

*На правах рукописи*



**Рыбникова Людмила Сергеевна**

**ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД  
В ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ РАЙОНАХ СРЕДНЕГО УРАЛА  
НА ПОСТЭКСПЛУАТАЦИОННОМ ЭТАПЕ**

Специальность 25.00.07 – гидрогеология

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора геолого-минералогических наук

Москва-2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте горного дела Уральского отделения Российской академии наук

**Официальные оппоненты:** Плюснин Алексей Максимович, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН Геологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, заместитель директора по научной работе

Тагильцев Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет», заведующий кафедрой гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии

Язвин Александр Леонидович, доктор геолого-минералогических наук, закрытое акционерное общество "Гидрогеологическая и геоэкологическая компания "ГИДЭК" (ЗАО "ГИДЭК"), главный научный сотрудник

**Ведущая организация:** Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», г. Москва

**Защита диссертации состоится** «21» марта 2019 г. в 15 часов 00 минут в ауд. 4-73 на заседании диссертационного совета Д 212.121.01 при Российском государственном геологоразведочном университете по адресу: 117997, г.Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, д.23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного геологоразведочного университета.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью) просим направлять по адресу: 117997, г. Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, д.23, Российский государственный геологоразведочный университет, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.121.01.

Автореферат разослан «10» января 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор геолого-минералогических наук



С. Д. Ганова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы исследований.* Уральский регион долгие годы является ведущим горнопромышленным центром России. Рудные месторождения Урала (железные, медные, золотые, никелевые и другие) отрабатывались в течение десятков и сотен лет.

Завершение отработки большого числа месторождений в последние годы (как в мире, так и в России) привело к необходимости решения, наравне с задачами развития горной промышленности, проблем управления территориями, нарушенными многолетними горными работами, а также экологическими рисками в районах старых отработанных рудников на постэксплуатационном этапе. После прекращения добычи и закрытия горнодобывающего предприятия негативное воздействие на прилегающую территорию может продолжаться в течение длительного времени. Основные виды такого влияния практически идентичны в разных странах и не зависят от типа полезного ископаемого: изменяется состояние подземных и поверхностных вод, проявляется нестабильность земной поверхности, происходит выход токсичных газов или опасных веществ в окружающую среду. Считается, что за счет загрязненных шахтных вод отработанных рудников формируется самый крупный поток сточных вод на земле (С. *Wolkersdorfer*, 2008; В.Г. *Lottermoser*, 2012).

За последние десятилетия на Среднем Урале было закрыто большое количество рудников, что привело к серьезным гидрогеоэкологическим проблемам (С.Н. *Елохина*, 2014). На многих из затопленных рудников формируются кислые шахтные воды, в первую очередь на медноколчеданных - наиболее опасных по степени экологического влияния.

Состояние гидросферы в зонах техногенного воздействия горнодобывающих предприятий – результат предыдущей хозяйственной деятельности, в т. ч. массового и зачастую неконтролируемого закрытия предприятий горнопромышленного комплекса. Это негативно сказывается на экологической ситуации в старопромышленном Уральском регионе: по данным Государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2015 г.» около 10% от общего объема загрязняющих веществ поступает в реки на водосборах, где расположены как действующие, так и отработанные рудники.

Комплексное изучение особенностей формирования гидрогеологических условий горнопромышленных территорий Среднего Урала на постэксплуатационном этапе даёт ключ к пониманию закономерностей развития и преобразования подземной гидросферы, что является фундаментальной проблемой наук о Земле, связанной с изучением механизмов, процессов, факторов, этапов эволюции системы вода-порода под влиянием природных и техногенных факторов. Научный прогноз является основой выбора мероприятий, направленных на снижение негативных последствий, вызванных многолетней горной деятельностью, и устранения накопленного вреда окружающей среде в старопромышленных районах.

Актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью развития научно-методических и прикладных основ горнопромышленной гидрогеологии с целью выявления закономерностей преобразования подземной гидросферы при эксплуатации рудников и в постэксплуатационный период и на этой основе обоснования мероприятий, направленных на снижение экологических рисков для окружающей среды.

*Степень разработанности темы.* Вопросы изучения техногенных изменений гидрогеологических условий, гидродинамических, геомеханических физико-химических процессов, определяющих формирование гидросферы горнопромышленных территорий, представлены в трудах целого ряда ученых (В.А. Мироненко и др., 1980; Ф.И. Тютюнова, 1987; Ю.А. Норватов, 1988; Н.И. Плотников, 1989; О.Н. Грязнов и др., 1995; В.А. Мироненко и В.Г. Румынин, 1999; Б.В. Боровский и др., 2000; Р.Ф. Абдрахманов, В.Г. Попов, 2010). Применительно к горнопромышленным объектам на постэксплуатационной стадии эти проблемы представляют собой интенсивно развивающуюся область исследований (Э.Ф. Емлин, 1991; С.В. Палкин и С.С. Палкин, 2003; А.К. Имайкин, К.К. Имайкин, 2013; С.Н. Елохина, 2014; И.А. Тарасенко, 2014; А.С. Maest et al., 2006; С. Wolkersdorfer, 2008; D.K. Nordstrom, 2015).

Прекращение отработки месторождения и отключение водоотлива приводит к существенному изменению гидродинамической и гидрохимической обстановки в пределах горнопромышленных районов, сложившейся в течение десятилетий отработки. Здесь развивается ряд негативных процессов, таких как подтопление ранее освоенных прилегающих территорий; загрязнение подземных вод; формирование очагов сосредоточенной разгрузки кислых вод; образование техногенных водоемов, содержащих токсичные воды (А.Н. Рюмин, 1998; С.Н. Елохина, 2002, 2003, 2004, 2014; И.А. Четверкин, 2005; А.И. Вишняк, 2005; А.К. Имайкин, 2005; Ю.А. Норватов и И.Б. Петрова, 2009; О.А. Ягунова, 2010; И.А. Тарасенко, 2014).

Одним из ведущих источников негативного воздействия на окружающую среду горнопромышленных регионов являются техногенно-минеральные образования (Ю.С. Рыбаков, 1998; С.Б. Бортникова, 2001; М.А. Пашкевич, 2001; А.М. Плюснин, 2001; О.Л. Гаськова, 2005; В.Г. Lottermoser, 2012). На Урале наиболее масштабные из них формируются базовыми отраслями уральской промышленности - черной и цветной металлургией в районах добычи и переработки исходного сырья (В.Л. Яковлев и др., 1999; С.И. Мормил и др., 2002; А.Б. Макаров, 2007; С.В. Корнилков, 2016). Специфическим видом техногенно-минеральных ресурсов являются шахтные воды, которые благодаря наличию в их составе большого количества цветных, редких и редкоземельных элементов могут рассматриваться как потенциальные месторождения гидроминерального сырья или «жидкие руды» (О.В. Зотеев, С.В. Корнилков, 1995; О.Н. Грязнов и др., 1997; Л.С. Табаксблат, 1999; И.В. Шадрунова, Н.Н. Орехова, 2009; В.Н. Никонов и др., 2014; D.K. Nordstrom et al., 2017).

Геохимические особенности и физико-химические параметры гипергенных процессов в зонах техногенеза определяют интенсивность окислительного выветривания сульфидных минералов, что приводит к формированию кислотных вод с повышенным содержанием металлов и редкоземельных элементов (С.С.Смирнов, 1951; Э.Ф. Емлин, 1991; Л.К. Яхонтова и В.П. Зверева, 2007; Б.Н. Рыженко и др., 2015; С.Н. Alpers, D.K. Nordstrom, 1991; D.W. Blowes et al., 2014). Для зоны гипергенеза характерна повышенная геохимическая подвижность химических элементов, разрушение и переотложение минералов происходит в условиях равновесно-неравновесного состояния системы вода-порода (С.Л.Шварцев, 1998, 2007, 2008).

В результате происходит формирование водорастворимых вторичных минералов, или неосульфатов, которые включают соли продуктов выветривания сульфидов - гидроксисульфаты железа, магния, алюминия (Э.Ф. Емлин, 1991; Е.В. Белогуб, 2009; D.K. Nordstrom, С.Н. Alpers, 1999; J.M. Hammarstrom et al., 2005; R.T. Amos et al., 2015). Нестационарный характер изменения гидрохимических показателей зафиксирован на многих закрытых шахтах и получил название «first flush» или первый смыв, продолжительность которого составляет десятки лет и представляет собой большой экологический риск (P.L. Younger, 1997; C. Wolkersdorfer, 2008). Закономерности формирования этого опасного гидрогеохимического явления до конца не раскрыты.

Для оценки гидрогеохимических процессов и выявления причин и механизма образования кислых вод активно используется термодинамическое физико-химическое компьютерное моделирование (Н.Н. Акинфеев др., 2001; С.Б. Бортникова и др., 2006; Л.С. Табаксблат и Н.А. Бизяев, 2008; Б.Н. Рыженко и А.Е. Рябенко, 2013; С.Н. Елохина и Б.Н. Рыженко, 2014; В.П. Зверева и др., 2016; С.А.А. Appelo, D. Postma, 2005), в том числе для решения обратных задач на основании расчета массового баланса (D.K. Nordstrom, 2011).

*Цель работы.* Выявление закономерностей гидродинамических и гидрогеохимических процессов формирования подземных вод в горнодобывающих районах Среднего Урала на постэксплуатационном этапе, разработка методов и способов оценки их влияния на окружающую среду.

*Задачи исследования:*

1. Обоснование концептуальной гидродинамической модели горнопромышленной территории на основе анализа процессов, приводящих к формированию техногенной фильтрационной зональности подработанного массива.

2. Выявление закономерностей формирования гидрогеохимических систем в результате перераспределения химических элементов в процессе горнодобывающей деятельности и после ее завершения для условий горноскладчатого Урала.

3. Разработка модели формирования состава подземных вод и процессов их саморемедиации на основе физико-химического и гидрогеомиграционного моделирования.

4. Эколого-экономический анализ потенциальной ценности шахтных вод и ущерба водным объектам; обоснование целесообразности использования шахтных вод как источника гидроминерального сырья.

5. Оценка ресурсного потенциала и обоснование возможности использования месторождений питьевых подземных вод, запасы которых утверждались как элемент дренажной системы месторождения твердых полезных ископаемых.

*Объектом научного исследования* являются подземные воды, которые формируются в районах, нарушенных горными работами в пределах старопромышленных территорий Среднего Урала. Процессы формирования гидродинамического режима, химического состава, генезис и эволюция подземных вод под влиянием природных и техногенных факторов составляют *предмет исследования*.

*Фактический материал и личный вклад автора.* В диссертации изложены результаты многолетних теоретических и прикладных исследований, выполненных лично автором и при его непосредственном участии, в том числе в рамках фундаментальных научных исследований по программам РАН: «Научные основы эффективности природопользования, развития минерально-сырьевых ресурсов, освоения новых источников природного и техногенного сырья» (программа № 23 Президиума РАН); «Исследование и прогноз экосистемных изменений в районе функционирования предприятий горнометаллургического комплекса» (№ 15-12-5-22); «Разработка инновационных технологий добычи и рудоподготовки стратегического минерального сырья на основе геолого-технологической оценки месторождений и техногенных объектов» (Программы № 27, 11 Президиума РАН); Междисциплинарный проект «Освоение недр Земли: перспективы комплексного расширения и освоения минерально-сырьевой базы горнометаллургического комплекса Урала» (№ 12-М-23457-2041); «Исследование и прогноз динамики техногенной трансформации экосистем в районах функционирования горнометаллургического комплекса Урала» (проект РФФИ грант 13-05-96038); «Теоретические основы стратегии комплексного освоения месторождений и технологий их разработки с учетом особенностей переходных процессов в динамике развития горнотехнических систем» (№ 0405-2018-0015.); «Научные основы разработки методов, технологий и средств исследования поверхности и недр Земли, атмосферы, включая ионосферу, магнитосферу Земли, гидросферы и криосферы; численное моделирование и геоинформатика (инфраструктура пространственных данных и ГИС технологии)» (№ 0405-2015-0011).

В основу диссертационного исследования положены результаты систематизации обширного фактического материала об изменении гидросферы в районах влияния горнодобывающих объектов. Объекты исследования являются своеобразными природно-техногенными полигонами, на которых в результате нецеленаправленных экспериментов современного горного

производства проявляются специфические процессы формирования подземных вод.

Банк гидрогеохимических данных, собранных в процессе выполнения работы, включает более 1 тысячи анализов проб подземных и поверхностных вод, подотвальных вод, вод техногенных водоемов, карьерных озер, прудов-осветлителей, начиная с 80-х годов прошлого века. Так, для отработанных медноколчеданных месторождений Кировградской группы (Левихинского, Карпушихинского, Ломовского, Белореченского) имеется массив режимной информации, уникальный по продолжительности наблюдений, полноте опробования и достоверности их результатов (опробование проводится ежедневно с момента выхода подземных вод на поверхность). Мониторинг качества подземных вод в пределах водозаборов, запасы которых утверждались как часть системы дренажных мероприятий при отработке месторождений твердых полезных ископаемых, выполнялся в течение 40 лет ежеквартально.

Вклад автора состоит в формировании направлений исследований, постановке задач, их разработке и решении, анализе и обобщении полученных результатов. Автором лично выполнена обработка и интерпретация многолетних режимных наблюдений на горнодобывающих объектах, физико-химическое моделирование процессов в системе вода-порода в естественных и нарушенных условиях, количественная оценка содержания ценных компонентов в шахтных водах.

Все разделы диссертационной работы подготовлены автором лично. Основные положения и выводы диссертации опубликованы.

*Методы исследования.* В работе использован системный междисциплинарный подход, в котором сочетаются современные гидрогеодинамические, гидрогеохимические методы, экспериментальные работы и модельные расчеты. Диссертационное исследование основано на материалах собственных полевых работ, результатах изучения режима подземных вод в процессе отработки месторождений твердых полезных ископаемых и после ее завершения, а также обобщения обширной геологической, гидрогеологической и геохимической опубликованной и фондовой литературы.

Макрокомпонентный и микрокомпонентный состав подземных вод определялся лабораторными методами (химическим, атомно-абсорбционным, спектрофотометрическим, хроматографическим и др.), атомно-эмиссионным и масс-спектральными методами с индуктивно-связанной плазмой ИСП-МС (ICP-MS) на приборах iCAP-6500, Thermo Scientific и X-7, Thermo Elemental (США). Для решения вопросов формирования вторичных минералов и химического состава подземных вод применялось физико-химическое моделирование на основе программного кода Visual MINTEQ ver. 3.0/3.1 на основе MINTEQA2, который был разработан Агентством по охране окружающей среды США (*J.D. Allison et al., 1991*). Геофильтрационное и геомиграционное моделирование выполнялось с использованием программных кодов MODFLOW (*A.W. Harbaugh, M.G. McDonald, 1996*) и PMPATH (*W.H. Chiang, W. Kinzelbach 2001*).

*Достоверность научных результатов* обеспечена достаточной представительностью фактического материала и использованием современных методов и средств исследований, выполнением гидрогеохимических исследований высокоточными методами в аккредитованных лабораториях с привлечением аккредитованных лабораторий химико-аналитического центра Института промышленной экологии УрО РАН (г. Екатеринбург) и аналитического испытательного центра Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН (г. Черноголовка, Московская обл.), сходимостью теоретических моделей и фактических данных, апробацией основных научных положений на российских и международных совещаниях и конференциях, публикацией в рецензируемых журналах; выполнением заданий государственных научных программ.

*Научная новизна работы:*

- показано, что формирование подземных вод горнопромышленной территории определяется совокупностью геомеханических, гидрогеодинамических и гидрогеохимических процессов;
- установлено, что интенсивность водо- и массообмена после завершения добычи полезного ископаемого не снижается, а на первых этапах даже возрастает;
- впервые детально для широкого перечня компонентов изучены пространственно-временные закономерности изменения показателей химического состава техногенно-индуцированных водных объектов;
- разработана модель формирования качества подземных вод водосбора, нарушенного горными работами;
- проанализированы эколого-экономические аспекты ущерба гидросфере в сопоставлении с потенциальной извлекаемой ценностью компонентов шахтных вод (цветных металлов и редкоземельных элементов);
- выявлены ведущие процессы формирования ресурсов и качества месторождений подземных вод, эксплуатируемых дренажными системами, на постэксплуатационном этапе.

*Практическая значимость работы*

Результаты исследования позволили решить конкретные задачи территорий, нарушенных горными работами на Среднем Урале: оценить воздействие рудников на подземную и поверхностную гидросферу, прилегающую территорию; обосновать водоохранные мероприятия и программы мониторинга окружающей среды в районах обрабатываемых и затопленных рудников; разработать прогнозы самореабилитации территорий, нарушенных горными работами; оценить прогнозные ресурсы шахтных вод для целей использования их в качестве гидроминерального сырья; определить условия сохранения питьевого качества подземных вод после прекращения горных работ.

