*На правах рукописи*



**Наволокина Вера Юрьевна**

# ФОРМИРОВАНИЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОТРАБОТАННЫХ МЕДНОКОЛЧЕДАННЫХ РУДНИКОВ (НА ПРИМЕРЕ ЛЕВИХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ, СВЕРДЛОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)

1.6.21 – Геоэкология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Екатеринбург – 2026

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН)

**Научный руководитель:** **Рыбникова Людмила Сергеевна**
доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории экологии горного производства ФГБУН Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

**Официальные оппоненты:** **Лепокурова Олеся Евгеньевна**
доктор геолого-минералогических наук, директор Томского филиала, главный научный сотрудник, и.о. заведующего лабораторией гидрогеохимии и геоэкологии ФГБУН «Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук» (ИНГГ СО РАН), Томский филиал.

**Филимонова Елена Александровна**
кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра гидрогеологии, Геологический факультет Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва.

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь.

Защита диссертации состоится 26 января 2027 года в 14 часов на заседании Диссертационного совета 24.1.054.01 на базе ФГБУН «Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук» по адресу: 109004, г. Москва, ул. Николоямская, д.51.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН по адресу: 101000, г. Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2.

Автореферат диссертации разослан «____»_____2026 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат географических наук Е.В. Булдакова

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** По результатам антирейтинга регионов РФ с экстремальным загрязнением природных водных объектов в Свердловской области в последние годы фиксируется самое большое число загрязненных рек: более четверти всех выявленных высоких и экстремально высоких показателей загрязнения. Одним из источников загрязнения поверхностных рек на Среднем Урале являются закрытые и затопленные медноколчеданные рудники, на которых продолжают формироваться и разгружаться на поверхность кислые шахтные воды (КШВ).

КШВ как основные источники загрязнения образуются на таких рудниках не только в процессе отработки, но и после прекращения шахтного водоотлива, заполнения депрессионной воронки и выхода КШВ на поверхность (часто в виде сосредоточенной разгрузки подземных вод - техногенных родников или изливов). Основной причиной образования таких вод является наличие в горных породах сульфидных минералов (В.А. Алексеев, 2022; Л.С. Рыбникова и др., 2019). Во время добычи нарушается целостность горного массива, происходит окислительное растворение сульфидных минералов при взаимодействии с водой и воздухом, что приводит к образованию КШВ (S. Kumari et al., 2010; A. Qureshi et al., 2016; C. Wolkersdorfer, 2018; B.G. Lottermoser, 2012; А.В. Докукин, 1950; Л.С. Рыбникова, 2018; М.А. Пашкевич и др., 2023). В свою очередь низкие значения pH в шахтных водах способствуют дальнейшему растворению минералов и выделению из них металлов, эти потоки при поступлении в природные водные объекты наносят существенный ущерб гидросфере. Одной из главных экологических проблем старопромышленных районов является ликвидация накопленного вреда окружающей среде, в том числе поверхностным водам.

**Степень разработанности темы.** Анализ опубликованных исследований показал, что проблема кислых шахтных вод остается одной из наиболее значимых экологических угроз, связанных с горнодобывающей промышленностью. Их образование и длительное негативное влияние на окружающую среду, в том числе на гидросферу после закрытия шахт подтверждается многочисленными исследованиями, проведенными как российскими, так и зарубежными учеными. Большой научный вклад в изучение формирования КШВ внесли такие известные ученые, как Б.А. Бачурин, С.Б. Бортникова, О.Л. Гаськова, О.М. Гуман, А.В. Докукин, С.Н. Елохина, Э.Ф. Емлин, О.В. Зотеев, Н.Г. Максимович, А.М. Плюснин, Л.С. Рыбникова, Б.Н. Рыженко, А.И. Семячков, Л.С. Табаксблат, И.А. Тарасенко R.T. Amos, B.G. Lottermoser, D.K. Nordstrom, C. Wolkersdorfer, P.L Younger и др.

Несмотря на значительный прогресс в изучении КШВ, проблема их полного устранения остается нерешенной, особенно в регионах с исторически накопленным экологическим ущербом.

**Цель работы.** Выявление закономерностей формирования геоэкологических условий природно-технических систем в районе закрытых медноколчеданных рудников Среднего Урала.

**Задачи исследования:**

1. Оценить состояние гидросферы природно-технических систем горнопромышленных районов (Свердловская область).
2. Выделить факторы и параметры, влияющие на эффективность действующих систем очистки, направленных на ликвидацию накопленного вреда в районе закрытых медноколчеданных рудников.
3. Выявить пространственные и временные закономерности изменения химического состава подземных и поверхностных вод.
4. Изучить закономерности миграции элементов в цепочке: от выхода кислых шахтных вод до сброса в гидросеть.
5. Разработать мероприятия по ликвидации накопленного вреда в районе закрытого Левихинского медноколчеданного рудника.

**Объект исследования.** Поверхностные и подземные воды на водосборах горнопромышленных территорий Среднего Урала.

**Предмет исследования.** Закономерности изменения химического состава вод гидросферы в районах ликвидированных медноколчеданных рудников Среднего Урала.

**Методы исследования** включают анализ материалов собственных полевых работ, систематизацию обширного фактического материала об изменении химического состава воды в районах влияния горнодобывающих объектов, а также обобщение опубликованной гидрогеологической и геохимической информации. Для проверки достоверности анализов, решения вопросов формирования химического состава вод, вторичных минералов и выявления закономерностей геохимических процессов в системе «вода-порода» применялось физико-химическое моделирование на основе программного кода Visual MINTEQ 3.1

**Обоснованность и достоверность научных результатов** обеспечивается применением современных методов и средств исследований для обработки большого массива данных, проведением химических анализов с привлечением аккредитованной лаборатории Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург), аналитического сертификационного испытательного центра института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН (г. Черноголовка) и лаборатории Государственного казенного учреждения Свердловской области «УралМонацит», апробацией основных научных положений на российских и международных совещаниях и конференциях, публикацией в рецензируемых журналах, выполнением заданий государственных научных программ.

**Научная идея работы*:*** геоэкологические условия на территориях с накопленным вредом определяются комбинацией техногенных, природных и

технологических факторов, при этом количественная оценка вклада каждого из них для разных водосборов позволяет научно обосновать методы реабилитации горнопромышленных территорий.

**Научная новизна работы:**

1. Установлено, что трансформация химического состава речных вод в бассейне р. Тагил имеет преимущественно техногенный генезис, вклад природных аномалий (Уральская металлогеническая зона) незначителен.

2. Впервые на основе сравнительного анализа двух отработанных медноколчеданных рудников Среднего Урала со схожими геолого-гидрогеологическими условиями, технологией и историей отработки показано, что лимитирующим фактором достижения нормативного качества воды при сбросе с водосбора горнопромышленной территории является не только технология очистки (технологический фактор), но и геоморфология - площадь водосбора (природный фактор).

3. Выявлена пространственная эволюция и механизмы формирования геохимических барьеров в подземных и поверхностных водах затопленного Левихинского рудника: от зоны выхода кислых шахтных вод до сброса в гидросеть.

4. Обосновано, что реабилитация техногенно-нарушенной территории должна выполняться с использованием как активных, так и пассивных методов по трехступенчатой схеме: (1) нейтрализация известковым молоком с использованием аэротенков, (2) углубленная очистка и флокуляция с помощью радиального отстойника, (3) иммобилизация металлов с использованием пассивной очистки в виде каскада прудов.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Трансформация гидрохимических показателей качества вод бассейна р. Тагил имеет преимущественно техногенный генезис: вклад природных аномалий металлогенической провинции Уральского рудного узла не превышает 4%, основной объем загрязняющих веществ ($Fe_{общ}$, $Cu^{2+}$, $Al^{3+}$, $Mn^{2+}$, $Zn^{2+}$) поступает с водосборов отработанных медноколчеданных месторождений.

2. Показатели качества воды в замыкающем створе зависят от сочетания ряда факторов (техногенный, технологический, природный). Различие в площади водосбора (в 11 раз) и свободном объёме пруда-осветлителя (в 11 раз) Дегтярского и Левихинского рудников обусловливает расхождение суммарного показателя загрязнения в 363 раза при исходно близких характеристиках кислых шахтных вод и идентичной технологии очистки. Продолжительность самореабилитации водосборов с накопленным вредом составляет десятки и сотни лет, даже если реализуются природоохранные мероприятия.

