

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт горного дела
Уральского отделения Российской академии наук

На правах рукописи

Рыбникова Людмила Сергеевна

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

Специальность 25.00.07 – гидрогеология

Диссертация на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Екатеринбург-
2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ, СОСТОЯНИЕ ЕЁ ИЗУЧЕННОСТИ	18
1.1 Гидрогеологические и экологические проблемы постэксплуатационного этапа в горнопромышленных районах	18
1.2 Современное состояние исследований по проблеме.....	28
1.3 Основные задачи исследования.....	33
2 ОСНОВНЫЕ РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СРЕДНЕГО УРАЛА. ОБЩАЯ ГИДРОГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА	53
2.1. Оротографическая характеристика.....	53
2.2 Гидрогеологические условия	57
2.3 Техногенное воздействие горнодобывающей промышленности	65
2.4 Гидрогеоэкологические последствия горных работ на постэксплуатационном этапе	71
Выводы по разделу.....	85
3 ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В РАЙОНАХ ОТРАБАТЫВАЕМЫХ И ЛИКВИДИРУЕМЫХ РУДНИКОВ	87
3.1 Гидродинамические процессы, сопровождающие затопление подземных рудников, и их последствия	87
3.2 Обоснование принципов геофильтрационной схематизации области гидродинамического воздействия рудника	88
3.3 Прогноз подтопления эмпирическими методами.....	103
3.4 Прогноз подтопления аналитическими методами.....	107
3.5 Модель планового потока подземных вод в области гидродинамического воздействия рудника	112
3.6 Численная модель и водно-балансовые составляющие (на примере Левихинского рудника)	117
Выводы по разделу.....	129

4 ГИДРОГЕОХИМИЯ ОТРАБАТЫВАЕМЫХ И ЗАТОПЛЕННЫХ МЕДНОКОЛЧЕДАННЫХ РУДНИКОВ	133
4.1 Проблемы формирования кислых шахтных вод.....	133
4.2 Гидрогеохимия процесса.....	142
4.3 Особенности формирования гидрохимического режима в районе Левихинского рудника.....	155
4.4 Гидрогеохимия редкоземельных элементов техногенной зоны гипергенеза отработанного медноколчеданного рудника	178
4.5 Физико-химическое моделирование формирования растворов.....	184
4.6 Гидрогеомиграционное моделирование	188
Выводы оп разделу.....	191
5 ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ СТАРОПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ	195
5.1 Методы очистки и обработки шахтных вод.....	197
5.2 Шахтные воды как источник гидроминерального сырья	203
5.3 Шахтные воды как источник загрязнения гидросферы	209
5.4 Сопоставление потенциальной ценности шахтных вод и ущерба от загрязнения водных объектов	219
Выводы по разделу.....	220
6 ФОРМИРОВАНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПИТЬЕВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ДОБЫЧЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ НА ГОРНОСКЛАДЧАТОМ УРАЛЕ	223
6.1 Опыт использования подземных вод для питьевого водоснабжения при отработке и консервации МТПИ	223
6.2 Закономерности формирования ресурсов и качества месторождений подземных вод в районе ведения горных работ.....	226
Выводы по разделу.....	255
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	261
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	265

ВВЕДЕНИЕ

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. Вокруг рудников происходило строительство перерабатывающих заводов и населенных пунктов: в частности, комплекс бывших и нынешних заводов-городов трассирует Зеленокаменную полосу – региональную провинцию медноколчеданных месторождений [Емлин, 1991]. Уральский рудный район относится к числу крупнейших колчеданосных провинций мира и занимает второе место в мире после Иберийского колчеданного пояса [Контарь, 2013].

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 опасностями 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: это изменение состояния подземных и поверхностных вод, нестабильность земной поверхности, выходы 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 [Wolkersdorfer, 2008; Lottermoser, 2012].

