

*На правах рукописи*



**УЛЬРИХ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ  
КОМПЛЕКСНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕХНОГЕННО-НАРУШЕННЫХ  
ТЕРРИТОРИЙ В РАЙОНАХ ДОБЫЧИ И ПЕРЕРАБОТКИ МЕДНЫХ РУД**

Специальность: 25.00.36 – Геоэкология  
(горно-перерабатывающая промышленность)

**Автореферат**

**диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

Москва, 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

**Научный консультант:** **Тимофеева Светлана Семеновна**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

**Официальные оппоненты:** **Макаров Дмитрий Викторович**, доктор технических наук, доцент, директор Института проблем промышленной экологии Севера – обособленного подразделения ФГБУН ФИЦ «Кольский научный центр РАН»

**Моисеенко Татьяна Ивановна**, доктор биологических наук, профессор, заведующий отделом Биогеохимии и экологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Ордена Ленина и Ордена Октябрьской Революции Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук (ГЕОХИ РАН)

**Счастливец Евгений Леонидович**, доктор технических наук, заведующий лабораторией моделирования геоэкологических систем Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий» (Кемеровский филиал ФИЦ ИВТ)

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет» (ФГБОУ ВО «УГГУ»)

Защита состоится "20" октября 2020 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.074.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН) по адресу: 111020, Москва, Крюковский тупик, 4; тел./ факс 8-495-360-89-60.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять в адрес совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПКОН РАН - [WWW.ИПКОНРАН.РФ](http://WWW.ИПКОНРАН.РФ).

Автореферат разослан «   » июля 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.074.01,  
доктор технических наук

Т.Н. Матвеева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В XXI веке экологическая ситуация в мире характеризуется достаточно высоким уровнем негативного воздействия промышленного производства на окружающую среду и значительными отрицательными экологическими последствиями прошлой экономической деятельности. Улучшение экологической ситуации является необходимым условием повышения качества жизни и здоровья населения, а также обеспечения экологической безопасности и охраны окружающей среды.

Неблагополучная экологическая ситуация, которая сложилась в большинстве стран с развитой горной промышленностью, требует достаточно серьёзных усилий как ученых, так и общества в целом, направленных на оздоровление загрязненных территорий горных выработок.

В настоящее время Россия входит в пятерку мировых лидеров горнорудной промышленности (наряду с Чили, Австралией, Южной Африкой и Канадой). Добыча и переработка полезных ископаемых относятся к стратегическим направлениям экономики страны. В то же время экологические последствия деятельности горнорудных предприятий для биосферы огромны. В официальных докладах о состоянии окружающей среды сообщается, что в результате производственной деятельности горнодобывающих и перерабатывающих производств ежегодно в атмосферу поступает более 45 млн т вредных веществ, в водоемы сбрасывается около 2,5 млрд м<sup>3</sup> загрязнённых сточных вод, на поверхности земли складировается более 8 млрд т твёрдых отходов различных классов опасности.

Проживание на техногенно-нарушенных территориях, в непосредственной близости к горным предприятиям приводит к ухудшению здоровья населения, развитию экологически обусловленных заболеваний, в том числе изменению активности ферментов, дисфункции органов дыхания, нервной системы, врожденным уродствам, смерти и т. п.

Главные надежды в решении острейших экологических проблем возлагают сегодня на экологизацию горного производства. Принцип экологизации предусматривает комплекс научно-исследовательских и организационно-хозяйственных мероприятий, направленных на воспроизводство земельных, минеральных и водных ресурсов, а именно: сохранение плодородного слоя земли, биологическую рекультивацию загрязненных земель, облагораживание рекультивируемых территорий, утилизацию отходов добычи и переработки минерального сырья, использование и совершенствование новейших технологий переработки сырья, внедрение высокоэффективных биотехнологий для восстановления почв и водных ресурсов, проведение научных исследований в области технологии разработки месторождений и переработки сырьевых запасов.

Особое внимание следует обратить на регионы, где ведется добыча и переработка медных руд в течение длительного времени, и возникли зоны экологического бедствия, накоплен значительный экологический ущерб. К таким регионам относится Южный Урал, где имеется более 20 месторождений медных руд и работают обогатительные фабрики, образованные в основном еще в эпоху Российской империи и СССР: Карабашская (1910 г.), Медногорская (1939 г.),

Сибайская (1913 г.), Бурибайская (1938 г.), Учалинская (1939 г.) с запасами хвостов: 9,1; 29,0; 18,4; 5,4 и 24,0 млн т соответственно. Рассеивание техногенных выбросов в атмосфере и последующее выпадение приводят к формированию в почвенном покрове техногенных аномалий и деградации почв. Загрязненные территории необходимо очищать и восстанавливать. Во многих странах мира уже создана целая индустрия по ремедиации территорий, существуют фирмы по очистке почв, разработке технологий. Создание комплексных технологий восстановления техногенно-нарушенных территорий с учетом региональных особенностей является важной народно-хозяйственной и актуальной научной проблемой.

Наиболее радикальным решением проблемы восстановления и предотвращения дальнейшего загрязнения природной среды горно-перерабатывающими производствами, в частности предприятиями по добыче и переработке медных руд, является внедрение комплексных ресурсо- и энергосберегающих технологий восстановления техногенно-нарушенных территорий.

Создание ресурсо- и энергосберегающих технологий для горных предприятий соответствует приоритетному направлению, прописанному в Указе Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642 и определившем Стратегию научно-технологического развития нашей страны. Поставлены цели, основные задачи научно-технологического развития Российской Федерации, установлены принципы, приоритеты, основные меры и направления реализации государственной политики для сбалансированного развития страны на долгосрочный период.

Изучению вопросов влияния горных предприятий на окружающую среду, очистки загрязненных вод и рекультивации нарушенных почв горной промышленностью посвящено большое количество работ таких ученых, как В.А. Чантурия, И.В. Шадрунова, Д.Р. Каплунов, Г.В. Калабин, В.С. Коваленко, И.М. Щадов, Н.Н. Мельников, Б.Л. Тальгамер, Д.В. Макаров, С.С. Тимофеева, С.Е. Денисов, В.Б. Заалишвили, И.В. Зеньков, А.Н. Попов, А.А. Батоева, Н.Н. Орехова, С.И. Иванков, В.А. Домрачева, Е.В. Зелинская, Л.Т. Крупская, В.Н. Макаров, Т.И. Моисеенко, Z. Yao, J.H. Fu, R.J. Abumaizar, M.D. Ulsido, De Ceballos BSO, J.T. De Sousa, L. Beesley, K. V. Cantrell, L. Cui, D. Houben и др.

В данном направлении работают многие научные школы Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН, Российского научно-исследовательского института комплексного использования и охраны водных ресурсов, Иркутского национального исследовательского технического университета, ОАО Подмосковного научно-исследовательского и проектно-конструкторского института, Уральского государственного горного университета, Дальневосточного научно-исследовательского института лесного хозяйства, Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Горного института КНЦ РАН, Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», Санкт-Петербургского горного университета и других учреждений.

Однако в литературе явно недостаточно внимания уделено экотехнологиям, способствующим восстановлению техногенно-нарушенных территорий в районах с развитой медной промышленностью. Применение в экотехнологиях природных материалов и композитов на их основе при правильном их подборе может быть высокоэффективным и экономически целесообразным по сравнению с традиционными методами очистки поверхностных вод, почв и атмосферного воздуха.

Для обеспечения максимальной эффективности применения экотехнологий с целью ревитализации техногенно-изменённых территорий освоения и эксплуатации медных месторождений необходимо проведение комплексных фундаментальных и прикладных исследований, включающих выбор и геоэкологическую оценку современного состояния территорий с высоким накопленным экологическим ущербом, обоснование методологических подходов и исследование закономерностей реабилитации загрязнённых территорий, разработка комплекса технических решений.

Разработка и апробация ресурсо- и энергосберегающих технологий для использования в горном деле соответствуют приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации – «Рациональное природопользование».

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Область исследования соответствует требованиям паспорта специальности научных работников 25.00.36 – Геоэкология (горно-перерабатывающая промышленность) по п. 3.1. «Горно-геологическая природная среда и ее изменение под влиянием хозяйственной деятельности при освоении месторождений (природного и техногенного происхождения) твердых полезных ископаемых: загрязнение массивов горных пород, поверхностных и подземных вод, развитие физико-геологических и техноприродных процессов, деградация криолитозоны, истощение ресурсов подземных вод»; п. 3.3. «Геоэкологические аспекты рационального использования и охраны минеральных ресурсов Земли и рекультивации территорий, нарушенных при разработке месторождений и обогащении твердых полезных ископаемых»; п. 3.10. «Инженерная защита экосистем, прогнозирование, предупреждение и ликвидация последствий загрязнения окружающей среды при строительстве, консервации и ликвидации горных и горно-обогатительных предприятий».

**Цель работы** – Создание научных основ и разработка технологий комплексного восстановления техногенно-нарушенных территорий и ликвидации накопленного ущерба в районах добычи и переработки медных руд.

**Идея работы:** использование выявленных закономерностей сорбции природными минеральными сорбентами и фитоэкстракции макрофитами и многолетними растениями тяжелых металлов для комбинации этих методов в технологиях комплексного восстановления техногенно-нарушенных добычей, обогащением и переработкой медных руд территорий с учетом их геоэкологической оценки и прогноза эффективности технологий с применением теории нечетких множеств.

**Задачи исследования:**

– провести анализ современного развития медной промышленности и ее влияния на окружающую среду. Выполнить анализ практики применения современных методов очистки сточных вод и почв, загрязненных тяжелыми металлами;

– провести геоэкологическую оценку и выявить масштабы загрязнения объектов окружающей среды, подверженных длительному влиянию накопленных сульфидсодержащих отходов в районах добычи и переработки медных руд Южного Урала. Изучить на примере Учалинской, Сибайской, Бурибайской, Медногорской и Карабашской геотехнических систем процессы миграции тяжелых металлов в объекты окружающей среды под влиянием отходов добычи и переработки медных руд;

– выполнить на примере Карабашской геотехнической системы типизацию горнопромышленных отходов;

– определить возможность детоксикации поверхностных сточных вод от тяжелых металлов с применением макрофитов, природных материалов и композитов на их основе, разработать математические модели оптимальных условий для фиторемедиационных и сорбционно-габионных сооружений;

– вскрыть механизмы и закономерности фитоэкстракции тяжелых металлов из загрязненных почв и поверхностных стоков растениями-биоаккумуляторами, осуществить выбор и научное обоснование структуры фитоценозов для ремедиации почв, стоков и хвостохранилищ;

– обосновать целесообразность использования отходов горнопромышленного производства (отходов пирометаллургии) в качестве сырья для получения грунтобетона, предназначенного для экранирования хвостохранилищ с использованием разработанных математических моделей параметров композита;

– разработать энерго- и ресурсосберегающие технологии очистки тяжелометалльных поверхностных стоков, почв и атмосферного воздуха до уровня приемлемого экологического риска с получением продуктов из растительного сырья и сырья для закладочных смесей. Оценить эколого-экономическую эффективность использования технологий ликвидации накопленного ущерба;

– разработать аналитическую методику оценки эффективности использования предлагаемых технологий восстановления техногенно-нарушенных территорий и прогнозирования результатов воздействия технологических решений.

**Объекты исследования:**

– геотехнические системы «редуцированного» и «полного» технологического циклов, сформированные под влиянием горнопромышленного техногенеза – Учалинская, Сибайская, Бурибайская, Медногорская и Карабашская;

– техногенные почвы, представленные несколькими природными зональными типами: горные слаборазвитые черноземы, черноземы обыкновенные, черноземы выщелоченные, черноземы южные и

неполнопрофильные, черноземы горные с редуцированным профилем, серые лесные почвы;

- сульфатные металлоносные воды различной кислотности;
- отходы добычи и обогащения руд; отходы процессов пирометаллургии; отходы, образованные при нейтрализации кислых рудничных вод.

**Методы исследований.** Методологической и общетеоретической основой диссертационного исследования выступает синтезирование интеллектуального капитала, накопленного непосредственно в самой геоэкологии и других отраслях знания. Исследование опирается на положения системного и антропологического подходов, теорий геоэкологической безопасности существующих и создаваемых технологий, инженерной защиты экосистем и создания экологически безопасных технологий, теории нечетких множеств. Анализ концептуальных теорий проводится как в понятийном, так и в проблемном аспектах.

Методы исследования: анализ литературы и имеющихся эмпирических данных, обобщение работ отечественных и зарубежных исследователей, электронно-микроскопический, микрорентгеноспектральный, дифференциально-термический, рентгенофазовый анализ (Универсальный рентгеновский дифрактометр Rigaku Ultima IV (излучение  $\text{CuK}\alpha$ )), вольтамперометрия, метод атомно-абсорбционного анализа с пламенным способом атомизации пробы, метод низкотемпературной адсорбции азота (анализатор удельной поверхности и пористости ASAP Micromeritics 2020), методы трехмерного моделирования, ГИС-технологии, математическая статистика, эколого-экономический и технико-экономический анализы.

Обработка экспериментальных данных проведена с использованием пакетов прикладных программ Correlay, Statistica, MicrosoftExcel 10.0, Gold Surfer.

***Научные положения, выносимые на защиту:***

1. Горнопромышленные отходы-генераторы пылеаэрозольных выпадений, кислотопродуцирования и поступления в поверхностные водотоки комплекса халькофильных и сидерофильных элементов в аномальных концентрациях на техногенно-нарушенных территориях в районах добычи и переработки медных руд разделяются на четыре промышленно-генетических типа. Потенциальные формы нахождения халькофильных элементов в депонирующих средах определяются зональным типом почв: в Бурибайской и Сибайской ГТС (неполнопрофильные черноземы) основной формой нахождения является «карбонатная», а в Учалинской и Карабашской ГТС (серые лесные почвы) – фракция, связанная с гидроксидами Fe и Mn, а значение суммарного показателя загрязнения (8–12 см) в техногенных интервалах гумусово-аккумулятивных горизонтов профиля почв в импактных зонах ГТС «полного» технологического цикла на порядок превышает таковой для ГТС «редуцированного» технологического цикла.

2. Повышение сорбции халькофильных и сидерофильных элементов до 84 % из поверхностных сточных вод с территорий горно-перерабатывающих предприятий с рН 1,58–7,85 достигается за счет сорбционной способности композитного сорбента из природных материалов в виде глауконита, вспученного

перлита и вспученного вермикулита в соотношениях 50:25:25, а его минимальная кажущаяся плотность  $0,184 \text{ г/см}^3$  и полученный математической моделью предел удельной поверхности от 15–20  $\text{м}^2/\text{г}$  позволяют использовать композит в сорбционно-габионных очистных сооружениях для их удешевления.

3. Повышенная фитоэкстракция тяжелых металлов из поверхностных стоков и почв в зоне воздействия предприятий по добыче и переработке медных руд достигается за счет создания растительных биоценозов с коэффициентом биогеохимической активности макрофитов от 2490 до 10098 для системы поверхностный сток – растение и коэффициентом обогащения растений-биоаккумуляторов от 2,3 до 52,5 для системы поверхностный сток – почва – растение.

4. Необходимые экозащитные свойства грунтобетона, состоящего из медеплавильного отвального шлака АО «Карабашмедь», цемента и белой глины, достигаются применением математических моделей, позволяющих определить оптимальный состав композита (шлак : глина + цемент до 1:4) и высоту слоя (от 15 см), исключающие миграцию тяжелых металлов в окружающую среду за счет повышенной прочности и сниженной влагопроницаемости композита.

5. Разработанные комплекс схем и технологические решения с использованием композитов и растительных сообществ позволяют снизить техногенную нагрузку на биогеоценоз и ликвидировать накопленный ущерб в геотехнических системах с длительным воздействием сульфидсодержащих отходов горно-перерабатывающей промышленности с получением товарных продуктов из отработанного растительного сырья и сырья для закладочных смесей.

6. Аналитическая методика, разработанная на основе использования адаптированного инструментария теории нечетких множеств, расширяет возможности анализа увеличением числа релевантных природных, техногенных и технологических показателей и позволяет выполнять интегральную оценку потенциальной эффективности предлагаемых технологий восстановления окружающей среды и ликвидации накопленного ущерба в геотехнических системах; прогнозирование результатов различных технологических решений.

