиксировано наличие техногенного потока подотвальных вод с высокой концентрацией меди (331,48-472,62 мг/л), цинка (252,80-352,52 мг/л), кадмия (0,421-0,499 мг/л) и железа (25467,00-33341,88 мг/л).

Низкие значения pH сточных вод (2,33–2,91) способствуют миграции металлов, однако при этом не происходит значительного увеличения их концентрации в почво-грунтах по пути техногенного потока (Рис 1.). Экспериментальные исследования по оценке влияния тяжелых металлов на произрастающую растительность (иван-чай узколистый) в границах ГТС выявили, что увеличение концентрации меди (более 472,14 мг/л), цинка (более 325,0 мг/л), кадмия (более 0,48 мг/л) и железа (более 34310,00 мг/л) в сточных водах приводит к экспоненциальному снижению морфологических показателей, включая уменьшение длины побегов до минимального значения около 90,33 см, что свидетельствует об угнетающем воздействии металлов на рост (Рис. 2).

Анализ растительности, произрастающих на территории месторождения, показал барьерный тип накопления тяжелых металлов, при этом концентрации меди, цинка и железа в их тканях превышают фоновые значения в 5, 7 и 2 раза соответственно, а длина корней и побегов уменьшена в 1,4 и 1,3 раза соответственно по сравнению с фоновыми значениями, что подтверждает ингибирующее воздействие тяжелых металлов на рост растений и обратную экспоненциальную зависимость между концентрацией металлов в сточной воде и морфологическими показателями растений.

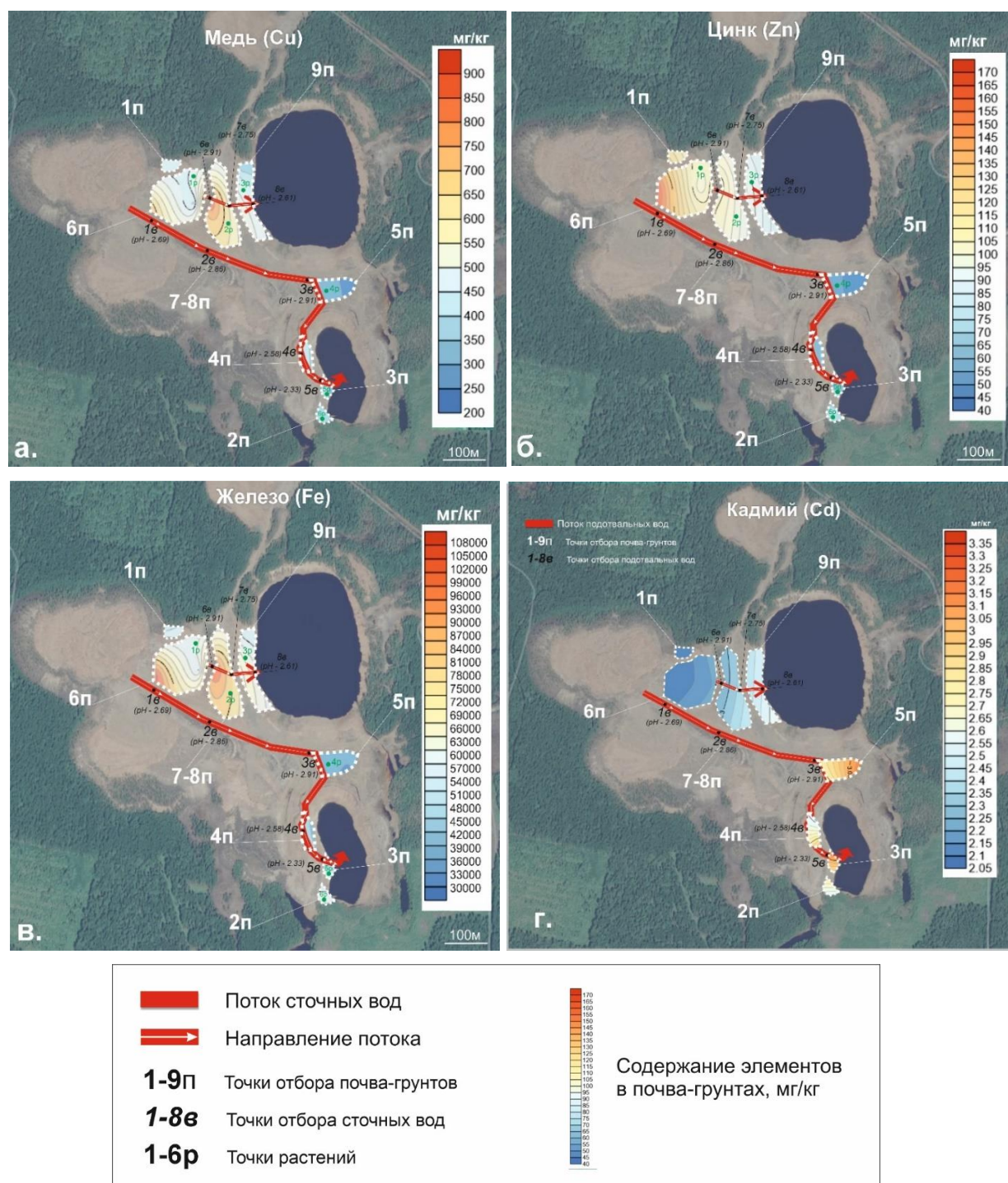


Рис. 1 - Схема направления и параметры потока сточных, образующихся при освоении медноколчеданных месторождений. Распределение тяжелых металлов по направлению