*Апробация работы.* Основные положения диссертации и результаты авторских исследований докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и региональных научных конгрессах, конференциях,

симпозиумах, в том числе международных: Международная научная конференция к 100-летию со дня рождения Б. И. Куделина (Москва, 2010); Международная научно-практическая конференция «Питьевые воды. Изучение, использование и информационные технологии» (Московская область, пос. Зеленый, 2011); XX, XXI, XXII Всероссийские совещания по подземным водам востока России (Иркутск, 2012; Якутск, 2015; Новосибирск, 2018); Международная научная конференция, посвящённая 60-летию основания кафедры гидрогеологии Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (Москва, 2013); II, III, IV Международная научно-практическая конференция «Экологическая безопасность горнопромышленных регионов» (Екатеринбург, 2014, 2015, 2016, 2017); XIII международная конференция «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр» (Тбилиси, 2014); 2-я, 3-я Всероссийская конференция с международным участием «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами» (Владивосток, 2015; Чита, 2018); Девятая международная конференция «Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире (ГЕОРИСК-2015)» в рамках Международного конгресса «Глобальная и национальная стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий» (Москва, 2015); Восемнадцатые и Девятнадцатые Сергеевские чтения (Москва, 2016, 2017); 15-th Water-Rock Interaction International Symposium, WRI-15 (Portugal, Évora, 2016); 100+ Forum Russia 2016. V Международная конференция «Проектирование, строительство и эксплуатация комплексов подземных сооружений» (Екатеринбург, 2016); 13-th International Mine Water Association Congress. Mine Water & Circular Economy (Finland, Lappeenranta, 2017); XIV всероссийские чтения памяти академика А. Е. Ферсмана по проблемам «Рациональное природопользование» и «Современное минералообразование» (Чита, 2018).

*Публикации.* По теме диссертации опубликовано 60 работ, из них 2 – в коллективных монографиях, 19 - статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК. Соавторы статей не имеют возражений против защиты данной работы.

*Структура и объем работы.* Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, содержит 306 стр. текста, 63 рисунка, 40 таблиц. Список литературы включает более 500 источников.

В *первой главе* «Постановка проблемы и состояние ее изученности» приведены сведения об эколого-гидрогеологических проблемах, которые возникают на постэксплуатационном этапе в горнопромышленных районах; освещено современное состояние исследований по проблеме; формулируются основные задачи исследования. Во *второй главе* «Основные региональные особенности Среднего Урала. Общая гидрогеоэкологическая характеристика района» рассмотрены гидрогеологические условия района, техногенное воздействие горнодобывающей промышленности и гидрогеоэкологические последствия горных работ на постэксплуатационном этапе. В *третьей главе* «Формирование гидродинамических условий в районах отработываемых и ликвидируемых рудников» приведены сведения о гидродинамических

процессах, сопровождающие затопление подземных рудников, обосновываются принципы геофильтрационной схематизации области гидродинамического воздействия рудника, рассматриваются особенности выполнения прогноза скорости и масштабов подтопления эмпирическими, аналитическими, численными методами. На материалах третьей главы обосновывается *первое защищаемое положение*. В четвертой главе «Гидрогеохимия обрабатываемых и затопленных медноколчеданных рудников» освещаются проблемы формирования кислых шахтных вод, закономерности формирования гидрохимического режима в районе Левихинского рудника, особенности распределения редкоземельных элементов в техногенной зоне гипергенеза, приводятся результаты физико-химического и гидрогеомиграционного моделирования и количественный прогноз нестационарного процесса формирования состава подземных вод. На материалах четвертой главы обосновывается *второе защищаемое положение*. В пятой главе «Эколого-экономическая оценка водных объектов старопромышленной территории» приводятся сведения о методах очистки и обработки шахтных вод, анализируется состав шахтных воды как источника гидроминерального сырья и как источник загрязнения гидросферы; выполняется сопоставление потенциальной ценности шахтных вод и ущерба от загрязнения водных объектов. На результатах исследований, приведенных в пятой главе, обосновывается *третье защищаемое положение*. В шестой главе «Формирование месторождений питьевых подземных вод при добыче полезных ископаемых на горно-складчатом Урала» анализируется опыт использования подземных вод для питьевого водоснабжения при отработке и консервации месторождений твердых полезных ископаемых, обосновываются закономерности формирования ресурсов и качества месторождений подземных вод в зоне ведения горных работ, оценивается эколого-геохимическое состояние подземных вод и возможность их использования после прекращения горнодобывающей деятельности. На материалах шестой главы обосновывается *четвертое защищаемое положение*.

## ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

**Первое защищаемое положение.** Закрытые (затопленные) рудники являются аномальными в гидрогеодинамическом и гидрогеохимическом аспекте объектами. Большие глубины и применение систем отработки с обрушением кровли выработанного пространства приводят к активизации геомеханических процессов и формированию техногенной трещиноватости, которая определяет емкость массива горных пород. Емкость (пустотность) выработанного пространства составляет не более 20%. Подтопление территорий после остановки водоотлива зависит от размеров нарушенной горными работами территории и питания, которое поступает в ее пределах после прекращения водоотлива.

В конце прошлого–начале этого века десятки горнодобывающих предприятий на Среднем Урале прекратили добычу, в том числе медноколчеданные рудники (рис. 1). После прекращения водоотлива на территории ряда городов и поселков Свердловской области (таких как Артемовский, Верхняя Пышма, Крылатовский, Нижний Тагил, Полевской и др.) возникли эколого-гидрогеологические проблемы: подтопление населенных пунктов, выход кислых вод на поверхность, активизация процессов карстообразования и сдвижения, загрязнение поверхностной и подземной гидросферы, почв (С.Н. Елохина, 2014).

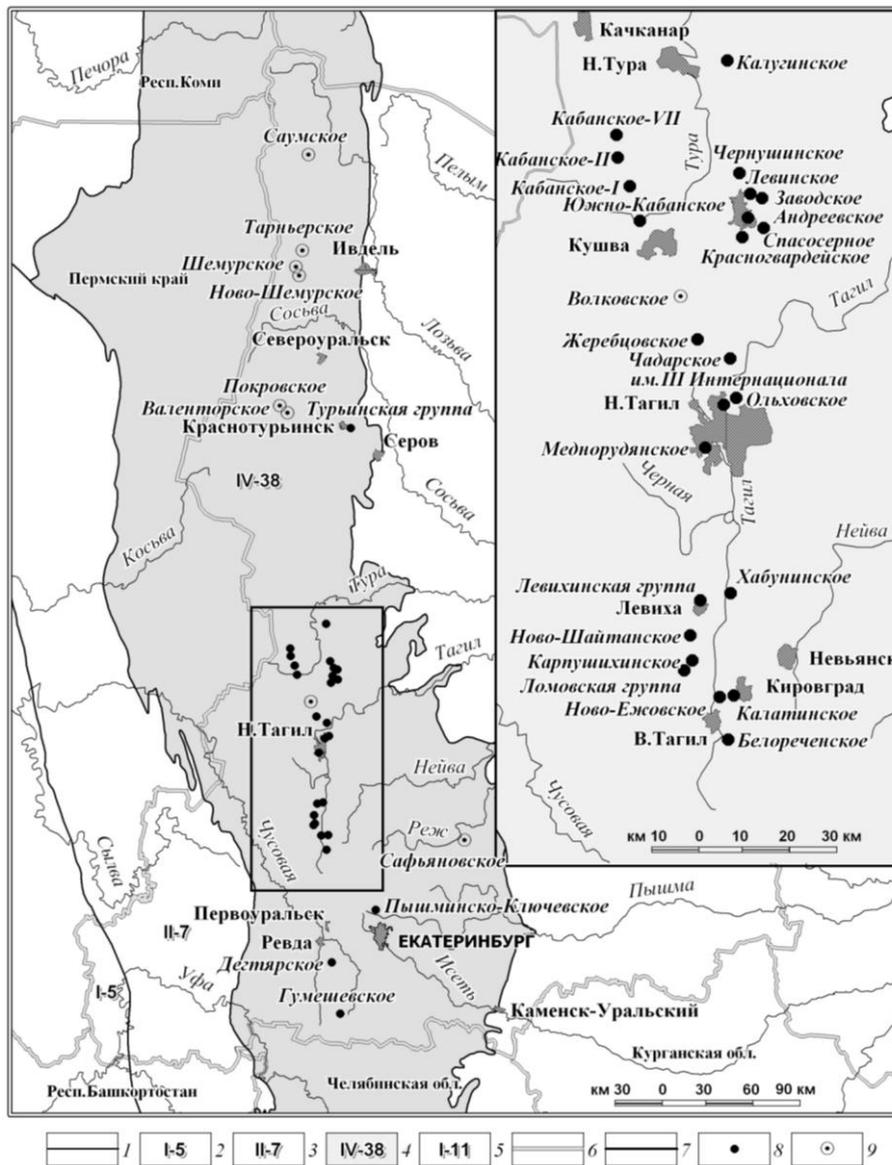


Рис. 1. Схема размещения отрабатываемых и законсервированных медноколчеданных месторождений Свердловской области и врезка на центральную часть (использованы данные (С.И. Мормилъ и др., 2002) с изменениями и дополнениями автора). 1 – граница между бассейнами подземных вод; 2 – Восточно-Русский артезианский бассейн; 3 – Предуральский предгорный артезианский бассейн; 4 - Большеуральская гидрогеологическая складчатая область; 5 – Западно-Сибирский артезианский бассейн; 6 – административные границы; 7 – врезка на центральную часть; медноколчеданные месторождения: 8 – находящиеся на мокрой консервации (ликвидации), 9 – отрабатываемые

Несмотря на наличие хорошо проработанных моделей, использующихся при гидрогеологических исследованиях в горном деле (эмпирических, аналитических, численных), для конкретного объекта прогноз изменения гидрогеологических условий, оценка балансовых составляющих в области гидродинамического влияния рудников, прогноз последствий прекращения водоотлива и оценка скорости заполнения депрессионных воронок в районе отработанных шахт всегда проблематичны независимо от сложности используемого аппарата. Как правило, закономерности, установленные опытным путем, являются основой создания концептуальных моделей, для разработки которых необходима геофильтрационная схематизация области гидродинамического воздействия рудника.

Месторождения полезных ископаемых в Уральском регионе развиты главным образом в пределах горноскладчатого Урала, преимущественно на восточном склоне. В геолого-структурном плане это Центрально-Уральское поднятие, Тагило-Магнитогорский прогиб, Восточно-Уральское поднятие. В гидрогеологическом отношении - это Большеуральская гидрогеологическая складчатая область. Подземные воды образуют систему бассейнов гидравлически связанных потоков подземных вод, в пределах которых площадь распространения и питания подземных вод совпадает, а основным коллектором подземных вод является региональная зона трещиноватости коренных скальных пород в верхней части земной коры (палеозойских и протерозойских осадочных, метаморфических и вулканогенных) (*В.П. Новиков, 1989*).

На медноколчеданных рудниках Среднего Урала при подземной добыче полезного ископаемого, как правило, используется технология отработки с обрушением кровли выработанного пространства. В пределах горного отвода образуются провалы глубиной десятки метров, зоны обрушения и сдвижения площадью в десятки и сотни гектаров (рис. 2). Площадь на земной поверхности, подвергающаяся сдвигению, в несколько раз превышает размеры отработанного пласта (*А.Д. Сашурин, 1999*) (рис. 3).

*Геофильтрационные свойства* скальных пород в естественных условиях определяются характеристиками открытых проницаемых трещин (их густотой, раскрытием и степенью взаимосвязи). Развитие трещиноватости в скальных массивах связано с действием современных горизонтальных тектонических напряжений и происходит, преимущественно, в пределах приповерхностной зоны хрупкой деформации (*С.Н. Тагильцев, 2001*). В процессе отработки месторождения появляется дополнительный фактор - сложное напряженно-деформированное состояние массива, которое формирует фильтрационную зональность подработанного массива, приводит к изменению фильтрационных, емкостных свойств и условий питания.

В подработанном массиве по степени водопроницаемости выделяются три характерные зоны (рис. 3): зона обрушений (сквозных каналов); зона водопроводящих трещин; зона наведенной трещиноватости (зона плавного сдвижения пород). В массивных скальных породах развитие зон деформации затрагивает всю толщу пород; в пластичных породах в пределах нижних двух

зон формируется зона водопроявляющих трещин, в зоне плавных сдвижений могут сохраняться водоупорные свойства разделяющих толщ (Гидрогеологические..., 1976). Согласно данным геолого-маркшейдерских работ во второй зоне происходит раскрытие трещин примерно в 5-10 раз (по сравнению с естественными условиями) (Д.М. Казикаев, 2005; А.В. Крутиков, Д.А Менгель, 2014).

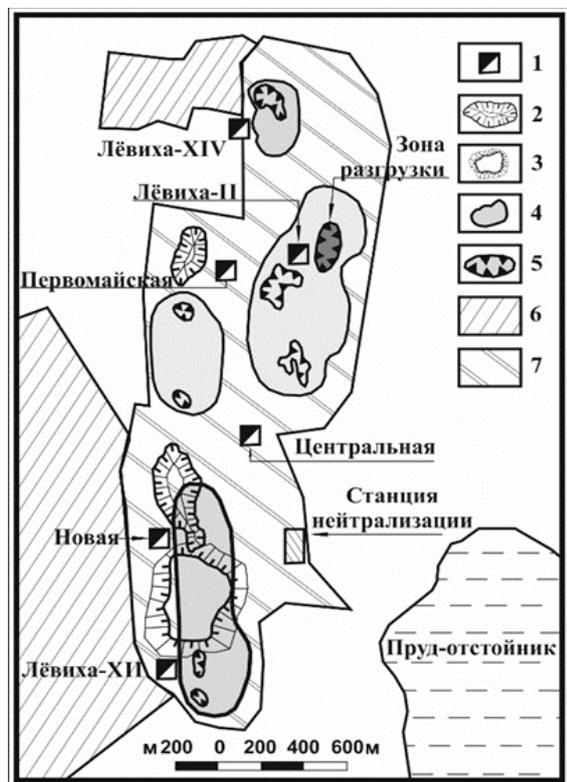


Рис. 2. Схема расположения техногенных объектов, определяющих гидродинамическую обстановку в районе Левихинского рудника. 1 – шахта и ее наименование; 2 – карьер; 3 – отвал; 4 – зона обрушения и сдвижения; 5 – провал; 6 – селитебная зона; 7 – горный отвод

Трещинная пористость ( $n$ ) находится в линейной зависимости от раскрытия ( $b$ ) и густоты трещин ( $\Gamma$ ):  $n = b\Gamma$  (Б.В. Боревский и др., 1976). Для чисто трещиноватых пород трещинная проницаемость ( $k$ ) имеет степенную зависимость от трещиноватости:  $k = b^a\Gamma$ , где степенной параметр  $a=3$  для трещин одинакового раскрытия (Е.С. Ромм, 1985) и может меняться в интервале  $1 < a < 3$  в случае, если раскрытие и густота трещин имеют корреляцию; при приблизительно равной вариации логарифмов густоты трещиноватости и раскрытия трещин показатель степени равен 2,0–2,5 (С.П. Поздняков, 1996). Исходя из этого, было выполнено параметрическое обоснование геофильтрационной модели массива горных пород, результаты которого представлены в таблице 1 (Л.С. Рыбникова, П.А. Рыбников, 2013).

При отработке рудников с водоотливом величина инфильтрационного питания по сравнению с естественными условиями возрастает до 4–6,5 л/с\*км<sup>2</sup>,

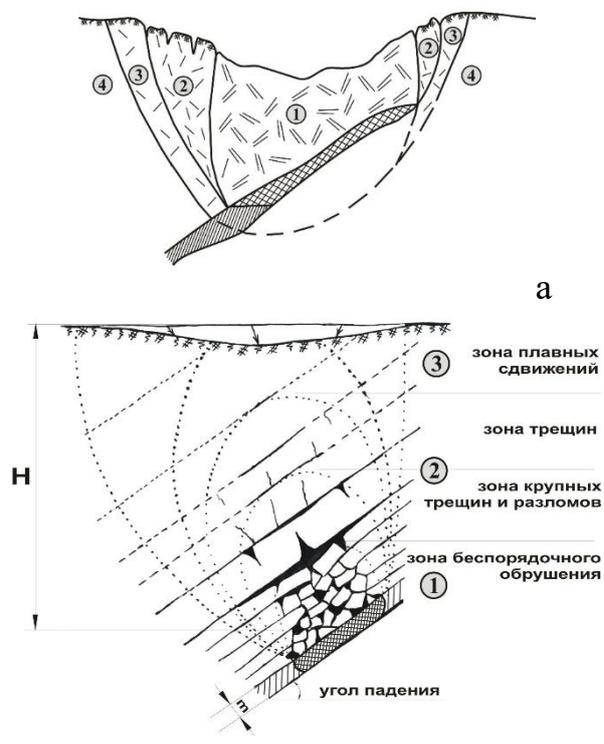


Рис. 3. Модель массива горных пород в области влияния обрабатываемых и ликвидируемых рудников: а – при массивном строении (скальные породы); б – при слоистом строении (пластичные породы)

однако и после затопления рудника модуль подземного стока выше, чем в ненарушенных условиях, преимущественно за счет участков полного поглощения атмосферных осадков в подработанных зонах (табл. 2) (А.Л. Фельдман и др., 2010; Л.С. Рыбникова, П.А. Рыбников, 2013). Именно это и является причиной подтопления прилегающих территорий после остановки рудничного водоотлива и формирования областей с более высоким по сравнению с естественными условиями положением уровня подземных вод (рис. 4).

Таблица 1. Геофильтрационные параметры массива горных пород в области гидродинамического влияния рудников

Наименование зоны	Характер трещиноватости	Процесс формирования трещиноватости	Параметры		
			$k_f$ , м/сут	$n$ , д.ед.	$w$ , мм/год
Зона обрушения	сквозные каналы и крупные трещины разрыва	появление новых, расширение естественных трещин	$> m \cdot 10^3$	$> p \cdot 10^{-1}$	100 ÷ 500
Зона трещин	трещины разрыва и расслоения	увеличение раскрытия трещин; соединение взаимно перпендикулярных систем трещин	$> m \cdot 10^1$	$p \cdot 10^{-1}$ $\div p \cdot 10^{-2}$	
Зона плавных сдвижений	наведенная трещиноватость	раскрытие отдельных трещин	$\geq m$	$\geq p \cdot 10^{-3}$	
Ненарушенные условия	региональная трещиноватость; тектонические нарушения и контакты пород	выветривание, разуплотнение; тектоника	$\leq m \cdot 10^{-1}$	$\sim p \cdot 10^{-4}$	15 ÷ 60
			$m$	$\sim p \cdot 10^{-3}$	

Примечания:  $k_f$  – коэффициент фильтрации;  $n$  – пористость (трещиноватость);  $w$  – инфильтрационное питание;  $m, p$  – значения от 1 до 9.