#### **Научная новизна:**

– Впервые разработаны методологические основы выбора технологических решений восстановления геотехнических систем в зоне воздействия предприятий по добыче и переработке медных руд с использованием энерго- и ресурсосберегающих технологий.

– В результате проведенной геоэкологической оценки исследуемых территорий установлены импактные зоны загрязнения от источника эмиссии за счет миграции в аквальные системы, педосферу и атмосферу тяжелых металлов и иных поллютантов в аномальных концентрациях от накопленных отходов горно-перерабатывающей промышленности прошлых лет мощностью от 4 до 20 км. Выявлены тенденции геохимической миграции и динамики накопления тяжелых металлов в объектах окружающей среды.



– Впервые на основе природных материалов получен композитный сорбент, который обладает эффектом эмерджентности, способствующим интенсивному извлечению из сточных вод  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ , в том числе трудноизвлекаемого  $\text{Cd}^{2+}$ , относящегося к первому классу опасности. Сорбционная емкость композитного сорбента в 1,6 раза превышает показатели моносорбентов, входящих в состав композита. Установлены закономерности сорбции.

– Научно обоснованы и экспериментально определены оптимальные режимы биоаккумуляции ионов тяжелых металлов макрофитами в зависимости от pH, температуры, концентрации металлов, плотности посадки и других параметров. Доказано, что наиболее перспективной для использования в фиторемедиационных очистных сооружениях является композиция макроконцентраторов из рогоза узколистного, кубышки жёлтой, рдеста пронзеннолистного, урути колосистой, рдеста гребенчатого, рдеста блестящего, кладофоры сборной и хары обыкновенной, биогеохимическая активность которых варьирует от 2490 до 10098 в зависимости от pH и температуры среды. Разработаны и математически смоделированы технологические решения фитотехнологии очистки ливневых, талых и подотвальных вод от тяжелых металлов в фиторемедиационных очистных сооружениях, которые позволяют достигнуть максимальной степени очистки стоков при массе растений в сооружении от 0,15 до 0,16 кг/м<sup>2</sup>.

– Детально исследованы закономерности фитоэкстракции тяжелых металлов из загрязненных почв и поверхностных стоков растениями-биоаккумуляторами. Установлено, что наиболее эффективными растениями-биоаккумуляторами выступают кустарниковые растения барбарис обыкновенный, бузина красная и многолетние травянистые растения пырей ползучий, житняк гребенчатый и овсяница луговая с коэффициентом обогащения от 2,3 до 52,5 в зависимости от концентрации металлов в почве и стоках. Доказано, что металлы концентрируются преимущественно в наземной части растений и могут быть извлечены и использованы после сжигания и последующей обработки.

– Для целей технологии рекультивации хвостохранилищ впервые предложен грунтобетон на основе медеплавильного гранулированного шлака, цемента, глины и воды. Доказано, что наличие большей доли шлака, обладающего пористым строением и способного аккумулировать в себе воду, поступающую из окружающей среды, способствует наименьшему промоканию композита при составе смеси с соотношением шлак : глина + цемент до 1:4, при этом соотношение глины и цемента в этой смеси должно быть 1:1,5 или 2:1.

– Разработаны технологии, направленные на экологическое восстановление системы атмосфера → воздух → почвы → поверхностные воды и ликвидацию накопленного ущерба с использованием композитов, макрофитов и растений-биоаккумуляторов с получением товарных продуктов из растительного сырья и сырья для закладочных смесей.

– Впервые предложена аналитическая методика комплексной оценки потенциальной эффективности разработанных технологий восстановления

техногенно-нарушенных территорий для прогнозирования результатов воздействия различных сочетаний релевантных технологических параметров. Особенность аналитической методики заключается в использовании инструментов теории нечетких множеств, что позволяет увеличить число показателей природных условий и рассматриваемых технологических параметров и за счет этого расширить аналитические возможности предлагаемой методики оценки и прогнозирования.

**Степень достоверности результатов** научных положений, выводов и рекомендаций, изложенных в диссертационной работе, подтверждается сопоставимостью большого объема экспериментальных исследований с положительными результатами промышленных испытаний, а также обеспечивается применением современного комплекса физико-химических методов исследований с использованием современного сертифицированного оборудования, стандартных методов испытаний и способов измерений.

**Практическое значение работы** заключается в создании и промышленном внедрении новых технологий, обеспечивающих экологическую безопасность окружающей природной среды на территориях эксплуатации, консервации и ликвидации предприятий по добыче и переработке медных руд, а именно:

- комплексная технология восстановления загрязненных территорий с использованием растений-биоаккумуляторов и сорбционно-габионных модулей, позволяющая повысить качество как почв, так и атмосферных стоков (Патент РФ на изобретение № 2603002);

- технология очистки поверхностных сточных вод с водосборной территории медеперерабатывающих предприятий на основе фиторемедиационных очистных сооружений, позволяющая повысить качество поверхностных вод (Патент РФ на изобретение № 2572577);

- технология рекультивации хвостохранилищ с применением композитов и биополотна, обеспечивающая консервацию техногенных намывных грунтов и, как следствие, повышение качества атмосферного воздуха и атмосферных стоков.

Созданы композитный сорбент из смеси глауконита, вспученного перлита и вспученного вермикулита (Патент РФ на изобретение № 2682586) и грунтобетон из смеси медеплавильного шлака, цемента, глины и воды.

Разработанные технологии внедрены на территории обогатительной фабрики АО «Карабашмедь», в проекты предприятий ООО НПО «РОСГЕО» и ООО «ЮжУралНИИВХ».

Основные научные положения и практические решения диссертационной работы использованы при организации учебного процесса по направлениям: 25.00.36 Геоэкология (по отраслям); 20.03.01 Техносферная безопасность; 25.00.27 Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия и 08.03(04).01 Строительство.

**Личный вклад автора** состоит в обосновании идеи работы и ее реализации путем постановки цели и задач исследования, в формировании методологического подхода для решения поставленных задач, в обобщении данных и разработке на базе результатов теоретических, экспериментальных и опытно-промышленных

исследований высокоэффективных технологий восстановления окружающей природной среды, в подготовке публикаций и обосновании выводов. Вклад автора является решающим во всех разделах работы.

**Апробация полученных результатов.** Результаты работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях, таких как: Научно-практическая конференция «Рациональное использование природных ресурсов» (Пермь, 2009); International conference «Science, Technology and Higher Education» (Westwood, Canada, 2012); International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO (Albena, Bulgaria, 2013, 2014); «International Scientific and Practical Conference «Science and Society» (London, 2013); II научно-практическая конференция с международным участием «Науки о земле: современное состояние и приоритеты развития» (Дубаи, 2014); II региональная научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов «Техносферная безопасность в XXI веке» (Иркутск, 2014); XX Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Современный мир и безопасность» (Иркутск, 2015), Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» (Челябинск, 2016); Международная научно-техническая конференция «Строительство, архитектура и техносферная безопасность» (Челябинск, 2017, 2018) и др.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 92 работы, в том числе 1 монография, 21 статья в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 15 статей в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science, получено 3 патента РФ на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, шести глав и заключения, изложенных на 361 странице машинописного текста, содержит 180 рисунков, 73 таблицы, библиографический список из 396 наименований и 13 приложений.

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» (ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»).

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены степень научной разработанности, сформулирована цель исследования, определены объекты исследования, научная новизна работы и практическая значимость полученных результатов, приведены основные научные положения, выносимые на защиту, представлены сведения об апробации полученных результатов. **В первой главе** дана краткая характеристика состояния и основные тенденции развития медной промышленности, произведена оценка воздействия горных и горно-перерабатывающих производств на экосистемы, проведен анализ современных литературных и патентных источников по современным методам восстановления почв и техногенных грунтов, произведен анализ методов очистки поверхностных стоков от тяжелых металлов. **Во второй главе** даны методологические основания выбора технологических решений

восстановления геотехнических систем. Рассмотрены методологический подход к решению вопроса очистки поверхностных сточных вод в фиторемедиационных сооружениях, методология комплексной ремедиации почв и атмосферных стоков и методология рекультивации хвостохранилищ с использованием грунтобетона и биополотна. Разработана аналитическая методика оценки эффективности предлагаемых технологий на основе теории нечетких множеств. **В третьей главе** уделяется внимание геоэкологическим последствиям добычи и переработки медноколчеданных руд в Южно-Уральском промышленном регионе. Отражаются результаты исследования по состоянию почв и водных экосистем в исследуемых геотехнических системах. Представлены геоэкологическая нагрузка от отходов добычи и переработки, а также прогнозная оценка состояния здоровья населения исследуемых территорий. **Следующие главы** содержат экспериментальные и теоретические исследования закономерностей сорбции тяжелых металлов природными сорбентами из водных растворов и закономерности фитоэкстракции тяжелых металлов из водных растворов и почв растениями-биоаккумуляторами. Представлены результаты математического моделирования условий и параметров технологических решений. Последняя, **шестая глава** посвящена практическим аспектам восстановления геотехнических систем в зоне воздействия предприятий по добыче и переработке медных руд, а именно: представлены технологии и технологические схемы очистки поверхностных сточных вод в фиторемедиационных сооружениях; комплексной ремедиации почв и атмосферных стоков с использованием сорбционно-габионных модулей, многолетних трав и кустарниковых растений; рекультивации хвостохранилищ с использованием грунтобетона и биополотна. Произведено прогнозирование эффективности разработанных технологий на основе инструментария теории нечетких множеств. Представлена эколого-экономическая эффективность использования предлагаемых технологий ликвидации накопленного ущерба. **Заключение** содержит основные выводы по результатам проведенных исследований. **В приложениях** представлены копия аттестата аккредитации испытательной лаборатории, акты о промышленном внедрении результатов работ и патенты.

На основе выполненных исследований обоснованы следующие научные положения, выносимые на защиту:

**Первое защищаемое положение:** *горнопромышленные отходы-генераторы пылеаэрозольных выпадений, кислотопродуцирования и поступления в поверхностные водотоки комплекса халькофильных и сидерофильных элементов в аномальных концентрациях на техногенно-нарушенных территориях в районах добычи и переработки медных руд разделяются на четыре промышленно-генетических типа. Потенциальные формы нахождения халькофильных элементов в депонирующих средах определяются зональным типом почв: в Бурибайской и Сибайской ГТС (неполнопрофильные черноземы) основной формой нахождения является «карбонатная», а в Учалинской и Карабашской ГТС (серые лесные почвы) – фракция, связанная с гидроксидами Fe и Mn, а значение суммарного показателя загрязнения (8–12 см) в техногенных*

*интервалах гумусово-аккумулятивных горизонтов профиля почв в импактных зонах ГТС «полного» технологического цикла на порядок превышает таковой для ГТС «редуцированного» технологического цикла.*

Под *геотехническими системами* (Емлин, 1991 и др.) понимается совокупность природных объектов и технических сооружений (комплексов), находящихся в тесной взаимной зависимости.

По результатам геоэкологической оценки геотехнических систем (ГТС) Южного Урала выделены четыре промышленно-генетических типа горнопромышленных отходов: отходы добычи руд; отходы обогащения руд; отходы процессов пирометаллургии и отходы, образованные при нейтрализации кислых рудничных вод.

*Отходы добычи руд* представлены техногенными массивами (отвалами) и состоят из гетерогенной горной массы с различным вещественным составом и морфологией. Под действием атмосферных осадков происходят процессы выщелачивания с образованием дренажных вод с низким значением рН и высокой концентрацией токсичных элементов – до десятков тысяч мг/дм<sup>3</sup>. рН стоков может варьировать от 2,09 (Карабашская ГТС) до 6,83 (Учалинская ГТС).

Установлено, что в состав сульфидсодержащих метасоматически изменённых пород входят нерудные минералы – кварц, полевые шпаты и серицит. Гипс и ярозит выступают в качестве вторичных минералов. Алюминий, медь, железо, свинец и цинк являются основными металлами, выносимыми из техногенных объектов в условиях выщелачивания.

*Отходы обогащения руд («хвосты»)* представлены тонкодисперсной массой алюмосиликатного и сульфидного состава, образованы при флотации руд, складированы в хвостохранилища. Являются постоянно действующими источниками поступления металлов в окружающую среду, при этом на территориях ГТС первого типа они могут приносить более 1205 мг/дм<sup>3</sup>, для второго типа – более 261 мг/дм<sup>3</sup> металлов в поверхностные водотоки.

Содержание металлов в отходах добычи и переработки медноколчеданных руд ГТС Южного Урала, отнесённых к первому и второму классу опасности, составляет: для свинца (2+) от 2106 до 5665 мг/кг, меди (2+) от 219 до 4884 мг/кг, марганца (2+) от 347 до 1078 мг/кг, цинка (2+) от 549 до 6639 мг/кг, железа (3+) от 80317 до 337421 мг/кг. Кроме того, пробы в значительных количествах содержат алюминий, кобальт, никель, титан, ванадий и фосфор.

В ГТС с «полным» технологическим циклом источником дополнительного загрязнения территорий являются и *отходы пирометаллургии* – металлургические шлаки.

Металлургические шлаки (на примере Карабашской ГТС) представлены чёрными, иризирующими на раковистых сколах афировыми гранулами размером от 0,8 до 5 мм. Микроструктура шлаков представлена стекловатой матрицей силиката железа (фаялит), сульфидными обособлениями округлой формы, редкими прожилковидными выделениями сульфидных фаз. Структура отвальных шлаков плотная, степень кристаллизации – 85–90 %. Содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO и Cu в шлаке варьирует в пределах до 8,6; 32,0 и 0,2 %, соответственно.

*Отходы, образованные при нейтрализации кислых рудничных вод,* накопившиеся в период эксплуатации шахт и не ликвидированные до сих пор, могут представлять собой специфический горнопромышленный отход четвертого геолого-промышленного типа.

Примером этого могут являться осадки, образованные при рудничном водоотливе шахты «Центральная» Карабашской ГТС. Рассматриваемые техногенные осадки образовались в результате смешения кислых рудничных вод шахты «Центральная» с нейтральными водами реки Ольховка. Образовавшиеся техногенные илы имеют площадь распространения около 1,5 км<sup>2</sup>, а содержание тяжелых металлов при мощности илов до 3,0 м имеет следующий диапазон: Zn до 25412; Cu до 11265; Cd до 84,2; Pb до 254,2 и Ni до 310,2 мг/кг. Вода в Ольховском пруду имеет рН от 6,7 до 7,1 в зависимости от климатических сезонов. Любое изменение рН в сторону снижения на 1 ед. рН может привести к смещению достигнутого равновесия.

Представленные четыре промышленно-генетических типа отходов являются постоянными источниками загрязнения окружающей среды.

По результатам исследования природно-техногенных вод всех исследуемых геотехнических систем, предложена их классификация, согласно которой воды можно разделить на 3 типа: сильнокислые и кислые экстравысокометалльные (воды источников эмиссии – кислые подотвальные воды), кислые и субнейтральные высокометалльные (воды зон смешения) и нейтральные низкометалльные (фоновые воды природных ландшафтов). Преобладающей формой миграции всех исследуемых элементов в аквальных системах является растворенная.

Согласно рисунку 1 можно выделить области, отражающие три типа вод: ультракислые и кислые подотвальные воды (хвостохранилища и отходы добычи руд), имеющие низкое значение рН и экстремально высокие концентрации исследуемых металлов; воды областей смешения; нейтральные воды. Все исследуемые рудничные воды относятся к сульфатному типу, они характеризуются наличием в своем составе катионов кальция и магния, а в анионном составе – сульфат-ион.

Исследованиями установлено, что снеговой инфильтрат за счет пылеаэрозольных выпадений и дождевая вода могут дополнительно привносить в объекты окружающей среды ГТС тяжелые металлы в объеме более 39000 мкг/л. Стоит отметить, что атмосферные осадки содержат кроме свинца, цинка, меди, никеля и железа вещество первого класса опасности кадмий.

Качество атмосферного воздуха в исследуемых ГТС указывает на высокое содержание в нем сернистого ангидрида, диоксида, оксида азота и других поллютантов. Так, например, в воздухе Карабашской ГТС превышение ПДК сернистого ангидрида наблюдалось от 88 до 170 раз.