3. Процессы формирования состава вод и донных отложений природно-технической системы затопленного Левихинского рудника определяются наличием геохимических барьеров. На щелочном барьере (нейтрализация кислых шахтных вод, увеличение pH от ~3,8 до ~9,4) ключевым процессом является смена форм

миграции компонентов от ионной формы к осаждению гидроксидов металлов: коэффициент распределения (CR) возрастает до $10^4$ л/кг (для $Zn^{2+}$, $Cu^{2+}$, $Fe_{общ}$, $Al^{3+}$), коэффициент опасности снижается на 3-4 порядка. На сорбционном барьере (ближе к устью р. Левихи) ведущим процессом становится сорбция, что отражается на увеличении CR до $10^5$-$10^6$ л/кг (для $Cu^{2+}$, $Fe_{общ}$, $Al^{3+}$), коэффициент опасности снижается на 1-2 порядка.

**Соответствие работы паспорту специальности.** Представленная работа соответствует паспорту специальности 1.6.21. Геоэкология (геолого-минералогические науки): пункт 7 – геоэкологические аспекты устойчивого развития регионов, функционирования природно-технических систем. Оптимизация взаимодействия (коэволюция) природной и техногенной подсистем, 16 – моделирование геоэкологических процессов и последствий хозяйственной деятельности для природных комплексов и их отдельных компонентов. Современные методы геоэкологического картирования, ГИС-технологии и информационные системы в геоэкологии, 18 – горно-геологическая природная среда и её изменение при разработке месторождений полезных ископаемых, взаимодействие природных и технических систем в процессе недропользования.

**Практическая значимость работы:** для Министерства природных ресурсов Свердловской области разработана «дорожная карта» по минимизации негативного воздействия на гидросферу в районе отработанного Левихинского рудника; выполнена сравнительная оценка эффективности существующих методов очистки КШВ на Дегтярском и Левихинском рудниках, что формирует основу для выбора оптимальных природоохранных решений. Обоснованы научно-методические подходы к экологической реабилитации территорий, нарушенных горными работами на Среднем Урале. Результаты и методические подходы могут быть использованы проектными, горнодобывающими организациями и экологическими службами Уральского региона для мониторинга среды и планирования реабилитационных работ на аналогичных техногенных объектах.

**Личный вклад автора.** Основные теоретические и прикладные результаты исследований, получены автором при выполнении гранта РНФ (проект № 22-27-20140) и государственного контракта для Минприроды Свердловской области и ГКУ СО «УралМонацит» (№ 01622000118200011820001 от 29.07.2020 г.). Вклад автора: полевые работы (отбор проб), обработка и интерпретация химического состава поверхностных и подземных вод, физико-химическое моделирование процессов в системе «вода-порода» и оценка состояния гидросферы. Автор лично обобщил полученные данные, обосновал выводы, подобрал методы по минимизации воздействия кислых шахтных вод на гидросферу и подготовил публикации по теме исследования.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации и результаты авторских исследований докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и научных конгрессах, конференциях в городах: Екатеринбург (2019,

2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026), Томск (2023, 2024, 2025, 2026), Иркутск (2021), Антрацит (2024), Санкт-Петербург (2022), Дербент (2024), Псков (2025), Брага (Португалия, 2025).

За цикл работ по теме диссертации автор удостоен премии Губернатора Свердловской области для молодых учёных за 2024 год в номинации «За лучшую работу в области наук о Земле» (Указ Губернатора Свердловской области от 10.01.2025 № 4-УГ).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 151 стр. текста, 40 рисунков, 24 таблицы и 1 приложение. Список литературы включает 127 источников.

**Благодарности.** Автор считает обязательным выразить искреннюю признательность своему научному руководителю д.г.-м.н. Л.С. Рыбниковой. За научные консультации, точные замечания и советы при работе над диссертацией автор благодарит к.г.-м.н. П.А. Рыбникова и д.т.н. С.В. Корнилкова. Автор выражает благодарность коллективу лаборатории геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании ИГД УрО РАН за оказанную поддержку и содействие в проведении исследований. Также автор искренне благодарен своей семье за моральную поддержку и безграничное терпение.

**Содержание работы.** *В первой главе* освещено современное состояние исследований по проблеме формирования химического состава кислых шахтных вод.

*Во второй главе* рассмотрены физико-географические, геологические, геолого-гидрогеологические условия Кировградского рудного района в том числе на примере Левихинского медноколчеданного месторождения. Оно расположено в Тагило-Магнитогорской гидрогеологической складчатой области. Согласно схеме тектонического районирования, район расположен в пределах Восточнотагильской зоны Тагильской мегазоны. Руды комплексные, сложены преимущественно пиритом, халькопиритом и сфалеритом. Рудовмещающие породы представлены кварц-серицитовыми, кварц-хлоритовыми сланцами, альбитофирами и порфиритами. Месторождение приурочено к вулканитам кировградской свиты. С гидрогеологических позиций объект расположен в границах Уральской сложной гидрогеологической складчатой области.

*В третьей главе* рассмотрена геохимия малых рек бассейна р. Тагил и дана оценка состояния гидросферы природно-технических систем (шахтных и поверхностных вод).

*В четвертой главе* выполнена оценка эффективности очистки КШВ в районах Дегтярского и Левихинского рудников. Сформирована классификация факторов (техногенных, технологических и природных), положенная в основу критериальной базы для сравнительного анализа экологической обстановки на объектах.

*В пятой главе* освещаются закономерности формирования химического состава шахтных, подземных и поверхностных вод и донных отложений в районе

Левихинского рудника, приводятся результаты термодинамических расчетов, определены формы миграции и массового баланса компонентов в системе «вода-порода», рассчитаны индексы насыщения, установлены места локализации загрязняющих веществ и выделены геохимические барьеры в природно-технической системе (шахтные и поверхностные воды). Предложены мероприятия по реабилитации горнопромышленной территории Левихинского рудника.

## ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

**1. Трансформация гидрохимических показателей качества вод бассейна реки Тагил имеет преимущественно техногенный генезис: вклад природных аномалий металлогенической провинции Уральского рудного узла не превышает 4%, основной объем загрязняющих веществ ($Fe_{общ}$, $Cu^{2+}$, $Al^{3+}$, $Mn^{2+}$, $Zn^{2+}$) поступает с водосборов отработанных медноколчеданных месторождений.**

Горнодобывающая деятельность приводит к формированию природно-технических систем (ПТС), жизненный цикл которых от разведки до ликвидации составляет десятки и сотни лет. Закрытие рудников как на Среднем Урале, так и по всему миру, выявило специфические проблемы, связанные с медленными процессами самореабилитации горнопромышленных районов и высоким уровнем загрязнения гидросферы на значительных площадях. Накопленный вред окружающей среде определяет неблагоприятную экологическую обстановку в непосредственной близости от селитебных территорий, угрозу источникам питьевого водоснабжения и обуславливает необходимость выполнения рекультивации в течение десятков лет после завершения отработки.

Бассейн реки Тагил, расположенный в пределах Уральской металлогенической провинции, является важнейшей составляющей гидрографической сети восточного склона Среднего Урала, характеризуется высокой плотностью и разнообразием малых водотоков. Малые реки во многом определяют гидрологический режим, качество вод и экологическое состояние основной артерии р. Тагил (Рисунок 1).