Таблица 2. Изменение составляющих водоотлива (дренажа) и инфильтрационного питания на разных этапах развития Левихинского рудника (результаты численного моделирования)

Год отработки/ликвидации рудника	Расход водоотлива (м <sup>3</sup> /сут)	Составляющие водоотлива (м <sup>3</sup> /сут)		Модуль подземного стока*** (л/с*км <sup>2</sup> )
		увеличение питания*	сокращение разгрузки**	
1958 – 1-й этап отработки	3189	2439 (1183)	740	3,0
2002 – завершающий этап отработки	6789	3703 (1665)	3089 (1153)	4,5
2007 – ликвидация (мокрая консервация)	2391	2372 (1665)	9 (-401)	2,0

Примечания: \* в скобках – в пределах зон обрушения; \*\* в скобках – из (+)/в (-) пруд-отстойник; \*\*\* в естественных условиях 0,88 л/с\*км<sup>2</sup>.

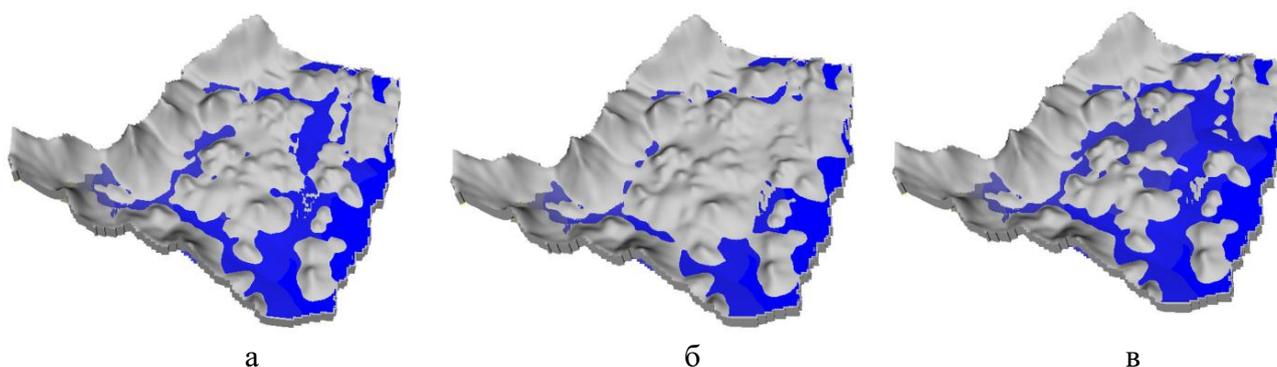


Рис. 4. Подтопление территории водосбора Левихинского рудника (синим цветом показаны участки, где глубина залегания уровня подземных вод менее 1 м; серый цвет – цифровая модель рельефа): а – в естественных условиях (1928 год); б - при работе водоотлива (2002 год), в - после прекращения водопонижения (2007 год). Масштаб 1:400000. Результаты численного моделирования (Л.С. Рыбникова и др., 2011)

Процесс восстановления уровня подземных вод после прекращения водоотлива в гидродинамическом плане идентичен процессу восстановления уровня после остановки откачки (В.М. Шестаков, 1995). Однако время откачки  $t_o$  должно корректироваться с учетом закономерностей формирования стационарного режима, когда по мере вовлечения всех источников формирования эксплуатационных ресурсов прекращается расширение депрессионной воронки, а  $Qt_o$  – не общий объем воды, откачанной за весь период эксплуатации, а расход водоотлива, обеспеченный сработкой емкостных запасов и естественными ресурсами, что соответствует времени стабилизации  $t_c$ . формирование стационарных условий происходит через относительно небольшой промежуток времени (как правило 1-3 года).

Тогда восстановление уровня после остановки водоотлива с учетом заполнения шахтного ствола может быть описано уравнением (Л.С. Рыбникова, П.А. Рыбников, 2017)

$$t_b = \frac{Qt_c}{4\pi TS} + \frac{\alpha \omega \Delta H}{Q}, \quad t_c = \frac{Q\mu}{2,25\pi\varepsilon T}, \quad (1)$$

где  $t_b$  - время после остановки водоотлива (сут),  $Q$  – установившийся перед отключением расход водоотлива ( $\text{м}^3/\text{сут}$ );  $T$  – проводимость пласта ( $\text{м}^2/\text{сут}$ );  $S$  – понижение уровня (м);  $\varepsilon$  – инфильтрационное питание ( $\text{м}/\text{сут}$ );  $\mu$  – гравитационная (или упругая для напорных пластов) водоотдача;  $\omega$  – площадь поперечного сечения горной выработки ( $\text{м}^2$ );  $\Delta H$  – высота подъема уровня воды в стволе (м);  $\alpha$  – эмпирический коэффициент, зависящий от количества горных выработок.

Продолжительность затопления рудников Среднего Урала, как правило, составляет 4-6 лет, скорость затопления от 30-40 м в месяц в начале процесса до 5–10 м в месяц и менее 1 м на завершающем этапе (рис. 5). В течение первых 1,5 лет повышение уровня происходит практически по линейному закону, 90% водопритока расходуется на заполнение шахтных выработок. Далее темп заполнения депрессионной воронки снижается, график повышения уровня принимает параболический вид, 90% водопритока расходуется на заполнение емкости пород. Распределение объемов воды, пошедших на заполнение горных

выработок и емкость массива горных пород, составляет 20% и 80%, соответственно (Л.С. Рыбникова, П.А. Рыбников, 2017).

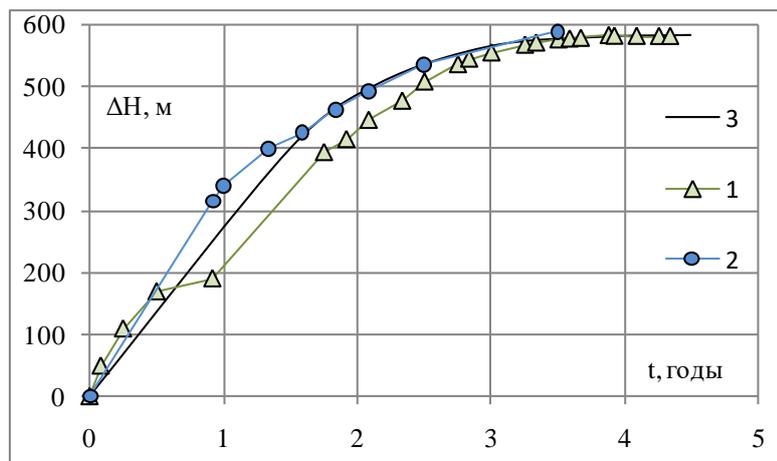


Рис. 5. График восстановления уровня в шахтных стволах. 1, 2 фактические данные (Вишняк А.И. и др., 2005; А.Л. Фельдман и др., 2008; С.Н. Елохина, 2014): 1 - Дегтярский; 2 - Левихинский рудник; 3 - расчет по зависимости (1)

Поток подземных вод на участке водораздел – река может быть схематизирован как линейный в плане водораздельный (полуограниченный) инфильтрационный поток с кусочно-постоянными значениями проводимости ( $T$ , м<sup>2</sup>/сут) водоносного горизонта ( $T=k \cdot m$ ,  $k$  - коэффициент фильтрации, м/сут,  $m$  – мощность горизонта, м) и инфильтрационного питания ( $w$ , м/сут) для ленты тока постоянной ширины (или слабо деформируемой в плане).

В этом случае расчетные зависимости для оценки распределения напоров и расходов могут быть составлены с использованием метода фрагментов для модели планового потока (В.М. Шестаков, 1995). Масштаб и интенсивность подтопления зависят от размеров нарушенной горными работами территории ( $L_2$ ), питания, поступающего в ее пределах после прекращения водоотлива ( $w_2^*$ ), фильтрационного сопротивления приречного участка ( $L_3/T_3$ ) и описывается выражением (Л.С. Рыбникова и др., 2011)

$$\Delta H = H^* - H = (w_2^* - w_2)L_2(L_3 - x_3)/T_3, \quad (2)$$

где  $H$ ,  $H^*$  – уровень подземных вод в естественных условиях и после прекращения водоотлива, соответственно. Расход потока подземных вод ( $q_p^*$ , м/сут), поступающего от водораздела и шахтного поля к дрене, по сравнению с естественными условиями ( $q_p$ ) возрастает пропорционально размерам нарушенной зоны и увеличению питания в ее пределах

$$q_p^* - q_p = (w_2^* - w_2)L_2. \quad (3)$$

Для условий и параметров, характерных для Среднего Урала, выполнена оценка последствий затопления отработанных рудников. В пределах ленты тока постоянной ширины в направлении от водораздела к дрене формирование области повышенного питания в зонах обрушения приводит к подъему уровня подземных вод на 1-5 м по сравнению с естественными условиями и вызывает подтопление прилегающих территорий после прекращения шахтного водоотлива (рис. 6).

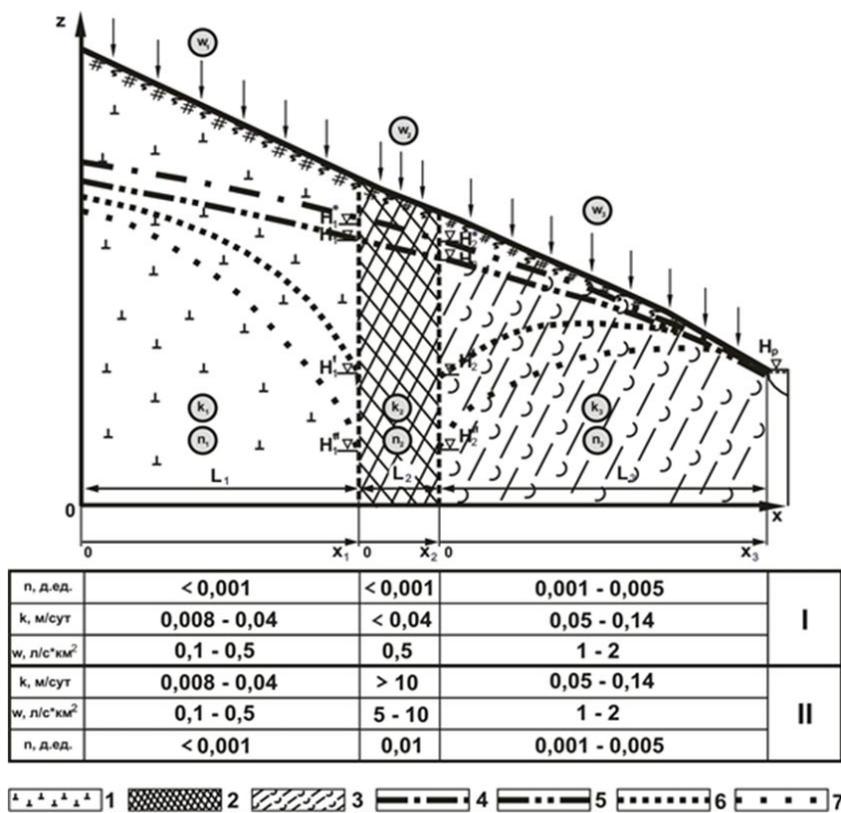


Рис. 6. Формирование гидродинамической обстановки в области воздействия рудника. Таблица – параметры пласта на этапах: I - естественные (ненарушенные) условия, II - нарушенные условия. Условные обозначения: породы: 1 - магматические; 2 - рудосодержащие (зона обрушения и сдвижения); 3 - метаморфические; уровень подземных вод: 4 - после прекращения водоотлива (мокрая консервация); 5 - в естественных (ненарушенных) условиях; 6 - на первом этапе отработки; 7 - на втором этапе отработки

Оценка балансовых составляющих в области затопленного рудника показывает, что, например, в районе затопленного Левихинского рудника скрытое поступление загрязнения в поверхностные водотоки подземным путем сопоставимо с массой вещества в реке Тагил (Рыбникова и др., 2012). Так, дополнительное питание, формирующееся в пределах зон обрушения и сдвижения, оценивается величиной порядка 10 л/с (площадь 0,3 км\*3,0 км, инфильтрация 5–10 л/с\*км<sup>2</sup>); концентрации меди и цинка в шахтных водах техногенного водоема, образовавшегося в краевой части зоны обрушения, 30–1000 мг/дм<sup>3</sup>; соответственно, массовый расход, поступающий с подземными водами на этом участке в поверхностные водотоки, может достигать по основным загрязняющим компонентам (меди и цинку) 1–30 тонн в год.

Эти результаты хорошо коррелируют с прогнозными расчетами, выполненными с использованием численной математической модели (А.Л. Фельдман и др., 2004; Л.С. Рыбникова и др., 2012) и свидетельствуют о том, что гидродинамическая модель планового потока может использоваться для оценки степени опасности подтопления территории и масштабов скрытого загрязнения гидросферы.

Основные принципы геофильтрационной схематизации для горнопромышленных территорий должны включать предварительный анализ геомеханических процессов, которые приводят к деформированию массива горных пород и формируют техногенную фильтрационную зональность подработанного массива; обоснование характеризующих их параметров, которые определяют направление, интенсивность, скорость массопереноса в зависимости от этапа освоения горного объекта, анализ особенностей

изменения гидрогеологических условий после остановки шахтного водоотлива и др. На основе выполненной геофильтрационной схематизации проводится обоснование концептуальной гидродинамической модели горнопромышленной территории на постэксплуатационном этапе.

Методика прогноза формирования потока подземных вод на постэксплуатационном этапе должна основываться на комбинировании расчетных методов: аналитических – для оперативной оценки скорости затопления, модели планового потока – для определения предельного положения уровня в стационарных условиях. Использование численного геофильтрационного моделирования позволяет детализировать водно-балансовые составляющие формирования гидродинамической обстановки в районе затопленных рудников, определить конкретные участки подтопления зоны выхода шахтных вод на поверхность, скорость заполнения депрессионной воронки.

**Второе защищаемое положение.** При отработке медноколчеданных месторождений Среднего Урала в результате нарушения сплошности пород, их измельчения, увеличения поверхности взаимодействия при практически полном поглощении атмосферных осадков, обогащенных кислородом, формируется техногенная зона гипергенеза - сернокислотная кора выветривания, в ходе эволюции которой образуются различные минеральные новообразования (кристаллогидраты сульфатов, гидроксиды, гидроокислы). После заполнения депрессионной воронки эти зоны становятся источником выноса ранее накопленного кислотного потенциала, являясь практически неограниченным поставщиком сульфатов, железа, цветных металлов и других элементов в подземные воды, что приводит к низким темпам самореабилитации горнопромышленных территорий.

Разработка колчеданных и сульфидизированных месторождений (в первую очередь золота, серебра, меди, цинка, свинца, никеля) провоцирует появление кислых шахтных вод. Их спецификой является широкий диапазон изменения рН, высокие концентрации сульфат-ионов, а также цветных металлов и железа, содержание которых превышает типичные для подземных вод катионы - кальций, магний, натрий. На характер формирования состава дренажных вод оказывают влияние многие факторы: геологические (тип и строение месторождения); геохимические (состав рудного тела и вмещающих пород; наличие, количество и виды сульфидных минералов, их форма и размеры, присутствие и объем потенциально нейтрализующих минералов); гидрогеологические (фильтрационные свойства зоны аэрации и водоносного горизонта, скорость движения подземных вод, расход, направление потока, интенсивность инфильтрации); климатические (осадки, температура, влажность); технологические (технология отработки, интенсивность ведения добычных работ, методы переработки полезного ископаемого, эффективность извлечения компонентов, стадия освоения).

Формирование кислых шахтных вод связано с растворением сульфидных минералов, находящихся в зоне оруденения. При понижении уровня подземных вод на десятки и сотни метров при организации водоотлива на руднике формируется техногенная зона аэрации, кислород получает свободный доступ в осушенную часть пород, изменяются окислительно-восстановительные условия. Это приводит к активизации процессов окислительного выветривания пирита и других сульфидных минералов. Кроме кислорода важным окислителем является  $Fe^{3+}$ , особенно для сульфидов с соотношением металл/сера, равным единице, типа сфалерита, халькопирита (J.M. Hammarstrom et al., 2005). В присутствии бактерий скорость сернокислотного выветривания возрастает в десятки и сотни раз (Л. К Яхонтова, А. П. Груднев, 1978; Б.Д Халезов, 2009).

Самые кислые из известных шахтных вод обнаружены в горных выработках шахты Ричмонд отработанного медноколчеданного месторождения Айрон Маунтен (Richmond Mine of Iron Mountain, Калифорния, США) (C.N. Alpers, D.K. Nordstrom, 1991). Зафиксированные значения pH ниже нуля, содержание растворенных металлов и железа - десятки граммов на литр. В отходах добычи сульфидного месторождения Шерит-Гордон (Sherritt-Gordon, Канада) поровые воды ненасыщенной зоны содержат до 280 г/л сульфатов, 129 г/л железа, 55 г/л цинка, 7,2 г/л алюминия, 1,6 г/л меди (M.C. Moncur, 2015).