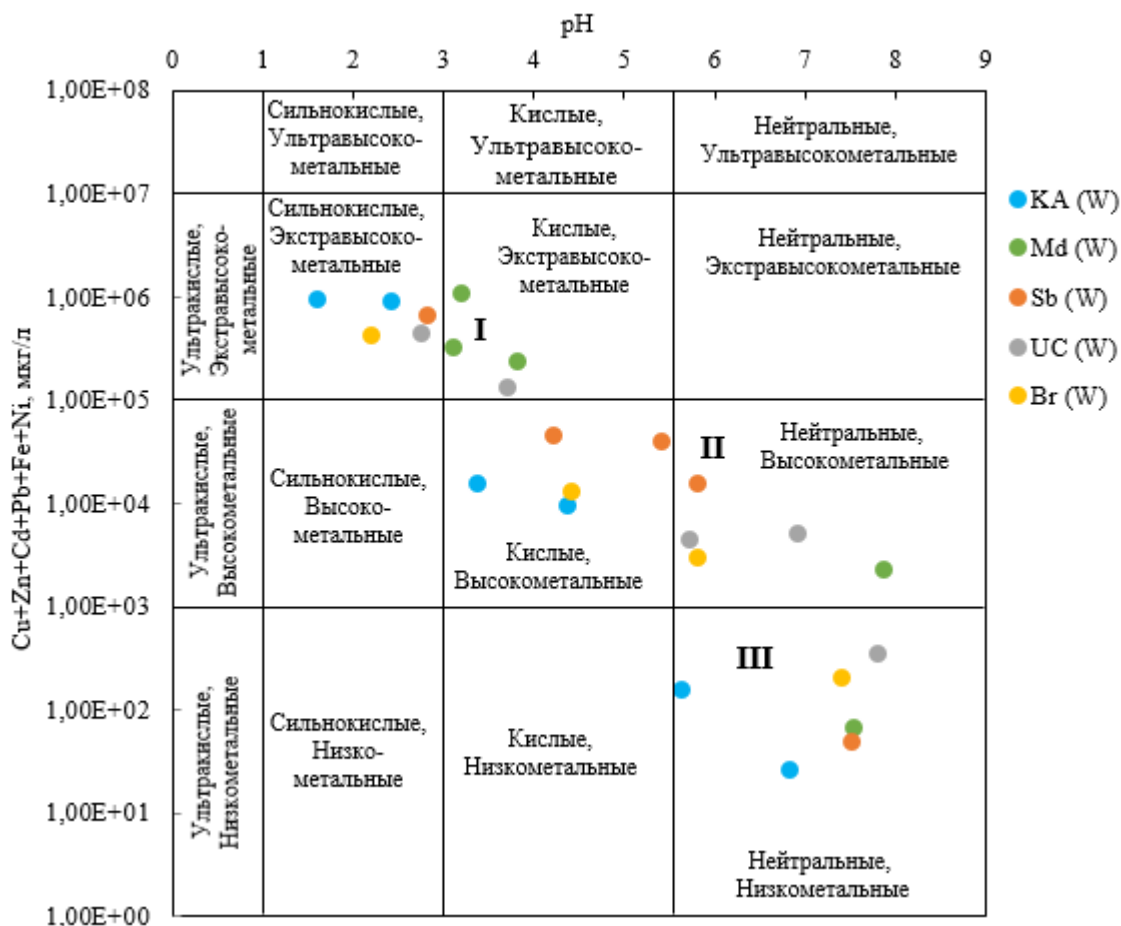


Рисунок 1 – Классификационная диаграмма состава вод геотехнических систем Южного Урала и фоновых территорий: I – ультракислые и кислые подотвальные воды, II – воды областей смешения III – нейтральные воды фоновых территорий

Исследованиями аномальных почв на территориях рассматриваемых ГТС установлено, что на ГТС с «редуцированным» технологическим циклом в верхнем слое 0–5 см содержание цинка и меди варьируется в широком диапазоне от 100 до 1540 мг/кг, а на территориях с «полным» технологическим циклом – от 1360 до 5007 мг/кг. Глубина загрязнения тяжелыми металлами в почвах ГТС как с «полным», так и с «редуцированным» технологическим циклом достигает 12–20 см. Пример распределения тяжелых металлов по почвенному профилю представлен Учалинской и Карабашской ГТС на рисунке 2.

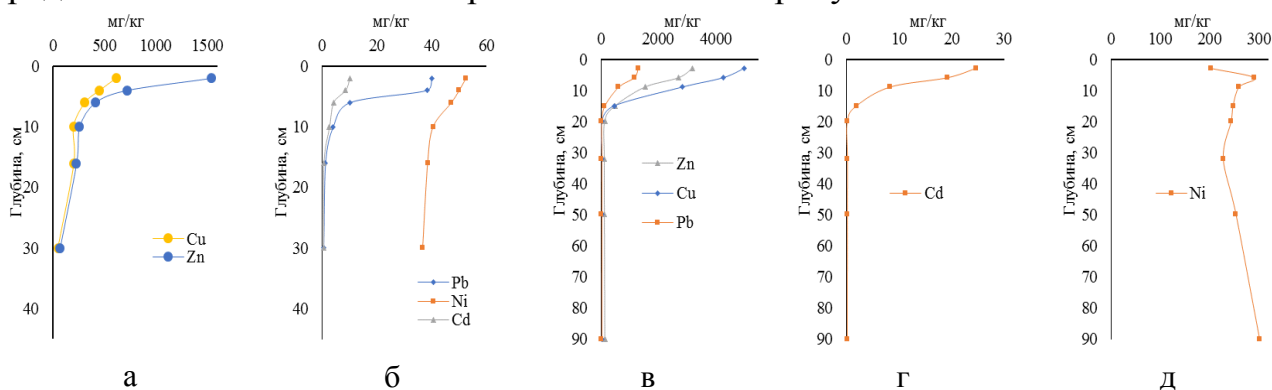


Рисунок 2 – Распределение металлов по почвенному профилю в: а, б – Учалинской ГТС; в, г, д – Карабашской ГТС

Максимальная концентрация тяжелых металлов отмечается в верхних частях гумусово-аккумулятивных горизонтов, которые по сути своей являются горизонтами-коллекторами пылевых аэральных выпадений. Снижение концентраций металлов в нижних частях разрезов свидетельствует об аэральном загрязнении почв с аккумулятивно-техногенным типом накопления исследуемых металлов. Отличительной особенностью обладает сидерофильный элемент Ni, концентрация которого постепенно увеличивается (Рис. 2 д) или незначительно уменьшается (Рис. 2 б) от верхних гумусово-аккумулятивных к нижним иллювиальным горизонтам почвенных профилей из-за содержания в них глинистых фракций, обуславливающих процессы сорбции Ni в исследуемых почвах.

Оценкой площади импактного загрязнения почв установлено, что уровни загрязнения, значительно превышающие фоновые значения, зафиксированы на расстоянии 0–4 км от источника эмиссии для ГТС с «редуцированным» технологическим циклом (Рис. 3 а, б) и до 20 км – с «полным» технологическим циклом (Рис. 3 в, г) по отдельным элементам за счет пылевой нагрузки при пиromеталлургическом переделе концентратов.

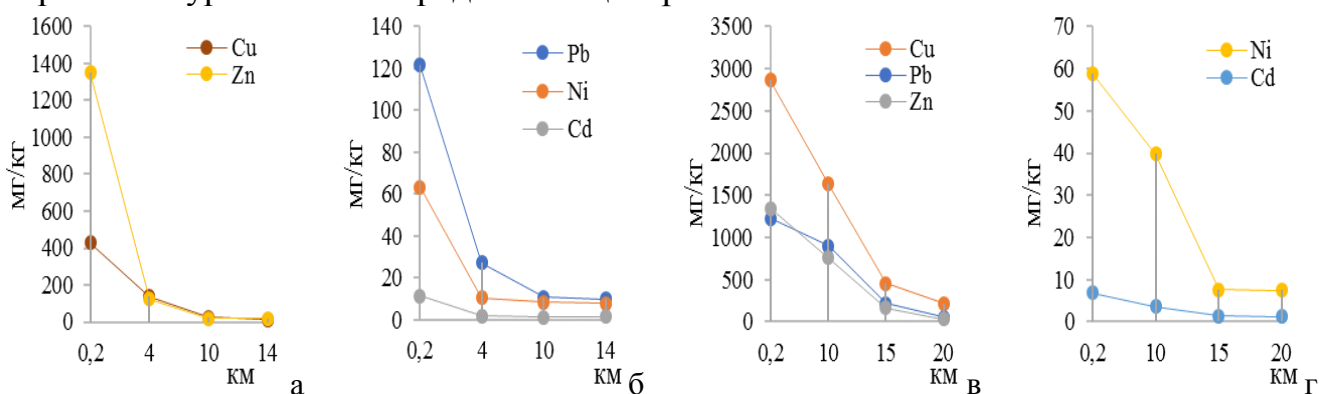


Рисунок 3 – Характер снижения концентраций халькофильных элементов в техногенных почвах: а, б – Сибайская ГТС; в, г – Медногорская ГТС

Рассчитан суммарный показатель загрязнения почв исследуемых ГТС ( $Z_c$ ), характеризующий эффект воздействия группы элементов. Установлено, что в Сибайской ГТС  $Z_c$  достигает 139; Учалинской ГТС – 134; Бурибайской ГТС – 58; Медногорской ГТС – 417 и Карабашской ГТС – 566.

Определены формы нахождения халькофильных элементов в депонирующих средах, которые определяются зональным типом почв: в Бурибайской (неполнопрофильные черноземы) и Сибайской (черноземы обыкновенные) ГТС основной формой нахождения является карбонатная, а в Учалинской, Карабашской (серые лесные почвы) и Медногорской ГТС (черноземы горные с редуцированным профилем) – фракция, связанная с гидроксидами Fe и Mn.

Таким образом, результаты геоэкологической оценки геотехнических систем Южного Урала позволяют определить в качестве приоритетных мер, направленных на экологическое восстановление системы: атмосферный воздух → почвы → поверхностные воды комплекс мероприятий по разработке и внедрению высокоэффективных энерго- и ресурсосберегающих технологий повышения



экологической безопасности обследуемых территорий с использованием сорбентов, макрофитов, многолетних трав и кустарниковых растений.

**Второе защищаемое положение:** *повышение сорбции халькофильных и сидерофильных элементов до 84 % из поверхностных сточных вод с территорий горно-перерабатывающих предприятий с рН 1,58–7,85 достигается за счет сорбционной способности композитного сорбента из природных материалов в виде глауконита, вспученного перлита и вспученного вермикулита в соотношениях 50:25:25, а его минимальная кажущаяся плотность  $0,184 \text{ г/см}^3$  и полученный математической моделью предел удельной поверхности от 15–20  $\text{м}^2/\text{г}$  позволяют использовать композит в сорбционно-габионных очистных сооружениях для их удешевления.*

Для решения проблем очистки поверхностного стока с техногенных водосборных территорий чаще всего применяют реагентные методы очистки, которые имеют ряд недостатков: высокие эксплуатационные расходы на содержание оборудования, необходимость предварительной очистки, повышенный расход электроэнергии, необходимость разбавления высококонцентрированных растворов, использование реагентов для повышения гидрофобности загрязнителей. Применение природных сорбентов, месторождения которых находятся на Южном Урале, в технологиях очистки загрязненных стоков может быть экономически целесообразным в связи с их дешевизной, широким распространением месторождений, довольно высокими адсорбционными свойствами.

Для выбора эффективного сорбента проведены исследования по оптимальной величине рН сорбции металлов, сорбционной емкости в статических и динамических условиях, фракционного состава сорбента, его фильтрационных свойств, возможности регенерации и площади удельной поверхности. Для исследования были выбраны такие сорбенты, как глауконит (Каринское месторождение), вспученный вермикулит, вспученный перлит, опока, древесная щепа, активированный уголь АГ-3, дроблёный антрацит и зола ТЭЦ.

Установлено, что представленные сорбенты относятся к группе материалов с развитой поверхностью и высокой открытой пористостью; относятся к микропористым или однородно-тонкопористым и характеризуются лэнгмюровскими изотермами адсорбции.

При исследовании закономерностей сорбции катионов меди, железа и цинка в статических условиях установлено, что в интервале концентраций 5–15 мг/л наиболее эффективно концентрация катионов снижается в следующих системах: модельный раствор – глауконит, модельный раствор – вспученный вермикулит, модельный раствор – вспученный перлит, модельный раствор – опока, а при средних и высоких концентрациях катионов меди (50–150 мг/л) наиболее эффективно уровень загрязнений снижают глауконит, вспученный вермикулит, АГ-3, причём при средних концентрациях можно выделить глауконит, а при высоких вспученный вермикулит, глауконит и АГ-3 работают практически одинаково.

Установлено, что с ростом температуры до 20 °С увеличивается статическая обменная ёмкость вспученного вермикулита, глауконита и вспученного перлита. Повышение температуры практически не оказывает влияния на обменную ёмкость золы и активированного угля марки АГ-3. Для дроблёного антрацита наблюдается снижение обменной ёмкости при повышении температуры, за исключением сорбции катионов свинца и цинка.

Зависимости адсорбции катионов металлов от вида сорбента и времени контакта с сорбентом при температурах 10 и 20 °С указывают на то, что с увеличением температуры модельного раствора происходит увеличение сорбции катионов железа глауконитом и вспученным вермикулитом в 15 раз, свинца – на 25 %, цинка – в 7 раз, никеля – в 2,5 раза. Повышение температуры не оказывает влияния на адсорбцию кадмия и незначительно влияет на адсорбцию меди.

Выявлены константа скорости и величина энергии активации процесса сорбции ионов металлов. Установлено, что при повышении температуры интенсивность сорбции возрастает, что, по-видимому, связано с ускорением процессов диффузии катионов металлов к поверхности сорбентов. Энергия активации адсорбции имеет низкие значения, поэтому взаимодействие сорбентов и сорбата происходит в диффузионной области. Расчёт энергии активации показывает на то, что адсорбция катионов металлов исследованными сорбентами лимитируется внешнедиффузионными процессами. Повышение температуры приводит к ускорению процесса адсорбции.

Исследованные сорбенты являются стабильными и прочными материалами. При воздействии сильноокислых модельных растворов, аналогов промышленных стоков, на поверхности не наблюдается разрушения и растворения.

Исследована сорбция металлов на природных сорбентах в динамических условиях. Установлено, что при скорости фильтрации 0,3 л/час степень очистки поверхностных сточных вод и, соответственно, количество сорбированных катионов металлов единицей массы сорбента выше, чем при скорости фильтрации 1,2 л/час. Таким образом, для эффективной сорбционной очистки сточных вод от ионов металлов при их совместном присутствии в растворах с высокой концентрацией рекомендуется интервал скоростей фильтрации от 0,3 до 0,6 л/час. Исключением является глауконит, который показал высокую эффективность сорбции (99,43–100 %) всех присутствующих в модельном растворе катионов металлов при скоростях фильтрации 0,3–1,2 л/час. Результаты исследований приведены на рисунке 4.

Получены ряды исследованных сорбентов по степени эффективности извлечения катионов тяжёлых металлов из многокомпонентного модельного раствора: глауконит > вспученный перлит > вспученный вермикулит > АГ-3 > дроблёный антрацит > древесная щепка. Следует отметить, что сорбенты опока и зола показали максимальную сорбцию при низких скоростях фильтрации – 0,014 и 0,007 л/час соответственно.