потока кислых сточных вод

а). Медь (Cu), б). цинк (Zn), в). Железо (Fe), г). Кадмий (Cd)

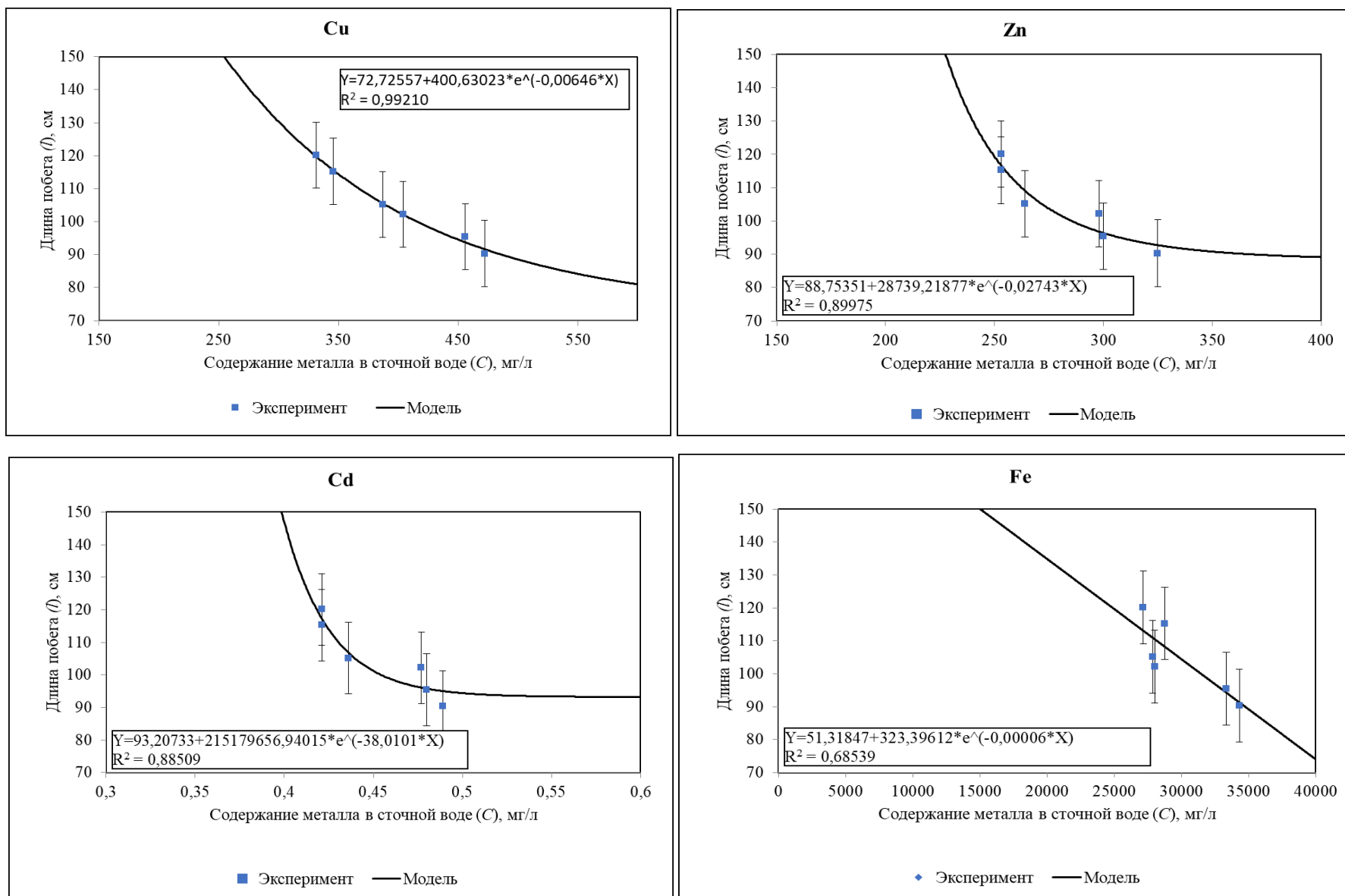


Рис. 2 - Влияние тяжелых металлов в сточных водах на замедление процессов самовосстановления на примере растений Иван-чай узколистый *Chamaenerion angustifolium* L. Scop.

Следовательно, формирование техногенного потока с высокими концентрациями тяжелых металлов (меди, цинка, кадмия, железа) является одной из основных особенностей разработки медноколчеданных месторождений, препятствует естественному восстановлению растительных ресурсов и требует совершенствования организации производственных процессов в части водоотведения и водоочистки при проектировании горнотехнических систем.

Второе защищаемое положение

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

Выявление закономерностей удаления металлов из сточных вод с использованием материалов, полученных из отходов недропользования, представляет собой фундаментальную основу для проектирования и совершенствования производственных процессов в части водоочистки на разных этапах жизненного цикла горнотехнических систем.