В техногенной зоне аэрации (в открытых горных выработках, зонах обрушения, отвалах, в бортах карьеров) активно протекают процессы гипрегенеза, образуется техногенная сернокислотная кора выветривания. В горных выработках установлено наличие значительного количества вторичных сульфатов - кристаллогидратов сульфатных солей металлов, таких как (в порядке образования) мелантерит, халькантит, кокимбит, ромбоклаз, копиапит, галотрихит и др. (месторождение Айрон Маунтен (Richmond Mine of Iron Mountain, Калифорния, США) (D.K. Nordstrom, C.N. Alpers, 1999).

Развитие сернокислотной коры выветривания происходит постепенно, в несколько этапов. На начальной стадии первичные минералы только начинают изменяться. Новообразований бывает мало, и они представлены главным образом сульфатами, частично оксидами и гидроксидами. На средней стадии окисления вторичные минералы преобладают над первичными, но в рудах сохраняются наиболее устойчивые сульфиды. Развитие зоны окисления – это последовательная непрерывная цепь изменений рудного вещества, которое в результате принимает наиболее устойчивые формы в зоне окисления (С.С. Смирнов, Е.В. Белогуб, 2009; C.N. Alpers, D.K. Nordstrom, 1991; M.C. Moncur, 2015).

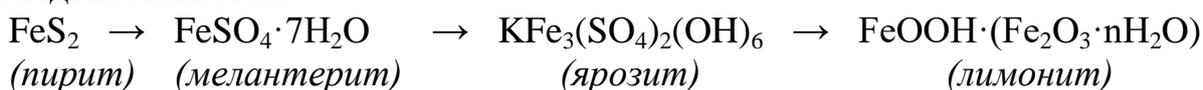
Исследование закономерностей формирования состава подземных вод и твердых фаз, выпадающих в осадок в процессе окисления сульфидов, было выполнено автором на примере идеализированного случая растворения пирита в воде, находящейся в равновесии с кислородом воздуха, при температуре  $t=10^{\circ}C$  (моделирование выполнялось с использованием программного кода Visual MINTEQ). Предполагалось, что система включает следующие

компоненты:  $\text{H}^+$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2(\text{aq})$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HSO}_4^-$ ,  $\text{HS}^-$ ,  $\text{H}_2\text{S}(\text{aq})$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{FeSO}_4^-$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{FeS}_2$  (пирит),  $\text{Fe}(\text{SO}_4) \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (мелантерит). Образующийся раствор имеет кислую реакцию ( $\text{pH}=0,4$ ) и пересыщен по отношению к мелантериту, который выпадает в осадок: окисление 1 моль пирита приводит к формированию 0,35 моль мелантарита. Результирующая реакция может быть записана в виде (Л.С. Рыбникова, П.А Рыбников, 2018)



При смене окислительных условий на восстановительные с ростом pH изменяются индексы насыщения раствора при  $\text{pH} < 3$  степень насыщенности убывает в ряду мелантерит  $\rightarrow$  гетит  $\rightarrow$  ярозит; при  $\text{pH} > 6$  ряд насыщенности представлен последовательностью ярозит  $\rightarrow$  гетит  $\rightarrow$  мелантерит. При осаждении мелантарита  $\text{Fe}^{2+}$  расходуется на его образование, при этом в растворе в заметном количестве появляется  $\text{Fe}^{3+}$ ; выпадение в осадок гетита полностью удаляет из раствора  $\text{Fe}^{3+}$ .

В процессе выветривания главнейших породообразующих минералов образуется ряд промежуточных соединений, изменяется минеральный состав в последовательности:



На большинстве медноколчеданных рудников Урала дренажные воды в период отработки характеризуются как экстра- и высокометалльные сильнокислые и кислые, имеют низкие значения pH и повышенные содержания металлов - до  $n \cdot 10^2$  -  $n \cdot 10^3$  мг/л. В последние десятилетия на Среднем Урале большое количество рудников было закрыто и затоплено, в том числе медноколчеданных (рис. 1). После завершения отработки и прекращения водоотлива состав шахтных вод изменяется, кислотность снижается, однако они по-прежнему остаются экстра- и высокометалльными сильнокислыми и кислыми (рис. 7).

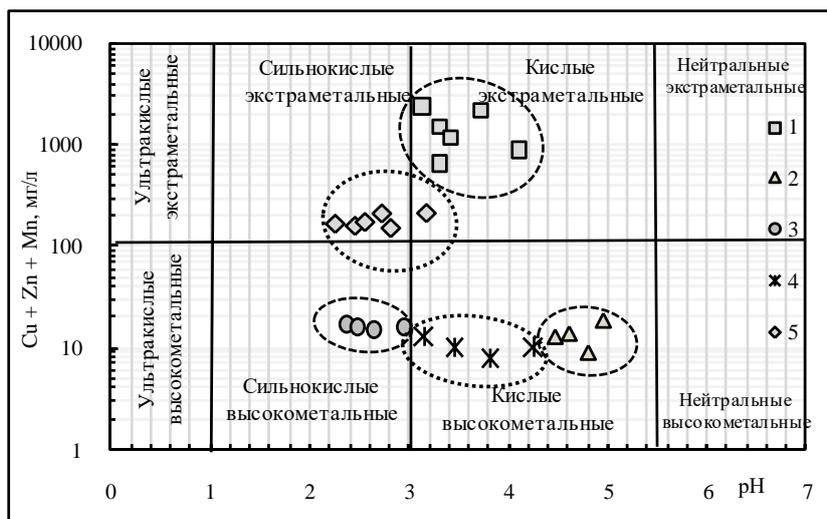


Рис. 7. Зависимость содержания металлов от pH в шахтных водах затопленных медноколчеданных рудников Урала. 1 - Левихинский, 2 - Ломовский, 3 - Белореченский, 4 - Карпушихинский, 5 - Дегтярский

Среди отработанных рудников Среднего Урала по степени контрастности и особенностям химического состава шахтных вод наиболее заметными являются Дегтярский и Левихинский. Особенности формирования химического состава шахтных вод Дегтярского рудника рассмотрены в ряде работ (А.И. Вишняк, О.А. Силина, 2005; С.Н. Елохина, Б.Н. Рыженко, 2014; С.Н. Елохина, 2014). Гидрохимические закономерности трансформации шахтных вод в процессе затопления (резко нестационарный гидродинамический и гидрохимический режим) и после завершения заполнения депрессионной воронки (установившийся режим подземных вод и резко нестационарный гидрохимический режим в начале процесса, квазистационарный в течение последующего периода) могут быть детально рассмотрены на примере Левихинского рудника, по которому имеется массив режимной информации, уникальный по продолжительности наблюдений, полноте опробования и достоверности результатов. Этот объект по значимости может быть сопоставим с исследованиями на месторождении Айрон Маунтен (Iron Mountain, Colorado, USA), проводившихся за счет средств Супрефонда, начиная с 80-х годов прошлого столетия (D.K. Nordstrom, C.N. Alpers, 1999).

В пределах горнопромышленных ландшафтов отработанного Левихинского рудника формируется несколько типов подземных вод, которые приурочены к шахтным стволам, отвалам, зонам обрушения. Содержание цинка, алюминия, железа, марганца, меди, кадмия, кобальта, серы на два-четыре порядка выше кларковых значений, в качестве которых приняты величины средних содержаний в подземных водах ландшафтной зоны горно-складчатых областей провинции умеренно влажного климата (С.Л. Шварцев, 1998). Максимальные значения характерны для шахтных вод, разгружающихся в техногенный водоем (рис. 8).



Рис. 8. Геохимический спектр макро- и микрокомпонентов в водных объектах Левихинского рудника (кларки концентраций)

*Гидрохимический режим шахтных вод после затопления.* Как показали выполненные исследования, остановка водоотлива является причиной перестройки гидродинамического баланса горнопромышленной территории,

изменения окислительно-восстановительных условий, инициирует развитие новых гидрогеохимических процессов.

Качество подземных вод характеризуется существенно нестационарным гидрохимическим режимом: резкий рост содержания всех компонентов в течение 4-6 месяцев после выхода шахтных вод на поверхность (в 5-6 раз по сравнению с периодом отработки), сохранение повышенных значений в течение 3-5 лет, с последующим снижением, которое может продолжаться десятки лет и более (рис. 9). Закономерности изменения меди аномальны как по величинам максимальных значений коэффициентов концентрации по отношению к периоду отработки (0,5), так и по резкому спаду во времени (менее 1 года).

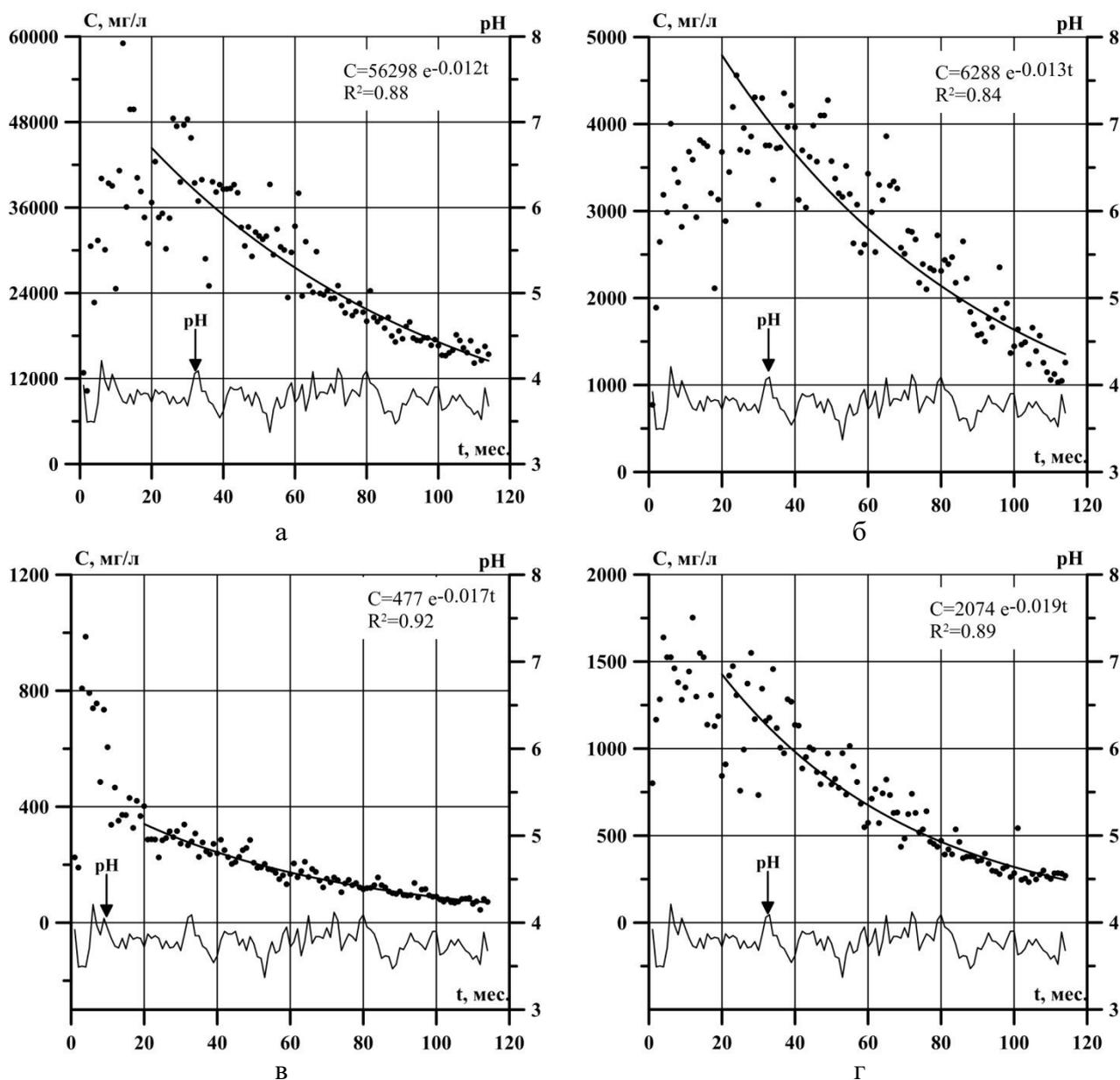


Рис. 9. Изменение содержания компонентов и pH в подземных водах зоны сосредоточенной разгрузки после затопления (точки – фактические данные, сплошная линия – экспоненциальная аппроксимация,  $R^2$  – достоверность аппроксимации): а – суммарная минерализация, б - железо, в - марганец, г - цинк

До настоящего времени показатели химического состава шахтных вод в зоне разгрузки выше, чем при отработке рудника. Состав подземных вод в зоне разгрузки сульфатный, гидрокарбонат-ион отсутствует, содержание хлор-иона на уровне фона 25-53 мг/л; среди катионов преобладают алюминий, железо, магний. Температура подземных вод 10°C, Eh = 250÷270 мВ, железо практически полностью в форме Fe<sup>2+</sup>. Ранжированный ряд по степени концентрации по отношению к периоду отработки выглядит следующим образом: K<sub>Mg</sub> > K<sub>Mn</sub> > K<sub>Fe</sub> > K<sub>Zn</sub> > K<sub>Al</sub> > K<sub>SO4</sub>. Изменение содержания компонентов во времени хорошо описывается экспоненциальной зависимостью  $\bar{C} = e^{-bt}$ , где  $\bar{C}$  - относительная концентрация вещества,  $\bar{C} = (C_i - C_{min}) / (C_{max} - C_{min})$ , C<sub>i</sub> - текущая концентрация, C<sub>min</sub>, C<sub>max</sub> - его максимальная и минимальная концентрации. Значения показателя b составляют 0,13-0,22 год<sup>-1</sup>, период полураспада (уменьшения концентраций компонентов в 2 раза) продолжается около 5,5 лет.

*Моделирование формирования состава подземных вод в зоне разгрузки.* Результаты расчета насыщенности подземных вод в зоне разгрузки показали следующее (использовался программный код Visual MINTEQ). Воды: пересыщены по отношению к гематиту, магнетиту, гетиту, лепидокрокиту, ярозиту; находятся в равновесии с гипсом, ангидритом, ферригидритом; недонасыщены по отношению к эпсомиту, халькантиту, мелантериту и др. Высокие концентрации сульфатной серы определяют форму миграции металлов в виде сульфатных комплексов: Al<sup>3+</sup> и Fe<sup>3+</sup> практически полностью; двухзарядные катионы в количестве около 50%; однозарядные катионы не более 10%.

Решение обратных задач путем расчета массового баланса позволяет при наличии достаточного объема достоверных данных о компонентах подземных вод определить породы, в результате растворения-осаждения которых может быть сформирован конкретный состав воды. В качестве вероятных геохимических сценариев для условий Левихинского рудника были рассмотрены три модели формирования состава подземных вод в зоне разгрузки и решены обратные задачи для них (Л.С. Рыбникова, П.А Рыбников, 2018).

Первая модель (Пр) предполагает окислительное растворение сульфидов (пирит, сфалерит, халькопирит); вторая (Мл) – растворение кристаллогидратов сульфатов (мелантерит, госларит и халькантит); в третьей (Яр) место мелантерита занимает ярозит. Источниками алюминия, магния, кальция, марганца являются серицит, хлорит, кальцит, манганит (табл. 3).

Скорость растворения сульфатов в настоящее время составляет (5-10)·10<sup>3</sup> моль/час и сопоставима со скоростью растворения сульфидов при отработке в период 1990-2000 гг. (L.S. Rybnikova, P.A. Rybnikov, 2017). Для сравнения - скорость окисления в шахте Айрон Маунтен (Iron Mountain), где зафиксированы отрицательные значения pH, на порядок выше (D.K. Nordstrom, 2011).

Феномен роста значений компонентов в зоне разгрузки и их последующего снижения (“first flush” по принятой в англоязычной литературе терминологии) и закономерности формирования гидрогеохимических систем в результате перераспределения химических элементов можно объяснить, используя результаты физико-химического и гидрогеомиграционного моделирования.

Таблица 3. Результаты расчета массового баланса для различных моделей формирования состава шахтных вод (отрицательные значения – осаждение, положительные – растворение, ммоль/кг)

Минеральная фаза	Геохимическая модель			Шахтные воды *	
	Пр	Мл	Яр	Показатели	Содержание
Серпентин	10	10	10	pH	3,18
Серицит	10	10	10	$\Sigma M$	14,5
Кальцит	11	11	11	$SO_4^{2-}$	9 954
Пирит	50	0	0	$Ca^{2+}$	423
Сфалерит	7	0	0	$Mg^{2+}$	703
Халькопирит	0.3	0	0	$Al^{3+}$	603
Манганит	2	2	2	$Cu^{2+}$	11
Мелантерит	0	100	0	$Zn^{2+}$	323
Госларит	0	7	7	$Fe_{общ}$	1 373
Халькантит	0	0.3	0.3	$Mn^{2+}$	94
Ярозит	0	0	50	$Ni^{2+}$	0,5
Кварц	-40	-40	-40	$Co^{2+}$	1,5
Гетит	-25	-75	-125	РЗЭ	4,9

Примечания.  $\Sigma M$  – суммарная минерализация; РЗЭ – сумма редкоземельных элементов; размерности: суммарная минерализация – г/л, остальные компоненты – мг/л; \*техногенный водоем, t = 90 мес. (дата опробования 15.09.2014).

Основываясь на анализе полученных результатов, можно полагать, что в период затопления зоны обрушения вторичные минералы, сформированные в сернокислотной коре выветривания, растворяются; раствор в трещинах и порах насыщается сульфатами, металлами и др. компонентами. Подземные воды, разгружающиеся в провал, в повышенных концентрациях содержат растворенные вещества, которые находятся в воде, заполняющей свободное пространство зоны обрушения. Разгрузка подземных вод в провал складывается из расхода потока, формирующегося в зоне обрушения, и расхода латерального потока, поступающего с прилегающих территорий (рис. 10).