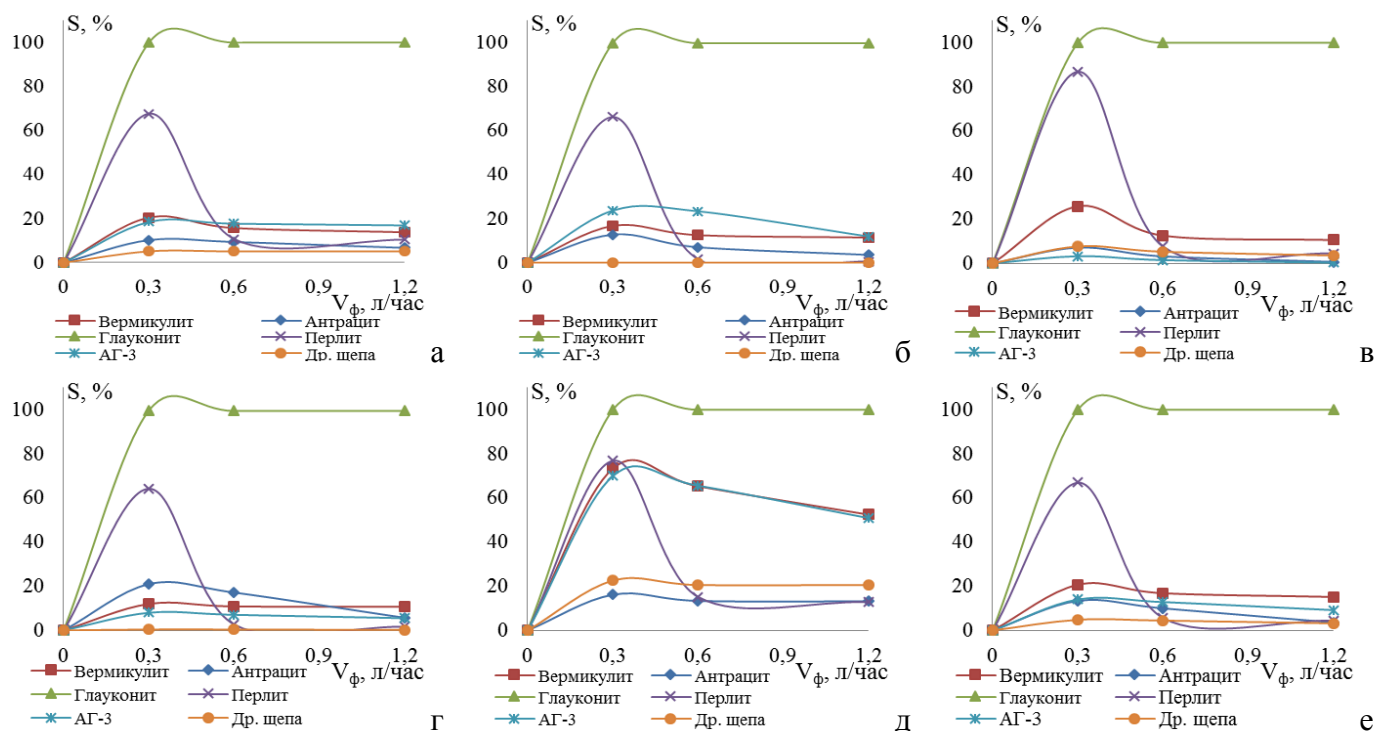


Рисунок 4 – Эффективность степени сорбции металлов природными сорбентами:  
а – кадмия; б – меди; в – железа; г – никеля; д – свинца; е – цинка

В реальных условиях в промышленных стоках содержатся сложные композиции металлов с высокими концентрациями, поэтому с целью максимального извлечения загрязнителей и удешевления технологий очистки стоков автором разработан композитный сорбент, включающий в свой состав такие моносорбенты, как глауконит, вспученный перлит и вспученный вермикулит в процентном соотношении 50:25:25 соответственно. Основанием для выбора материалов являются следующие аргументы: достаточно высокая сорбционная активность в статических и динамических условиях при низких значениях рН, низкая стоимость и доступность, а также дополнительным аргументом выбора композитного сорбента в качестве засыпки в сорбционно-габионный модуль является его пониженная кажущаяся (насыпная) плотность по сравнению с моносорбентами, входящими в его состав (Табл. 1).

Таблица 1 – Кажущаяся плотность сорбентов

Сорбент	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Сорбент	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>
Глауконит	1,121	Вспученный вермикулит	0,294
Вспученный перлит	0,253	Композитный сорбент	0,184

Благодаря своей кажущейся плотности композит будет занимать наибольший объем в фильтрующем модуле, что приведет к повышению фильтрующей способности, уменьшению расчетной массы загрузки в модуле и, соответственно, к удешевлению технологии очистки поверхностных стоков.

Исследованы закономерности сорбции катионов металлов композитным сорбентом в интервале низких (5–15 мг/л), средних и высоких (50–150 мг/л)

концентраций в статических условиях. Установлено, что с повышением концентрации модельного раствора возрастает статическая обменная ёмкость композитного сорбента. У композитного сорбента так же, как и у монсорбентов АГ-3, вспученного вермикулита, глауконита, наблюдается высокая сорбционная способность. При низких концентрациях адсорбируется от 94,5 до 99,4 % катионов из модельного раствора, при средних и высоких концентрациях – от 64,8 до 88,0 %.

Установлено, что влияние температуры на процесс сорбции металлов композитным сорбентом в статических условиях приводит к эффективной очистке модельного раствора от катионов цинка, железа и никеля, а статическая обменная ёмкость сорбента по катионам составляет 7,240; 2,080 и 0,019 мэкв/г соответственно.

Выявлено, что последовательность извлечения катионов исследуемым композитным сорбентом, определяемая величиной константы скорости реакции, имеет вид:  $Cd > Pb > Ni > Zn > Fe > Cu$  (Табл. 2). Полученные значения энергии активации процесса адсорбции катионов металлов из многокомпонентного раствора показывают, что данный процесс проходит по механизму физической адсорбции и лимитируется внешнедиффузионными процессами.

Таблица 2 – Показатели сорбции катионов металлов из раствора – аналога промышленных стоков композитным сорбентом

Показатели	Металлы					
	Cd <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	Ni <sup>2+</sup>	Pb <sup>2+</sup>	Zn <sup>2+</sup>
Константы скорости реакции при адсорбции катионов из многокомпонентного раствора, $\times 10^3$ , сут <sup>-1</sup>	129,0	12,0	18,4	51,0	83,0	27,0
Энергия активации адсорбции катионов из многокомпонентного раствора, кДж/моль	1,780	8,011	3,164	3,678	3,036	3,034

Установлено, что представленный автором композитный сорбент из-за эффекта эмерджентности позволяет извлекать из промышленных стоков в первую очередь наиболее опасные для окружающей среды компоненты. Константа скорости реакции адсорбции кадмия композитным сорбентом в 1,6 раза превышает показатели отдельных компонентов, входящих в состав композита.

Эффект эмерджентности достигается за счет оптимальной удельной поверхности системы, которая обеспечивается выбранным соотношением компонентов. Свободно насыпанные частицы (вспученный перлит) образуют каркас сорбента. В промежутках между частицами крупной фракции находится средняя фракция (вермикулит). Средние зерна при оптимальном количестве размещаются в так называемом «горле» пор, образованных крупными частицами, и препятствуют перетоку мелких частиц глауконита. Изменение указанного соотношения материалов в сторону увеличения или уменьшения приводит к изменению структуры композитного сорбента и ухудшает его технологические свойства.

Установлено, что использование глауконита, вспученного перлита и вспученного вермикулита в качестве фильтрующих материалов для очистки

сточных вод сопровождается некоторыми недостатками этих материалов: низкая эффективность очистки при использовании крупных частиц перлита; плоские частицы вермикулита образуют плотную «упаковку», снижающую скорость движения потока воды и вызывающую быструю коагуляцию; использование глауконита способствует накоплению тяжелых металлов и залповому их выбросу в концентрациях выше исходных.

Использование композитного сорбента исключает перечисленные выше недостатки, способствует повышению константы сорбции и оптимизирует эксплуатационные свойства.

Изучение сорбции катионов металлов композитным сорбентом в динамических условиях (Рис. 5) позволяет сделать вывод о том, что с увеличением скорости фильтрации (от 0,15 до 1,2 л/час) степень удаления

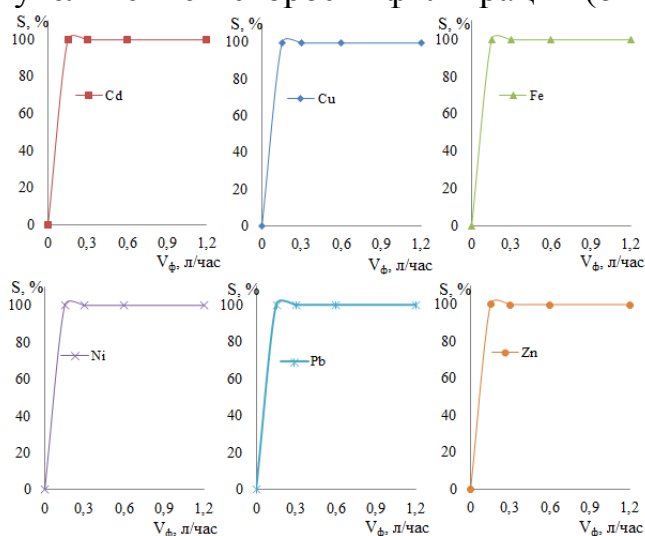


Рисунок 5 – Эффективность степени сорбции металлов композитным сорбентом

позволяет сделать вывод о сложности процессов, протекающих на их поверхности. Установлено, что, кроме физической адсорбции, происходит переход катионов с поверхности компонентов в раствор и замена их на катионы и анионы модельного раствора.

Математическим моделированием определена необходимая удельная поверхность композитного сорбента и его рабочая поверхность для оптимальной степени очистки поверхностного стока (Рис. 6). Варьируемым фактором являлась зависимость степени очистки  $Y$  от удельной поверхности  $X_1$  ( $0,53-18,17 \text{ м}^2/\text{г}$ ), концентрации катионов  $X_2$  (в диапазоне концентрации катионов от 2 до 405 мг/л) и скорости фильтрации  $X_3$  ( $0,15-0,6 \text{ л/час}$ ). Моделирование проводилось матричным способом, в результате которого получено уравнение 1.

Установлено, что степень очистки загрязненного поверхностного стока катионами металлов возрастает с увеличением удельной поверхности сорбента. Максимальная очистка предлагаемым композитом может достигаться при увеличении удельной поверхности сорбента до  $15-20 \text{ м}^2/\text{г}$ .

катионов металлов из модельного раствора не снижается. Для кадмия, никеля и свинца снижение максимально. Кроме того, анализ рисунков 4 и 5 свидетельствует о том, что использование композитного сорбента в очистке стоков при динамическом режиме повышает эффективность степени сорбции металлов до 84 %. В процессе сорбции металлов наблюдалось увеличение pH раствора с 1,38 до 7,53.

Анализ фазового состава компонентов, входящих в состав композита, до и после сорбции

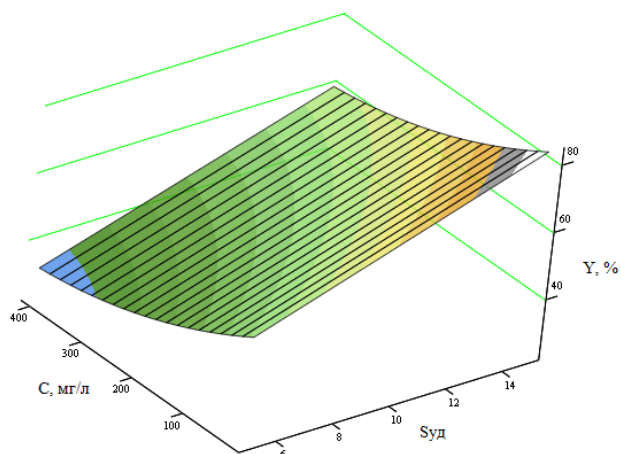


Рисунок 6 – Зависимость степени очистки стоков (%) от удельной поверхности ( $S_{уд}$ ) и концентрации катионов в растворе ( $F_0 = 1,48 < F_{табл} = 5,3$ )

$$S_{сорб. \%} = 10,74 + 13,26X_1 - 0,056X_2 + 60,38X_3 - 0,64X_1^2 + 0,0001X_2^2 - 76,04X_3^2 - 0,0003X_1X_2 + 0,96X_1X_3 - 0,068X_2X_3. \quad (1)$$

Свойства сорбентов и загрузки из них с учетом рассчитанной удельной поверхности и их кажущейся плотности представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Свойства сорбентов и загрузки из них

Сравнительная характеристика загрузки	
Объем сорбционного модуля, м <sup>3</sup> :	0,25
Масса загрузки (с учетом кажущейся плотности), кг:	
• глауконит	290
• вспученный перлит	63
• вспученный вермикулит	73
• композитный сорбент	46
Удельная поверхность сорбентов, м <sup>2</sup> /г	15
Рабочая поверхность сорбента, м <sup>2</sup> :	
• глауконит	$435 \cdot 10^4$
• вспученный перлит	$945 \cdot 10^3$
• вспученный вермикулит	$1095 \cdot 10^3$
• композитный сорбент	$69 \cdot 10^4$

Высокая адсорбционная способность композитного сорбента, обусловленная эффектом эмерджентности и механическим взаимодействием с сорбатом, позволяет использовать его в сорбционно-гэбзионных очистных сооружениях для повышения эффективности извлечения тяжелых металлов даже из сильнозагрязненных поверхностных стоков, а его минимальная кажущаяся плотность ( $0,184 \rho$ , г/см<sup>3</sup>) позволяет достичь удешевления технологий очистки стоков.

**Третье защищаемое положение:** *повышенная фитоэкстракция тяжелых металлов из поверхностных стоков и почв в зоне воздействия предприятий по добыче и переработке медных руд достигается за счет создания растительных биоценозов с коэффициентом биогеохимической активности макрофитов от 2490 до 10098 для системы поверхностный сток – растение и коэффициентом обогащения растений-биоаккумуляторов от 2,3 до 52,5 для системы поверхностный сток – почва – растение.*

Для обоснования фиторемедиационных сооружений, были изучены наиболее часто встречающиеся на Южном Урале, в Челябинской области макрофиты: аир обыкновенный, рогоз узколистный, сабельник болотный, рдест плавающий, кубышка желтая, рдест блестящий, рдест пронзеннолистный, рдест гребенчатый, уруть колосистая, роголистник темно-зеленый, кладофора сборная, хара обыкновенная и хара щетинистая.

В результате исследования основных закономерностей фитоэкстракции тяжелых металлов из водных растворов при заданном диапазоне рН установлено, что максимальное извлечение абсолютно всех металлов макрофитами наблюдается при рН равновесных растворов, близких к нейтральным (рН 4,2–7,2), с последующим снижением при рН 9,2. Следовательно, указанный интервал значений рН 4,2–7,2 является оптимальным для наиболее полного протекания процесса фитоэкстракции в гетерофазной системе водный раствор (имитант) – растение. Таким образом, в технологиях очистки сильноокислых и кислых сточных вод рекомендуется предусматривать нейтрализацию стоков и предварительную очистку.

Исследованные морфологические особенности макрофитов позволяют установить, что исследуемый диапазон рН водной среды не вызывает отмирания вегетативных органов исследуемых водных растений.

Изучение фитоэкстракции металлов макрофитами из водного раствора в зависимости от температуры среды позволило выявить, что при низких температурах степень извлечения металлов минимальна, а при повышенных – возрастает. Установлены термодинамические параметры наиболее благоприятных температур для поглощения – 9 и 16 °С.

Установлен суммарный коэффициент биогеохимической активности видов (БХА) по отношению к тяжелым металлам (Табл. 4).

Таблица 4 – Биогеохимическая активность растений

Растения	БХА (рН)				БХА (Т, °С)			
	2,5	4,2	7,2	9,2	2	9	16	23
Аир обыкновенный	0,68	329,9	2917,7	312,1	209,3	2137,8	5115,2	1586,5
Рогоз узколистный	1,45	553,0	2049,0	5791,9	15,6	4697,8	7238,0	5994,2
Сабельник болотный	2,91	589,1	4603,4	4102,4	5,95	4807,9	6695,9	3634,6
Рдест плавающий	10,02	881,2	2315,2	2381,0	45,4	3225,3	1037,1	2875,7
Кубышка желтая	2,64	700,5	4148,9	5231,8	10,7	3004,5	7160,6	6680,7
Рдест блестящий	1,4	125,4	135,6	125,2	14,8	14544,1	7479,7	3345,3
Рдест пронзеннолистный	1,89	2528,2	1953,9	6551,3	47,2	33776,2	30979,3	4951,2
Рдест гребенчатый	1,77	4648,0	3175,1	2786,6	6,8	6648,3	38766,3	5354,2
Уруть колосистая	2,4	6887,0	3484,8	2753,2	8,8	19151,2	26402,4	5183,6
Роголистник темно-зеленый	1,8	1033,7	1175,1	1034,3	9,8	448,2	962,2	235,8
Кладофора сборная	4,4	666,3	765,3	625,6	4,6	5560,4	9155,9	5088,1
Хара обыкновенная	2,7	380,5	990,4	4494,8	20,6	4292,9	5566,5	4179,6
Хара щетинистая	3,2	608,8	741,4	1422,4	16,4	3044,9	5573,6	4236,5

Наиболее интенсивным накоплением, по усредненным данным БХА, отличаются следующие виды: рдест пронзеннолистный, уруть колосистая, рдест гребенчатый, кубышка желтая, рогоз узколистный, рдест блестящий, далее

следуют кладофора сборная, хара обыкновенная. По накопительной способности металлов растения сабельник болотный, хара щетинистая, рдест плавающий и аир обыкновенный занимают промежуточное положение. Накопление тяжелых металлов в роголистнике темно-зеленом относительно низкое.