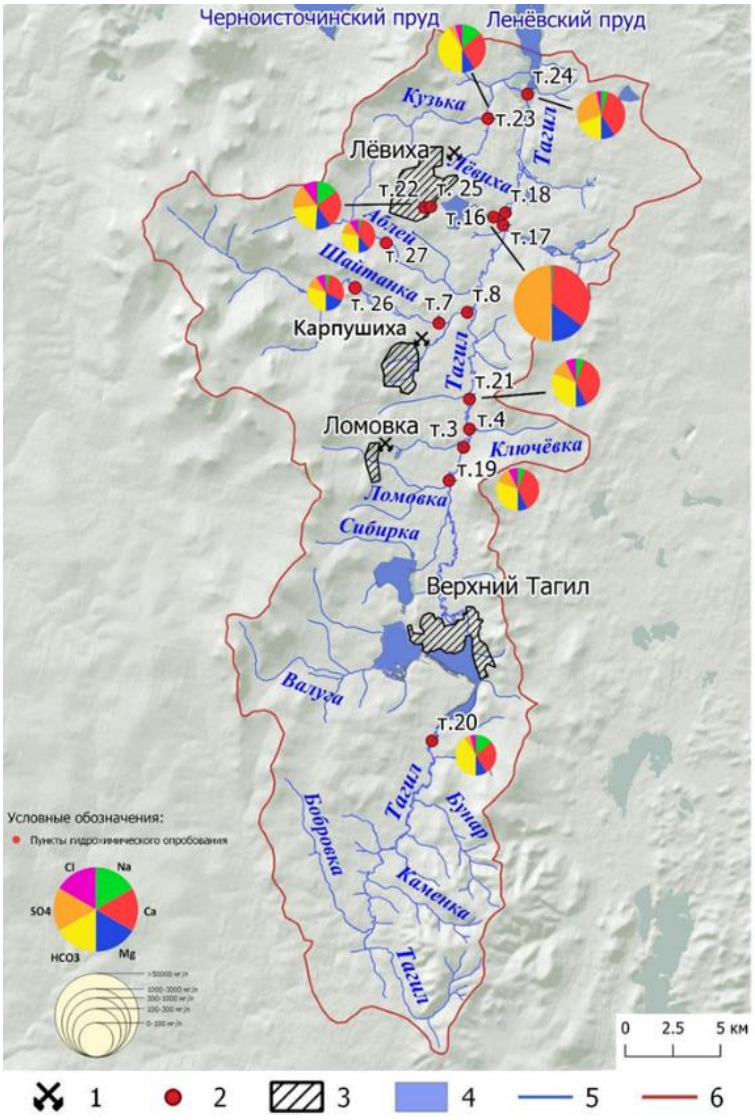



**Рисунок 1** – Схема расположения пунктов гидрохимического опробования в бассейне р. Тагил.

*1 – отработанные рудники, 2 – объекты мониторинга гидросферы, 3 – населенные пункты, 4 – водоемы, 5 – реки, 6 – граница водосбора*

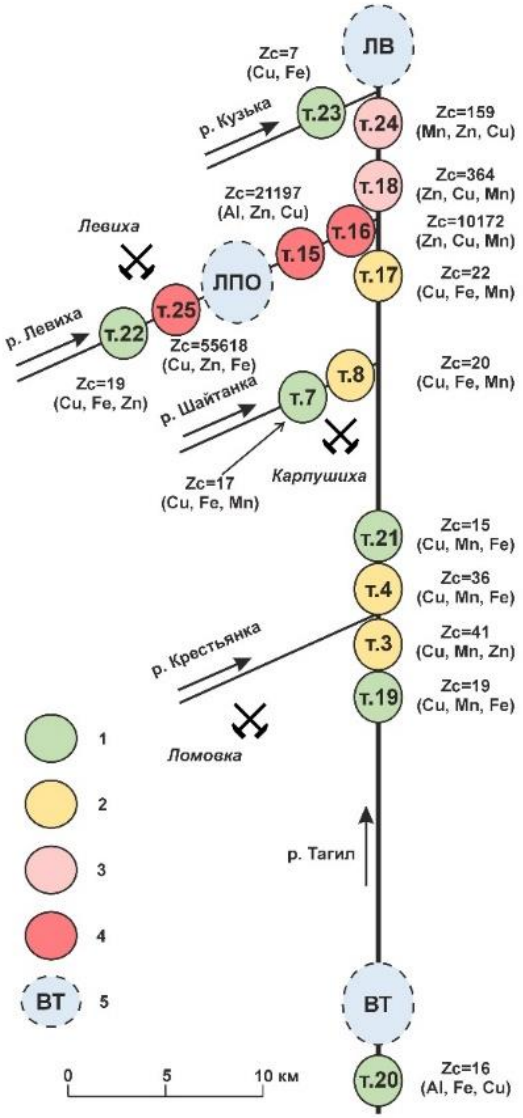



**Рисунок 2** – Суммарный показатель загрязнения в точках мониторинга бассейна р. Тагил (верховья).

*Характер загрязнения: 1 – природное; 2 – умеренно техногенное; 3 – высокое; 4 – экстремальное техногенное; 5 – наименования водных объектов. В скобках приведен ранжированный ряд основных загрязняющих компонентов (в порядке убывания)*

Фоновый химический состав поверхностных вод (р. Тагил, р. Шайтанка, р. Аблей, р. Левиха и р. Кузька) выше зон отработки исходно характеризуется как гидрокарбонатный (исключение р. Левиха – сульфатный) кальциево-магниевый

либо магниево-кальциевый с pH=6,5-8,1 тем не менее не соответствуют предельно-допустимым концентрациям для рыбохозяйственного значения (ПДКрх) по $Cu^{2+}$ и $Mn^{2+}$ (превышение в 3-17 раз), $Fe_{общ}$ (в 5-11 раз) и $Al^{3+}$ (в 3-7 раз). В условиях прямой антропогенной нагрузки ограниченная буферная емкость и низкий потенциал самоочищения малых водотоков приводит к критической трансформации химического состава поверхностных вод. Так, сброс очищенных шахтных вод Левихинского рудника с pH=7,1 сульфатного алюминиево-магниево-кальциевого состава вызывает локальные превышения ПДКрх при попадании в р. Тагил по $Zn^{2+}$ в 3980 раз, $Cu^{2+}$ в 2500 раз, $Mn^{2+}$в 2250 раз и $Al^{3+}$ в 1398 раз. Таким образом, фоновое состояние и высокую чувствительность малых рек необходимо учитывать при ранжировании загрязнителей и локализации зон экологического неблагополучия.

В работе приведен сравнительный анализ пяти методов оценки техногенной нагрузки на гидросферу: потоковых (масса накопленного вещества ($M_i$, т/год) и модуль гидрохимической нагрузки ($G_i$, т/год*км²)) и интегральных (индекс загрязнения воды (ИЗВ), удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ) и суммарный показатель загрязнения (Zc)). Показано, что для комплексной оценки, ранжирования водных объектов и разделения природного и техногенного генезиса загрязнения наиболее эффективна адаптация Zc, рекомендованного СанПиН 1.2.3685-21 для почв (В.Е. Закруткин и др., 2020).

Zc рассчитывается как сумма коэффициентов концентрации отдельных химических элементов-загрязнителей относительно их ПДК с учетом количества загрязняющих веществ.

По данным гидрохимического мониторинга медноколчеданных месторождений Среднего Урала по 6 характерным компонентам ($Cu^{2+}$, $Zn^{2+}$, $Mn^{2+}$, $Fe_{общ}$, $Al^{3+}$, $SO_4^{2-}$) выполнена оценка влияния затопленных рудников на поверхностные воды бассейн р. Тагил.

В условно фоновых створах, отражающих естественную региональную гидрохимическую норму и не испытывающих прямого антропогенного воздействия (т. 20, 7, 22, 23), значения $Z_c$ минимальны от 7 (р. Кузька) до 19 (верховья р. Левихи и р. Тагил ниже г. Верхний Тагил), что соответствует благоприятному экологическому состоянию. В пределах горнопромышленных ландшафтов техногенные аномалии в шахтных и затем в поверхностных водах превышают природный фон рек на несколько порядков, переводя водные объекты в категории умеренного, высокого и экстремального экологического состояния.

В бассейне р. Тагил значения Zc изменяются от 16 в верховьях (т. 20) до 364 ниже сброса очищенных шахтных вод Левихинского рудника (т. 18). Максимальные значения Zc (без учета техногенного водоема, т. 25) зафиксированы на сбросе с пруда-осветлителя (т. 15, $Zc=21*10^3$) и в устье р. Левихи (т. 16, $Zc=10*10^3$), где ведущим загрязняющим веществом становится цинк. За счет разбавления чистыми боковыми притоками происходит двукратное самоочищение р. Тагил, однако в

Леневское водохранилище поступает вода с высокой нагрузкой Zc = 159, при доминирующем вкладе марганца (Рисунок 1, 2).

Количественное нормирование по методу Zc позволило впервые ранжировать вклад природного фактора (максимальные значения Zc=19) и техногенных источников: влияние малых рудников (Ломовский, Карпушихинский) и основного загрязнителя Левихинского рудника (Таблица 1).