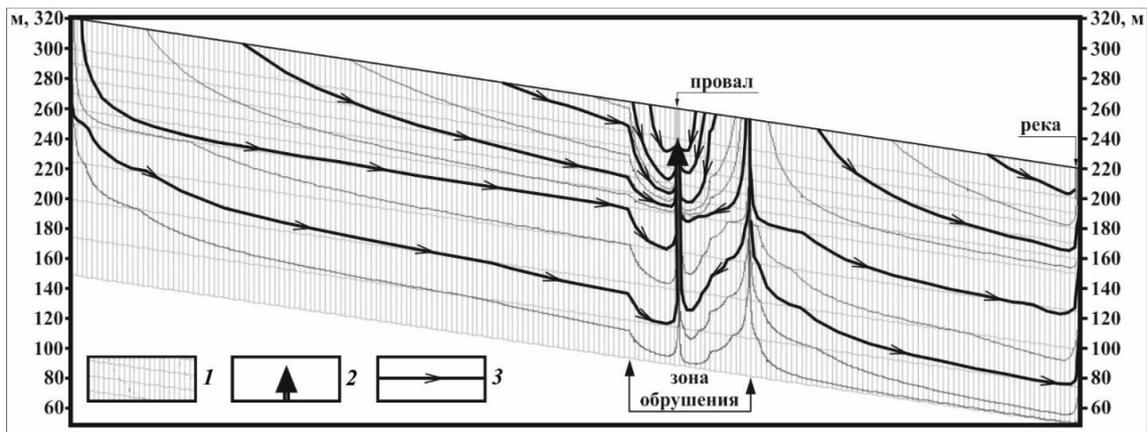


Рис. 10. Схема движения подземных вод после затопления. 1 – сеточная разбивка; 2 – разгрузка подземных вод в провал; 3 – линии тока. Слева – водораздел, непроницаемая граница; справа – река, граница третьего рода; размер блока по горизонтали – 50 м, количество пластов – 10; величина питания, фильтрационные и емкостные параметры приведены в табл. 1. (использованы программные коды MODFLOW и RMPATH)

Время движения потока подземных вод в зоне обрушения (от ее границы до места разгрузки) составляет 3-5 лет, это тот период, когда наблюдаются чрезвычайно высокие значения практически всех показателей в техногенном водоеме (рис. 9). Повышенные значения компонентов в начальный период затопления обеспечиваются поступлением раствора из зоны обрушения. Со временем латеральный поток, поступающий с прилегающих территорий, начинает разбавлять раствор в зоне обрушения, что приводит к снижению концентраций веществ в зоне разгрузки, однако формирование кислых вод в этой зоне будет продолжаться не менее 50 лет (рис. 11).

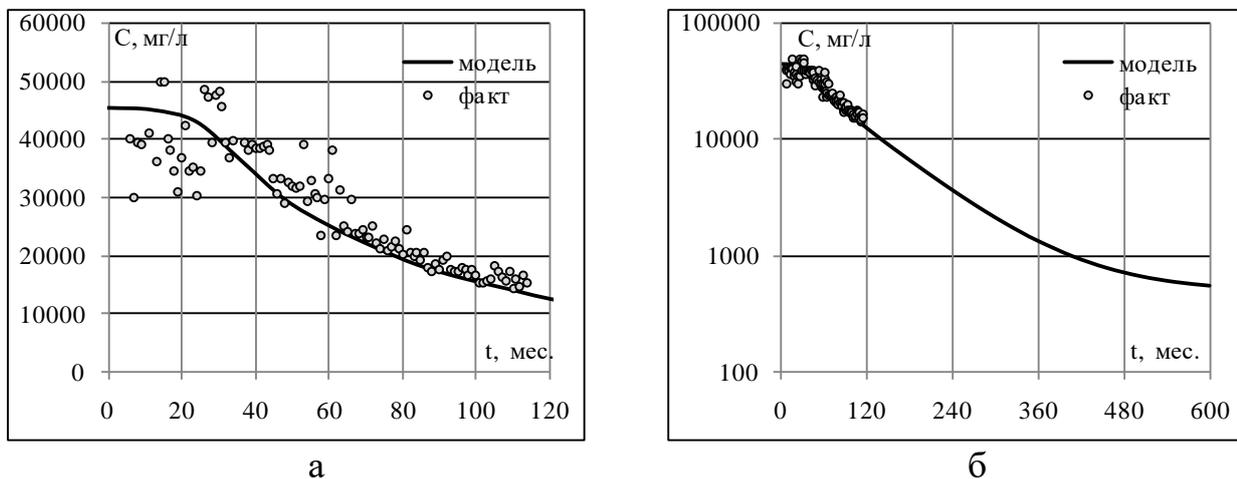


Рис. 11. Изменение суммарной минерализации в зоне разгрузки, фактические данные и результаты моделирования: а – в течение 10 лет после завершения заполнения депрессионной воронки и выхода шахтных вод на поверхность; б – прогноз на 50 лет.  
 $C_{\min} = 500 \text{ мг/л}$ ,  $C_{\max} = 45\,000 \text{ мг/л}$

Масса растворяющихся минералов достигает 5-10 тыс. т/год, при этом в подземном пространстве образуется более 1 тыс. м<sup>3</sup> пустот ежегодно. Именно этим объясняется тот факт, что на отработанных рудниках долгие годы продолжается образование новых провалов.

**Третье защищаемое положение.** Экологическая нагрузка на гидросферу в старопромышленных горнодобывающих районах Среднего Урала после прекращения добычи не снижается. Подземные воды затопленных медноколчеданных рудников могут рассматриваться как возобновляемые месторождения гидроминерального сырья. Потенциальная извлекаемая ценность цветных металлов и редкоземельных элементов в шахтных водах превосходит затраты на обеспечение ежегодной нейтрализации кислых вод, поступающих в бассейны рек Тагил и Чусовая, и превышает величину экологического ущерба от сброса очищенных шахтных вод.

Загрязнение окружающей среды горнопромышленных территорий происходит в результате образования как твердых, так и жидких отходов, в том числе шахтных и подотвальных вод. Затопленные в конце прошлого–начале этого века медноколчеданные рудники, в частности, Дегтярский, Левихинский, Карпушихинский, Ломовский, Белореченский и др., являются одним из основных источников загрязнения водных объектов. Эти территории представляют собой самые проблемные объекты накопленного вреда окружающей среде в Свердловской области, а долговременные затраты на очистку шахтных вод с начала 2000-х годов покрываются из областного бюджета по программе «Экология и природные ресурсы Свердловской области» (*Постановление ...*, 2009).

Промышленный потенциал Уральского региона уже несколько столетий основывается на минерально-сырьевых ресурсах. В связи с истощением запасов многих месторождений все большее значение получают ресурсы техногенного происхождения – техногенно-минеральные образования (*В.Л. Яковлев и др., 1999; С.В. Корнилков и др., 2013*). Специфическим видом таких ресурсов являются шахтные воды, которые, благодаря наличию в их составе большого количества цветных, редких и редкоземельных элементов, могут рассматриваться как потенциальные месторождения гидроминерального сырья. На закрытых горнодобывающих предприятиях под шахтными водами следует понимать не только те, которые извлекаются попутно при добыче полезного ископаемого и осушении шахт, но и образованные после остановки водоотлива и подъема уровня подземных вод, а именно техногенные водоносные горизонты, водоемы, родники и водотоки (*С.Н. Елохина, 2014*).

Извлечение металлов из шахтных вод осуществляется в течение как минимум четырех тысячелетий (*D.K. Nordstrom et al., 2017*). Годовой вынос меди и цинка с шахтными водами отработываемых медноколчеданных рудников Урала в конце прошлого века составлял 1,3 и 2,6 тыс. т., соответственно. Это позволило рассматривать дренажные и подотвальные воды как источник гидроминерального сырья для извлечения цветных металлов (*О.В. Зотеев, С.В. Корнилков, 1995; О.Н. Грязнов и др., 1997; Л.С. Табаксблат, 1997*). В последние годы, из-за необходимости изыскания недорогих ресурсов и все более жестких требований к охране окружающей среды, извлечение из шахтных вод компонентов, имеющих потенциальную экономическую ценность

(в первую очередь металлов и редкоземельных элементов), рассматривается как часть процесса очистки (Ю.С. Рыбаков, 1998; В.А. Чантурия и др., 2005; М.Л. Черный, 2005; В.Н. Никонов и др., 2014; Н.Н. Орехова, И.В. Шадрюнова, 2015; Л.В. Чупрова, 2016; А.М. Плюснин, 2017).

*Методы очистки шахтных вод.* На Среднем Урале до середины 1950-х гг. кислые шахтные воды ( $pH=2\div 3$ ) обрабатываемых медноколчеданных рудников сбрасывались в близлежащие реки, ручьи или болота, выжигая растительность, которая во многих местах не восстановилась до сих пор. На некоторых рудниках (Дегтярский, Карабашский, Левихинский) в период 1939–1985 гг. была организована частичная очистка шахтных вод от содержащейся в них меди путем пропуска воды через железный скрап. По этой технологии на рудниках Уральского региона из шахтных вод было извлечено около 60 тыс. т меди (О.В. Зотеев, С.В. Корнилков, 1995; В.Н. Никонов и др., 2014).

Как правило, для снижения  $pH$  шахтных вод и уменьшения растворимости загрязняющих веществ (в первую очередь тяжелых металлов) используют негашеную известь, гидроксид натрия (каустическую соду) или известняк. В результате формируются нерастворимые или плохо растворимые осадки, для их осаждения используются осветлительные пруды. Полученный осадок может высушиваться и в зависимости от токсичности размещается в выработанном пространстве или на специальных полигонах.

Достоинствами такого метода очистки является простота технологии, доступность и относительная дешевизна, однако для его реализации требуется большое количество реагентов, выделение значительных площадей под размещение прудов-стабилизаторов. Кроме того, не обеспечивается снижение компонентов до показателей, соответствующих нормативным требованиям (Л.С. Рыбникова и др., 2014).

Несмотря на отмеченные недостатки, нейтрализация кислых вод известковым молоком (или известковым раствором) как у нас в стране, так и за рубежом, является наиболее распространенным методом очистки больших объемов сточных вод. Такая схема очистки реализована на Левихинском, Дегтярском, Ломовском, Карпушихинском, Белореченском рудниках.

В последние годы реализован ряд успешных проектов очистки шахтных вод производительностью до 15-20 тыс.м<sup>3</sup>/сут с получением сульфидов металлов (с использованием сероводорода) на установках BioteQ на рудниках Карибу (Caribou) и Раглан (Raglan) в Канаде, Маунт Веллингтон (Mount Wellington) и Бисби (Bisbee) в США (М. Nodwell, D. Kratochvil, 2012; D.K. Nordstrom et al., 2017). Для Левихинского и Сафьяновского месторождений разработана технология сорбционной доочистки сточных вод с попутным извлечением меди и цинка. (М.Л. Черный, 2005; К.Л. Тимофеев, 2013).

*Шахтные воды как источник гидроминерального сырья.* Вопросы изучения и использования гидроминерального сырья активно разрабатываются в нашей стране с начала 80-х годов, когда бывшее министерство геологии СССР приняло постановление «О состоянии и расширении научно-исследовательских и геологоразведочных работ на гидроминеральное сырье».

На затопленных в настоящее время Левихинском и Дегтярском рудниках вынос металлов шахтными водами в зонах разгрузки продолжается на высоком уровне и составляет сотни (марганец, цинк) и тысячи тонн в год (железо) (рис. 12). Вынос меди уменьшился более чем на порядок (Л.С. Рыбникова и др., 2014).

Содержание многих компонентов в шахтных водах значительно выше величин промышленного содержания<sup>1</sup>: кобальта в 73 раза, марганца в 66 раз, железа в 41 раз, алюминия в 11 раз (Л.С. Рыбникова, П.А. Рыбников, 2015). Концентрации практически всех РЗЭ в шахтных водах Левихинского рудника в десятки раз превышают промышленные содержания (рис. 13).

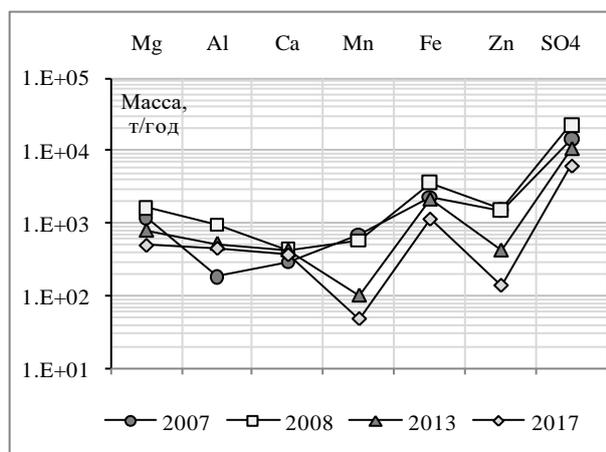


Рис. 12. Масса выноса компонентов с шахтными водами зоны разгрузки Левихинского рудника после затопления

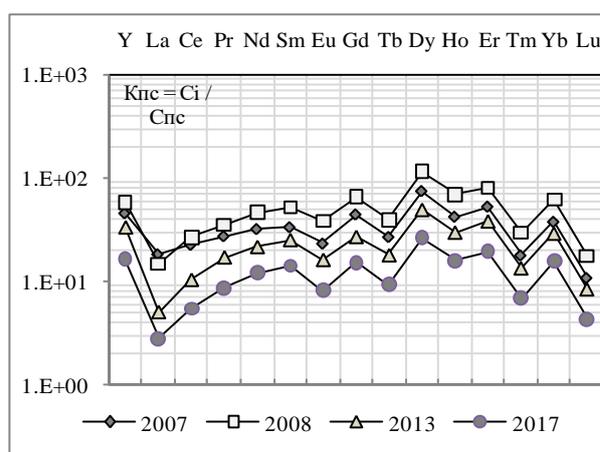


Рис. 13. Распределение коэффициентов концентрации по промышленному содержанию РЗЭ в шахтных водах зоны разгрузки Левихинского рудника по годам

Потенциальные ресурсы РЗЭ, оцененные по суммарной массе выноса за 25 лет, составляют около 120 т, с 2007 по 2017 год было вынесено на поверхность около 80 т РЗЭ. Потенциальные ресурсы цветных металлов и железа за этот же период составят около 36 тыс. т железа, 15,3 тыс. т цинка, 9,6 тыс. т алюминия, 5,8 тыс. т марганца, 60 т кобальта<sup>2</sup>.

Суммарная извлекаемая ценность<sup>3</sup> цветных металлов и РЗЭ из шахтных вод в начальный период после затопления Левихинского рудника превышала 13 млн \$ США, в последующие годы сохраняется на уровне около 4-5 млн. долларов США (табл. 4). За весь период, в течение которого концентрации компонентов будут выше, чем значения концентраций промышленного

<sup>1</sup> Методические рекомендации по изучению и оценке попутных вод месторождений полезных ископаемых в целях их использования в качестве гидроминерального сырья. М.: ВСЕГИНГЕО, 1985.

<sup>2</sup> Например, Уральская горно-металлургическая компания производит из техногенных отходов около 80-90 т/год селена, в том числе 4-5 т/год - на Кыштымском медеплавильном комбинате (О.А. Романова, 2014).

<sup>3</sup> Ценность запасов в недрах (А.В. Душин, 2014).

содержания (по меньшей мере 25 лет), извлекаемая ценность составит около 130 млн \$ США, или около 500 млн руб./год<sup>4</sup>.

Эти оценки показывают, что уровень выноса ценных компонентов и их потенциальная извлекаемая ценность на объектах завершённой добычи медных рудников очень высокий.

Таблица 4. Ранжированный ряд по извлекаемой ценности цветных металлов и РЗЭ из шахтных вод Левихинского рудника (тыс. \$ США/год)

Элемент	Извлекаемая ценность		Элемент	Извлекаемая ценность	
	2008 г.	2013 г.		2008 г.	2013 г.
<i>цветные металлы</i>			<i>Nd</i>	605	282
Zn	3 212	891	Gd	230	95
Al	2 016	1 111	Ce	220	84
Mn	988	175	Pr	144	70
Co	183	45	Sm	124	61
<i>РЗЭ</i>			<i>Er</i>	82	39
Dy	2 015	876	Lu	66	31
Eu	1 511	636	Yb	64	30
Y	557	320	Ho	54	24
Tb	625	283	La	55	18
<i>Итого</i>				<i>13 172</i>	<i>5 152</i>
<i>В том числе РЗЭ</i>				<i>6 352</i>	<i>2 850</i>
<i>В том числе цветных металлов</i>				<i>6 820</i>	<i>2 302</i>

Примечание. Для расчета использованы: по цветным металлам – данные Лондонской биржи, среднее – сентябрь 2012-август 2014 г., URL: <http://www.lme.com>; по РЗЭ – анализ динамики цен на РЗМ, URL: <http://tdm96.ru/?p=829>; в период отработки потенциальная извлекаемая ценность в среднем в год составляла 3,9 млн \$ США, в том числе 2,4 млн \$ США цветных металлов и 1,5 млн \$ США РЗЭ (в современных ценах)

*Шахтные воды как источник загрязнения гидросферы.* Можно выделить три основных пути поступления загрязняющих веществ в поверхностные водотоки: (1) от точечных источников со сточными водами, возникновение которых связано с техногенной деятельностью, (2) с водами поверхностного (склонового) стока, формирующихся при таянии снегового покрова, во время дождей, (3) с подземными водами, загрязнение которых произошло на горнопромышленной территории.