Представленное научное положение об эффективности удаления тяжелых металлов из высокоминерализованных кислых вод подтверждается результатами проведенных исследований, которые доказывают возможность достижения до 99,99% очистки от меди, цинка, кадмия и железа. Исследования, направленные на использование отходов горной промышленности железо-магниевого производства (ЖМКС) и отходов производства гуминовых препаратов (ОГП) для очистки сточных вод (месторождение «Кабан-1») от тяжелых металлов, выявили ряд ключевых закономерностей, на основании которых были оптимизированы параметры их применения.

При определении оптимального времени контакта и дозировки для удаления ионов металлов из раствора использовали навески образцов (0,1-2 г), к которым добавляли 50 мл сточных вод и перемешивали 120 мин. Для определения оптимального времени контакта, 0,2 г образца перемешивали от 5 до 180 мин, изучения влияния концентрации металлов, готовили растворы с концентрацией 10-1000 мг/л. Взаимодействие проводили при 120 мин, навеске 0,2 г, 50 мл раствора, pH 2,3-2,5. Рассчитывали статическую обменную емкость (q_e , мг/г) и степень извлечения (E , %) по формулам: $q_e = (C_i - C_e) \times V/m$ и $E = (C_i - C_e)/C_i \times 100\%$.

С целью установления оптимальных параметров очистки сточных вод от тяжелых металлов отходами производств и выявления закономерностей применена методика

функционально-факторного моделирования с использованием программного обеспечения «Трендс ФСП-1». Оптимальные условия были определены как «3λ». Результаты экспериментов показали, что для результативной очистки сточных вод, учитывая технологические особенности и интервалы релаксации металлов, необходимо последовательное применение ЖМКС и ОГП (дозировкой до 10 г/л) в течении 120-180 минут.

Установлено, что ЖМКС удаляет металлы и при высоких концентрациях (до 500 мг/л), тогда как ОГП лучше справляется с доочисткой вод с низкими концентрациями металлов (менее 50 мг/л), особенно меди и цинка.

Это указывает на механизмы взаимодействия данных материалов с ионами металлов: ЖМКС, за счет образования гидроксидов при повышении pH, обеспечивает осаждение основных объемов металлов, а ОГП, имеет на своей поверхности достаточное количество активных сорбционных центров, готовых принять частицы тяжелых металлов.

Увеличение дозировки ЖМКС от 0,1 до 2 г приводит к экспоненциальному росту содержания магния в растворе до 2153,00 мг/л и повышению pH фильтрата до 8,01, что способствует осаждению металлов.

Таким образом, в ходе исследований установлено, что эффективность извлечения металлов как с помощью ЖМКС, так и ОГП, экспоненциально возрастает с увеличением дозировки и времени контакта. Применение ЖМКС позволяет достичь максимальных показателей удаления металлов из раствора сточных вод, стремящихся к асимптоте 99,99% для меди и кадмия, 99,80% для цинка, при интервалах релаксации 0,1-0,2 г (Рис. 3-4). Для меди, при увеличении времени контакта (Рис. 5-6), эффективность достигает максимума 93,33% (интервал релаксации 6,1 мин), а для цинка и кадмия - 81,89% и 83,00%, соответственно, с интервалами релаксации 47,4 и 55,4 мин.

Схожие результаты, с эффективностью очистки, приближающейся к 99,99%, достигаются при использовании ОГП для всех трех металлов при интервале релаксации 0,1-0,2 г/л, хотя эффективность в зависимости от времени контакта имеет более низкие максимальные значения: медь - 58,72%, цинк - 50,61%, кадмий - 68,95% при интервалах релаксации 13-21,8 мин.

Следовательно, последовательное использование ЖМКС и ОГП – это оптимальное решение для очистки сточных вод. На первом этапе ЖМКС снижает концентрацию металлов до определенного уровня, а затем ОГП на втором этапе доводит очистку до требуемых показателей. Указанный подход позволяет создать двухступенчатую систему, адаптированную к изменениям в составе сточных вод, характерным для различных этапов эксплуатации месторождений.