Таблица 1 – Оценка вклада факторов по суммарному показателю загрязнения

| Объект | Zc | Zc/ Σ | (Zc/Σ) *100, % |
|---|---|---|---|
| Фон | 19 | 0,04 | 4 |
| Ломовский и Карпушихинский рудники | 41 | 0,10 | 10 |
| Левихинский рудник | 364 | 0,86 | 86 |
| Σ | 424 | 1 | 100 |

Установлено, что доля природного фона в общем загрязнении составляет 4%, тогда как 96% обусловлено сбросами с объектов горнопромышленных комплексов, из которых на Левихинский рудник приходится 86% воздействия (Таблица 1). Это предопределило необходимость детального изучения данной природно-технической системы.

**2. Показатели качества воды в замыкающем створе зависят от сочетания ряда факторов (техногенный, технологический, природный). Различие в площади водосбора (в 11 раз) и свободном объёме пруда-осветлителя (в 11 раз) Дегтярского и Левихинского рудников обусловливает расхождение суммарного показателя загрязнения в 363 раза при исходно близких характеристиках кислых шахтных вод и идентичной технологии очистки. Продолжительность самореабилитации водосборов с накопленным вредом составляет десятки и сотни лет, даже если реализуются природоохранные мероприятия.**

Ликвидация медноколчеданных рудников в Свердловской области (Левихинского, Карпушихинского, Ломовского, Дегтярского и др.) приводит к формированию сосредоточенных выходов КШВ, как правило, в наиболее низкой части горнопромышленного ландшафта (в провалах, карьерах) с расходом до нескольких тысяч кубометров в сутки. В условиях дефицита подземных вод на горноскладчатом Урале такие изливы создают прямую угрозу поверхностным водохранилищам, которые являются основным источникам питьевого водоснабжения крупных промышленных центров региона. Нейтрализация КШВ, осуществляемая ГКУ СО «УралМонацит» за счет средств областного бюджета, минимизирует воздействие на гидросферу (подземные и поверхностные воды), тем не менее последующий сброс очищенных поверхностных вод в р. Тагил оказывает

долговременную нагрузку на Леневское водохранилище, которое является одним из источников водоснабжения г. Нижний Тагил (330 тыс. человек) (Рисунок 3).

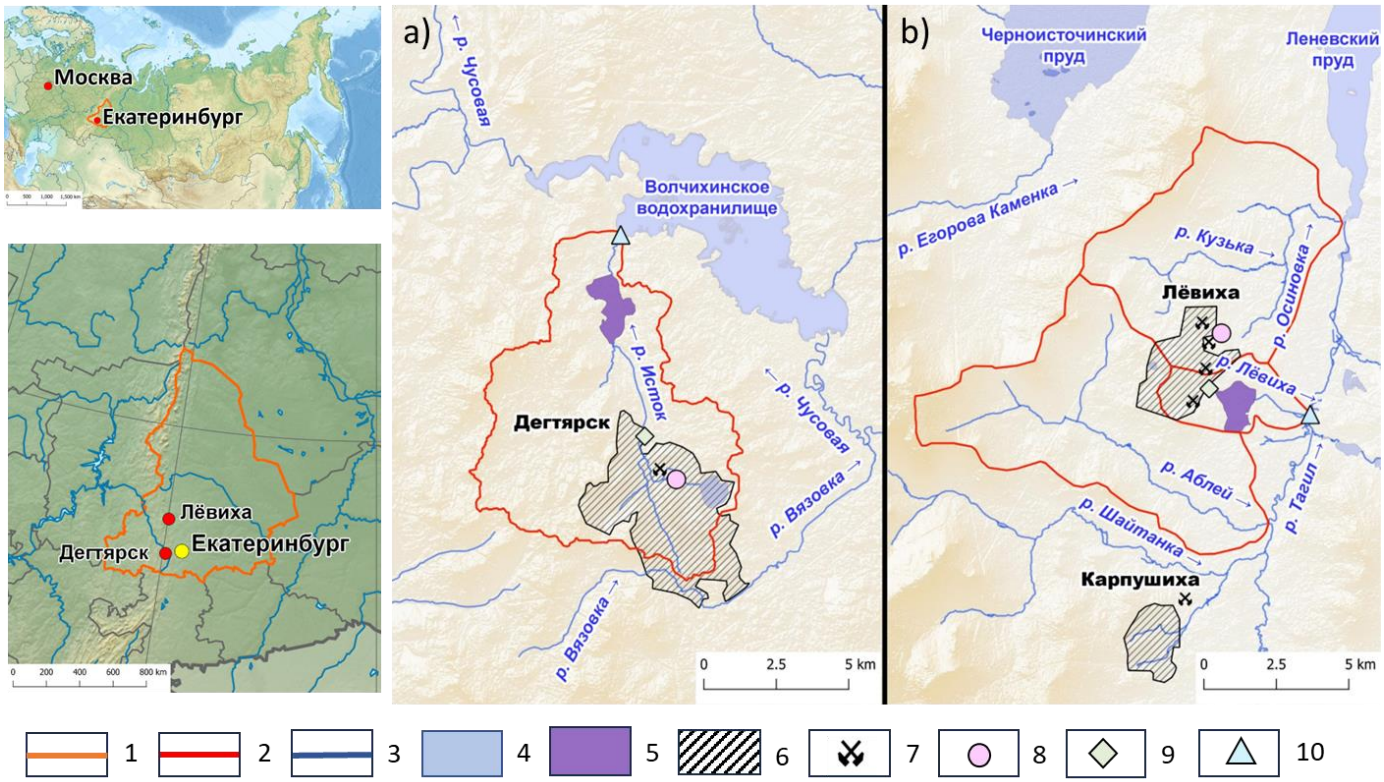



**Рисунок 3** – Схема расположения объектов исследования: а) Дегтярский рудник, b) Левихинский рудник. *1 – граница Свердловской области, 2 – границы частных водосборов, 3 – реки, 4 –водохранилище, 5 – пруд-осветлитель, 6 – населенные пункты, 7 – шахты, 8 – выход КШВ, 9 – станция нейтрализации, 10 – сброс в р. Ельчевка и р. Тагил*

Очищенные сточные воды с Дегтярского рудника через р. Ельчевку поступают в Волчихинское водохранилище, обеспечивающее питьевое водоснабжение г. Екатеринбурга (1,5 млн человек). Фактически осуществляется межбассейновая переброска стока рек через Главный Уральский водораздел (Рисунок 3).

При идентичных геологических условиях, истории отработки и технологии нейтрализации известковым молоком КШВ качество очищенных стоков на объектах принципиально различается. На Дегтярском руднике показатели качества воды при сбросе в речную сеть соответствуют нормативным требования, тогда как на Левихинском руднике содержания загрязняющих веществ в поверхностных водах $Mn^{2+}$, $Cu^{2+}$, $Zn^{2+}$ и $Al^{3+}$ превышают ПДКрх на 2-3 порядка (Л.С. Рыбникова и др., 2019; Л.С. Рыбникова, 2022).

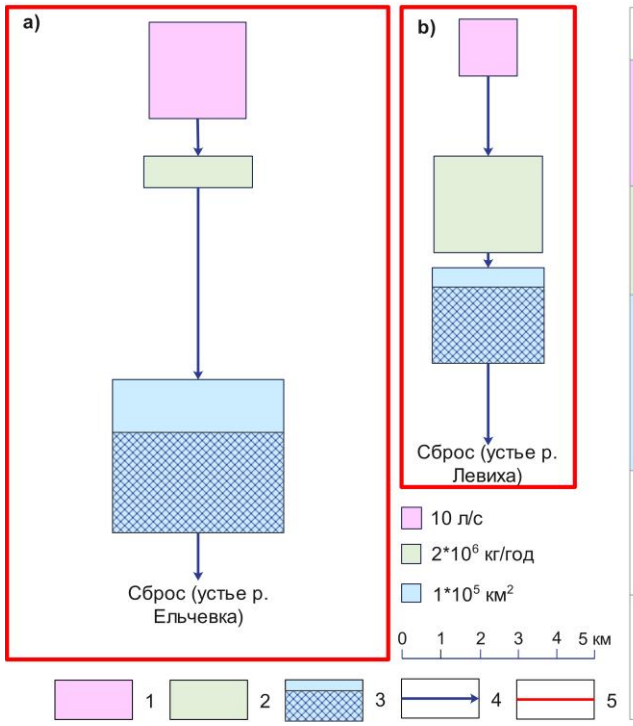
Для сопоставления принят период через 10 лет после остановки водоотлива (2003-2004 гг. - Дегтярский, 2015-2016 гг. - Левихинский рудники). КШВ Дегтярского рудника с pH=2,3-3,3 и минерализацией М=1,4-16,0 г/л после нейтрализации преобразуются из сульфатных кальциево-магниево-железистых в

магниево-кальциевые с pH=7,2-7,5 и M=0,9-1,2 г/л. На Левихинском руднике КШВ характеризуются pH=3,6-3,9 и M=14,2-20,0 г/л сульфатного магниево-железо-алюминиевого состава. На выходе трансформируются в магниево-кальциевые с pH=6,6-7,6, но сохраняют высокую минерализацию до 9,2 г/л.