В пределах водосборов, где расположены отработанные рудники, одним из основных источников загрязнения поверхностной гидросферы является сброс из прудов-отстойников. Степень очистки шахтных вод затопленного Левихинского рудника достаточно высокая и составляет от 85-90% (для сульфат-иона, марганца, цинка, меди) до 98% (для железа) (рис. 14).

<sup>4</sup> Потенциальная извлекаемая ценность компонентов в кислых шахтных водах на месторождении Айрон Маунтен (Iron Mountain, США) оценивается суммой более 20 млн \$ США (без учета РЗЭ) за период с 1994 по 2002 год (D.K. Nordstrom et al., 2017).

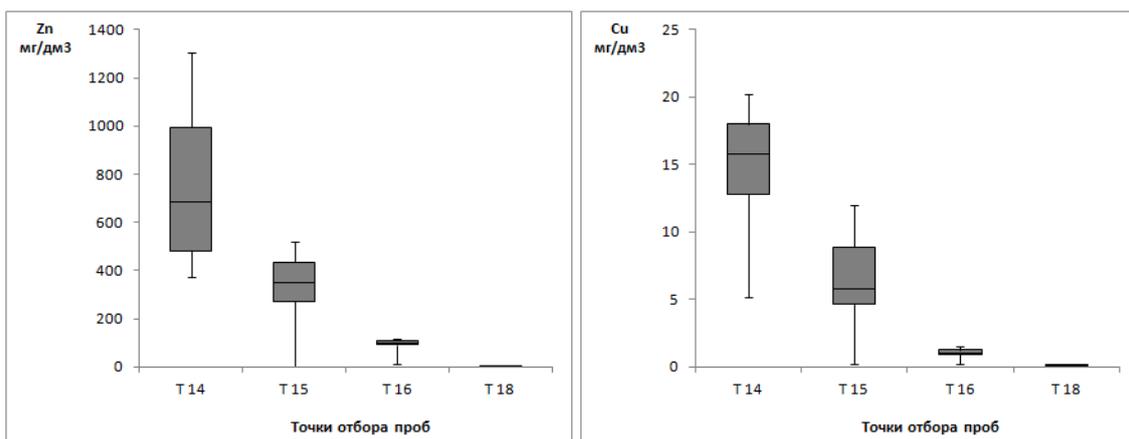


Рис. 14. Степень очистки шахтных вод затопленного Левихинского рудника. Точки отбора проб: Т14 – зона разгрузки шахтных вод; Т15 – пруд-осветлитель; Т16 – сбросной канал; Т18 – р. Левиха (ниже сброса сточных вод Левихинского рудника)

Тем не менее, сточные воды, сбрасываемые в р. Тагил, имеют значительные превышения ПДК и более высокие содержания компонентов, чем в период отработки: по марганцу в 12 раз (от 3,8 до 46 мг/л), железу в 11 (от 7,1 до 78 мг/л), цинку в 6 раз (от 17 до 105 мг/л). В целом степень загрязнения вод р. Тагил тяжелыми металлами после затопления Левихинского рудника увеличилась в 3,5 раза, особенно по железу (от 0,7 до 4,3 мг/л) и цинку (от 0,65 до 1,97 мг/л) (рис. 15).

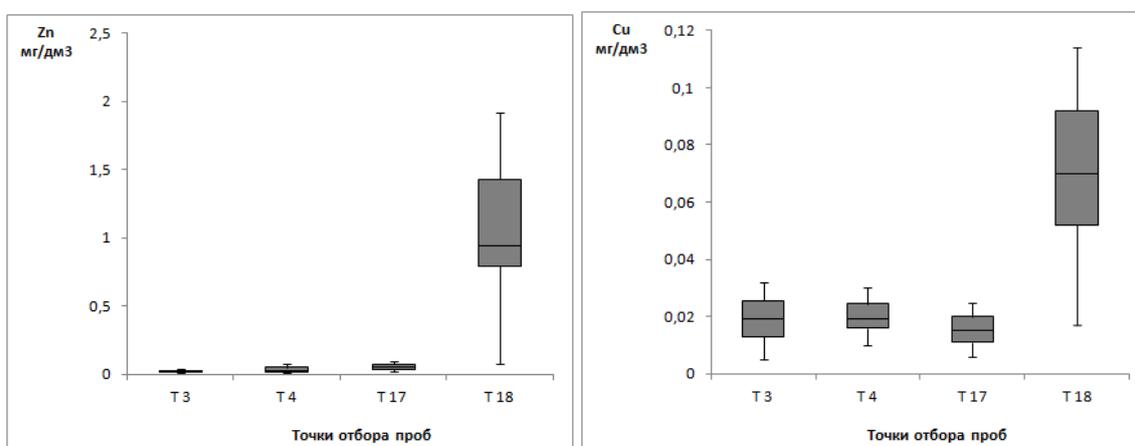


Рис. 15. Изменение содержания компонентов в воде р. Тагил по течению реки после затопления Левихинского рудника. Точки отбора проб: Т17, Т18- выше и ниже сброса сточных вод Левихинского рудника

Величина экологического ущерба водным объектам от сброса сточных вод после затопления Левихинского рудника составляет 120 млн. руб. в год (для сравнения при отработке рудника ущерб оценивается величиной 200 млн. руб. в год). При этом величина предотвращенного экологического ущерба на порядок больше (Л.С. Рыбникова и др., 2014).

В зависимости от этапа освоения месторождения изменяется значимость компонентов, вносящих основной вклад в экологический ущерб: при отработке

это была медь (65%), после затопления - цинк (57%). Предотвращенный ущерб наиболее значим в результате очистки шахтных вод от цинка, железа, марганца.

*Сопоставление потенциальной ценности шахтных вод и ущерба от загрязнения водных объектов.* Шахтные воды отработанных медноколчеданных рудников после затопления характеризуются более высокой минерализацией, содержание тяжелых металлов (кроме меди) и редкоземельных элементов также возрастает в несколько раз, соответственно, степень загрязнения водных объектов в старопромышленных горнодобывающих районах Среднего Урала после прекращения добычи не уменьшается. Отработанные медноколчеданные рудники являются значимым источником загрязнения гидросферы, при этом шахтные воды представляют собой обеспеченный возобновляемый источник цветных металлов и редкоземельных элементов и могут рассматриваться как месторождения гидроминерального сырья. Например, суммарная извлекаемая ценность цветных металлов и РЗЭ из шахтных вод Левихинского рудника превышает 500 млн руб. в год, около половины приходится на редкоземельные элементы. Потенциальная извлекаемая ценность компонентов превышает затраты на обеспечение ежегодной нейтрализации кислых шахтных вод и величину экологического ущерба от сброса очищенных шахтных вод.

Извлечение цветных металлов и редкоземельных элементов из шахтных вод позволит не только снизить экологическую нагрузку на гидросферу, но в значительной мере компенсировать затраты на нейтрализацию кислых шахтных вод.

**Четвертое защищаемое положение.** Хорошее качество подземных вод в период отработки в зоне, нарушенной горными работами, не может гарантировать возможность использования подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения на длительную перспективу. После завершения добычи, отключения карьерных (или шахтных) водоотливов, при наличии в пределах депрессионной воронки отработанных, затопленных и рекультивированных карьеров питьевые водозаборы могут быть утрачены. В случае, если массовый расход, который формируется в зоне, нарушенной горными работами, превышает расход, поступающий за счет естественных ресурсов, на этих объектах может происходить неконтролируемое загрязнение подземных вод.

В отличие от месторождений твердых полезных ископаемых (МТПИ) месторождения пресных подземных вод (МППВ) представляют собой возобновляемый ресурс и являются динамической системой: их эксплуатация приводит к изменению существующих и образованию новых гидродинамических и гидрогеохимических условий, перераспределению балансовых составляющих системы, привлечению новых источников формирования эксплуатационных ресурсов месторождения.

Возможность и целесообразность использования подземных вод (карьерных и шахтных), извлекаемых при осушении месторождений,

определяется в процессе разработки дренажных мероприятий при подсчете балансовых запасов месторождения твердых полезных ископаемых.

Наиболее успешными примерами реализации такой практики являются системы хозяйственно-питьевого водоснабжения, организованные в районе Курской магнитной аномалии, в Казахстане, Украине, а также на ряде месторождений твердых полезных ископаемых Уральского региона.

Подземные воды, извлекаемые при отработке месторождений твердых полезных ископаемых, являются важной частью водохозяйственного баланса Свердловской области, при этом использование их для производственно-технического водоснабжения имеет более широкое распространение, поскольку в этом случае особые требования к качеству воды обычно не предъявляются. Для питьевых целей до настоящего времени эксплуатируется несколько месторождений питьевых подземных вод, запасы которых первоначально утверждались в схеме водоотлива горнорудного предприятия как попутное полезное ископаемое (рис. 16).

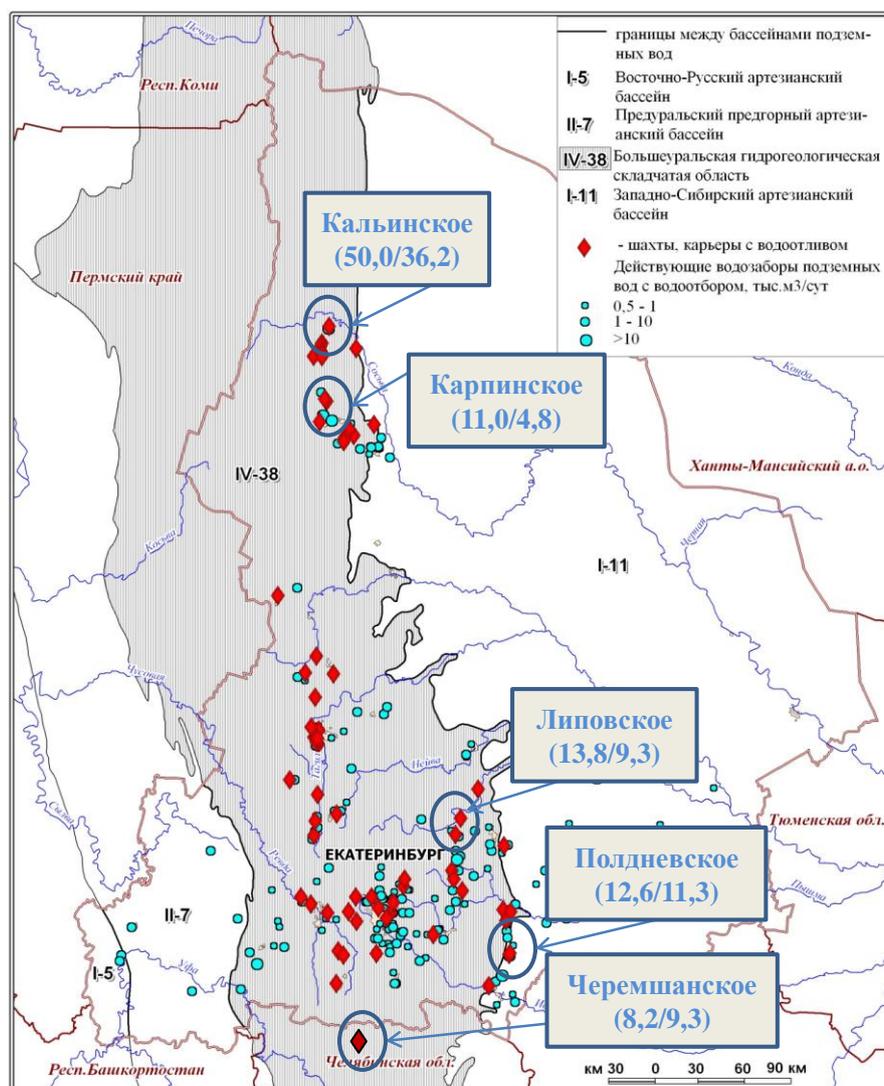


Рис. 16. Месторождения питьевых подземных вод, запасы которых первоначально утверждались как попутное полезное ископаемое. Название МППВ, в скобках в числителе – запасы, в знаменателе – водоотбор, тыс. м<sup>3</sup>/сут

Балансовая структура запасов месторождений подземных вод, эксплуатируемых дренажными системами на горноскладчатом Урале, определяется двумя составляющими: расхода, который формируется на территориях, затронутых горными работами  $Q_{гр}$ , и естественными ресурсами вне этих территорий  $Q_{ер}$

$$Q = Q_{гр} + Q_{ер}. \quad (4)$$

Эксплуатационные ресурсы месторождения определяются фильтрационными, емкостными свойствами водоносных горизонтов и разделяющих толщ, природными условиями территории и может быть формально представлены как

$$Q_{ер} = \Phi (k, m, \mu, B, P, E, R, BC, S), \quad (5)$$

где  $k$ ,  $m$ ,  $\mu$  – фильтрационные и емкостные свойства пласта,  $B$  – перетекание,  $P$  – осадки,  $E$  – испарение и эвапотранспирация,  $R$  – поверхностный сток,  $BC$  – граничные условия,  $S$  – понижение.

Ресурсы, формирующиеся в пределах нарушенных горными работами территорий  $Q_{гр}$ , зависят кроме указанных выше от ряда дополнительных параметров и могут быть представлены как

$$Q_{гр} = f (t; D; T_{от} K_{дс}; F_{го}; F_{ор}; F_{пр}; F_{от}; F_{рк}; V_{ко}) \quad (6)$$

где  $t$  – время отработки МТПИ по этапам (с учетом изменения глубины ведения горных работ  $D$ );  $T_{от}$  – технология отработки;  $K_{дс}$  – конструкция дренажной системы;  $F_{го}$  – площадь горного отвода,  $F_{ор}$  – площадь открытых горных работ;  $F_{пр}$  – площадь провалов;  $F_{от}$  – площадь отвалов,  $F_{рк}$  – площадь рекультивированных карьеров;  $V_{ко}$  – объем карьерного озера.

Возможность эксплуатации месторождения питьевых подземных вод в процессе ведения горных работ и после их завершения на постэксплуатационном этапе зависит от массовых расходов воды, которые каптируются водозаборным сооружением, и состоят из массового расхода, формирующегося на нарушенной горными работами территории ( $M_{гр}$ ), и поступающего с остальной части воронки депрессии ( $M_{ер}$ )

$$M = M_{гр} + M_{ер}, \quad M_{гр} = Q_{гр} * C_{гр}, \quad M_{ер} = Q_{ер} * C_{ер} \quad (7)$$

где  $Q_{ер}$ ,  $Q_{гр}$  – расход потока ( $м^3/сут$ ),  $C_{ер}$ ,  $C_{гр}$  – концентрации компонентов ( $кг/м^3$ ).

При этом если массовый расход водозабора определяется только геохимической активностью водовмещающих и перекрывающих отложений  $G_{ер}$

$$M_{ер} = Q_{ер} * \mathcal{F} (G_{ер}), \quad (8)$$

то массовый расход потока в зоне ведения горных работ зависит также и от геохимической активности полезного ископаемого в зоне ведения горных работ  $G_{гр}$

$$M_{гр} = Q_{гр} * \mathcal{F} (G_{гр}, G_{ер}). \quad (9)$$

Проведенные исследования показали, что в случае, если массовый расход потока, который формируется в зоне, нарушенной горными работами, превышает расход, поступающий за счет естественных ресурсов, возможность эксплуатации МППВ на постэксплуатационном этапе становится проблематичной, требуются упреждающие меры по изысканию и введению в

работу новых источников водоснабжения или организация специальных систем защиты водозабора (Л.С. Рыбникова, П.А Рыбников, 2015) (табл. 4).

Таблица 4. Оценка возможности использования подземных вод после прекращения горнодобывающей деятельности

Показатель	Возможность использования подземных вод		
	можно	проблематично	нельзя
Водовмещающие породы	известняки, мрамора, метаморфические породы		
Способ рекультивации	мокрая консервация (затопление)		
Конструкция дренажной системы	вертикальный законтурный дренаж, внутрикарьерный (зумпфовой) дренаж		
Геохимическая активность полезного ископаемого	низкая	средняя, высокая	высокая
Состояние горной выработки перед рекультивацией	не заполнена или заполнена инертным материалом	заполнена вскрышными породами и некондиционными рудами	заполнена вскрышными породами и некондиционными рудами
Возможность организации второго и третьего пояса ЗСО	есть	есть частично	нет
Источники формирования эксплуатационных ресурсов (массовые расходы $M_{ep}$ и $M_{gp}$ )	$M_{ep} \gg M_{gp}$	$M_{ep} \sim M_{gp}$	$M_{ep} \ll M_{gp}$
Примеры месторождений	Кальинское	Карпское; Липовское, западный узел	Липовское, восточный узел; Полдневское; Черемшанское

Основными источниками формирования эксплуатационных запасов подземных вод в районе ведения горных работ на Среднем Урале являются: сокращение разгрузки в поверхностные дрены, увеличение инфильтрационного питания, поверхностный сток. Изменение качества подземных вод происходит в результате процессов сернокислотного выщелачивания техногенной зоны аэрации и характеризуется повышением содержания ряда компонентов по сравнению с фоном: в частности, сульфат-иона в 5–10 раз (рис. 17, скв. 4э Северо-Мазулинский водозабор, скв.14э Полдневской водозабор).