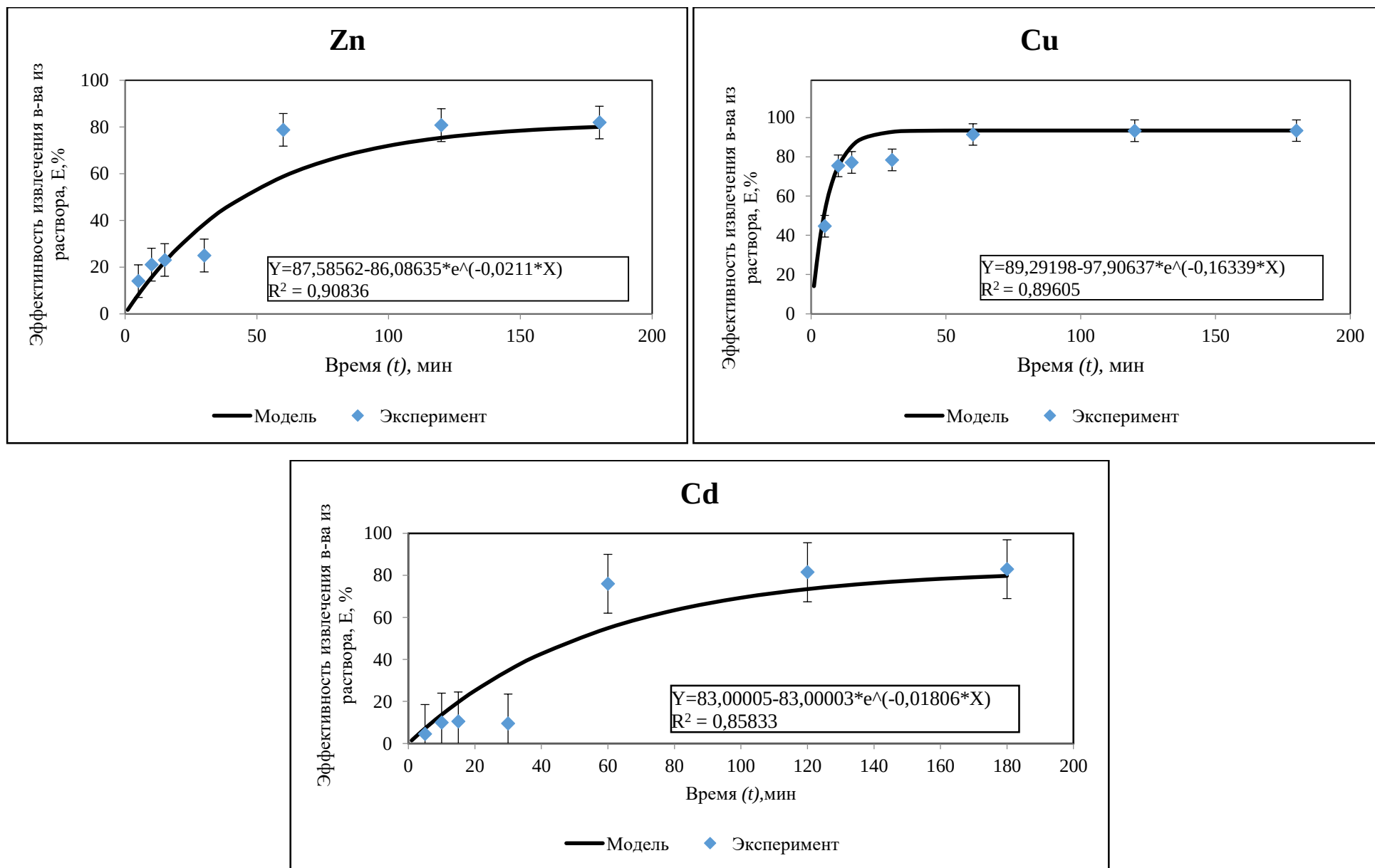


Рис. 3 - Влияние времени контакта на степень извлечения металлов из раствора (ЖМКС).