Эффективность очистки (разница концентраций загрязняющих веществ на входе в систему очистки и после прохождения системы на сбросе) на Дегтярском руднике достигает 99% (превышения ПДКрх по $Cu^{2+}$, $Zn^{2+}$ – до 10 раз, $Mn^{2+}$ – до 20 раз), а на Левихинском руднике при аналогичной схеме очистки снижается до 59% (для $Mn^{2+}$) и 93% (для $Fe_{общ}$, $Cu^{2+}$), вызывая избыточные концентрации $Zn^{2+}$ (в 11 тыс. раз), $Mn^{2+}$ (в 1,4 тыс. раз) и $Cu^{2+}$ (в сотни раз) при сбросе в р. Тагил.

Факторами, влияющими на эффективность очистки, являются:

*1. Техногенные (горно-геологические) факторы.* Высокая геохимическая нагрузка Левихинского рудника: при меньшем дебите (Q) (32 л/с против 50 л/с на Дегтярском) содержания $Fe_{общ}$ (1290 мг/л), $Al^{3+}$ (494 мг/л), $Zn^{2+}$ (127 мг/л) и расчетная кислотность (Ac) в 6-10 раз выше (Рисунок 4).




| *Пункт* | *Параметр* | *Дегтярский* | *Левихинский* | *Кратность* |
|---|---|---|---|---|
| *КШВ* | pH | 2,6 | 3,7 | 1,4 |
| | Zc | 36 057 | 64 821 | 1,8 |
| | Q, л/с | 50 | 32 | 1,6 |
| *Нейтрализация* | Ac, мг/л $CaCO_3$ | 1 003 | 5 413 | 5,4 |
| | Re, т/год | 1 581 | 5 462 | 3,5 |
| *Пруд-осветлитель* | S, га | 220 | 142 | 1,5 |
| | Vпр, млн $м^3$ | 9,34 | 3,30 | 2,8 |
| | Vсв, млн $м^3$ | 2,43 | 0,23 | 10,6 |
| *Водосбор* | F, $км^2$ | 100 | 9 | 11 |
| | L, $км^2$ | 6,3 | 2,8 | 2,3 |
| | T, сут | 1,26 | 0,56 | 2,3 |
| *Сброс* | pH | 7,4 | 7,0 | 1,1 |
| | E, % | 99 | 75 | 1,3 |
| | Zc | 44 | 15 967 | 362,9 |

**Рисунок 4** – Схема и параметры очистки КШВ: a) Дегтярский рудник, b) Левихинский рудник. *1 – разгрузка КШВ, 2 – станция нейтрализации, 3 – пруд-осветлитель (штриховка – объем донных отложений, голубой цвет – свободный объем), 4 – поверхностные водотоки, 5 – водосборная площадь рек Ельчевка и Левиха.*

*2. Технологические (технология очистки) факторы.* Технологическим фактором является критическое заполнение прудов-осветлителей тонкодисперсными гидратами железа. Степень заполнения Ельчевского пруда

(Дегтярский рудник) достигает 74%, Левихинского 93%. Свободный объем (Vсв) Левихинского пруда-осветлителя составляет всего 0,23 млн м³ (против 2,43 млн м³ на Дегтярском). В итоге доступный объем Левихинского пруда оказывается в 11 раз меньше, чем Ельчевского. Этого объема недостаточно для отстаивания взвесей, что приводит к выносу на сбросе $Zn^{2+}$ (107 мг/л), $F_{еобщ}$ (95 мг/л), $Mn^{2+}$ (34 мг/л) и $Cu^{2+}$ (1 мг/л) (Рисунок 4).

*3. Природные (разбавление на площади водосбора) факторы.* Природным фактором пассивной очистки выступает разбавление стоков на площади водосбора (F). Для Дегтярского рудника она составляет около 100 км², обеспечивая высокую обводненность гидросети. Водосбор р. Левихи 9 км², при этом перекачка КШВ из бассейна р. Кузька увеличивает естественный расход реки в 3 раза, исключая потенциал разбавления стоков. В результате величина суммарного показателя загрязнения (Zc) в устье р. Ельчевки в 363 раза ниже, чем в устье р. Левихи.

Следовательно, ключевыми факторами высокой эффективности очистки на Дегтярском руднике по сравнению с Левихинским являются большая площадь водосборного бассейна и достаточный свободный объем пруда-осветлителя.

**3. Процессы формирования состава вод и донных отложений природно-технической системы затопленного Левихинского рудника определяются наличием геохимических барьеров. На щелочном барьере (нейтрализация кислых шахтных вод, увеличение pH от ~3,8 до ~9,4) ключевым процессом является смена форм миграции компонентов от ионной формы к осаждению гидроксидов металлов: коэффициент распределения (CR) возрастает до $10^4$ л/кг (для $Zn^{2+}$, $Cu^{2+}$, $Fe_{общ}$, $Al^{3+}$), коэффициент опасности снижается на 3-4 порядка. На сорбционном барьере (ближе к устью р. Левихи) ведущим процессом становится сорбция, что отражается на увеличении CR до $10^5$-$10^6$ л/кг (для $Cu^{2+}$, $Fe_{общ}$, $Al^{3+}$), коэффициент опасности снижается на 1-2 порядка.**

Левихинская группа медноколчеданных месторождений расположена в Тагило-Магнитогорской гидрогеологической складчатой области. Согласно схеме тектонического районирования, район расположен в пределах Восточнотагильской зоны Тагильской мегазоны. Руды комплексные, сложены преимущественно пиритом, халькопиритом и сфалеритом. Рудовмещающие породы представлены кварц-серицитовыми, кварц-хлоритовыми сланцами, альбитофирами и порфиритами.

Месторождение приурочено к вулканитам кировградской свиты. Разработка его велась с 1927 по 2003 гг. открытым и подземным способами с формированием воронки депрессии глубиной до 615 м. После затопления рудника (2007 г.) сформировался излив КШВ (pH 2,1–2,9; минерализация до 52 г/л) с расходом 120 м³/ч. Для предотвращения экологической катастрофы КШВ нейтрализуются известковым молоком с отстаиванием в пруде-осветлителе.

На рудном поле сформировано 11 отвалов (1,7 млн м³) и 14 техногенных водоемов (включая карьеры объемом 3,7 млн м³).

Для гидрогеоэкологического мониторинга в 2021 г. заложена сеть наблюдательных скважин (глубиной 30–50 м): в центре горного отвода (2 скв.), на его границе (4 скв.) и в зоне сброса очищенных поверхностных вод (1 скв.) (Рисунок 5).