За последние десятилетия на Среднем Урале было закрыто и затоплено большое количество рудников, что привело к серьезным гидрогеоэкологическим проблемам [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: около 10% от общего объема загрязняющих веществ поступает в реки на водосборах, где расположены как действующие, так и отработанные рудники [Государственный доклад, 2013].

Актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью углубления и развития научно-методических и практических основ горнопромышленной гидрогеологии в старопромышленных районах на постэксплуатационном этапе.

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 [Мироненко и др., 1980; Тютюнова, 1987; Норватов, 1988; Плотников, 1989; Грязнов и др., 1995; Мироненко и Румынин, 1999; Абдрахманов и Попов, 2010]. Применительно к горнопромышленным объектам на постэксплуатационной стадии эти проблемы представляют собой интенсивно развивающуюся область исследований [Емлин, 1991; Имайкин и Имайкин, 2013; Елохина, 2014; Тарасенко, 2014; Maest et al., 2006; Wolkersdorfer, 2008; 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 [Рюмин, 1998; Елохина,

2002, 2003, 2004, 2014; Имайкин, 2005; Питаленко, 2007; Норватов и Петрова, 2009; Ягунова, 2010; Тарасенко, 2014].

Одним из ведущих источником негативного воздействия на окружающую среду горнопромышленных регионов являются техногенно-минеральные образования [Рыбаков, 1998; Бортникова, 2001; Пашкевич, 2001; Гаськова, 2005; Плюснин, 2001; Белан, 2006; Lottermoser, 2012]. На Урале наиболее масштабные из них формируются базовыми отраслями уральской промышленности - черной и цветной металлургией в районах добычи и переработки исходного сырья [Яковлев и др., 1999; Мормиль и др., 2002; Макаров, 2007; 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» [Грязнов и др., 1997; Табаксблат, 1999; Зотеев и др., 2009; Шадрунова и Орехова, 2009; Никонов и др., 2014; Nordstrom et al., 2017].

Геохимические особенности и физико-химические параметры гипергенных процессов в зонах техногенеза определяют интенсивность окислительного выветривания пирита и других сульфидных минералов, что приводит к формированию кислотных вод с повышенным содержанием металлов и редкоземельных элементов [Смирнов, 1951; Емлин, 1991; Яхонтова и Зверева, 2007; Рыженко и др., 2015; Alpers and Nordstrom, 1991; Blowes et al., 2014]. Для зоны гипергенеза характерна повышенная геохимическая подвижность химических элементов, активные процессы их рассеивания и концентрирования, в ней происходит разрушение и переотложение минералов [Шварцев, 1998, 2007, 2008]. В техногенной коре выветривания активными агентами преобразования наряду с природными физическими, химическими и биологическими факторами являются антропогенный и техногенный факторы, которые значительно ускоряют процессы выветривания и степень преобразования пород [Сунгатуллин, 2010].

В результате геомеханических и гидрохимических процессов в открытых горных выработках, в зонах обрушения, в отвалах формируется техногенная

сернокислотная кора выветривания, где происходит формирование и накопление водорастворимых вторичных минералов, или неосульфатов, которые включают соли продуктов выветривания сульфидов - гидросульфаты железа, магния, алюминия [Емлин, 1991; Белогуб, 2009; Nordstrom and Alpers, 1999; Hammarstrom et al., 2005; 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 [Ягунова, 2010; Имайкин, 2012; Younger, 1997; 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 [Бортникова и др., 2006; Табаксблат, Бизяев, 2008; Рыженко и Рябенко, 2013; Елохина и Рыженко, 2014; Зверева и др., 2016; Appelo and Postma, 2005], в том числе для решения обратных задач на основании расчета массового баланса [Nordstrom, 2011].

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.

Цель работы. Выявление закономерностей гидродинамических и гидрогеохимических процессов формирования подземных вод в горнодобывающих районах Среднего Урала на постэксплуатационном этапе,

обоснование их генезиса, 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 самореабилитации 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.