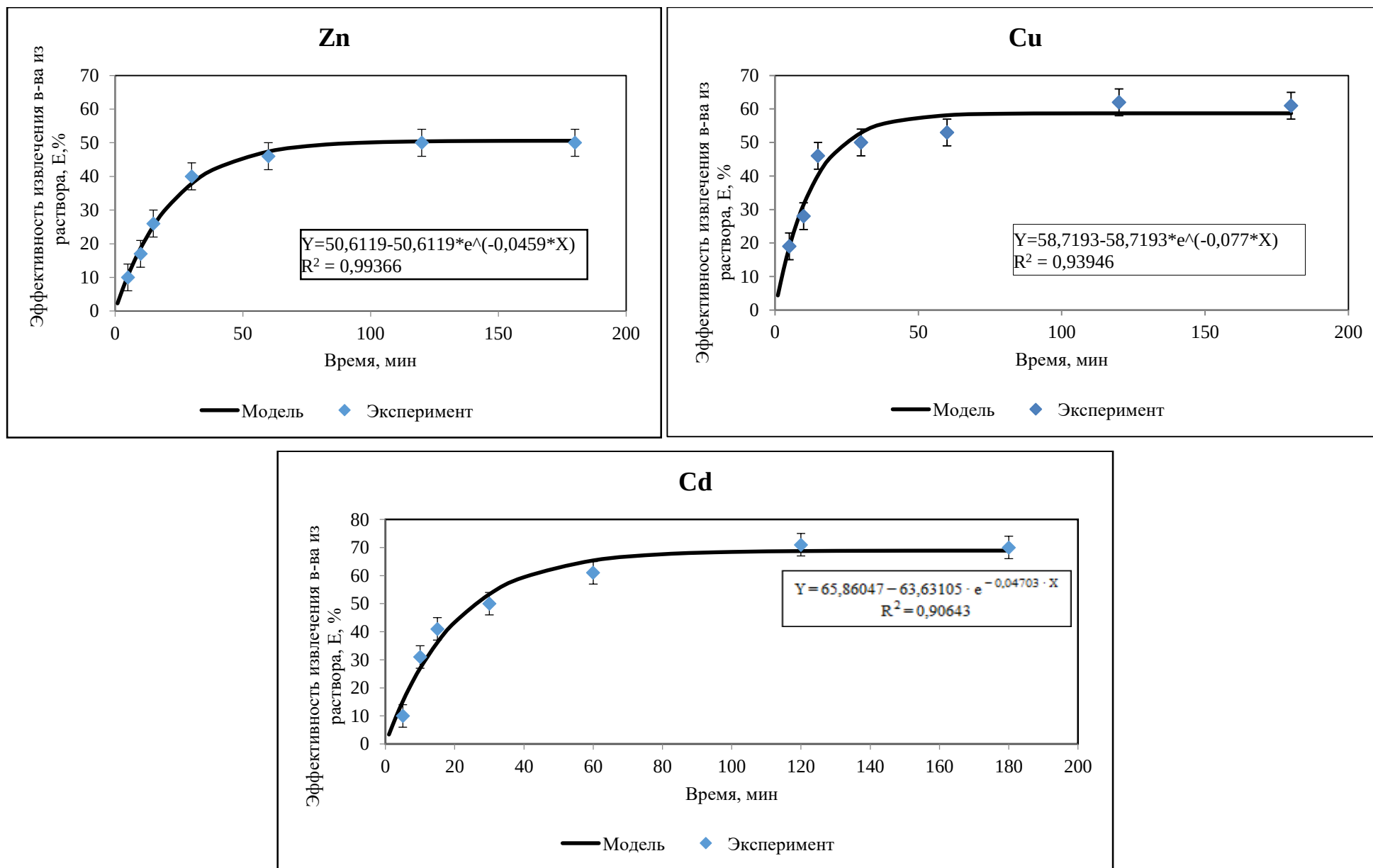


Рис. 4 - Влияние времени контакта на степень извлечения металлов из раствора. (Обработанные сточные воды Кабан-1), ОГП

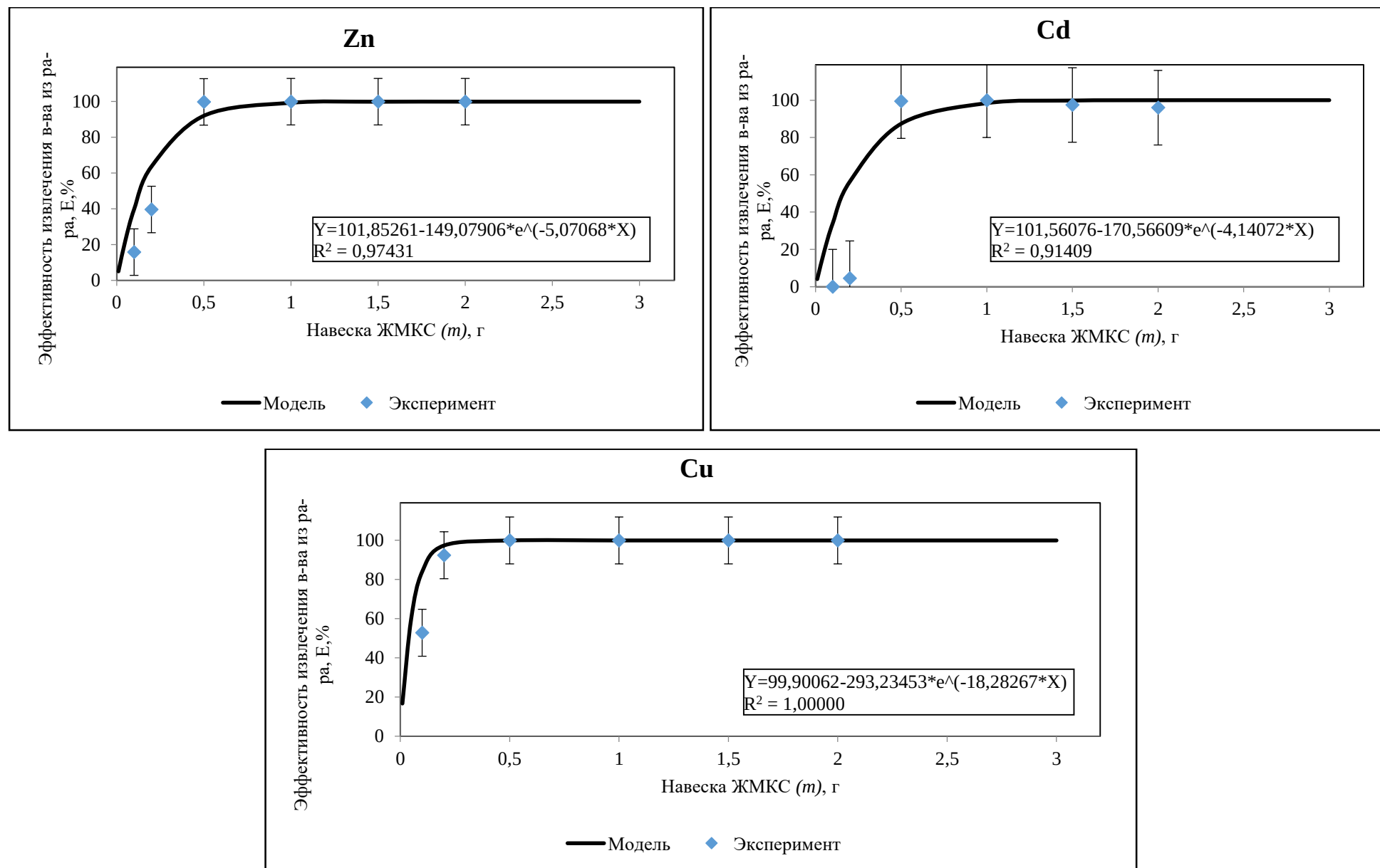


Рис. 5 - Влияние дозировки отходов на степень извлечения ионов из раствора (ЖМКС)