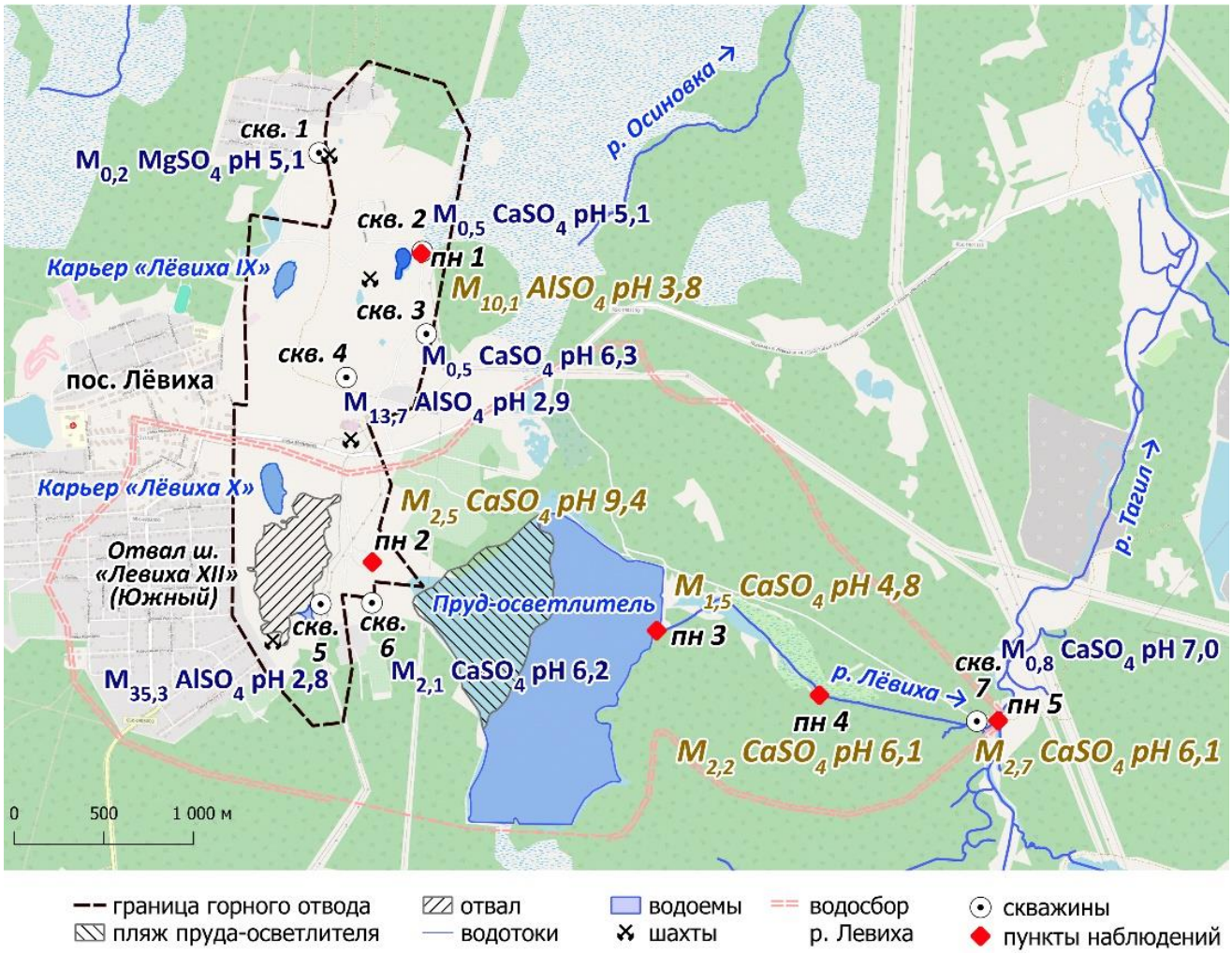



**Рисунок 5** – Обзорная схема расположения объектов на Левихинском руднике. *Химический состав воды представлен в виде упрощенной формулы М.Г. Курлова, где слева направо указаны: минерализация в г/л ($M_{10,1}$), преобладающие катион и анион ($AlSO_4$) и водородный показатель (pH 3,6).*

Подземные воды относятся в основном к сульфатным магниевым или кальциевым, либо алюминиевым водам (в пределах горного отвода). Термодинамические расчеты выявили пересыщение подземных вод относительно алунита и $Al_4(OH)_{10}SO_4$, а в кислых водах (pH=2,8-2,9) в отличие от нейтральных и слабокислых высокие индексы насыщений (SI) по ярозиту, гетиту, ферриту меди (II) и маггемиту. Установлено, что при действующей системе очистки загрязнение подземных вод носит строго локальный характер и приурочено к точечным

источникам в районе шахтного ствола «Центральный» (скв. № 4) и отвала «Южный» (скв. № 5) (Рисунок 5).

По гидрографической цепочке от излива КШВ до сброса в гидросеть опробованы 5 пунктов наблюдений (пн), это шахтные и поверхностные воды, а также донные отложения: техногенный водоем (пн 1), техногенный ручей после нейтрализации (пн 2), пруд-осветлитель (пн 3), р. Левихи ближе к устью (пн 4) и устье р. Левихи (пн 5) (Рисунок 5). Исходные шахтные воды (пн 1) характеризуются кислой средой (pH=2,3-3,9), минерализацией до 12 г/л (сульфат-ионы — до 9 г/л) и высокими концентрациями $Fe_{общ}$, $Al^{3+}$, $Mg^{2+}$, $Zn^{2+}$, $Cu^{2+}$, $Mn^{2+}$.

Термодинамические расчеты и анализ миграции компонентов в пунктах наблюдений показал, что $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$ и $Mn^{2+}$ мигрируют в свободной форме, а $Cu^{2+}$, $Zn^{2+}$ меняются с сульфатных на гидроксокомплексы при защелачивании. Миграция $Al^{3+}$, $Fe^{2+}$ и $Fe^{3+}$ трансформируется от сульфатных форм в кислой среде к гидроксокомплексам в нейтральных и щелочных условиях.

Анализ индекса насыщения (SI - термодинамического показателя, отражающего способность воды растворять или осаждать конкретные минералы) выявил смену геохимических барьеров. В кислой среде (пн 1) элементы мигрируют в ионной форме при пересыщении по алуниту. На щелочном барьере добавление известкового молока в КШВ (пн 2) происходит гидролиз меди с осаждением куприта и тенорита, а также неравновесное выпадение аморфного ферригидрита. В околонейтральной среде (пн 4, 5) формируется сорбционный барьер, где выпадающие оксигидроксиды $Fe^{3+}$ и $Al^{3+}$ аккумулируют на своей поверхности сопутствующие металлы.

Расчет коэффициентов опасности ($K=C_{факт}/ПДК_{рх}$) показал, что в техногенном водоеме (пн 1) максимальные превышения (до $10^4$ раз) характерны для $Cu^{2+}$, $Zn^{2+}$, $Fe_{общ}$, $Al^{3+}$. В техногенном ручье после нейтрализации (пн 2) кратность их превышения резко падает на несколько порядков за счет осаждения. В пруду-осветлителе (пн 3) уровни $Zn^{2+}$, $Cu^{2+}$, $Al^{3+}$ снижаются в 3-6 раз, а в устье р. Левихи (пн 4, 5) концентрации загрязняющих веществ уменьшаются на 1-4 порядка, сохраняя значительные (в сотни раз) превышение ПДКрх по $Zn^{2+}$ и $Cu^{2+}$.

Расчет коэффициентов распределения ($CR=C_{до}/C_{в}$, л/кг), показал, что в кислой среде (pH=3,8) происходит десорбция металлов, а при повышении pH и нейтрализации активизируется их переход в донные отложения, достигая максимальных значений CR для $Al^{3+}$, $Fe_{общ}$ и $Cu^{2+}$ (более $1,7*10^5$ л/кг) при (pH=6,1). Специфика накопления загрязняющих веществ, включая высокие CR по $Zn^{2+}$ ($>6*10^4$) и $Cu^{2+}$ ($>4,1*10^4$) после нейтрализации, обусловлена преобладанием сорбционных процессов и гидролитического осаждения над растворением. В околонейтральной среде (пн 4, 5) зафиксированы аномально высокие значения CR по $Cu^{2+}$ (до $4,4*10^5$ л/кг), что доказывает интенсивное накопление загрязняющих веществ в донных отложениях.

На основе полученных данных были выделены два геохимических барьера в рассматриваемой природно-технической системе (ПТС) от выхода КШВ до сброса в гидросеть (Рисунок 6).