Выявлено, что рассматриваемые растения являются макроконцентраторами-накопителями, кроме исключительных случаев, когда растения аир обыкновенный, рогоз узколистный, рдест блестящий, рдест пронзеннолистный, рдест гребенчатый и роголистник темно-зеленый при рН 2,5 имеют значение БХА менее 2. Установлено, что наибольшая часть металлов после поглощения растениями скапливалась в листьях растений, что позволяет рекомендовать скашивание растений в фиторемедиационных сооружениях для их последующей утилизации и получения товарных продуктов из переработанного растительного сырья.

Моделирование оптимальных условий эффективной очистки поверхностных стоков от тяжелых металлов в биологическом пруду позволило определить необходимую массу растений, которая варьирует в пределах от 0,15 до 0,16 кг/м<sup>2</sup> (Рис. 7).

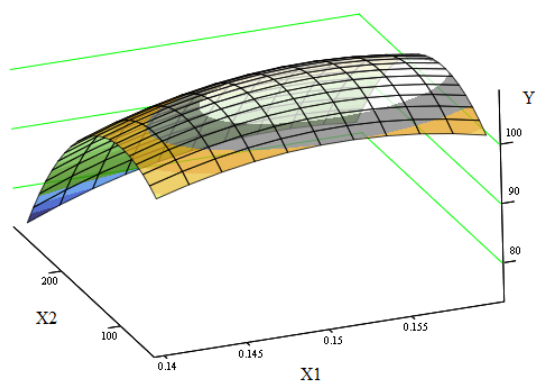


Рисунок 7 – Зависимость степени очистки стоков (%) от массы растений и концентрации катионов (33,8 до 273,6 мг/л) в растворе ( $F_0 = 2,33 < F_{\text{табл}} = 5,3$ ), при:

$$S_{\text{экстр.}} \% = -746,123 + 11073,53X_1 + 0,02X_2 + 2,94X_3 - 36804,4X_1^2 - 0,001X_2^2 - 0,21X_3^2 + 1,38X_1 X_2 - 0,76X_1 X_3$$

Для установления возможной фотосинтетической аэрации в фиторемедиационных сооружениях определено влияние тяжелых металлов на процесс фотосинтеза водных погруженных растений. Установлено, что добавление ионов меди в среду приводит к снижению количества выделенного кислорода на 32,5–48,7 % (рдест плавающий) и на 26,3–57,5 % (кубышка желтая) в сравнении с контролем. Ионы железа, алюминия, никеля и свинца в малой степени влияют на процесс фотосинтеза. Фотосинтетическая аэрация в биоинженерных сооружениях будет способствовать устранению запахов в сточных водах и их обесцвечиванию.

Выявлены закономерности выхода электролитов из клеток листьев водных погруженных растений для предотвращения процесса перехода тяжелых металлов в биоинженерные сооружения. Установлено, что различные металлы вызывали неоднозначные изменения проницаемости мембран. Так, увеличение температуры с 16 до 60 °С в присутствии ионов Cu, Cd, Zn и Pb повышало экзосмос электролитов в дистиллированную воду из высечек листьев рдеста плавающего, кубышки желтой, рдеста блестящего, рдеста пронзеннолистного, тогда как ионы Fe, Al, Ni лишь незначительно изменяли величину выхода электролитов.



Таким образом, все вышеперечисленные результаты исследований говорят о том, что высокая эффективность очистки металлосодержащих стоков в биоинженерных сооружениях по системе поверхностный сток – растение будет достигнута благодаря сообществу: рогоз узколистный – кубышка жёлтая – рдест пронзеннолистный – уруть колосистая – рдест гребенчатый – рдест блестящий – кладофора сборная – хара обыкновенная, усредненная БХА которого составляет от 2490 до 10098.

Для обоснования технологий очистки почв и поверхностных стоков также исследовались такие многолетние растения, как: боярышник обыкновенный, барбарис обыкновенный, бузина красная, шиповник майский, пырей ползучий, житняк гребенчатый, овсяница луговая и мятлик луговой. Рассматриваемые растения могут служить также и в качестве барьера для снижения скорости потока загрязненных поверхностных стоков.

В результате исследования закономерностей и механизмов фитоэкстракции тяжелых металлов многолетними растениями были выявлены среднесезонные концентрации тяжелых металлов в корнях и листе растений, а также в плодах кустарников, которые увеличивались к концу вегетационного периода. В течение вегетационного периода средние многолетние значения концентрации металлов варьировали в достаточно широких пределах.

Установлено, что у всех исследуемых травянистых растений металлы из корней транспортируются в листья.

Сравнительный анализ выявил, что листья барбариса обыкновенного и бузины красной в больших концентрациях аккумулируют металлы по сравнению с листьями боярышника обыкновенного и шиповника майского. Исследуемые травы пырей ползучий и овсяница луговая также проявляют значительную аккумуляционную способность к большинству металлов. Что касается меди, кадмия и цинка, то наибольшее поглощение этих металлов зафиксировано у житняка гребенчатого. Эта же тенденция проявляется и в накоплении тяжелых металлов плодами исследуемых кустарниковых растений. Выявлено, что накопление металлов в барбарисе обыкновенном и бузине красной выше, чем у боярышника обыкновенного и шиповника майского. В качестве показателя способности растений к накоплению поллютантов определен коэффициент обогащения (Табл. 5), который характеризует антропогенное накопление металлов, так как он в большинстве случаев больше 1.

Выявлена эффективность выноса тяжелых металлов из почвы в максимальной концентрации в осенний период, учитывающая их содержание в почве и вынос надземной биомассой, которая показывает, что высокая эффективность выноса характерна для Cd, Fe и Pb, умеренная – для Cu и Zn и ограниченная – для Ni. Поступлению Cu, Cd, Fe, Zn и Pb корень не оказывает значительного сопротивления, и исследуемые растения в этом случае ведут себя как биоаккумулятор этих элементов.

Таким образом, наиболее эффективными растениями-биоаккумуляторами могут выступать барбарис обыкновенный, бузина красная, пырей ползучий, житняк гребенчатый, овсяница луговая, которые можно отнести к

гипераккумуляторам и рекомендовать в качестве элемента технологии ремедиации как загрязненных почв, так и поверхностных стоков.

Таблица 5 – Коэффициенты обогащения растений тяжелыми металлами

Химический элемент	Коэффициент обогащения (Ср/Сп)							
	Боярышник обыкновенный	Барбарис обыкновенный	Бузина красная	Шиповник майский	Пырей ползучий	Житняк гребенчатый	Овсяница луговая	Мятлик луговой
Fe	0,5	1,1	1,0	0,5	13,9	2,8	26,4	1,3
Ni	0,7	2,3	2,3	1,3	1,9	1,3	1,0	0,6
Cu	2,1	3,8	3,9	2,5	1,3	1,1	0,7	0,5
Cd	0,4	1,4	10,3	0,3	0,7	19,6	1,7	1,5
Zn	1,8	4,0	5,2	2,8	0,7	0,7	0,7	0,6
Pb	0,5	52,5	7,2	2,0	2,4	18,2	6,6	1,3

**Четвертое защищаемое положение:** *необходимые экозащитные свойства грунтобетона, состоящего из медеплавильного отвального шлака АО «Карабашмедь», цемента и белой глины, достигаются применением математических моделей, позволяющих определить оптимальный состав композита (шлак : глина + цемент до 1:4) и высоту слоя (от 15 см), исключающие миграцию тяжелых металлов в окружающую среду за счет повышенной прочности и сниженной влагопроницаемости композита.*

Для снижения негативного влияния техногенных грунтов хвостохранилищ на окружающую среду за счет смыва загрязняющих веществ и фильтрования влаги в техногенный грунт путем воздействия на них атмосферных осадков, а также испарения с поверхности хвостохранилищ впервые разработан высокопрочный грунтобетон. В качестве сырьевых материалов грунтобетона были использованы цемент ЦЕМ II-32,5Н, медеплавильный шлак, находящийся в отвалах АО «Карабашмедь» и белая глина.

Для разработки оптимального состава предлагаемого грунтобетона использовали как математическое моделирование, так и лабораторные исследования. Для решения поставленной задачи использовался двухфакторный эксперимент, где варьируемыми факторами являлись количество цемента по отношению к глине и суммарное отношение цемента и глины к шлаку.

Анализ полученных данных включает в себя математическую обработку результатов исследования с целью получения значений коэффициентов полинома второй степени и зависимостей прочности композита в разные сроки твердения (Рис. 8–11).

Результатами математической обработки являются зависимости предела прочности композитов от соотношения Г:Ц и соотношения Ц:Ц+Г в виде уравнения регрессионной зависимости:

$$M(x, y) = b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot y + b_{11} \cdot x^2 + b_{12} \cdot x \cdot y + b_{22} \cdot y^2, \quad (2)$$

где  $b_0 \dots b_{22}$  – расчетные коэффициенты модели;  $x, y$  – значения варьируемых факторов.

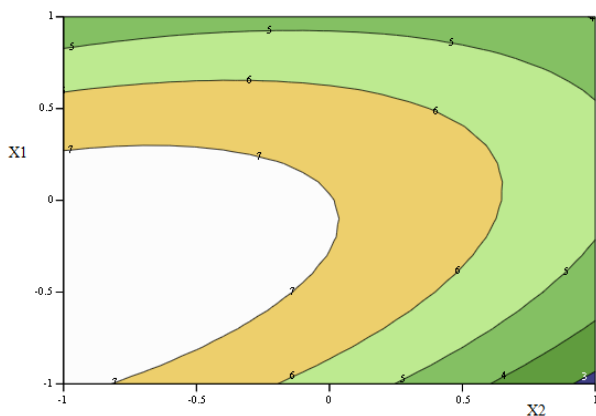


Рисунок 8 – Зависимость прочности композитов в возрасте 3 суток

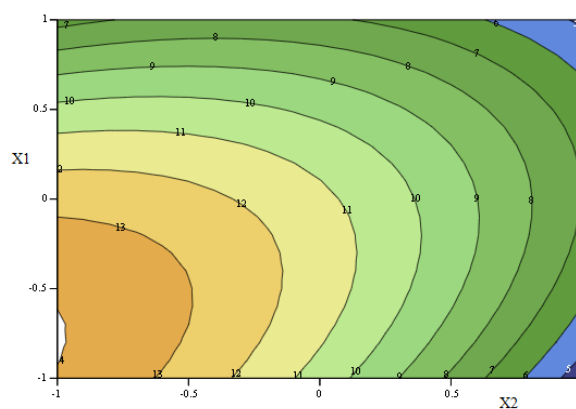


Рисунок 9 – Зависимость прочности композитов в возрасте 7 суток

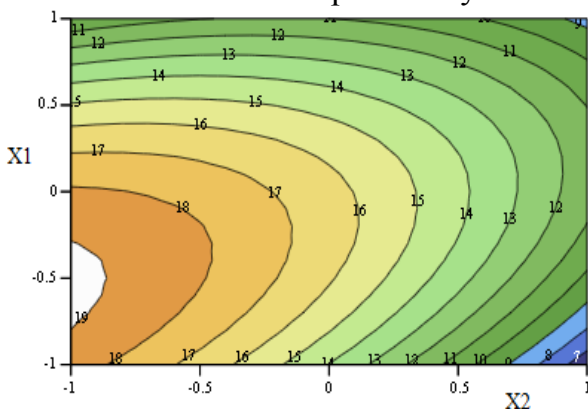


Рисунок 10 – Зависимость прочности композитов в возрасте 21 суток

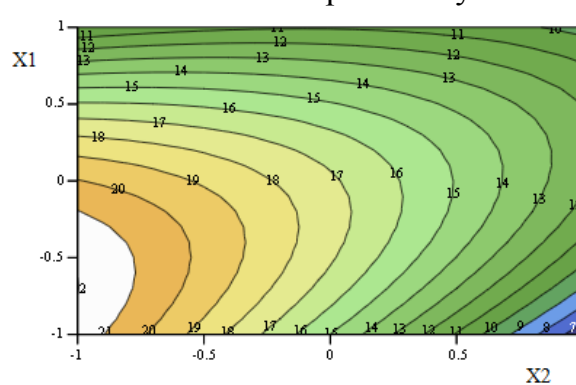


Рисунок 11 – Зависимость прочности композитов в возрасте 28 суток

В результате обработки получились следующие зависимости:

$M(x, y) = 7,022 + (-1,167) \cdot x + (-0,45) \cdot y + (-0,633) \cdot x^2 + 1,075 \cdot x \cdot y + (-1,883) \cdot y^2$  – предел прочности композитов на основе шлака, цемента и глины в возрасте 3 суток;

$M(x, y) = 11,22 + (-2,842) \cdot x + (-1,713) \cdot y + (-1,398) \cdot x^2 + 1,925 \cdot x \cdot y + (-2,363) \cdot y^2$  – предел прочности композитов на основе шлака, цемента и глины в возрасте 7 суток;

$M(x, y) = 16,33 + (-3,395) \cdot x + (-1,488) \cdot y + (-1,595) \cdot x^2 + 2,667 \cdot x \cdot y + (-3,845) \cdot y^2$  – предел прочности композитов на основе шлака, цемента и глины в возрасте 21 суток;

$M(x, y) = 17,16 + (-3,925) \cdot x + (-2,05) \cdot y + (-1,042) \cdot x^2 + 3,725 \cdot x \cdot y + (-4,22) \cdot y^2$  – предел прочности композитов на основе шлака, цемента и глины в возрасте 28 суток.

Полученные уравнения регрессионной зависимости позволяют сделать прогноз о прочности на сжатие композитов в различные сроки твердения на различных расходах сырьевых компонентов в исследуемом диапазоне. Коэффициент Фишера составил 3,65–3,95 и не превышает 4,3, что говорит о значимости полученных зависимостей.

При оценке степени капиллярного подсоса полученными композитами определено, что наименьшей высотой подъема воды по капиллярам и порам обладают составы с соотношением шлак : глина+цемент до 1:4, при этом соотношение глины и цемента в этой смеси должно быть 1:1,5 или 2:1.

Это объясняется наличием большой доли шлака, обладающего пористым строением и способного аккумулировать в себе воду, поступающую из окружающей среды, данная вода затем будет создавать благоприятные условия для дальнейшего набора прочности цементом, который, как было сказано выше, является основной активной составляющей структурной фазы данного вида композита. Для получения защитного слоя из полученного нами композита, способного сдерживать как выход грунтовых вод, так и ливневые и талые воды, необходимо укладывать его толщиной не менее 15 см.

В случае оценки капиллярного подсоса композитами на основе двухкомпонентных смесей: цемент + глина, выявлено, что наименьшей высотой капиллярного подсоса обладают составы с соотношением 2:1. Но данные составы к концу испытаний полностью «промокли» и, как следствие, не могут быть рекомендованы в качестве барьера для грунтовых, ливневых и талых вод в технологиях рекультивации техногенных намывных грунтов.

**Пятое защищаемое положение:** *разработанные комплекс схем и технологические решения с использованием композитов и растительных сообществ позволяют снизить техногенную нагрузку на биогеоценоз и ликвидировать накопленный ущерб в геотехнических системах с длительным воздействием сульфидсодержащих отходов горно-перерабатывающей промышленности с получением товарных продуктов из отработанного растительного сырья и сырья для закладочных смесей.*

Анализ патентных источников и литературных данных, посвященных проблемам охраны окружающей природной среды на территории медеперерабатывающих предприятий, свидетельствует о перспективности использования высокоэффективных энерго- и ресурсосберегающих экобезопасных технологий в восстановлении почв, водных ресурсов и атмосферного воздуха.