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

Фактический материал. 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 горно-металлургического 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 [Allison et al., 1991]. Геофильтрационное и геомиграционное моделирование выполнялось с использованием программных кодов MODFLOW [Harbaugh, McDonald, 1996] и RMPATH [Chiang, 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

В диссертационной работе получило развитие современное научное направление, связанное с горнопромышленной гидрогеологией постэксплуатационного этапа:

- 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 отработываемых 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); 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); XIII международная конференция «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр» (Тбилиси, 2014); 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); 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);

- всероссийских: Первая Всероссийская конференция молодых ученых, посвященная памяти В. А. Мироненко (С-Петербург, 2010); Комплексные проблемы гидрогеологии (Санкт-Петербург, 2011); XX, XXI, XXII Всероссийские совещания по подземным водам востока России (Иркутск, 2012; Якутск, 2015; Новосибирск, 2018); конференция «Комплексные проблемы гидрогеологии», посвященная 125-летию со дня рождения Б. Л. Личкова (Санкт-Петербург, 2013); II Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы гидрогеологии, инженерной геологии и геоэкологии Урала и сопредельных территорий» (Екатеринбург, 2013); Юбилейная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения академика Е. М. Сергеева (Москва, 2014); Конгресс с международным участием и элементами школы молодых ученых «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» (Екатеринбург, 2014); Всероссийская научно-практическая конференция «Состояние, проблемы и перспективы геологоразведочных и научно-исследовательских работ в области гидрогеологии, инженерной геологии, геокриологии и геоэкологии» (Москва,

2014); XIII Международный научно-практический симпозиум и выставка «Чистая вода России» (Екатеринбург, 2015); 2-я, 3-я Всероссийская конференция с международным участием «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами» (Владивосток, 2015; Чита, 2018); Годичная сессия Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Восемнадцатые Сергеевские чтения (Москва, 2016); Девятнадцатые Сергеевские чтения. Геоэкологическая безопасность разработки месторождений полезных ископаемых. Научная конференция в рамках Года экологии в России (Москва, 2017); XIV всероссийские чтения памяти академика А.Е. Ферсмана по проблемам «Рациональное природопользование» и «Современное минералообразование» (Чита, 2018);

- специальных научных совещаниях: Неделя горняка (Москва, 2010, 2011); Горнопромышленная декада (Екатеринбург, 2011); Научно-практическая конференция «Математическое моделирование, геоинформационные системы и базы данных в гидрогеологии» (Московская обл., 2013); I, II, III Научно-практическая конференция с международным участием. Технологическая платформа «Твердые полезные ископаемые: Технологические и экологические проблемы отработки природных и техногенных месторождений» (Екатеринбург, 2013, 2015, 2017); Школа-семинар для молодых ученых, аспирантов и магистрантов «Модели гидрогеологических процессов: от теоретических представлений до решения практических задач», посвящённая 90-летию со дня рождения профессора В. М. Шестакова (Москва, 2017).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 60 работ, из них 2 – в коллективных монографиях, 20 - 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*: «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 четвертой главе «Гидрогеохимия отработываемых 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*: «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 приводят к низким темпам самореабилитации горнопромышленных территорий».

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*: «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».

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*: «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».

1 ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ, СОСТОЯНИЕ ЕЁ ИЗУЧЕННОСТИ

1.1 Гидрогеологические и экологические проблемы постэксплуатационного этапа в горнопромышленных районах

Завершение отработки большого числа месторождений в последние годы (как в мире, так и в России) привело к необходимости управления территориями, нарушенными многолетними горными работами, а также экологическими опасностями в районах старых отработанных рудников. Для обозначения периода, следующего за периодом отработки, используются различные термины: регрессивная (пассивная) стадия техногенеза (развития геосистемы) [Емлин, 1991; Кецко, 1996; Палкин, Палкин, 2003; Гуман и др., 2013; Елохина, 2013], постмайнинг [Шубин, 2006], конец жизненного цикла месторождения, фаза консервации объекта [ГОСТ Р 55100-2012], постэксплуатационная стадия (этап, период) [Елохина, 2013, 2014; Тюленев и др., 2015], постотрабочный период [Дребенштедт, 2013; Славиковская и др., 2016]; в англоязычной литературе - post-mining, reclamation [Younger et al., 2002; Wolkersdorfer, 2008; Mine closure ..., 2008].