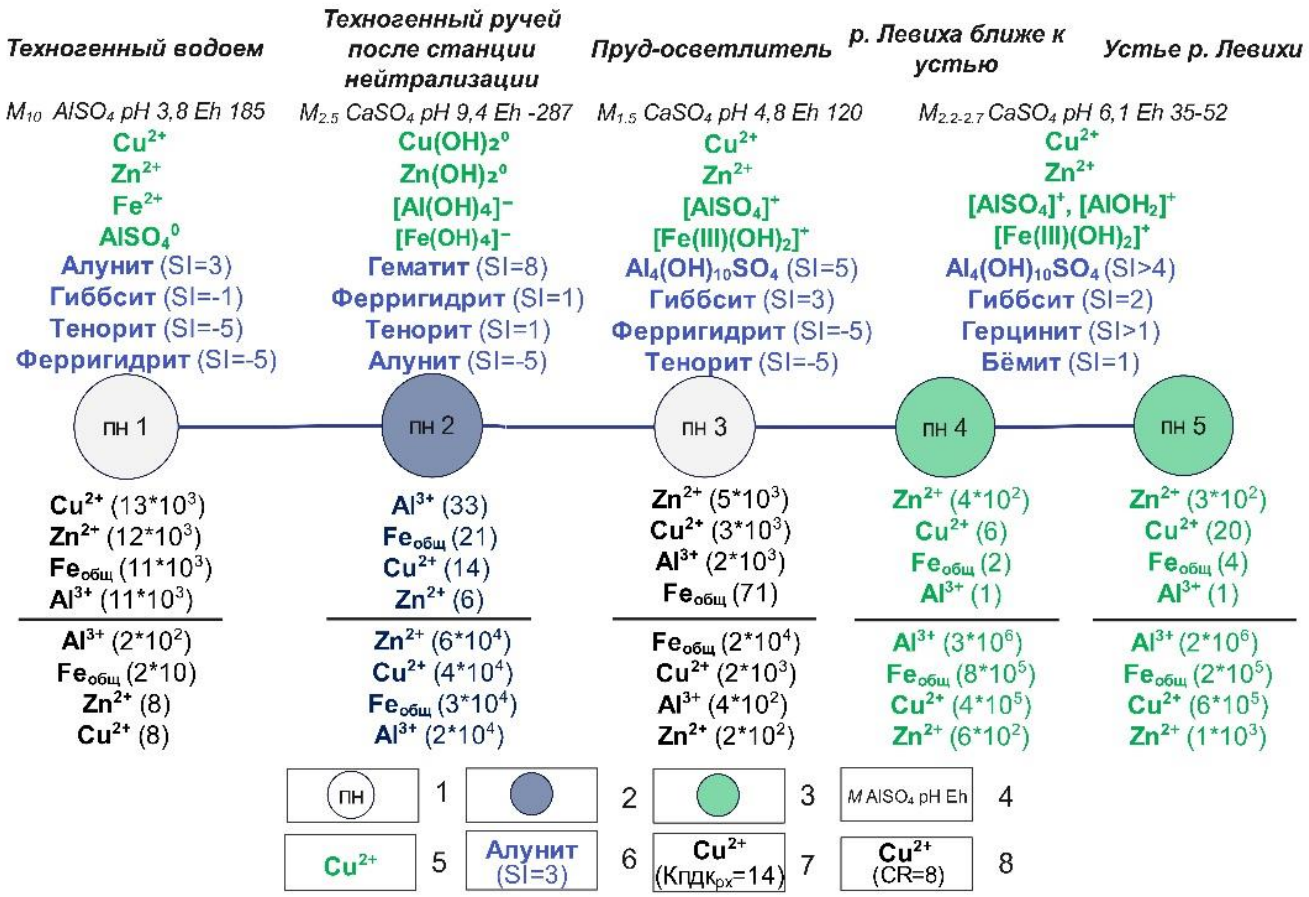



**Рисунок 6** – Формы миграции, индексы насыщения, коэффициент опасности и распределения *1 – пункт наблюдений; 2 – щелочной геохимический барьер; 3 – сорбционный геохимический барьер; 4 – химический состав воды в виде упрощенной формулы М.Г. Курлова; 5 – основные формы миграции элементов; 6 – индексы насыщения воды по отношению к минералам (SI); 7 – коэффициент опасности ($Кпдк_{рх}$); 8 – коэффициент распределения (CR).*

Исходный техногенный водоем (пн 1, pH=3,8) является зоной генерации миграционного потока, где $Cu^{2+}$, $Zn^{2+}$, $Al^{3+}$, $Fe^{2+}$ подвижны и мигрируют в катионной и сульфатной формах, что подтверждается пиковыми коэффициентами опасности, недонасыщением вод по гидроксидам металлов (SI от -1 до -6) и их минимальной аккумуляцией в донных отложениях.

Первый геохимический барьер – щелочной, формируется в техногенном ручье после нейтрализации (пн 2, pH=9,4), выступая техногенным фильтром. Резкое повышение pH трансформирует формы миграции металлов в гидроксокомплексы $[Cu(OH)_2]^0$, $[Zn(OH)_2]^0$, $[Al(OH)_4]^-$, $[Fe(OH)_4]^-$ и резко повышает SI оксидов и гидроксидов меди и железа при недонасыщении по сульфатным фазам. Это вызывает интенсивный гидролиз элементов, снижение коэффициентов опасности на

3-4 порядка и рост CR до $10^4$ л/кг за счет осаждения металлов в твердую фазу донных отложений (Рисунок 6).

Пруд-осветитель (пн 3, pH= 4,8) реализует пассивную очистку за счет изменения гидродинамического режима. Для $Fe^{3+}$ доминирующим становится $[Fe(OH)_2]^+$, а для $Al^{3+}$ возрастает роль гидроксидов при пересыщении по $[Al_4(OH)_{10}SO_4]$. Несмотря на недонасыщенность вод по катионам $Cu^{2+}$ и $Zn^{2+}$, их валовые концентрации снижаются, а CR железа резко возрастает до $2*10^4$ л/кг.

Второй геохимический барьер - сорбционный, формируется в устье р. Левихи (пн 4, 5, pH=6,1) при смешении стоков с речной водой и выполняет функцию природной доочистки. Пересыщение вод относительно гидроксидов $Al^{3+}$ и $Fe^{3+}$ обусловливает осаждение их малорастворимых соединений, выступающих в роли активных сорбентов. На этом сорбционном барьере происходит эффективное соосаждение и извлечение остаточных масс $Cu^{2+}$ и $Zn^{2+}$, что подтверждается увеличением CR для $Al^{3+}$, $Fe_{общ}$, $Cu^{2+}$ в донных отложениях до $10^5$-$10^6$ л/кг. Однако барьерная емкость природно-технической системы недостаточна, и на сбросе в гидросеть сохраняются экстремальные превышения ПДКрх.

Для повышения степени очистки на Левихинском руднике требуется перейти к более эффективным схемам, которые включают три стадии: 1) очистные сооружения с аэротенками; 2) радиальный отстойник с флокуляцией; 3) каскад прудов.

## Заключение

Основные результаты, отражающие научную и практическую значимость работы, сводятся к следующему:

1. Установлено, что несмотря на наличие природной геохимической аномалии в водных объектах бассейна р. Тагил, воздействие на качество речных вод определяется техногенными факторами и прежде всего влиянием Левихинского рудника.

2. Высокая степень загрязнения на Левихинском руднике обусловлена как технологическими факторами (минимальный свободный объем пруда-осветлителя), так и ограниченными возможностями природной очистки (незначительная площадь водосбора). На Дегтярском руднике, несмотря на больший расход шахтных вод, природный фактор способствуют более эффективной очистке кислых шахтных вод.

3. В настоящее время на Левихинском медноколчеданном руднике на поверхность разгружаются кислые (pH=2,3-3,9) высокоминерализованные воды сульфатного состава с повышенными концентрациями металлов. Несмотря на выраженную тенденцию к снижению содержаний компонентов в поверхностных водах (например, $SO_4^{2-}$), содержание основных загрязняющих веществ ($Fe_{общ}$, $Zn^{2+}$) остается выше, чем при эксплуатации рудника.

Подземные воды относятся в основном к сульфатным магниево-кальциевым или железо-алюминиевым водам. В районе горного отвода загрязнение подземных вод имеет локальный характер и приурочено к горному отводу (ствол шахты «Центральная» и отвал «Южный»). При действующей системе откачки КШВ не происходит масштабного загрязнения подземных вод.

4. Выявлены основные формы миграции макро- и микрокомпонентов (свободные ионы) и зоны их максимального осаждения. Физико-химическое моделирование показало пересыщение вод минералами оксидов, гидроксидов и сульфатов. Доказано, что осаждение таких элементов как, $Al^{3+}$, $Fe_{общ}$, $Cu^{2+}$, и их сорбция донными отложениями происходят в околонейтральной среде на сорбционном геохимическом барьере, где коэффициент распределения достигает величин порядка $10^5$-$10^6$ л/кг.