С учетом полученных нами результатов, свидетельствующих о значительной степени очистки поверхностных стоков, почв и, как следствие, атмосферного воздуха, предлагаемые технологии прошли полупромышленные испытания на территории Карабашской ГТС, согласно которым достигнуто снижение концентрации тяжелых металлов в поверхностных сточных водах на 75,0–97,5 %, в стоках водосборных территорий на 70,4–99,9 %, в почвах на 80–91,9 %, а рекультивация хвостохранилища позволяет добиться содержания тяжёлых металлов в Аргазинском водохранилище до ПДК<sub>рыб.хоз</sub> и снижения загрязняющих веществ в воздухе над «хвостами». Результаты исследований приняты в проекты ООО НПО «РОСГЕО» и ООО «ЮжУралНИИВХ».

**Технология очистки поверхностных сточных вод в фиторемедиационных сооружениях:** разработана эффективная конструкция биологического пруда для высокоэффективной очистки поверхностных стоков.

Технологическая система для очистки кислых стоков содержит последовательно расположенные от стока фильтрационную секцию, заполненную известняком с  $K_{\phi}=10-20$  м/сут, фильтрационный модуль, заполненный композитным сорбентом из смеси глауконита, вспученного перлита и вспученного вермикулита, заключенным в сетчатые коробчатые контейнеры, биопруд с растениями-макрофитами в виде комплекса гидатофитов, гидрофитов, гелофитов. В пространство биопруда заселяются рекомендованные нами растения, такие как рогоз узколистый, кубышка жёлтая, рдест пронзеннолистный, уруть колосистая, рдест гребенчатый, рдест блестящий, кладофора сборная и хара обыкновенная. Очистка от тяжелых металлов и иных загрязнений в холодное время года осуществляется фильтрующими секциями и харовыми водорослями – хара обыкновенная. Дно и стенки биопруда и фильтрационной секции выполнены из экранирующего слоя суглинков мощностью до 500 мм с  $K_{\phi}=0,005$  м/сут для предотвращения фильтрации воды в нижние слои почв и предотвращения контакта укореняющихся водных растений с техногенно-нарушенным грунтом. На дне пруда над слоем суглинка расположен слой из плодородного грунта в качестве субстрата для растений. Глубина пруда не менее 1,5–2 м. У противоположной от стока стенке биопруда выполнены дренаж и водоотвод.

В варианте для слабокислых стоков непосредственно у стока расположена фильтрационная секция, заполненная гравием с  $K_{\phi}=10-20$  м/сут, огороженная от биопруда барьером в виде стальных сеток.

Водоотвод как в первом, так и во втором вариантах может устраиваться как в верхней, так и в нижней части биопруда, что связано с рельефом местности.

Технологическая схема очистки стоков в фиторемедиационном сооружении представлена на рисунке 12.

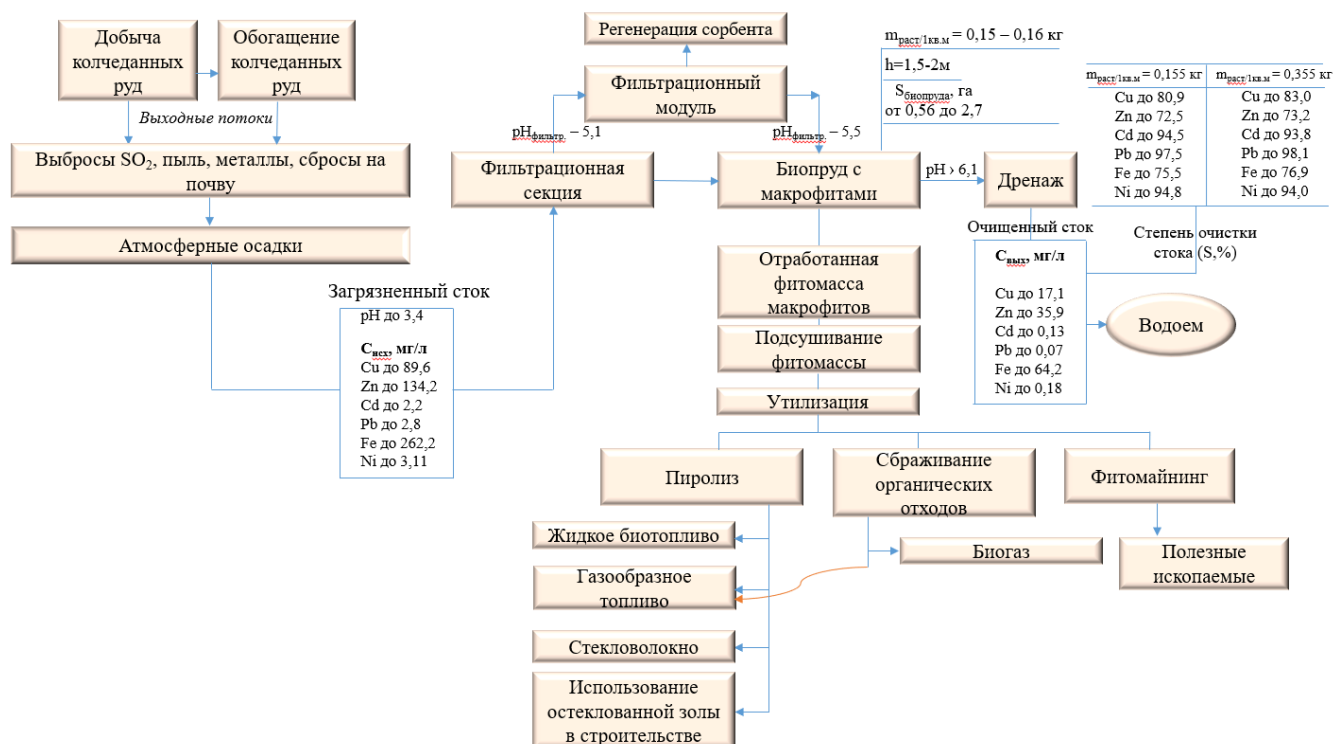


Рисунок 12 – Технологическая схема очистки стоков в фиторемедиационном сооружении

Результаты натуральных исследований указывают на достаточно высокие показатели качества очистки стоков в двух представленных вариантах с различной массой макрофитов на 1 м<sup>2</sup> биологического пруда. Однако в результате натурального эксперимента раскрыто *противоречие* между массой используемых для очистки стоков макрофитов в биологическом пруду и степенью очистки стоков, доказывающее, что увеличение массы растений на 1 м<sup>2</sup> биологического пруда не приводит к увеличению степени очистки самих стоков.

С учетом климатических условий Южного Урала предполагаемая длительность работы сооружений в году приравнивается к длительности формирования поверхностных стоков и составляет примерно 58 %.

**Комплексная технология ремедиации почв и атмосферных стоков:** разработано устройство и способ очистки атмосферных стоков и почв от тяжелых металлов, включающий в себя при необходимости два этапа: сорбционную (для очистки атмосферных стоков) и фитоочистку (для восстановления загрязненных почв).

Предложенная технология содержит последовательно расположенные от стока сорбционно-габионные модули с сорбционной загрузкой из композитного сорбента, состоящего из смеси глауконита, вспученного перлита и вспученного вермикулита, между которыми высаживаются растения-биоаккумуляторы (барбарис обыкновенный и бузина красная) и укладывается биополотно из смеси пырея ползучего, житняка гребенчатого и овсяницы луговой; экранирующий слой из глины с  $K_{\phi}=0,005$  м/сут для предотвращения фильтрации загрязненного стока в нижние слои почв; конечный сорбционно-габионный модуль, встроенный в противофильтрационное габионное сооружение из бутового камня с пропиткой из горячей песчано-битумной мастики для доочистки стоков перед выпуском в водоем через водослив. У основания габионного сооружения предусмотрен посев харовых водорослей (хара обыкновенная) для последующей доочистки в зимнее время года.

С учетом климатических условий Южного Урала предполагаемая длительность работы сооружений в году приравнивается к длительности формирования поверхностных стоков даже при нулевых температурах среды и составляет примерно 75 %.

Одним из этапов технологии является фитоочистка почв, загрязненных тяжелыми металлами, которая достигается за счет использования предложенных травосмесей из растений-биоаккумуляторов. В качестве биоаккумуляторов предлагается использовать такие растения, как пырей ползучий, житняк гребенчатый, овсяница луговая в биополотне. Предлагаемые растения способны концентрировать тяжелые металлы корнями и надземными органами.

Выбор травосмеси, согласно проведенным автором исследованиям, определяется доминирующим металлом, загрязняющим почву (Табл. 6). Соотношение трав в травосмеси – 1:1. Для комплексного загрязнения почв исследуемыми металлами предлагается следующая травосмесь: житняк гребенчатый – пырей ползучий – овсяница луговая в равном соотношении.

Этап фиторемедиации загрязненных почв предусматривает следующие операции: подготовительные, земляные и планировочные работы; подготовку биополотна, представляющего собой многослойную, полностью биологически разлагающуюся основу из прессованной соломы, между слоями которой уложены семена предлагаемых травосмесей многолетних трав. Травосмесь подбирается исходя из условий загрязнения по доминирующему металлу. Почва выравнивается и рыхлится с использованием культиваторов до образования разрыхленного слоя мощностью от 20 до 30 см. На подготовленную почву укладывается заранее подготовленное биополотно с травосмесью (норма высева – 20–40 гр. семян/1м<sup>2</sup> биополотна). Первое время, при начальном развитии

Таблица 6 – Выбор травосмеси по отношению к доминирующим металлам

Доминирующий металл	Травосмесь
Fe	Овсяница луговая – Пырей ползучий
Zn, Cd, Pb	Житняк гребенчатый – Овсяница луговая
Cu, Ni	Пырей ползучий – Житняк гребенчатый

растений, биополотно выполняет все защитные функции, предотвращая эрозионные процессы. В течение последующих 2–3 лет образуется равномерный травостой с обильной корневой системой, проникающей глубоко в почву, который связывает грунт и образует дернину. При этом предлагаемое биополотно полностью усваивается в

почве. Образующий дерновой покров обладает высокой механической прочностью, кроме того, обладает влагоудерживающими свойствами, повышается устойчивость склонов и откосов к эрозии. Крепление биополотна производится деревянными кольшками 2–4 шт/м<sup>2</sup> (длиной 20 см, толщиной 3 см, конической формы).

Предлагаемая технология успешно прошла полупромышленные испытания на территории Карабашской ГТС, в непосредственной близости от горно-перерабатывающего предприятия. На рисунке 13 представлена технологическая схема комплексной ремедиации почв и атмосферных стоков от тяжелых металлов.

С учетом климатических условий Южного Урала предполагаемая продолжительность фиторемедиации почв в году составляет примерно от 50 до 58 %.

**Технология рекультивации хвостохранилищ с использованием грунтобетона и биополотна:** предлагаемая нами технология может быть реализована следующим образом: на поверхность хвостохранилища, содержащего отходы обогащения, укладывается экранирующий слой грунтобетона ( $h = 15$  см) из композитного материала, состоящего из отработанного шлака, смеси цемента и глины в соотношении 1:4 соответственно. При этом соотношение глины и цемента в этой смеси должно быть 1:1,5. Данный слой устраняет непосредственный контакт водонасыщенных хвостов с экраном, который обрывает капиллярную кайму, вследствие чего исключает восходящую миграцию вредных веществ в вышележащие слои и предотвращает инфильтрацию атмосферных осадков в нижние слои хвостов. Технологическая схема рекультивации представлена на рисунке 14.

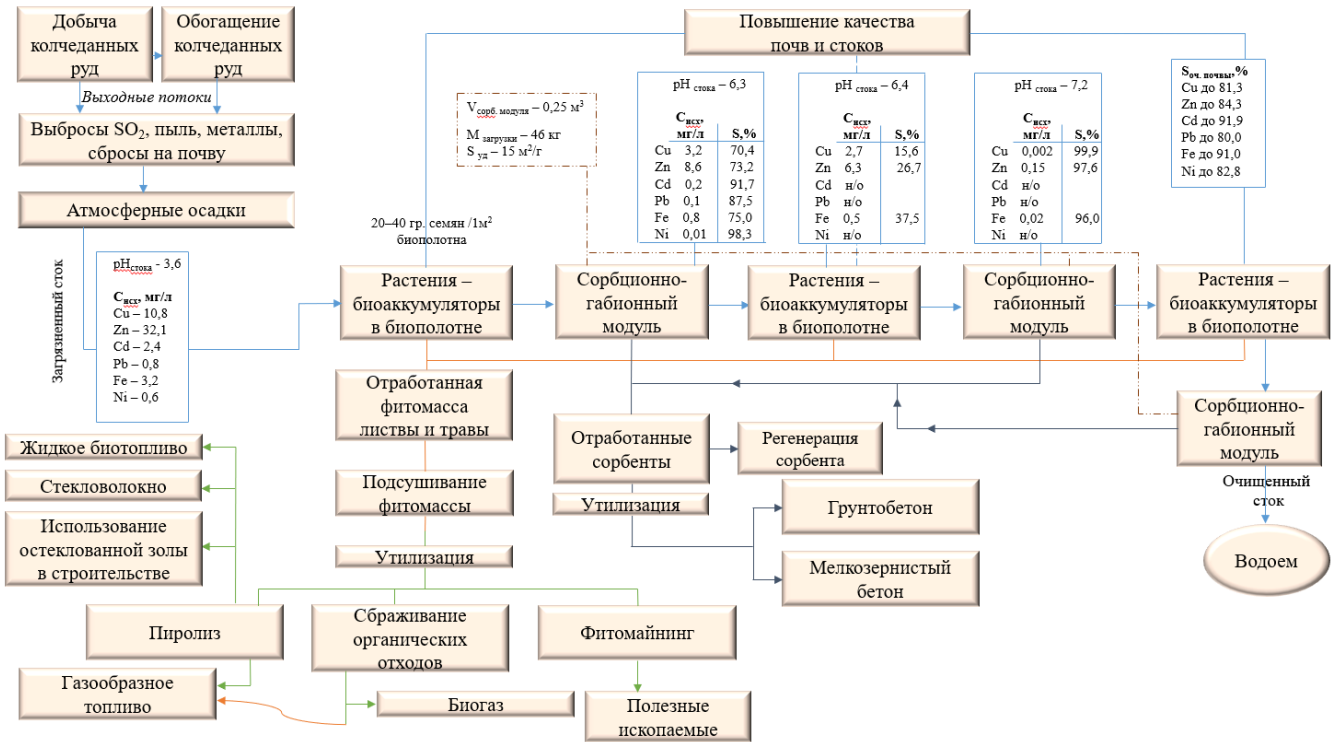


Рисунок 13 – Технологическая схема комплексной ремедиации почв и атмосферных стоков от тяжелых металлов

На экранирующий слой для предотвращения коррозионных процессов в грунтобетоне отсыпают слой суглинков высотой до 300 мм, на который размещается слой почвенной массы, состоящей из чернозема, высота которого составляет до 0,5 метра. Высота плодородного слоя определяется глубиной проникновения корневой системы растений-биоаккумуляторов. На почвенный слой укладывается биополотно с предлагаемыми травосмесями согласно таблице 6. Растения скашиваются и утилизируются по мере необходимости.

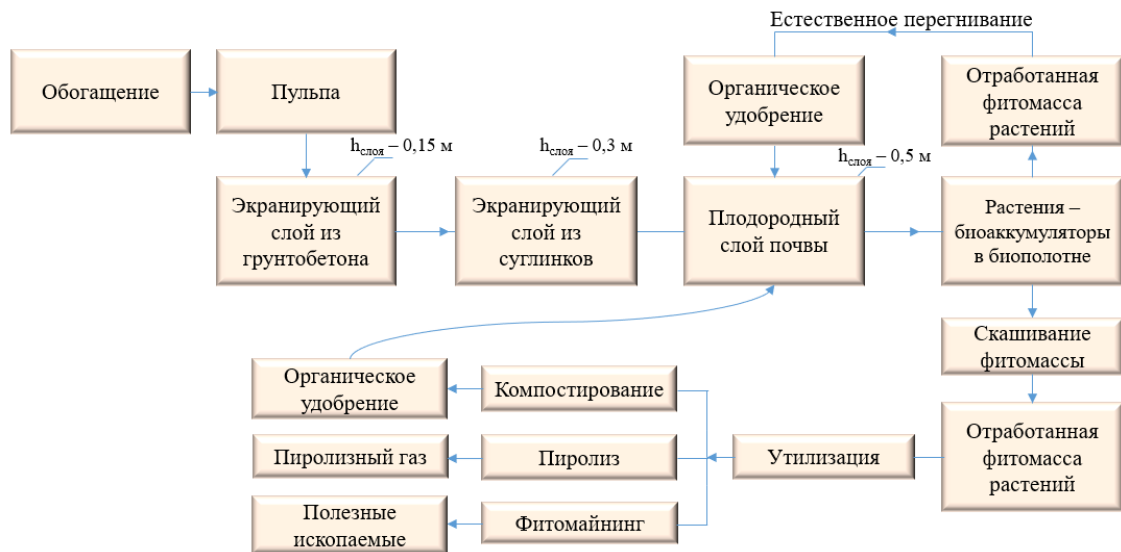


Рисунок 14 – Технологическая схема рекультивации хвостохранилищ

Предложенная технология рекультивации техногенных грунтов с использованием биополотна и экранирующих слоев из грунтобетона способствует



прекращению загрязнения поверхностных и грунтовых вод, почв, а также улучшению качества атмосферного воздуха.