Независимо от состояния горных работ наравне с задачами развития горной промышленности все более актуальными становятся не только проблемы ликвидации нерентабельных предприятий, но и вопросы управления опасностями в районах, где горнодобывающая деятельность завершена. О значимости выполнения работ, направленных на проведение реабилитации горнопромышленных территорий, организацию процесса затопления и его мониторинг, свидетельствует тот факт, что несколько лет назад в Высшей школе технических наук им. Георга Агриколы (г. Бохум, Германия) была открыта новая специальность в магистратуре «Геомеханика и постэксплуатационная фаза горных предприятий» [Тюленев и др., 2015].

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: это изменение состояния подземных и поверхностных вод, нестабильность земной поверхности, выходы токсичных газов или опасных веществ в окружающую среду.

К настоящему времени многие страны, ранее в течение столетий интенсивно развивавшие горную промышленность, исчерпали запасы полезных ископаемых и прекратили или значительно снизили горнодобывающую активность. В некоторых странах произошло практически полное исчезновение горной промышленности (например, в Великобритании, Корее, Франции, Японии и др.). Точное количество закрытых шахт и горных выработок неизвестно, предположительно их число во всем мире превышает несколько миллионов (только в последние десятилетия их количество превысило десятки тысяч), они занимают огромные площади и являются долговременной угрозой существованию человека и окружающей среды на больших территориях [Wolkersdorfer, 2008]. Наиболее остро последствия горнодобывающей деятельности проявились в таких странах, как Австралия, Великобритания, Канада, США, ЮАР, в меньшей степени – Ирландия, Швеция, Чили, Япония [Mining for ..., 2002]. Однако и в других странах эти проблемы весьма актуальны: детальное исследование 10 восточно-европейских стран (включая Болгарию, Польшу, Румынию, Чехию) выявило несколько тысяч потенциально опасных закрытых горных объектов [Mining, mining ..., 2004]. Территории на границах Германии, Польши и Чешской Республики, которые были загрязнены в результате многолетней деятельности предприятий горнорудной промышленности, входят в зону так называемого «Черного треугольника» [Соловьянов, 2015].

Старопромышленные районы Европы после прекращения горнодобывающей деятельности столкнулись с серьезными проблемами. Одни из крупнейших в Европе регионов с большой плотностью отработанных угольных шахт и населения – Aachen (Германия) и South-Limburg (Нидерланды). После 800 лет горные работы в 1992 г. были прекращены, воронка депрессии площадью

около 400 км² заполнилась за несколько лет, уровень подземных вод поднялся на 200-240 м [Wolkersdorfer, 2008; Тюленев и др., 2015].

В Германии в 2012 г. была прекращена добыча каменного угля на территории Саарланд, насчитывающей двухсотлетнюю историю добычи. К 2020 г. будет завершена отработка Рурского каменноугольного бассейна, где уголь добывался с XII века. Обеспечение безопасного процесса затопления подземных выработок в Рурском горнопромышленном регионе потребует больших финансовых затрат [Тюленев и др., 2015].

По оценкам, выполненным для территории Германии, затраты на проведение рекультивационных работ (в пересчете на единицу полезного ископаемого) иногда могут превышать стоимость реализации самого продукта, добытого за всю историю эксплуатации горного объекта [Дребенштедт, 2013].