5. На основе комплексного анализа и термодинамических расчетов в пределах изучаемой ПТС: от выхода КШВ до сброса в гидросеть были выделены два геохимических барьера. Первый геохимический барьер - щелочной, непосредственно это существующая система очистки кислых шахтных вод. Второй – сорбционный, локализованный по руслу р. Левихи и обеспечивающий природную доочистку шахтных вод.

ПТС Левихинского рудника находится в стадии медленной самоочистки, созданные инженерные сооружения выполняют роль эффективных, но несовершенных геохимических барьеров. Русло реки принимает на себя функцию сорбционного барьера, аккумулируя загрязняющие вещества в донных отложениях.

Результаты работы позволяют прогнозировать экологическое состояние водных объектов в районах закрытых рудников и оптимизировать системы очистки. Для объектов с ограниченным природным потенциалом самоочищения (таких, как Левихинский рудник) разработано и научно обосновано принципиальное решение о необходимости перехода от двухступенчатой к более эффективной трехступенчатой системе очистки шахтных вод.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на переход от термодинамических расчетов к изучению кинетики и скоростей осаждения гипергенных фаз на геохимических барьерах. Кроме того, актуальной задачей остается проведение полевых работ и экспериментов для точной оценки емкостного ресурса и времени насыщения природного сорбционного барьера в долине р. Левихи, а также разработка селективных физико-химических методов извлечения ценных компонентов ($Cu^{2+}$, $Zn^{2+}$, $Al^{3+}$) из шлама пруда-осветлителя с их последующей утилизацией в индустрии строительных материалов.

## Список основных публикаций по теме диссертации

*Публикации в журналах, индексируемых международными реферативными базами данных Scopus, Web of Science и/или рекомендованных перечнем ВАК*

1. Рыбникова, Л. С. Закрытые медноколчеданные рудники: миграция химических элементов в водной среде и донных отложениях (на примере Левихинской группы месторождений, Средний Урал) / Л. С. Рыбникова, П. А. Рыбников, **В. Ю. Наволокина** // Записки Горного института. – 2026. – Т. 278. – С. 136-152.

2. Рыбникова, Л. С. Миграция химических элементов в подземных водах горнопромышленной территории / Л. С. Рыбникова, П. А. Рыбников, **В. Ю. Наволокина** // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335, № 9. – С. 137-147.

3. Рыбникова, Л. С. Оценка эффективности очистки кислых шахтных вод (на примере медноколчеданных рудников Среднего Урала) / Л. С. Рыбникова, П. А. Рыбников, **В. Ю. Наволокина** // Записки Горного института. – 2024. – Т. 267. – С. 388-401. – Parallel text: Rybnikova L. S. Assessment of the efficiency of acid mine drainage purification (using the example of copper-pyrite mines in the Middle Urals) / L. S. Rybnikova, P. A. Rybnikov, **V. Y. Navolokina** // Journal of Mining Institute. – 2024. – Vol. 267. – P. 388-401.

4. Рыбникова, Л. С. Реабилитация техногенных объектов отработанных медноколчеданных месторождений на примере Левихинского рудника (Средний Урал) / Л. С. Рыбникова, П. А. Рыбников, **В. Ю. Наволокина** // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334, № 8. – С. 137-150.

5. Рыбникова, Л. С. Снижение негативного влияния законсервированного медноколчеданного рудника Урала на состояние гидросферы / Л. С. Рыбникова, П. А. Рыбников, **В. Ю. Наволокина** // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 3. – С. 194-201. – Parallel text: Rybnikova L. S. Reducing Negative Impacts of Dormant Pyrite Copper Ore Mine on the Geosphere in the Urals / L. S. Rybnikova, P. A. Rybnikov, **V. Y. Navolokina** // Journal of Mining Science. – 2022. – Vol. 58. – P. 519-525.

6. Рыбникова, Л. С. Обоснование мероприятий по минимизации воздействия кислых шахтных вод на гидросферу (на примере Левихинского медноколчеданного месторождения, Свердловская обл.) / Л. С. Рыбникова, **В. Ю. Наволокина** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 5-2. – С. 245-256.

*Публикации в других научных изданиях и материалах конференций*

7. Рыбникова, Л. С. Оценка влияния затопленного Левихинского медноколчеданного рудника на качество поверхностных вод реки Тагил / Л. С. Рыбникова, П. А. Рыбников, **В. Ю. Наволокина** // Проблемы недропользования. – 2019. – № 3 (22). – С. 155-161.

8. Рыбникова, Л. С. Анализ воздействия затопленного Левихинского медноколчеданного рудника на р. Тагил / Л. С. Рыбникова, П. А. Рыбников, **В. Ю. Наволокина** // Уральская горная школа – регионам : междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург : сб. докл. – Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2019. – С. 565-566.

9. Rybnikova, L. Analysis and Feasibility of Measures to Minimize the Impact of Acid Mine Waters Discharged by Abandoned Copper-Sulphide Mines on Hydrosphere of the Tagil River / L. Rybnikova, **V. Navolokina** // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 177. – С. 04009.

10. Рыбникова, Л. С. Оценка состояния гидросферы в верховьях бассейна реки Тагил (Свердловская обл.) / Л. С. Рыбникова, **В. Ю. Наволокина** // Проблемы недропользования. – 2020. – № 2 (25). – С. 81-89.

11. Рыбникова, Л. С. Экологические проблемы гидросферы южной части бассейна р. Тагил / Л. С. Рыбникова, **В. Ю. Наволокина** // Уральская горная школа - регионам : междунар. науч.-практ. конф., апрель 2020 г., Екатеринбург : сб. докл. – Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2020. – С. 361-362.

12. Рыбникова, Л. С. Оценка состояния гидросферы природно-технических систем с использованием данных геоинформационного мониторинга (на примере бассейна р. Тагил, Средний Урал) / Л. С. Рыбникова, **В. Ю. Наволокина** // Подземная гидросфера : материалы Всерос. совещания по подземным водам Востока России с междунар. участием (XXIII Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока). – 2021. – С. 534-538.

13. Рыбникова, Л. С. Гидрогеоэкологические аспекты изучения техногенных отходов отработанного Левихинского медноколчеданного рудника (Свердловская область) / Л. С. Рыбникова, П. А. Рыбников, **В. Ю. Наволокина**, А. Н. Галин // Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения. – 2022. – Вып. 23. – С. 428-433.

14. Рыбникова, Л. С. Донные отложения пруда-осветлителя медноколчеданного рудника (Свердловская область) / Л. С. Рыбникова, П. А. Рыбников, **В. Ю. Наволокина** // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований : труды VI Конгресса с междунар. участием «Техноген – 2023», г. Екатеринбург. – 2023. – С. 55-57.

15. Рыбникова, Л. С. Исследование состава шлама нейтрализации кислых шахтных вод (на примере Левихинского медноколчеданного рудника, Свердловская область) / Л. С. Рыбникова, П. А. Рыбников, **В. Ю. Наволокина** // Геологическая

эволюция взаимодействия воды с горными породами : труды V Всерос. науч. конф. с междунар. участием им. проф. С. Л. Шварцева. – Томск : Изд-во Томского политехн. ун-та, 2023. – С. 301-304.

16. Рыбникова, Л. С. Изучение техногенных грунтов с использованием физико-химического моделирования (на примере Левихинского рудника, Свердловская область) / Л. С. Рыбникова, П. А. Рыбников, **В. Ю. Наволокина**, А. Ю. Смирнов // Сергеевские чтения. Массивы грунтов как жизнеобеспечивающий ресурс общества : материалы годичной сессии Науч. совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Псков, 27–28 марта 2025 г. – Москва : Геоинфо, 2025. – С. 114-118.

17. Rybnikova, L. S. Environmental implications of acid mine drainage in the Middle Urals, Russia / L. S. Rybnikova, P. A. Rybnikov, **V. Yu. Navolokina** // International Mine Water Association Conference 2025 – Time to Come : Proceedings of the International Mine Water Association Conference. – Braga : International Mine Water Association, 2025. – P. 850-855.