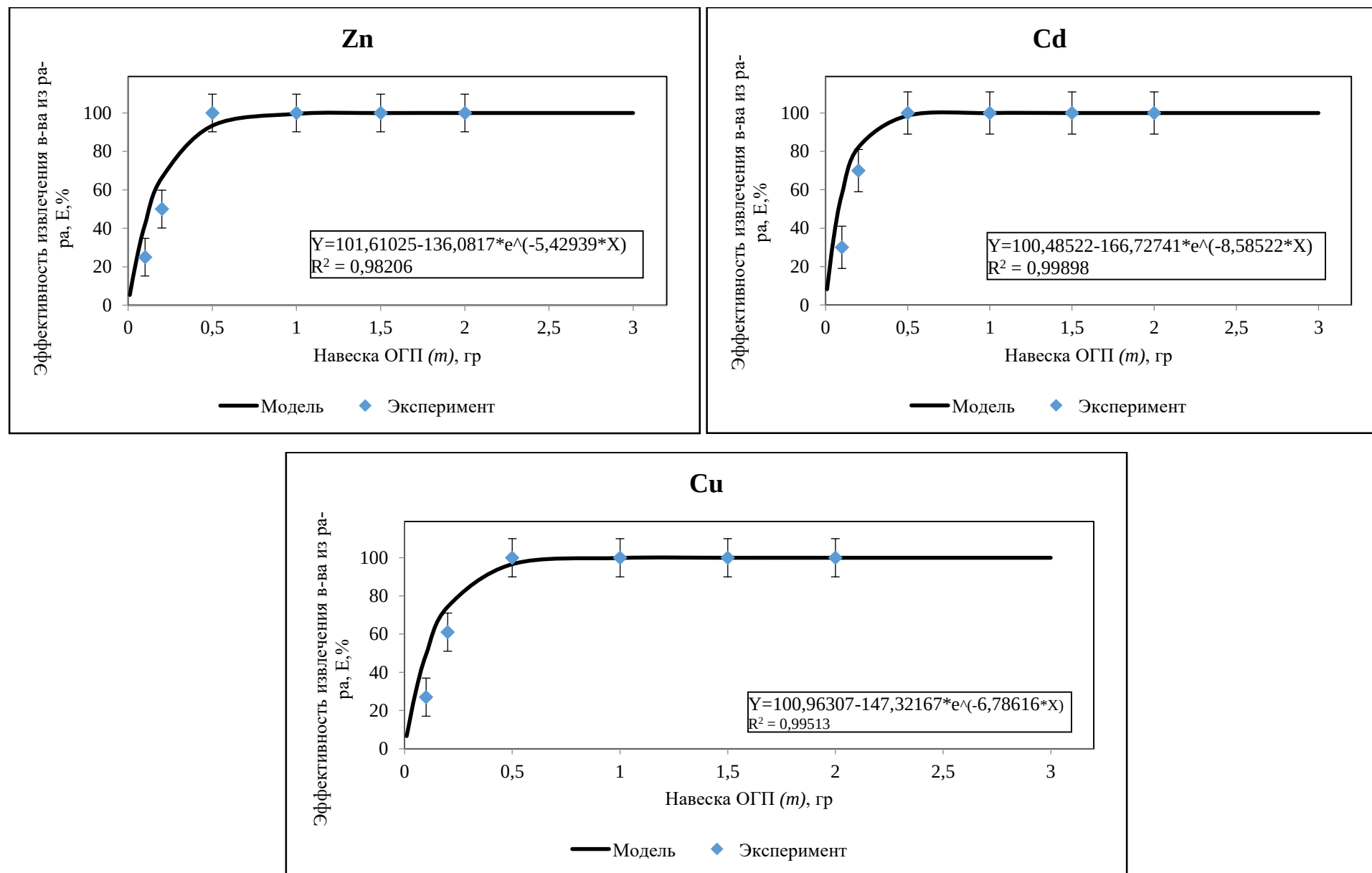


Рис. 6 - Влияние дозировки ОГП на степень извлечения металлов из раствора (Обработанные сточные воды Кабан-1)

В связи с вышеизложенным, полученные данные подтверждают научное положение о возможности эффективного удаления тяжелых металлов из кислых высокоминерализованных сточных вод с использованием последовательного внесения ЖМКС и ОГП в дозировках (до 10 г/л) и временном диапазоне (120-180 минут), обеспечивая высокую степень очистки.

Третье защищаемое положение

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

Разработка медноколчеданных месторождений сопряжена с образованием существенных объемов сточных вод, загрязненных тяжелыми металлами, а традиционные методы очистки требуют значительных капитальных и эксплуатационных затрат. Поэтому внедрение технологий водоочистки с использованием отходов производств решает проблемы, связанные с эксплуатацией объектов размещения отходов как элементов горнотехнических систем.