Триста лет угледобычи в бассейне Durham (Англия) привели к осушению водоносных горизонтов на огромных площадях, прекращение водоотлива и заполнение депрессионной воронки спровоцировало бы многочисленные негативные последствия, в том числе - загрязнение питьевых водозаборов подземных вод, подтопление отвалов, отстойников и их активное выщелачивание и др. Для предотвращения этого была организована система откачки шахтных вод для поддержания уровня ниже продуктивного водоносного горизонта (Basal Permian Sands), построен завод по очистке шахтных вод производительностью около 15 тыс.м³/сут [Younger, 1993; Coulton et al, 2004; Wolkersdorfer, 2008].

В США закрыто более 500 тыс. рудников, из них потенциальными рисками обладают около 30 тыс. объектов. В базе данных AMLIS (Abandoned Mine Land Inventory System) собрана информация о 48529 отработанных угольных шахт, из них к первой категории опасности относится 2465 объектов. Геологическая служба США (USGS) ведет базу данных минеральных ресурсов (Mineral Resources Data System, MRDS), которой охарактеризованы 64833 отработанных рудника.

Отработанные горные объекты на западе США являются самыми крупными и дорогостоящими, на которых Агентство по охране окружающей среды (US

ЕРА) проводило многолетние широкомасштабные реабилитационные работы за счет средств Суперфонда.

Несколько крупных шахт в США, отработанных во второй половине двадцатого века, объявили о банкротстве, а ответственность за постоянное обращение с кислыми водами оставили будущим поколениям. В качестве примеров можно привести шахту Зортман Ландуски (Zortman Landusky) в штате Монтана, шахту Саммитвилль (Summitville) в Колорадо, рудник Бром (Brohm) в Южной Дакоте. Горнодобывающие предприятия на западе США, в том числе, Банкер Хилл (Bunker Hill) в Айдахо, Батл-Кларк Форк Ривер (Butte-Clark Fork River) в Юго-Западной Монтане, Айрон Маунтен (Iron Mountain Mine) в Калифорнии являются самыми крупными и дорогостоящими объектами, на которых Агентство по охране окружающей среды (EPA USA) проводило многолетние работы за счет средств Суперфонда. Так, на территории медного рудника Айрон Маунтен (Iron Mountain Mine) начиная с 1988 г. проводятся широкомасштабные реабилитационные работы, стоимость их варьирует от 3 до 9 млн \$ США в год. По итогам работ в течение 25 лет ЕРА заявило, что достигнуто принципиальное улучшение состояния окружающей среды, а созданная система очистки удаляет до 99% металлов из кислых вод. Однако показатели, установленные в начале работ, не могут быть достигнуты во всех водных объектах, так как на них продолжают влиять неконтролируемые рассредоточенные (диффузные) источники формирования кислых вод на водосборе. Их полная очистка будет стоить неоправданно дорого[Fifth Five-Year ..., 2013].

Негативные, а иногда и катастрофические последствия завершенной отработки на постэксплуатационном этапе можно проиллюстрировать многими примерами. 5 августа 2015 г. за счет поступления подземных вод из штольни шахты Gold King (Колорадо, США), отработанной более 40 лет назад, произошло загрязнение реки Анимас (приток р.Колорадо) тяжелыми металлами. Был объявлен режим ЧС в штатах Колорадо и Нью-Мехико, в Сенате США прошли

слушания по вопросам предотвращения подобных инцидентов на заброшенных шахтах (сентябрь 2015 г.) [Technical Evaluation ..., 2015].

В 1994 г. началась реструктуризации угольной промышленности России. Было ликвидировано 203 угледобывающих предприятия (188 шахт и 15 разрезов). При министерстве энергетики России в 1997 г. создано главное управление по вопросам реорганизации и ликвидации нерентабельных шахт и разрезов (ГУРШ), в задачи которого входит организация разработки проектов ликвидации неперспективных и особо убыточных шахт и разрезов и мониторинг реализации таких проектов. Проведение работ по реструктуризации угольной отрасли РФ планировалось Минэнерго России выполнить до 2010 г., однако из-за недостаточного финансирования их выполнение не будет завершено ранее 2018 г. [5].