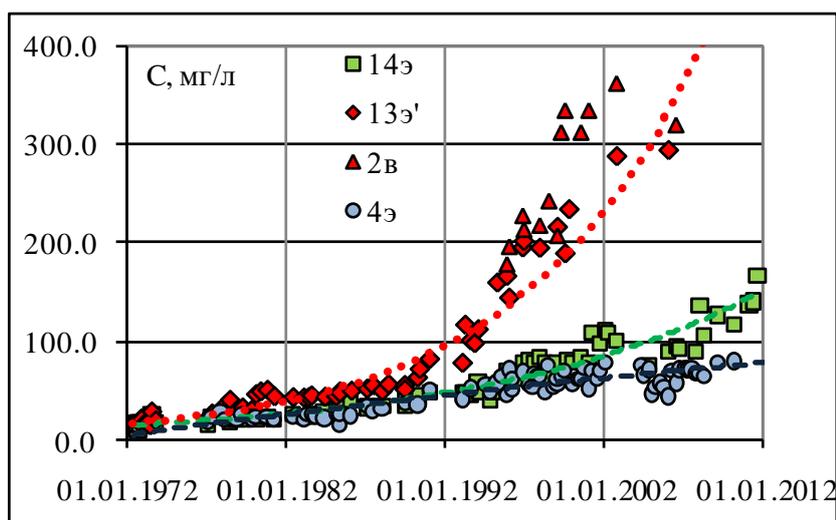
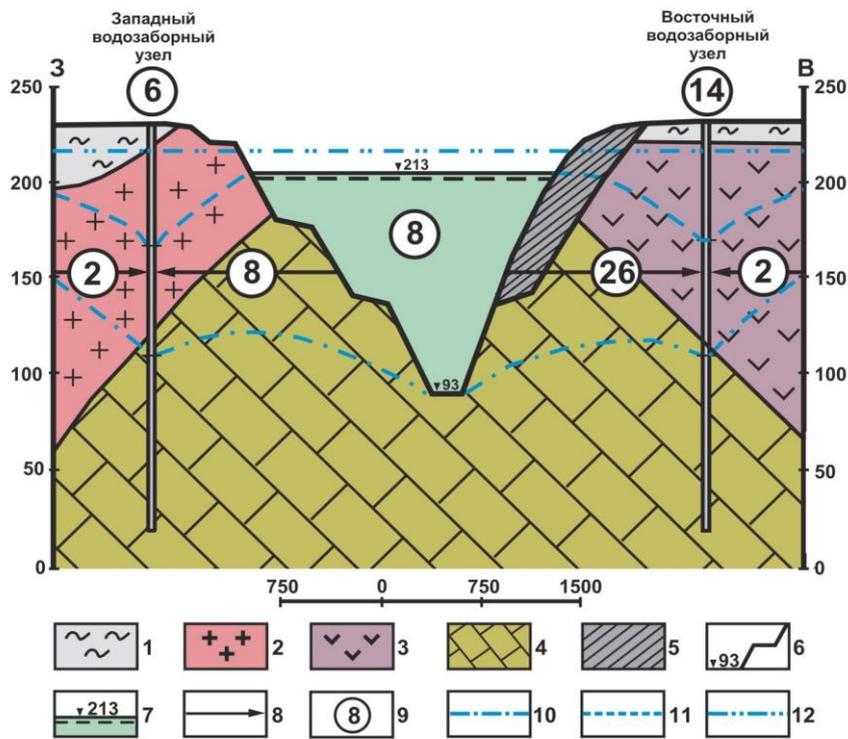


Рис. 17. График изменения содержания сульфат-иона в скважинах Полдневского и Каменск-Уральского месторождения пресных подземных вод. Используются данные (А.И. Вишняк, 2002; А.Г. Вострокнутов, 2006; Н.В. Цветов, 2010). Полдневское месторождение, скв. 14э – эксплуатационная, скв. 13э' – барражная, скв. 2в – дренажная; Северо-Мазулинское месторождение скв. 4э – эксплуатационная

После завершения отработки МТПИ и уменьшения водоотлива происходит частичное заполнение депрессионной воронки, формирование карьерных озер, техногенных водоносных горизонтов в рекультивированных горных выработках. Значительную долю в балансе эксплуатационного водоотбора начинает составлять привлечение ресурсов карьерных озер и поступление воды из техногенных водоносных горизонтов, сформированных в отвалах и рекультивированных карьерах. Качество вод карьерных озер зависит от состояния карьерной выемки: сернокислотное выщелачивание невыбранной руды приводит к формированию вод с коэффициентом концентрации<sup>5</sup> по сульфат-иону 8 (рис. 18, Липовское месторождение, Западный водозаборный узел) – 15 (Карпинское, Северо-Восточный дренажный узел).

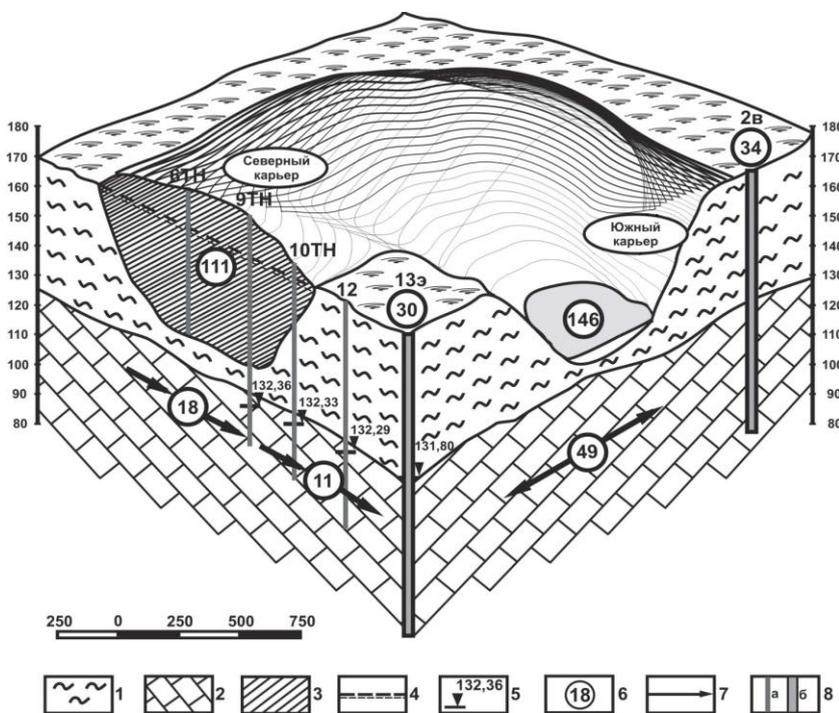
Значимость поступления в продуктивный водоносный горизонт вод техногенного водоносного горизонта, сформировавшегося в отвалах и рекультивированных карьерах (при условии предварительного осушения), оценивается как незначительная: коэффициент концентрации по сульфат-иону в водоносном горизонте составляет менее 20 (рис. 19, Полдневское месторождение, скв. 9ТН, 10ТН, 12). Техногенный горизонт в массиве вскрышных пород и некондиционных руд рекультивированного карьера, хотя и имеет очень высокий коэффициент концентрации по сульфат-иону (до 110 – Северный карьер), но является локальным маломощным, его влияние на качество воды в основном горизонте незначительно.

<sup>5</sup>  $K_c$  – коэффициент концентрации, отношение текущего содержания компонента (С) к его фоновому значению  $C_{фон}$ ,  $K_c = C/C_{фон}$ . Сульфат-ион рассматривается как индикатор процесса.



5 – внутренний отвал вскрышных пород и некондиционных руд (техногенный водоносный горизонт); 6 – контур карьера и отметка его дна; 7 - уровень воды в карьере после его затопления; 8 – направление потока подземных вод в настоящее время; 9 – коэффициент концентрации сульфат-иона ( $K_c$ ); 10 – 12 уровень подземных вод по этапам: 11 – при отработке карьера; 12 – в настоящее время; 13 – в естественных условиях

Рис. 18. Гидрогеохимическая модель формирования качества подземных вод Липовского месторождения. Геологическая основа принята по (С.В. Палкин, С.С. Палкин, 2003). Условные обозначения: 1 – глинистая кора выветривания; 2 – водоносная зона интрузивных пород (граниты); 3 – водоносная зона рифейско-палеозойских метаморфических пород (сланцы, серпентиниты, кремнистые породы); 4 – водоносная зона палеозойских карбонатных пород (мрамора, известняки);



3 – рекультивированная часть карьера (вскрышные породы и некондиционные руды); 4 – техногенный водоносный горизонт в теле рекультивированного карьера; 5 – уровень подземных вод; 6 - коэффициент концентрации сульфат-иона ( $K_c$ ); 7 - направление потока подземных вод; 8 – скважина, а – наблюдательная, б – эксплуатационная

Рис. 19. Гидрогеохимическая модель формирования качества подземных вод Полдневского месторождения подземных вод (Полдневская залежь Троицко-Байновского месторождения огенупорных глин). Геологическая основа принята по (А.Г. Вострокнутов, 2006). Условные обозначения: 1 – локально-водоносный комплекс пород верхнего и нижнего мела (огнеупорные глины, глинистые и глауконитовые пески); 2 – водоносная зона нижнекаменноугольных карбонатных пород (известняки закарстованные);

Эксплуатация питьевого водозабора (скв. 14э, 15э) возможна только под защитой барража (скв. 13э) с расходом, который должен быть сопоставим с водоотбором на питьевые нужды. При этом необходимость очистки подземных вод до нормативов, предъявляемых к качеству воды в водоемах рыбохозяйственного значения, и возможный отказ предприятия-недропользователя от затрат на такую очистку, могут привести к прекращению существования месторождения пресных подземных вод.

Мокрая рекультивация (частичное заполнение выработанного пространства отработанных карьеров породами вскрыши, некондиционных руд) является причиной формирования вод с очень высоким уровнем загрязнения: здесь отмечается более чем 25-50 кратное повышение содержания компонентов по сравнению с фоновым (рис. 20, Липовское месторождение, восточный водозаборный узел).

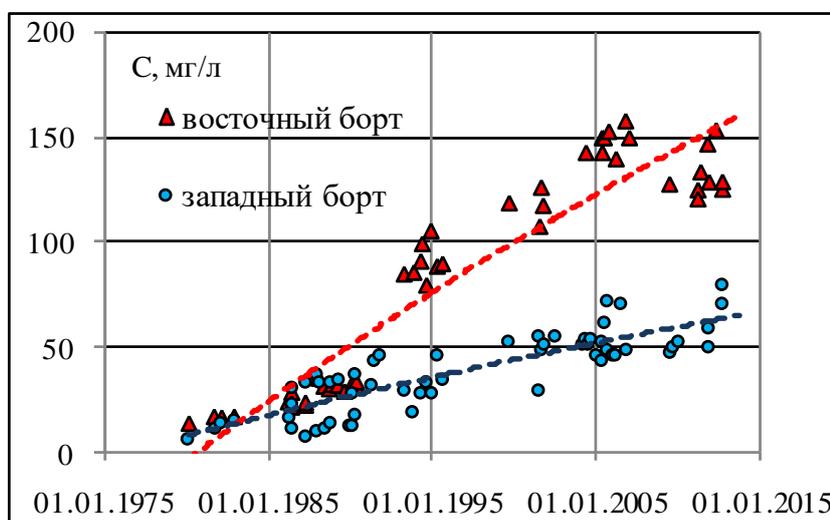


Рис. 20. График изменения содержания сульфат-иона в скважинах восточного и западного бортов Липовского месторождения пресных подземных вод. Использованы данные (С.М. Петров, 2002; Н.А. Бизяев, 2012)

Подъем уровня подземных вод в техногенном водоносном горизонте выше отметки +150 м (после 1994 г.) спровоцировал растворение вторичных минералов<sup>6</sup>, что обеспечивает поступление в повышенных концентрациях сульфатов, никеля<sup>7</sup> и других компонентов в водозабор на восточном борту карьера (рис. 3, 5, Липовское месторождение, Восточный водозаборный узел). Техногенный водоносный горизонт стал “генератором” сульфатных солей (С.В. Палкин, С.С. Палкин, 2003).

<sup>6</sup> На месторождении отмечаются процессы современного минералообразования: на выветрелых серпентинитах обнаружены водорастворимые сульфаты – эпсомит (в том числе никельсодержащий), мелантерит (О.Г. Кецко, 1996).

<sup>7</sup> Содержание никеля в последние годы стабильно выше допустимого: по Западному узлу 0,01–0,07 мг/л ( $K_{ПДК}=3,5$ ), по Восточному 0,04–0,13 мг/л ( $K_{ПДК}=6,5$ ). Водозабор продолжает эксплуатироваться, поскольку является единственным источником водоснабжения г. Режа. Фоновое значение никеля менее 0,02 мг/л.

Таблица 5. Оценка эколого-геохимического состояния подземных вод в зоне ведения горных работ

Источник, объект	Гидродинамический процесс	Гидрогеохимический процесс	Эколого-геохимическое состояние подземных вод		
			Кс*	уровень загрязнения **	степень влияния ***
Техногенная зона аэрации	Водопонижение (карьерный водоотлив, законтурный дренаж, эксплуатационный водоотбор). Инфильтрация атмосферных осадков.	Сернокислотное выветривание пород осушенной части (техногенной зоны аэрации)	2 – 10	низкий	допустимое
			Полдневское (скв. 14э, 15э)		
Карьерное озеро	Сокращение водоотлива. Подъем уровня подземных вод. Заполнение депрессионной воронки, формирование карьерного озера. Фильтрация вод карьерного озера	Сернокислотное выветривание невыбранной руды	5 – 15	низкий	слабо выраженное
			Липовское (западный водозаборный узел) Карпинское (Северо-Восточный дренажный узел)		
Рекультивированный карьер (вскрышные породы и некондиционные руды)	Инфильтрация атмосферных осадков. Формирование локального маломощного техногенного водоносного горизонта в массиве вскрышных пород и некондиционных руд	Сернокислотное выветривание вскрышных пород и некондиционных руд	10 – 20	средний	предельное
			Полдневское (скв. 9ТН, 10ТН, 12)		
Карьерное озеро (вскрышные породы и некондиционные руды обводнены)	Подъем уровня подземных вод (заполнение депрессионной воронки, формирование карьерного озера). Фильтрация вод карьерного озера. Формирование техногенного водоносного горизонта	Сернокислотное выветривание невыбранной руды, вскрышных пород и некондиционных руд	>25 – 50	высокий и очень высокий	опасное
			Полдневское (скв. 2в, 13э) Липовское (восточный водозаборный узел) Черемшанское (скв. 32)		

Примечания. \*коэффициент концентрации содержания сульфатов в водоносном горизонте; \*\*по (Ю.Е. Саев и др., 1990; Н.Г. Гуляева, 2002); \*\*\*степень влияния на качество подземных вод техногенных факторов (СП 2.1.5.1059-01)

Выявленные закономерности изменения химического состава подземных вод в зоне, нарушенной горными работами, представлены в таблице 5. Особенности процессов формирования качества подземных вод и их эколого-геохимическое состояние зависят от направленности гидродинамических и гидрогеохимических процессов на разных этапах освоения горнопромышленной территории (Л.С. Рыбникова, П.А. Рыбников, 2015).

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Основные результаты, отражающие научную и практическую значимость выполненных исследований, сводятся к следующему.

1. Анализ мировой практики последствий завершения горных работ показал, что для управления территориями отработанных месторождений потребовалась разработка специальных законов, а на их реабилитацию тратятся значительные средства. В горном деле развиваются идеи зеленой экономики, которые становятся определяющими при разработке стратегических решений экономического развития. В последние годы стало очевидным, что возможность отработки месторождений, особенно крупных, определяется именно гарантией обеспечения экологической безопасности. По этим причинам, например, до сих пор не отрабатывается гигантское полиметаллическое (Cu-Au-Mo) месторождение меднопорфировых руд Пebbл (Pebble) в юго-западной части Аляски, США; пересмотрена технология отработки Томинского медно-порфирового месторождения (Челябинская обл.).

2. Выполненные исследования показали, что не решены проблемы горнопромышленной гидрогеологии, связанные с трансформацией гидросферы на постэксплуатационном этапе жизненного цикла месторождений полезных ископаемых. Особенности этого этапа являются его продолжительность (как правило, на порядок больше эксплуатационного), непредсказуемые гидрогеохимические процессы (взрывной характер изменения качества подземных вод, никак или слабо проявлявшийся при отработке месторождений полезных ископаемых), формирование новых очагов разгрузки подземных вод (обусловленных характером техногенных изменений рельефа), подтопление прилегающих территорий (вследствие подъема уровня подземных вод до отметок, превышающих его положение в естественных ненарушенных условиях). Обоснование мер по обеспечению экологической безопасности должно быть междисциплинарным и базироваться на прогнозе геомеханических, гидрологических, гидрогеохимических, гидродинамических процессов не только на период отработки месторождения, но и после ее завершения. При этом особенно значимой становится концепция контролируемого загрязнения, повышается роль мониторинга как инструмента получения достаточной и надежной информации для создания адекватных гидрогеоэкологических моделей.

3. Закрытые (затопленные) рудники являются аномальными в гидрогеодинамическом и гидрогеохимическом аспекте объектами, определяющими кризисные ситуации на прилегающей территории.

Последствия отработки месторождений полезных ископаемых приводят к столь серьезным гидрогеоэкологическим проблемам, что иногда затраты на их решение могут превышать стоимость реализации самого продукта, добытого за всю историю эксплуатации горного объекта. Деграция водосбора, начавшаяся при отработке, после ее завершения и затопления рудника может происходить стремительно. Особую значимость последствия отработки имеют для горноскладчатых районов (например, для Среднего Урала), где очищающая способность водосборов малых рек невысока. Реабилитация таких объектов оказывается невозможной в принципе при любых затратах, для самовосстановления подобных горнопромышленных территорий могут потребоваться сотни лет.