На основании полученных данных была разработана технологическая схема очистки сточных вод от металлов с применением отходов производств – ЖМКС и ОГП. Процесс состоит из четырех этапов: накопление и усреднение сточных вод, очистка с использованием ЖМКС (осаждение металлов, нейтрализация, повышение pH и получение мелиоранта ФММ), доочистка с применением ОГП (сорбция остаточных металлов, повышение концентрации калия, нейтрализация pH и получение мелиоранта ГМ) и складирование доочищенной воды «магниева вода» для повторного использования (Рис. 7).

Эффективность доочистки оценивалась методом биотестирования с использованием кресс-салата (*Lepidium sativum* L.) и сои (*Glycine max* (L.) Merr.) по показателям всхожести (RGP) и роста корней (RGG) в сравнении с контрольными образцами (исходная сточная и дистиллированная вода). Результаты показали отсутствие негативного воздействия доочищенной воды и осадков сточных вод на рост и развитие растений, что позволяет использовать их в качестве мелиоранта. Для достижения максимальных показателей всхожести и роста определена оптимальная дозировка мелиоранта - ФММ (60 г/м²).

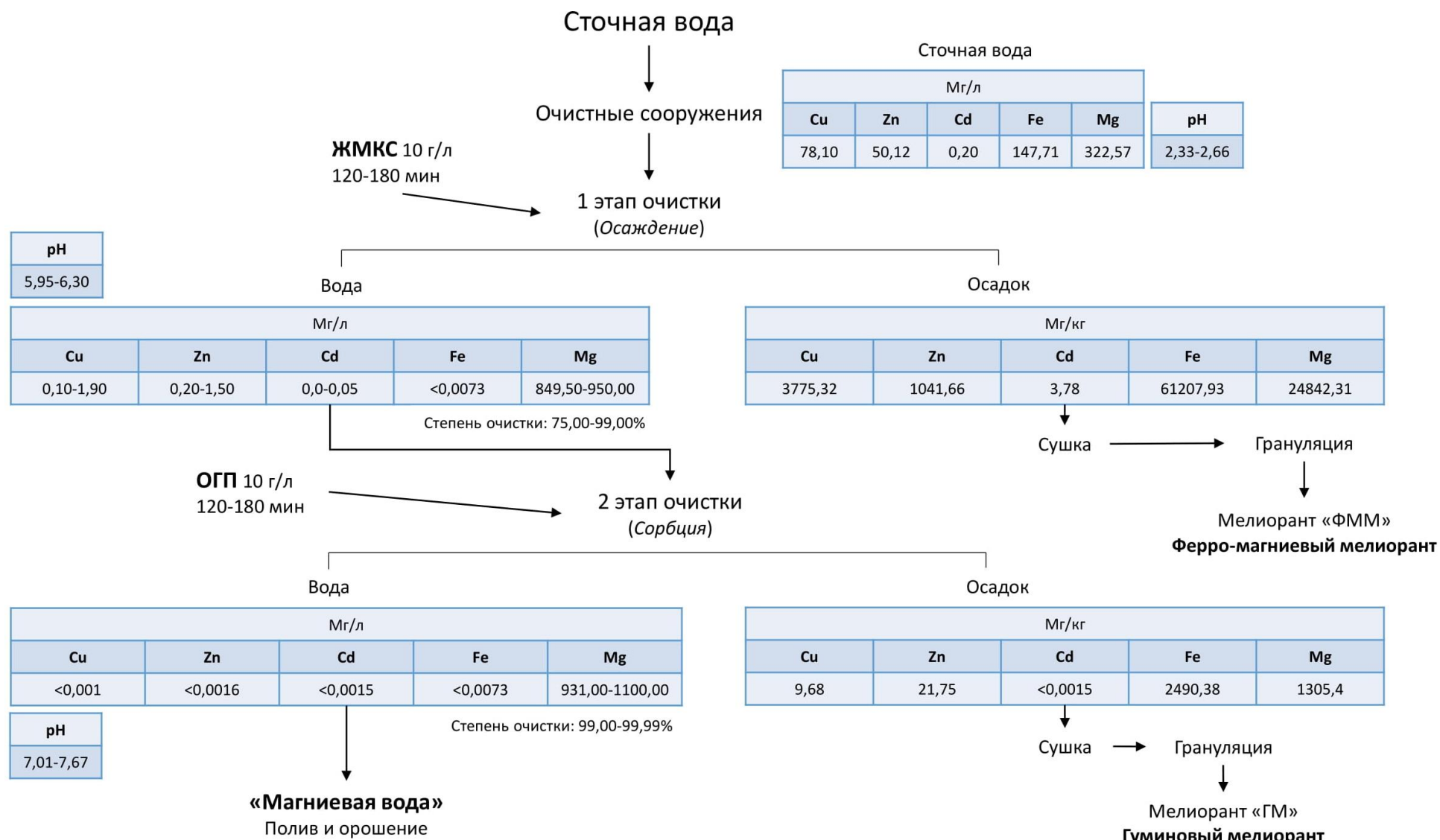


Рис. 7 - Технологическая схема очистки высокоминерализованных сточных вод от металлов (Cu, Zn, Cd, Fe) с применением ЖМКС и ОГП

Кроме того, затраты на очистку 1 м³ сточных вод с использованием ЖМКС и ОГП составляют 4,20 руб., что значительно ниже, чем при использовании традиционных методов, стоимость которых варьируется от 18 до 187 руб./м³. По результатам укрупненного сметного расчета возможна экономия материальных затрат порядка 48 552,46 тыс. руб. в связи с сокращением штрафов и компенсаций за причиненный экологический ущерб.