Вопреки ожидавшимся сценариям развития негативных последствий закрытия и затопления угольных шахт в различных угольных бассейнах России, многие вызванные ими явления оказались более длительными и нестабильными. В Кузнецком и Донецком угольных бассейнах значительные территории оказались подтопленными, загрязнены и выведены из строя питьевые водозаборы, наблюдаются выходы токсичных газов и просадки земной поверхности [Прогноз негативных..., 2006; Об экологических последствиях..., 2010; Лангольф и др., 2007; Лудзиш, 2012]. После закрытия шахт Кизеловского бурогоугольного бассейна осталось 14 изливов кислых шахтных вод, которые попадают в бассейны рек Чусовая, Косьва, Яйва, Вильва, загрязнение поверхностных вод и донных осадков прослеживается до Камского водохранилища [Имайкин, 2005; Максимович и др., 2006; Мирошниченко, 2011].

Уральский регион является уникальной геохимической провинцией, где на территориях от Заполярья до южных границ Оренбургской области и Башкортостана находятся многочисленные разведанные, разрабатываемые и ликвидированные месторождений полезных ископаемых. В последние десятилетия в пределах горноскладчатого Урала большое количество рудников было закрыто и затоплено. В старопромышленных районах Урала, где

сосредоточено наибольшее количество нарушенных при добыче минерального сырья территорий, застроенные территории находятся, как правило, в непосредственной близости от горнодобывающих предприятий. Это приводит к возникновению серьезных гидрогеоэкологических проблем на постэксплуатационном этапе [Елохина, 2014]. В районе многих из затопленных рудников происходит подтопление прилегающих территорий, формируются кислые шахтные воды, в первую очередь на медноколчеданных - наиболее опасных по степени экологического влияния.

Управление территориями отработанных месторождений, особенно старых и бесхозных рудников, потребовало разработки специальных законов, на их реабилитацию тратятся значительные средства.

В законодательстве большинства стран, начиная с 80-х годов прошлого века, закреплено положение о том, проведение рекультивационных мероприятий после завершения работ является обязанностью предприятия. Как правило, формируется специальный фонд в составе налога на добычу, горнодобывающие компании должны зарезервировать и разместить на счетах примерно две трети от общей суммы, необходимой на проведение ликвидационных работ. Однако по разным причинам после прекращения добычи многие объекты становятся источниками экстремального загрязнения окружающей среды на длительный период.

В 1980 г. в США был принят Закон «О всеобъемлющих мерах по охране окружающей среды, выплате компенсаций и ответственности», известный как Закон о Суперфонде (Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act, CERCLA). Был образован фонд, средства которого идут на очистку территорий, когда невозможно найти ответственных за данный участок. Значительную часть объектов, реабилитация которых осуществлялась за счет средств Суперфонда, составляют отработанные рудники. Выполнение закона о Суперфонде координирует Агентство по защите окружающей среды (Environmental Protection Agency, EPA USA).

В 2013 г. Министерство природных ресурсов РФ разработало Законопроект «О ликвидационных фондах», целью которого является финансовое обеспечение процедуры ликвидации промышленных объектов на отработанных месторождениях, ликвидация экологического ущерба, накопленного за годы разработки месторождений, рекультивация земель, консервация горнодобывающих объектов [Проект Федерального ..., 2013]. При сокращении рентабельности добычи полезных ископаемых горнодобывающие компании заявляют о банкротстве и, как следствие, не имеют денег на рекультивацию, в этом случае ликвидацией занимается государство, что серьезно бьет по бюджету. За 1994–2008 годы в России на ликвидацию заброшенных месторождений было потрачено из бюджета 36,4 млрд рублей. На конец 2013 года общий долг недропользователей по ликвидационным работам составлял 16 млрд рублей [Истощенные месторождения ..., 2014]..