4. Условия формирования подземных вод, пространственная структура потока и параметры пласта в зоне ведения горных работ имеет принципиальные отличия в естественных условиях, на этапе отработки и после ее завершения. Комбинирование расчетных методов позволяет оценить гидродинамические процессы, сопровождающие затопление подземных рудников, и их последствия: оперативная оценка скорости затопления может выполняться аналитическими методами, оценка предельного положения уровня в стационарных условиях – на модели планового потока, детализация водно-балансовые составляющих и определение зоны выхода шахтных вод на поверхность – численными методами.

5. Формирование фильтрационной зональности массива горных пород в пределах горнопромышленной территории определяется геомеханическими процессами. В зонах обрушения развивается техногенная трещиноватость, которая определяет емкость массива горных пород в зонах обрушения и сдвижения (в том числе в провалах). Именно здесь при водоотливе и понижении уровня подземных вод на сотни метров формируется техногенная сернокислотная кора выветривания, обогащенная вторичными минералами. Их растворение при затоплении рудника обеспечивает нестационарный характер загрязнения подземных вод, продолжительность которого составляет десятки лет, что дало основание называть такие объекты *acid perpetuum mobile*.

6. Циклический процесс осаждения и растворения продуктов выветривания сульфидов в техногенной зоне гипергенеза является важным источником кислых металлоносных вод в районах разработки месторождений и размещения отходов добычи. После завершения отработки эти зоны становятся практически неограниченным поставщиком элементов в подземные воды в течение десятков лет. По результатам решения обратных задач определен состав пород, в результате растворения которых могут формироваться кислые подземные воды в зоне разгрузки; скорости выноса сульфатов: в настоящее время сопоставимы со значениями, которые были зафиксированы при отработке в период 1990-2000 гг. (на примере Левихинского рудника).

7. На основе анализа результатов физико-химического и геофильтрационного моделирования сформулирована гипотеза формирования качества подземных вод, объясняющая закономерности нестационарных

гидрогеохимических процессов после затопления рудника: повышенные значения всех показателей в воде зоны разгрузки в начальный период затопления обеспечиваются поступлением раствора преимущественно из зоны обрушения. Со временем возрастает роль и значение латерального потока с прилегающих территорий в разбавлении раствора, который сформировался в зоне обрушения, что приводит к снижению концентраций компонентов в зоне разгрузки. Продолжительность формирования кислых вод составляет более 50 лет.

8. Шахтные воды являются обеспеченным возобновляемым источником цветных металлов и редкоземельных элементов и могут рассматриваться как месторождения гидроминерального сырья: например, для Левихинского рудника суммарная извлекаемая ценность цветных металлов и РЗЭ из шахтных вод составляет более 500 млн руб. в год, что превышает затраты на обеспечение ежегодной нейтрализации кислых шахтных вод и величину экологического ущерба от сброса очищенных шахтных вод.

9. Изменение источников формирования эксплуатационных запасов месторождений питьевых подземных вод в зоне ведения горных работ на постэксплуатационном этапе происходит в результате привлечения ресурсов карьерных озер, поступления воды из техногенных водоносных горизонтов, сформированных в отвалах и рекультивированных карьерах. Мокрая рекультивация (частичное заполнение выработанного пространства отработанных карьеров породами вскрыши, некондиционных руд и их последующее затопление) является причиной формирования вод с очень высоким уровнем загрязнения. Это вызвано формированием техногенного водоносного горизонта, который является источником поступления продуктов сернокислотного выщелачивания, сформировавшихся в зоне окисления. В случае, если массовый расход потока, который формируется в зоне, нарушенной горными работами, превышает массовый расход за счет естественных ресурсов, эксплуатации МППВ на постэксплуатационном этапе становится проблематичной.

К основным задачам дальнейших исследований в области гидрогеологии постэксплуатационного периода относятся:

1) расширенное изучение минералогических особенностей техногенной зоны гипергенеза;

2) разработка методических и нормативно-правовых документов, регламентирующих порядок проведения работ по рекультивации нарушенных территорий с учетом прогноза изменения гидрогеологических условий после завершения горных работ.

## **Основные работы, опубликованные по теме диссертации**

### **Коллективные монографии**

1. Фельдман А.Л., Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Мониторинг подземных и поверхностных вод в горнодобывающих районах (на примере Урала). С. 298-307 / Будущее гидрогеологии: современные тенденции и перспективы: колл. моногр. СПб.: СПбГУ, ВВМ/ 2008. 420 с.

2. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Проблемы горнопромышленной гидрогеологии на постэксплуатационном этапе. С. 98-112 / Труды школы-семинара «Моделирование гидрогеологических процессов: от теоретических представлений до решения практических задач»: колл. моногр. Под редакцией к.г.-м.н. Е.С. Казак, д.г.-м.н. С.П. Позднякова. М.: МГУ, 2018. 206 с.

#### **Работы, опубликованные в изданиях из перечня ВАК**

3. Палкин С.В., Рыбникова Л.С. Государственный мониторинг подземных вод на Среднем Урале // Известия ВУЗов. Горный журнал. Уральское горное обозрение. 1995. №5. С. 49-64.

4. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Фельдман А.Л. Мониторинг состояния недр в Уральском федеральном округе // Разведка и охрана недр. 2007. №7. С. 91-94.

5. Рыбникова Л.С., Фельдман А.Л., Рыбников П.А. Геоэкологические и экономические аспекты защиты гидросферы в районах ликвидируемых рудников Урала // Дальний Восток-2: Сборник статей. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). 2009. № 05. С. 316-329.

6. Рыбникова Л.С., Фельдман А.Л., Рыбников П.А. Проблемы инженерной защиты гидросферы при отработке и ликвидации рудников Среднего Урала (на примере Левихинского рудника) // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2011. № 2. С. 58-71.

7. Рыбникова Л.С., Фельдман А.Л., Рыбников П.А. Последствия затопления медноколчеданных рудников Среднего Урала: формирование гидрогеологических условий // Проблемы недропользования: Сборник статей. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). М.: Издательство «Горная книга». 2011. № 05. С. 459-470.

8. Палкин С.В., Палкин С.С., Рыбникова Л.С. К вопросу о возможности полного водообеспечения города Екатеринбурга подземными водами // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2011. № 5. С. 75-88.

9. Антонинова Н.Ю., Чайкина Г.М., Рыбникова Л.С., Шубина Л.А., Фельдман А.Л. Геоэкологические проблемы земле- и водопользования на месторождениях Урала // Горный журнал. 2012. №1. С.89-92. (Версия Antoninova N.Yu., Chaikina G., Rybnikova L., Shubina L., Feldman A.L. Geo-ecological problems of land and water use in the Urals deposits. Eurasian Mining. 2012. № 1. P. 44-47).

10. Антонинова Н.Ю., Рыбникова Л.С., Славиковская Ю.О., Рыбников П.А., Шубина Л.А. Геоэкологическая оценка земле- и водопользования в районах освоения природного и техногенного сырья Урала // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2012. № 2. С. 194-200. (Версия Antoninova N.Yu., Rybnikova L.S., Slavikovskaya Yu.O., Rybnikov P.A., Shubina L.A. Geocological estimation of land and water use in the Ural natural and technogeneus mineral resource exploration areas. Journal of Mining Science. 2012. V. 48. № 2. P. 398-404).

11. Рыбникова Л.С. Техногенное воздействие горнодобывающих предприятий Урала на состояние гидросферы // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2012. № 1. С. 74-91.

12. Фельдман А.Л., Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Гидрогеолого-геофизические работы при обосновании проходки и эксплуатации подземных линейных выработок в сложных условиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: Горная книга. 2012. №1. С. 36-41.

13. Рыбникова Л.С., Фельдман А.Л., Рыбников П.А. Инженерная защита гидросферы при отработке и ликвидации рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: Горная книга. 2012. № 10. С. 301-306.

14. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Геофильтрационная модель массива горных пород в области влияния отрабатываемых и ликвидируемых рудников горноскладчатого Урала // Литосфера. 2013. № 3. С. 130-136.

15. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Влияние экологического ущерба, накопленного от горнодобывающей деятельности, на состояние гидросферы Среднего Урала // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 6. С. 110-118.

16. Корнилков С.В., Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Концепция геоинформационной системы «Комплексное освоение природных и техногенных ресурсов Урала» // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2013. №8. С. 93-99.

17. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Тютков О.В. Оценка влияния затопленных медноколчеданных рудников на водные объекты Среднего Урала // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2014. № 6. С. 77-91.

18. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Особенности формирования запасов месторождений подземных вод, эксплуатируемых дренажными системами на горноскладчатом Урале // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2015. № 3. С. 204-219. (Версия Rybnikova L.S., and Rybnikov P.A. Formation of Potable Groundwater Deposits Developed by Drainage Systems in the Mountain-Fold Urals // Water Resources. 2016. Vol. 43. No. 7. P. 934–947).

19. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Эколого-экономическая оценка шахтных вод на примере затопленных медноколчеданных рудников Урала // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 1. С. 52-65.

20. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А., Тарасова И.В. Геоэкологические проблемы использования выработанных карьерных пространств на Урале. ФТПРПИ. 2017. №1. С. 170-181. (Версия Rybnikova L. S., Rybnikov P. A., and Tarasova I. V. Geoeological Challenges of Mined-Out Open Pit Area Use in the Urals. Journal of Mining Science. January 2017. Volume 53. Issue 1. P. 181–190).

21. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Гидрогеологические исследования в горном деле на постэксплуатационном этапе // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2018. №. 4. С. 25–39.

#### **Публикации в других изданиях**

22. Жолобова Л.Ю., Рыбникова Л.С., Шевелева Л.Д. Моделирование процессов загрязнения подземных вод при кучном выщелачивании меди // Цветная металлургия. Научно-технические достижения и передовой опыт в цветной металлургии. 1990. №7. С. 23-25.

23. Рыбникова Л.С., Фельдман А.Л., Рыбников П.А. Geoenvironmental and economical aspects of ground and surface waters protection in eliminated mining regions of Ural. // Proceedings of the X-th jubilee national conference with international participation of the open and underwater mining of minerals. June 07-11, 2009, Varna. С. 443-449.

24. Фельдман А.Л., Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Гидрогеологические проблемы Урала. Первая Всероссийская конференция молодых ученых, посвященная памяти Валерия Александровича Мироненко / под ред. П.К. Коносаевского, Р.А.Филина. СПб: С-Петербург. гос. ун-т, 2010. С. 140-148.

25. Фельдман А.Л., Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Изменение ресурсов подземных вод в горнодобывающих районах при отработке и ликвидации рудников // Ресурсы подземных вод: Современные проблемы изучения и использования: Материалы международной научной конференции. Москва, 13-14 мая 2010 г.: К 100-летию со дня рождения Бориса Ивановича Куделина. М.: МАКС Пресс, 2010. С. 200-205.

26. Фельдман А.Л., Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Защита питьевых водозаборов при осушении и затоплении карьеров горноскладчатого Урала// Питьевые воды. Изучение, использование и информационные технологии. Матер. Междунар. научно-практ. конф. (18-22 апреля 2011 г.). Ч. 4. Московская область, г. Балашиха: ФГУ ВНИИПО МЧС России. С.88-98.

27. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Эволюция подземной и поверхностной гидросферы горнопромышленных территорий Урала // Подземная гидросфера: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам востока России. Иркутск: Изд-во ООО «Географ», 2012. С. 117-120.

28. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Гидрогеологические проблемы постмайнинга на Среднем Урале / Гидрогеология сегодня и завтра: наука, образование, практика: Материалы международной научной конференции: Москва, 22-24 мая 2013 г.: К 60-летию со дня основания кафедры гидрогеологии МГУ имени М.В. Ломоносова / Сост. Корзун А.В., Поздняков С.П. М.: МАКС Пресс, 2013. С. 96-102.

29. Рыбников П.А., Рыбникова Л.С. Изучение фильтрационной неоднородности и адаптация геофильтрационных моделей трещиноватых массивов горноскладчатого Урала / Гидрогеология сегодня и завтра: наука, образование, практика: Материалы международной научной конференции: Москва, 22-24 мая 2013 г.: К 60-летию со дня основания кафедры гидрогеологии МГУ имени М.В. Ломоносова / Сост. Корзун А.В., Поздняков С.П. М.: МАКС Пресс, 2013. С. 260 – 264.

30. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Использование подземных вод для питьевого водоснабжения при отработке и консервации месторождений полезных ископаемых / Сборник материалов XII Международного научно-практического симпозиума и выставки «Чистая вода России». 14-16 мая 2013 года, г. Екатеринбург. С. 360-367.

31. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Гидрогеологические проблемы постмайнинга на Среднем Урале // Материалы II Всеросс. науч.-прак. конф. «Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии Урала и сопредельных территорий» (г. Екатеринбург, 9-12 декабря 2013 г.). Екатеринбург: Уральский государственный горный Университет, 2013. С. 143–147.

32. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Оценка накопленного экологического вреда водным объектам в районе медноколчеданных рудников Среднего Урала // Экологическая безопасность горнопромышленных регионов: Труды II Международной научно-практической конференции. Екатеринбург: Уральский государственный горный Университет, 2014. С.166-170.

33. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Формирование ресурсов и качества подземных вод в районах ликвидируемых рудников Среднего Урала // Развитие научных идей академика Е.М. Сергеева на современном этапе. Юбилейная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения академика Е.М. Сергеева. Вып. 16. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (21 марта 2014 г.). Москва: РУДН, 2014. С. 467-472.

34. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Шахтные воды затопленных медноколчеданных рудников как возобновляемые месторождения гидроминерального сырья //Труды Конгресса с международным участием и элементами школы молодых ученых «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований». Екатеринбург: УрО РАН (Уральский рабочий), 2014. С. 347-351.

35. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Шахтные воды затопленных медноколчеданных рудников Урала: техногенные месторождения или жидкие отходы? // Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: материалы XIII междунар. конф. (Москва (Россия) - Грузия (Тбилиси) 15-21 сентября 2014 г.) / под ред. А.Е. Воробьева, Т.Н. Чекушиной. Москва: РУДН, 2014. С. 33–35.

36. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Оценка риска утраты питьевых водозаборов в районах ликвидируемых рудников Среднего Урала // Фундаментальные и прикладные проблемы гидрогеологии. Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России (XXI Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с международным участием). Г. Якутск, 22-28 июня 2015 г. С. 499-504.

37. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Гидрогеохимия техногенных процессов разрабатываемых и ликвидированных медноколчеданных месторождений Среднего Урала //

Материалы 2-й Всероссийской конференции с международным участием «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами», г. Владивосток, 06-11 сентября 2015. Федеральное государственное унитарное предприятие "Издательство Дальнаука" (Владивосток), 2015. С. 503-507.

38. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Гидрогеохимические риски на горнопромышленных территориях Среднего Урала // Анализ, прогноз и управление природными рисками в современном мире: материалы 9-й научно-практической конференции ГЕОРИСК-2015: в 2-х т. / отв. ред. В.И.Осипов. Москва: РУДН, 2015. Т. 2. С. 313-319.

39. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Экологическая реабилитация водных объектов после завершения добычи на медноколчеданных рудниках Среднего Урала // Сергеевские чтения. Инженерная геология и геоэкология. Фундаментальные проблемы и прикладные задачи. Вып. 18. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (24-25 марта 2016 г.). Москва: РУДН, 2016. С. 415-419.

40. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Hydrogeochemistry of the abandoned sulfide mines of the Middle Urals (Russia) // Procedia Earth and Planetary Science. 17. 2017. P. 849 – 852.

41. Rybnikov P.A., Rybnikova L.S. Formation of waste-rock drainage water on massive sulfide deposits of the Urals (Russia) // Procedia Earth and Planetary Science. 17. 2017. P. 857 – 860.

42. Rybnikov P.A., Rybnikova L.S. Waste disposal in the open pits: the hydrogeological aspects and the influence on the environment (the South Urals, Russia). 13th International Mine Water Association Congress. Mine Water & Circular Economy. 25–30 June 2017. Lappeenranta – Finland. Editors: Christian Wolkersdorfer, Lotta Sartz, Mika Sillanpää, Antti Häkkinen. 2017. Proceedings, 63, Volume 1. P. 489-494.

43. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Water quality of the abandoned sulfide mines of the Middle Urals (Russia). 13th International Mine Water Association Congress. Mine Water & Circular Economy. 25–30 June 2017. Lappeenranta – Finland. Editors: Christian Wolkersdorfer, Lotta Sartz, Mika Sillanpää, Antti Häkkinen. 2017. Proceedings, 63, Volume 1. P. 753-760.

44. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Гидродинамическая модель затопления рудников горноскладчатого Урала / Сергеевские чтения. Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии в рамках Года экологии в России. Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. М.: Издательство Российский университет дружбы народов (РУДН), 2017. С. 416-421.

45. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Гидрогеологические исследования в горнопромышленных районах на постэксплуатационном этапе // Подземные воды Востока России: материалы Всерос. Совещания по подземным водам Востока России (XXII Совещание по подземным водам Сибири и Дальнего Востока с междунар. участием), г. Новосибирск, 18-22 июня 2018 г. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018. С. 403-408.

46. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Гидрогеохимия редкоземельных элементов техногенной зоны гипергенеза отработанного медноколчеданного рудника // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: мат-лы третьей Всерос. конф. с междунар. участием 20–25 августа 2018 г., г. Чита. Улан-Удэ: Издательство БНЦ СО РАН, 2018. С. 370-374.

47. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Гидрогеохимия горнопромышленных ландшафтов Среднего Урала на постэксплуатационном этапе // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Рациональное природопользование. Современное минералообразование: тр. VII Всерос. симпозиума с междунар. участием и XIV Всерос. чтений памяти академика А.Е. Ферсмана. Забайк. гос. ун-т, Ин-т природных ресурсов, экологии криологии СО РАН. Чита: ЗабГУ, 2018. С. 167-172.