Результаты проведенных исследований подтверждают, что разработанная технология очистки сточных вод с использованием ЖМКС и ОГП позволяет не только усовершенствовать производственные процессы в части водоочистки в связи с особенностью функционирования горнотехнических систем, но и обеспечить возможность использования очищенных сточных вод и образуемых осадков в хозяйственных целях без негативного воздействия на растения. Таким образом, внедрение позволит оптимизировать систему водоочистных сооружений, снижая затраты и повышая эффективность производства с учетом фактора экологической безопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Основные научные результаты работы заключаются в следующем:

1. Установлены закономерности влияния высокоминерализованных сточных вод, формирующихся при разработке медноколчеданных месторождений. Увеличение концентрации тяжелых металлов в воде приводит к снижению интенсивности самовосстановления биологических растительных ресурсов, что проявляется в уменьшении длины корней (в 1,4 раза) и длины побегов (в 1,3 раза) по сравнению с контрольной группой (фоновым участком).

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

3. Для очистки сточных вод запатентовано применение отхода гуминового производства, а также железо-магниевого композиционного состава, в основе которого отход железо-магниевого производства, обладающих способностью к активной нейтрализации тяжелых металлов (Cu^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{3+}).

4. Разработана безотходная технология, основанная на последовательном осаждении и сорбции тяжелых металлов Cu, Zn, Cd, Fe обеспечивающим совершенствование проектирования системы водоочистки производительностью до 1591 м³/сутки

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

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

Рекомендации и дальнейшие перспективы разработки темы

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

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

НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

(в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, SCOPUS, WOS)

1. Антонинова Н.Ю., Собенин А.В., Усманов А.И., Шепель К.В. Оценка возможности использования отходов железо-магниевого производства для очистки сточных вод от тяжелых металлов (Cd^{2+} , Zn^{2+} , Co^{2+} , Cu^{2+}) // Записки Горного института. 2023. Т. 260. С. 257-265. DOI: 10.31897/PMI.2023.34

2. Собенин А.В., Антонинова Н.Ю., Усманов А.И., Шепель К.В. Удаление ионов меди из промышленных сточных вод с использованием отходов железомagneвского производства // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2023. № 2. С. 32-42. DOI: 10.21440/0536-10.

3. Корнилов С.В., Антонинова Н.Ю., **Собенин А.В.**, Усманова В.А., Усманов А.И. Об основных положениях методики проектирования мероприятий, локализирующих миграцию тяжелых металлов в почвах и техногенных грунтах // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 6(166) С. 85-94. DOI 10.26730/1999-4125-2024-6-85-94. – EDN LUMHKA.

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

5. Антонинова Н.Ю., **Собенин А.В.**, Усманов А.И., Горбунов А.А. Обоснование возможности применения отходов производства гуминовых препаратов для очистки сточных вод от металлов (Cd^{2+} , Zn^{2+} , Mg^{2+} , Cu^{2+}) с целью разработки эффективных мероприятий по экологической реабилитации // Записки Горного института. 2024. Т. 267. С. 421-432. EDN NYTVJH

6. **Собенин А. В.**, Антонинова Н. Ю., Горбунов А. В., Якупов Д. Р. Использование производственных отходов в целях очистки сточных вод от тяжелых металлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 12(1). С. 47–66. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_121_0_47.

Другие печатные материалы

7. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023623743 Российская Федерация. Адсорбционная ёмкость железо-магниевого композиционного состава по отношению к тяжелым металлам (Cu^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} , Ni^{2+}) : № 2023623462 : заявл. 20.10.2023 : опубл. 02.11.2023 /Н. Ю. Антонинова, **А. В. Собенин**, А. И. Усманов, А. А. Горбунов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук.

8. Патент № 2800460 С1 Российская Федерация, МПК В01J 20/04, В01J 20/06, С02F 1/28. Железо-магниевый композиционный состав для очистки сточных вод : № 2022124852 : заявл. 28.09.2022 : опубл. 21.07.2023 / Н. Ю. Антонинова, **А. В. Собенин**, А. И. Усманов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук.

9. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024625407 Российская Федерация. Влияние тяжелых металлов на морфологические показатели растений *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop., произрастающих на отработанном медно-

колчеданном месторождении : № 2024625407 : заявл. 29.10.2024 : опубл. 22.11.2024 /Н. Ю. Антонинова, **А. В. Собенин**, А. И. Усманов, В. А. Усманова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук.

10. Патент на изобретение Отходы гуминового производства для очистки сточных вод: № 2023133123; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук. **Собенин Артем Вячеславович**, Усманов Альберт Исмагилович, Антонинова Наталья Юрьевна, Горбунов Алексей Александрович.