После использования в предложенных технологиях биомасса растений утилизируется путем сжигания в пиролизных печах на промышленных предприятиях, подвергается сбраживанию, фитомайнингу и компостированию. Предлагаемый сорбент может подвергаться регенерации с помощью растений-биоаккумуляторов, которые высаживаются на сорбционно-габионный модуль. Это обстоятельство характеризуется тем, что основной составляющей композита является глауконит, который, по данным ООО «Глауконит», следует также рассматривать как многофакторное удобрение для растений. Дополнительным способом утилизации сорбента может являться его использование в качестве сырья для закладочных смесей (грунтобетона и мелкозернистого бетона).

На основании полученных результатов разработана комплексная замкнутая технологическая схема ликвидации прошлого экологического ущерба (Рис. 15), способствующая достижению максимального устранения негативного влияния медеперерабатывающих предприятий на здоровье людей и окружающую среду в целом.

Реализация технологии ликвидации накопленного ущерба может сопутствовать повышению уровня комфортности проживания населения за счет ликвидации загрязненных территорий; сохранению водоисточников; снижению заболеваемости населения по причине потребления некачественной воды и загрязненных продуктов; улучшению качества атмосферного воздуха, почв и водных объектов; увеличению рекреационных возможностей.



Рисунок 15 – Комплексная технологическая схема ликвидации накопленного ущерба

Рассчитанный экономический эффект от водоохраных мероприятий, направленных на ликвидацию старых загрязнителей на территории Карабашской

геотехнической системы составляет 367,84 млн руб. при экономической эффективности капитальных вложений в водоохранные мероприятия – 1,5 года.

**Шестое защищаемое положение:** *аналитическая методика, разработанная на основе использования адаптированного инструментария теории нечетких множеств, расширяет возможности анализа увеличением числа релевантных природных, техногенных и технологических показателей и позволяет выполнять интегральную оценку потенциальной эффективности предлагаемых технологий восстановления окружающей среды и ликвидации накопленного ущерба в геотехнических системах; прогнозирование результатов различных технологических решений.*

Разработанная аналитическая методика выполняет две основные функции: сравнительная оценка потенциальной эффективности разработанных технологий восстановления окружающей среды для различных геотехнических систем и прогнозирование результатов воздействия комплекса технологических параметров для всех разработанных технологий на эффективность использования этих технологий.

При создании технологий очистки поверхностных стоков, ремедиации почв, рекультивации хвостохранилищ и управления их технологическими параметрами используется достаточно разнородная и зачастую нечеткая информация. Это значения суммы металлов в стоке, количества осадков на исследуемых территориях, массы растений-биоаккумуляторов, коэффициентов биогеохимической активности видов и другие. Нечеткость вызывается как природными явлениями (количеством осадков), так и загрязненностью территорий геотехнических систем (суммой металлов в стоке, почве). Технологические параметры, такие как высота столба воды, площадь биопруда и другие, также не являются четкими и изменяются в определенном диапазоне. Наличие проблемы нечетких значений дает основу для использования в разработанных технологиях математического аппарата теории нечетких множеств.

Рассмотрим возможности адаптации приложений теории нечетких множеств для решения поставленных в диссертации задач.

Определение подпрямого образа нечеткого множества. Применительно к задачам настоящего исследования постановка данной задачи может быть представлена следующим образом: а) имеется набор неких объектов (водосборные территории ГТС), обладающих б) комплексом определенных признаков, и для оценки этих объектов задана в) группа соответствующих критериев (критериальный набор признаков). Результатом решения является выявление объекта, который по комплексу свойств в наибольшей степени соответствует критериальному набору.

Выражение (3) представляет решение поставленной задачи в матричном виде:

$$(p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n) \blacktriangleleft \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1j} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2j} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & & \dots & & \dots \\ r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{ij} & \dots & r_{im} \\ \dots & \dots & & \dots & & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nj} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} = (q_1, q_2, \dots, q_j, \dots, q_m), \quad (3)$$

где  $p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n$  – критериальный набор, включающий нечеткие значения технологических параметров;  $r_{11} \dots r_{nm}$  – элементы матрицы – нечеткие значения признаков исследуемых ГТС;  $q_1, q_2, \dots, q_m$  – степени соответствия исследуемых ГТС критериальному набору технологических параметров;  $n$  – число технологических параметров  $x$ ;  $m$  – число объектов (ГТС).

Содержание операции  $\blacktriangleleft$  становится понятным из записи решения выражения (3) в координатной форме:

$$\min ((p_1 \blacksquare r_{11}); (p_2 \blacksquare r_{21}); \dots (p_i \blacksquare r_{j1}); \dots (p_n \blacksquare r_{n1})) = q_1$$

.....

$$\min ((p_1 \blacksquare r_{1m}); (p_2 \blacksquare r_{2m}); \dots (p_i \blacksquare r_{jm}); \dots (p_n \blacksquare r_{nm})) = q_m.$$

Так называемая операция срезки ( $\blacksquare$ ), может быть представлена следующим образом:

$$p \blacksquare r = \begin{cases} 1 & \text{при } p \leq r \\ r & \text{при } p > r \end{cases} \quad (5)$$

По результатам расчета по формулам (4) получаем решение в виде множества:

$$B = \{(y_1 | q_1); (y_2 | q_2); \dots (y_j | q_j); \dots (y_m | q_m)\} \quad (6)$$

Множество  $B$  позволяет оценить, какой из рассмотренных объектов  $y$  по комплексу свойств в большей степени соответствует заданному критериальному набору технологических параметров. Чем ближе значение  $q$  к единице, тем больше степень соответствия. Показатель  $q$  рассматривается нами как интегральный показатель эффективности применения предлагаемых технологий.

На основе разработанного алгоритма была выполнена оценка потенциальной эффективности предлагаемых технологий на исследуемых ГТС. В таблице 7 приведены исходные данные для оценки потенциальной эффективности применительно к технологии 1 – «Очистка поверхностных стоков в биоремедиационных сооружениях» и трансформированные в интервал  $[0;1]$  значения этих показателей в соответствии с правилами теории нечетких множеств.

С использованием вышеприведённых выражений (3) – (6) была выполнена оценка потенциальной эффективности всех разработанных технологий (Табл. 8).

В соответствии с логикой оценки эффективности технологий положительное влияние на степень очистки стоков, почв оказывают минимальные значения выбранных признаков. Однако, если все значения признаков критериального набора будут равны нулю, то в соответствии с особенностями выбранного математического аппарата все выходные интегральные показатели будут равны единице, и дифференцировать объекты не удастся. Исходя из этого,

критериальный набор имеет не минимальные, а максимальные значения, но степень соответствия выходных интегральных показателей критериальному набору признаков следует оценивать не по близости к единице, а по близости к нулю. Таким образом, чем меньше итоговый интегральный показатель  $q$ , тем в большей степени объект соответствует предъявляемому набору требований по комплексу свойств.

Таблица 7 – Объекты оценки и их показатели  
(показатели / показатели, трансформированные в интервал [0;1])

Объекты оценки – исследуемые ГТС:					
Наименование показателя	№ 1 Карабашская	№ 2 Медногорская	№ 3 Сибайская	№ 4 Учалинская	№ 5 Бурибайская
Максимальная сумма металлов в стоке, мг/л	960,37 0,96	338,58 0,34	662,37 0,66	447,65 0,45	439,40 0,44
Количество осадков за апрель–октябрь (max.), мм	355,68 0,85	280,08 0,60	290,16 0,63	386,88 0,96	280,8 0,60
Количество осадков за ноябрь–март (max.), мм	191,52 0,64	150,72 0,50	156,24 0,52	208,32 0,69	151,2 0,50
Площадь активно-загрязненной водосборной территории, га	105,3 0,96	68,6 0,62	56,8 0,52	20,1 0,18	31,8 0,29
Постоянный коэффициент стока	0,4 0,80	0,2 0,40	0,25 0,50	0,2 0,40	0,3 0,60
Расчетная площадь требуемого биопруда, га	2,7 0,96	1,39 0,34	1,19 0,66	0,56 0,45	0,64 0,44

В соответствии с условной интегральной оценкой эффективности комплекса технологий очистки поверхностных стоков и почв территории исследуемых геотехнических систем можно расположить в следующий ряд (по мере снижения потенциала эффективности): Бурибайская ГТС → Учалинская ГТС → Медногорская ГТС → Сибайская ГТС → Карабашская ГТС.

Эффективным средством прогнозирования возможных последствий применения различных сочетаний технологических параметров, по нашему мнению, может быть использование другого приложения теории нечетких множеств – нечетких моделей вывода.

Алгоритм такого прогнозирования включает задание нечеткими числами технологических параметров, каждый из которых имеет различную интенсивность. Нечеткие модели вывода дают возможность на основе принятой технологической концепции или мнения экспертов получить результаты воздействия этого набора технологических параметров.

На основе алгоритма реализации нечетких моделей вывода было выполнено прогнозирование результатов воздействия комплекса технологических факторов (показателей) разработанных технологий на относительную величину выходных полезных эффектов этих технологий. Технологические факторы и результаты

прогнозирования их влияния на выходные полезные эффекты для технологии 1 – «Очистка поверхностных стоков в биоремедиационных сооружениях» приведены в таблице 9.

Таблица 8 – Условная интегральная оценка эффективности комплекса технологий на территориях исследуемых геотехнических систем

Наименование показателя (признака)	Объекты оценки – исследуемые ГТС:				
	Карабашская	Медногорская	Сибайская	Учалинская	Бурибайская
<i>Технология 1 – «Очистка поверхностных стоков в биоремедиационных сооружениях»</i>					
Потенциал эффективности применения технологии $q$	0,64	0,34	0,50	0,18	0,29
Место в ряду потенциалов эффективности	5	3	4	1	2
<i>Технология 2 – «Комплексная ремедиация почв и поверхностных стоков»</i>					
Потенциал эффективности применения технологии $q$	0,64	0,34	0,25	0,18	0,09
Место в ряду потенциалов эффективности	5	4	3	2	1
<i>Технология 3 – «Технология рекультивации хвостохранилищ»</i>					
Потенциал эффективности применения технологии $q$	0,60	0,40	0,42	0,40	0,12
Место в ряду потенциалов эффективности	5	2–3	4	2–3	1
Сумма потенциалов эффективности применения технологий $\sum q_j$	1,88	1,08	1,17	0,76	0,50
Сумма мест в рядах потенциалов эффективности	15	9,5	11	5,5	4
Итоговое место в ряду по мере снижения потенциала эффективности применения комплекса разработанных технологий	5	3	4	2	1

Таблица 9 – Прогнозирование результатов воздействия комплекса технологических факторов на относительную величину выходных полезных эффектов

Технологические факторы	Значение факторов	Выходные параметры и полезные эффекты	Значение параметров
Масса растений	1,0	Степень очистки стока	1,0
Высота столба воды в биопруду	0,7	Возможность использования водосборных территорий в качестве рекреационных зон	0,8
Коэффициент биогеохимической активности растений	1,0	Степень пригодности очищенного стока для вторичного использования	0,7
Степень предварительной очистки стока	0,0	Степень пригодности биосырья (выход биосырья)	0,5

Интерпретируя полученные результаты для технологии № 1, можно прогнозировать, что заданный комплекс технологических факторов в наибольшей степени окажет влияние на степень очистки стоков. В несколько меньшей степени

комплекс окажет влияние на возможности использования нарушенных территорий в качестве рекреационных зон и на степень пригодности очищенных стоков для повторного использования. В наименьшей степени этот набор технологических факторов повлияет на выход биосырья. Аналогичным образом можно прогнозировать влияние набора технологических факторов и для других технологий.

По нашему мнению, практическая значимость предложенного аналитического инструмента заключается в том, что его использование позволяет оценить последствия воздействия изменения не отдельных технологических факторов, а их набора (комплекса). В результате такого подхода появляется возможность аналитического прогнозирования показателей и тенденций их изменения для предлагаемых технологий при использовании любой совокупности технологических факторов.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой дано решение крупной актуальной научно-практической проблемы, связанной с теоретическим обоснованием и разработкой новых высокоэффективных технологических решений обеспечивающих инженерную защиту окружающей среды и имеющих важное народно-хозяйственное значение при эксплуатации, консервации и ликвидации горно-перерабатывающих предприятий.

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

1. Анализ геоэкологических последствий добычи и переработки медноколчеданных руд в Южно-Уральском промышленном регионе позволил оценить степень загрязненности почв и водных экосистем.

Содержание тяжелых металлов в почвах на территориях исследуемых геотехнических систем как с «полным», так и с «редуцированным» технологическими циклами достигает 12–20 см и может варьировать в достаточно широких пределах. Максимальная концентрация тяжелых металлов отмечается в верхних частях гумусово-аккумулятивных горизонтов и варьирует в пределах от 4,7 (Cd) до 1540 (Zn) мг/кг на территориях с «редуцированным» технологическим циклом, и от 5,7 (Cd) до 5007 (Cu) мг/кг – на территориях с «полным» технологическим циклом. Импактная зона загрязнения почв зафиксирована на расстоянии от 0 до 4 км от источника эмиссии для территорий с «редуцированным» технологическим циклом и до 20 км – с «полным» технологическим циклом за счет пылевой нагрузки при пирометаллургическом переделе концентратов.

Состояние водных объектов на исследуемых территориях характеризуется высоким уровнем загрязнения тяжелыми металлами с многократным превышением ПДК вследствие образования сульфатных вод различной кислотности с высоким содержанием железа, марганца и других химических элементов за счет окисления сульфидов, содержащихся в отходах.

Приоритетными технологическими мерами, направленными на повышение экологической безопасности горнодобывающего и горно-перерабатывающего производства и восстановление экосистем, являются разработка и внедрение энерго- и ресурсосберегающих технологий повышения экологической безопасности обследуемых территорий.

2. Впервые получен композитный сорбент из алюмосиликата (глауконита), гидрослюды (вспученного вермикулита), вулканического стекла (вспученного перлита), позволяющий интенсифицировать процесс и обеспечить высокую степень очистки поверхностных сточных вод (атмосферных стоков) с водосборной территории. Изучены закономерности сорбции катионов металлов композитным сорбентом в статических и динамических условиях, выявлены константы скорости реакции и энергия активации при адсорбции катионов из многокомпонентных растворов. Установлено, что композитный сорбент из-за эффекта эмерджентности позволяет извлекать из загрязненных стоков в первую очередь наиболее опасные для окружающей среды компоненты, а константа скорости реакции адсорбции кадмия композитным сорбентом в 1,6 раза превышает показатели моносорбентов, входящих в состав композита. Минимальная кажущаяся плотность композита ( $0,184 \rho$ , г/см<sup>3</sup>) и полученный математической моделью предел его удельной поверхности от 15–20 м<sup>2</sup>/г позволяют достичь удешевления технологий очистки стоков с использованием композита в сорбционно-габионных очистных сооружениях.

3. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность использования консорциума подобранных макрофитов для высокоэффективной очистки поверхностных стоков (атмосферных осадков и подотвальных вод). Изучены закономерности фитоэкстракции металлов из водного раствора в зависимости от pH и температуры среды и способность макрофитов к накоплению тяжелых металлов, определена биогеохимическая активность видов при различных pH и температурах. Установлено, что максимальная очистка стоков за счет использования консорциума макрофитов *Typha angustifolia*, *N. luteum* (L.), *Potamogeton lucens* L., *Potamogeton perfoliatus* L., *Potamogeton pectinatus* L., *Myriophyllum spicatum* L., *Cladophora glomerata* и *Chara vulgaris* предполагается при массе растений в фиторемедиационных очистных сооружениях от 0,15 до 0,16 кг/м<sup>2</sup>.

4. Установлено, что использование многолетних трав и кустарниковых растений способствует очистке загрязненных почв и стоков. Определены коэффициенты обогащения растений тяжелыми металлами (от 2,3 до 52,5), интенсивность транспирации исследуемых растений в процессе фитоэкстракции. Экспериментально доказано, что растения *Berberis vulgaris*, *Sambucus racemose*, *Elytrigia repens*, *Agropyron cristatum* и *Festuca pratensis* можно отнести к гипераккумуляторам и благодаря этому рекомендовать их к использованию в технологиях ремедиации почв и стоков.

5. Разработаны защитные технологические решения в виде способов и устройств фиторемедиационных и сорбционно-габионных сооружений с использованием макрофитов, композитных сорбентов, кустарниковых растений и

биополотна с многолетними травянистыми растениями для реализации очистки поверхностных стоков и почв от тяжелых металлов. Устройства относятся к технике высокоэффективной очистки поверхностных стоков (подотвальных, дождевых и талых вод) и почв на территориях геотехнических систем Южного Урала.

6. Разработана высокоэффективная технология рекультивации хвостохранилищ с применением биополотна и экранирующего слоя из грунтобетона на основе смеси медеплавильного шлака, цемента и глины. Впервые в качестве высокопрочного грунтобетона предложена композиция, состоящая из смеси медеплавильный шлак – цемент + глина в соотношении 1:4, при этом соотношение глины и цемента в этой композиции должно быть 1:1,5 или 2:1. Данная композиция способна образовывать бетон с высокой водостойкостью и прочностью. Выявлено, что добавка в состав грунтобетона шлака повышает его прочность. Установлено, что грунтобетон предотвращает инфильтрацию атмосферных осадков в нижние слои хвостов, а биополотно выполняет все защитные функции, предотвращая эрозионные процессы.

7. Дана эколого-экономическая оценка защитных технологических решений. Эколого-экономический эффект в базисных ценах от внедрения технологии очистки поверхностных стоков с помощью фиторемедиационных очистных сооружений составил 22 273,27 руб. и 52,4 % (с учетом Индекса удорожания – 133 194,15 руб.); от внедрения комплексной технологии ремедиации с использованием сорбционно-габионных очистных сооружений, кустарниковых растений и биополотна составил 11900,52 руб. и 19,9 % (71 165,11 руб.). Технология рекультивации техногенных грунтов (хвостохранилищ) дает нам экономический эффект в размере 16789,84 руб. (100 403,24 руб.), что в процентном соотношении эквивалентно 39,6 %.

8. Разработанные аналитическая методика оценки эффективности предлагаемых технологий на основе теории нечетких множеств и алгоритм оценки сочетаний ключевых показателей позволяют выполнять многокритериальную оценку геотехнических систем с позиций эффективности применения разработанных технологий и аналитически прогнозировать результаты применения данных технологий при различных сочетаниях релевантных технологических параметров.

9. Разработана комплексная принципиальная технологическая схема ликвидации накопленного ущерба с получением высококачественной продукции за счет переработки отработанных материалов.

Основными социальными результатами реализации энерго- и ресурсосберегающих технологий повышения экологической безопасности являются: повышение уровня комфортности проживания населения за счет ликвидации загрязненных территорий; сохранение водоисточников; снижение заболеваемости населения по причине потребления некачественной воды и загрязненных продуктов; улучшение качества атмосферного воздуха, почв и водных объектов; увеличение рекреационных возможностей.



**ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ  
В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:**

*Монография*

1. Тимофеева, С.С. Инновационные фитотехнологии реабилитации загрязненных территорий горными предприятиями на Южном Урале: монография // С.С. Тимофеева, **Д.В. Ульрих**. – Новосибирск: Гео, 2018. – 192 с. + [16] с. цв. вкл.

*Публикации в периодических журналах, рекомендованных ВАК РФ*

2. **Ульрих, Д.В.** Поглощение катионов меди и цинка черноземом обыкновенным / Д.В. Ульрих, С.Е. Денисов // Сорбционные и хроматографические процессы. – Т 9. – 2009. – № 5. – С. 722–725.

3. **Ульрих, Д.В.** Оценка состояния водосбора и поверхностного стока на территориях электрометаллургических предприятий города Челябинска / Д.В. Ульрих // Экология урбанизированных территорий. – 2009. – № 3. – С. 44–46.

4. **Ульрих, Д.В.** Химические и биохимические предпосылки технологии ремедиации водосборных территорий / Д.В. Ульрих, С.Е. Денисов // Экология урбанизированных территорий. – 2011. – № 2. – С. 62–64.

5. **Ульрих, Д.В.** Материалы и технологические решения для реабилитационных сооружений / Д.В. Ульрих, С.Е. Денисов // Вестник ЮУрГУ. Серия Строительство и архитектура. – 2012. – № 17(266). – С. 36–41.

6. **Ульрих, Д.В.** Геологическая характеристика Карабашского горнорудного района в условиях техногенного воздействия / Д.В. Ульрих, С.Е. Денисов, Г.О. Жбанков, С.М. Мерцалов // Проблемы региональной экологии. – 2012. – № 2. – С. 47–50.

7. **Ульрих, Д.В.** Современное экологическое состояние водоисточников Карабашского горнопромышленного узла / Д.В. Ульрих, Ю.А. Дженис, С.Е. Денисов, Г.О. Жбанков // Вода: химия и экология. – 2013. – № 6. – С. 104–106.

8. **Ульрих, Д.В.** Возможности использования листостебельных мхов в очистке сточных вод / Д.В. Ульрих, М.Н. Брюхов, С.С. Тимофеева // Вестник ИрГТУ. Серия Науки о земле. – 2013. – № 12. – С. 136–139.

9. **Ульрих, Д.В.** Листостебельные мхи в ремедиации ливневых вод с территории промышленных предприятий / Д.В. Ульрих, С.С. Тимофеева, М.Н. Брюхов // Известия Иркутского государственного университета. Серия биология, экология. – Т. 6. – 2013. – № 3. – С. 78–81.

10. **Ульрих, Д.В.** Природные сорбенты в технологиях ремедиации / Д.В. Ульрих, М.Н. Брюхов, Г.О. Жбанков, С.С. Тимофеева, С.Е. Денисов // Вода: химия и экология. – 2014. – № 3. – С. 96–100.

11. **Ульрих, Д.В.** Современное состояние хвостохранилища в г. Карабаш и его влияние на техногенез прилегающей территории / Д.В. Ульрих, С.С. Тимофеева // Экология и промышленность России. – 2015. – Т. 19. – С. 56–59.

12. **Ульрих, Д.В.** Оценка влияния горнодобывающих и перерабатывающих предприятий на состояние окружающей среды Челябинской области / Д.В. Ульрих, С.С. Тимофеева, С.Е. Денисов // Горный журнал. – 2015 – Т. 5. – С. 94–99. (**Scopus**)

13. **Ульрих, Д.В.** Влияние отходов обогатительной фабрики на водные объекты Челябинской области / Д.В. Ульрих, М.Н. Брюхов, С.С. Тимофеева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № 4. – С. 139–142.

14. **Ульрих, Д.В.** Фиторемедиация загрязненных почв и техногенных грунтов хвостохранилищ на территории меднорудных предприятий Южного Урала / Д.В. Ульрих, С.С. Тимофеева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 3. – С. 341–349.

15. Тимофеева, С.С. Фитофильтры для очистки сточных вод / С.С. Тимофеева, **Д.В. Ульрих**, С.С. Тимофеев // Вестник Технологического университета. – 2016. – Т. 19. – № 16. – С. 162–166.

16. Тимофеева, С.С. Технологии фиторемедиации на техногенно-поврежденных территориях в условиях Восточной Сибири и Южного Урала / С.С. Тимофеева, С.С. Тимофеев, **Д.В. Ульрих** // Безопасность в техносфере. – 2016. – № 6. – С. 16–23.

17. **Ульрих, Д.В.** Биоинженерные сооружения для очистки загрязненных поверхностных стоков // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 2. – ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4214.

18. **Ульрих, Д.В.** Использование природных сорбентов в технологии очистки поверхностных стоков с территорий горно-перерабатывающих предприятий / Д.В. Ульрих // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 8 (специальный выпуск 41). – 12 с.

19. Тимофеева, С.С. Фитомайнинг как технология ревитализации территории меднорудных месторождений Южного Урала / С.С. Тимофеева, **Д.В. Ульрих**, С.С. Тимофеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 1 (специальный выпуск 6). – С. 3–16. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-6-3-16.

20. Тимофеева, С.С. Использование фиторемедиационного потенциала декоративных кустарников в ревитализации техноземов Карабашского промузла / С.С. Тимофеева, **Д.В. Ульрих**, С.С. Тимофеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 1 (специальный выпуск 6). – С. 42–50. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-6-42-50.

21. Тимофеева, С.С. Возможности использования фиторемедиационного потенциала и сорбционно-габионных модулей в ревитализации техногенно-нарушенных территорий Южного Урала / С.С. Тимофеева, **Д.В. Ульрих**, С.С. Тимофеев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 1 (специальный выпуск 6). – С. 17–41. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-6-17-41.

22. **Ульрих, Д.В.** Аналитическая методика оценки эффективности технологий восстановления окружающей среды в условиях геотехнических систем Южного Урала / Д.В. Ульрих, Г.М. Грейз // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 2 (специальный выпуск 7). – С. 3–15. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-7-3-15.

#### Патенты

23. **Ульрих, Д.В.** Система очистки сточных вод (варианты): пат. № 2572577 Рос. Федерация: МПК С02F3/32; С02F9/14 / Д.В. Ульрих, М.Н. Брюхов, С.С. Тимофеева, С.Е. Денисов. – № 2014123764/10; заявл. 10.06.2014; опубл. 20.12.2015, бюл. № 2.

24. **Ульрих, Д.В.** Система очистки поверхностных сточных вод (варианты): пат. № 2603002 Рос. Федерация: МПК С02F3/32; С02F9/14; С02F11/02; С02F101/20 / Д.В. Ульрих, Г.О. Жбанков, М.Н. Брюхов, С.Е. Денисов. – № 2015147891/10; заявл. 06.11.2015; опубл. 20.11.2016, бюл. № 32.

25. **Ульрих, Д.В.** Композитный гранулированный сорбент: пат. № 2682586 Рос. Федерация: МПК В01J 20/16; В01J 20/30 / Д.В. Ульрих. – № 2018118265; заявл. 07.05.2018; опубл. 19.03.2019, бюл. № 8.

#### Публикации в журналах и сборниках конференций, индексируемых в Web of Science и Scopus

26. **Ulrich, D.V.** Analysis and research of geo-ecological and geologic conditions of Karabash ore mining area / D.V. Ulrich, S.E. Denisov // 13th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO: Albena. – Bulgaria, 2013. – P. 1–8.

27. **Ulrich, D.V.** Dynamics of pollutants transportation by the stream flow from technogenic territories / D.V. Ulrich, S.E. Denisov // 13<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO: Albena. – Bulgaria, 2013. – P. 111–116.

28. **Ulrich, D.V.** Geocological condition of floodplain soil of the Sak-Elga river in the Karabash town / D.V. Ulrich, S.E. Denisov, G.O. Zhbankov // Science and Society: 3<sup>rd</sup> International Scientific and Practical Conference. – London, 2013. – P. 22–26.

29. **Ulrich, D.V.** Measurements for advanced neutralized wastewater treatment applying the sorption method / D.V. Ulrich, M.N. Bryukhov, G.O. Zhbankov, S.E. Denisov, S.S. Timofeeva // Science and Society: 4<sup>rd</sup> International Scientific and Practical Conference. – London, 2013. – P. 141–147.

30. Bryukhov, M.N. Role of leafy mosses in wastewater treatment / M.N. Bryukhov, **D.V. Ulrich**, S.S. Timofeeva // 14<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO: Albena. – Bulgaria, 2014. – P. 579–584.

31. Bryukhov, M.N. Modern experience of natural clay use at reclamation of disturbed soil / M.N. Bryukhov, **D.V. Ulrich**, G.O. Zhbakov // 14<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO: Albena. – Bulgaria, 2014. – P. 461–465.

32. Timofeeva, S.S. Energy-efficient green technology (phytotechnology) of wastewater treatment from oil production sites / S.S. Timofeeva, S.S. Timofeev, **D.V. Ulrich**, M.N. Bryukhov // 14<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO: Albena. – Bulgaria, 2014. – P. 237–243.

33. **Ulrich, D.V.** Possibility of use of zeolites and gaize in remediation technologies / D.V. Ulrich, M.N. Bryukhov, G.O. Zhbakov, S.S. Timofeeva, S.E. Denisov // 14<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO: Albena. – Bulgaria, 2014. – P. 519–523.

34. Timofeeva, S.S. Environmental phytotechnologies in eastern Siberia and south Ural / S.S. Timofeeva, S.S. Timofeev, **D.V. Ulrich**, M.N. Bryukhov // 14<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO: Albena. – Bulgaria, 2014. – P. 259–266.

35. Zhbakov, G.O. Analysis of geological engineering conditions of Chelyabinsk region / G.O. Zhbakov, **D.V. Ulrich**, M.N. Bryukhov, S.E. Denisov // 14<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO: Albena. – Bulgaria, 2014. – P. 3–9.

36. **Ulrikh, D.V.** Soil-cement of Normal Hardening on the Basis of the Argillaceous Raw Material and Copper Ore Processing of Waste in Eco-geology and Construction / D.V. Ulrikh, M.D. Butakova // Procedia Engineering. – 2016. – № 150. – P. 1510–1515.

37. Timofeeva, S.S. Phytomining perspectives in rehabilitation of mining and industrial areas of South Ural / S.S. Timofeeva, **D.V. Ulrikh**, S.S. Timofeev // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – № 66. – <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/66/1/012030/pdf>.

38. Denisov, S.E. Formation of Hydrochemical River Regime Under Extreme Contamination by Waste Water (the Sak-Elga River in the Chelyabinsk Region) / S.E. Denisov, **D.V. Ulrikh**, G.O. Zhbakov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – № 262. – <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/262/1/012186/pdf>.

39. **Ulrikh, D.V.** Assessment of Inhalation Risk to Public Health in the Southern Ural / D.V. Ulrikh, S.V. Ivanova, I.A. Riabchikova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – № 262. – <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/262/1/012209/pdf>.

40. **Ulrikh, D.V.** Choice of sorbents for the pretreatment in the complex technology of phytoremediation / D.V. Ulrikh, S.S. Timofeeva, S.S. Timofeev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – № 451. – <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/451/1/012235/pdf>.

Также материалы диссертационной работы опубликованы в **52** статьях в журналах и изданиях международных, всероссийских и региональных конференций.

*Автор выражает истинную благодарность научному консультанту, зав. кафедрой промэкологии и безопасности жизнедеятельности ФГБОУ ВО ИРНИТУ, профессору, доктору технических наук С.С. Тимофеевой за постоянную поддержку и консультации на всех этапах работы.*

*Автор выражает благодарность за помощь в организации проведения исследований и содействие в подготовке диссертации ректору ФГАОУ ВО ЮУрГУ профессору, д.т.н. А.Л. Шестакову; первому научному наставнику профессору, д.т.н. С.Е. Денисову; профессору, д.т.н. С.Д. Ваулину; профессору, д.т.н. Г.Г. Михайлову; д.х.н. В.В. Авдину; профессору, д.т.н. И.В. Зенькову; профессору, д.филос.н. Е.Г. Прилуковой; профессору, д.т.н. И.Л. Кравчуку; профессору, д.т.н. Н.Н. Ореховой; к.т.н. Т.М. Лонзингер; профессору, к.т.н. И.А. Аркановой; профессору, д.э.н. Г.М. Грейзу; соискателю М.Н. Брюхову и др.*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета  
Подписано в печать 09.07.2020 г. Формат 60×84 1/16.  
Печать цифровая. Тираж 100 экз. Заказ 63/135.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.