Создание специального фонда направлено на то, чтобы у компании были деньги на приведение отработанного месторождения в подобающий вид, причем, под процедуру банкротства эти деньги не попадают. Сумма отчислений в спецфонды должна зависеть от вида полезного ископаемого, применяемых по его добыче технологий и сроков реализации проекта. Затраты на ликвидацию составят до 7% от затрат на строительство объектов. По словам министра природных ресурсов Сергея Донского, фонд станет своего рода ОСАГО недропользователей [Министр природных ..., 2014]. До настоящего времени закон не принят, против него активно выступают представители горнопромышленных предприятий [Минприроды РФ..., 2014].

Деятельность горного производства сопровождается образованием большого количества отходов и является одной из основных причин загрязнения окружающей среды. Даже внедрение самых лучших технологий в мире не позволяет использовать больше, чем 2-3% извлечённой из недр горной массы, а остальная её часть превращается либо в отходы (около 78%), либо в промышленные выбросы и сбросы (около 20%) [Государственный ..., 2016]. Для получения 1 т цветных металлов извлекается 1-3 тыс. т вмещающих и вскрышных

пород, образуется до 100 т хвостов обогащения. Отходы добычи и обогащения при извлечении редких элементов превышают целевой продукт в миллионы раз [Юмаев, 2014].

В особенности это касается экологического ущерба, накопленного в результате прошлой деятельности горнодобывающей отрасли. Необходимость ликвидации прошлого (накопленного) вреда окружающей среде к настоящему времени нашла свое отражение на законодательном уровне. В Федеральный закон "Об охране окружающей среды" (№ 7-ФЗ от 10.01.2002 г.) внесены изменения, вступившие в силу 01.01.2017 г. Согласно Федеральному закону № 7-ФЗ «накопленный вред окружающей среде - вред окружающей среде, возникший в результате прошлой экономической и иной деятельности, обязанности по устранению которого не были выполнены либо были выполнены не в полном объеме». В 2016 г. Росприроднадзор совместно с региональными властями проводил работу по постановке на учет предприятий и присвоению категорий экологической опасности. Поступило более 670 тысяч заявок, выдано около 130 тысяч свидетельств о постановке на учет. Из них к объектам I категории опасности отнесено более 5 тысяч объектов. На основе этих данных будет сформирован перечень из 300 пилотных предприятий. Ликвидация таких объектов будет осуществляться в рамках проекта «Чистая страна» [В 2017 г. Минприроды ..., 2017]. По предварительной оценке Минприроды России наиболее проблемными субъектами Российской Федерации по направлению «Экологическая реабилитация территорий, подверженных негативному воздействию объектов накопленного экологического ущерба в результате прошлой хозяйственной деятельности добывающей и горно-обогатительной промышленности» являются Забайкальский край, Кемеровская область, Республика Саха (Якутия), Свердловская область. В числе первоочередных мероприятий предложены «Ликвидация последствий загрязнений Карабашского ГОС (Челябинская область)», «Ликвидация загрязнения шахтными водами водных объектов, используемых для водозабора (Свердловская обл.)», в том

числе бывших Левихинского и Дегтярского рудника [Федеральная целевая..., 2013].

В последние годы появились примеры того, что возможность отработки месторождений, особенно крупных, определяется именно гарантией обеспечения экологической безопасности. Основой таких оценок является гидрологический и гидрогеохимический прогноз не только на период отработки, но и после ее завершения. Например, гигантское полиметаллическое (Cu-Au-Mo) месторождение золотосодержащих меднопорфировых руд Пеббл (Pebble) в юго-западной части Аляски, США было разведано еще в начале 2000-годов и до сих пор не получило разрешение на эксплуатацию, поскольку разработчики не смогли гарантировать отсутствие рисков для окружающей среды [Wobus et al., 2012]. Оработка месторождения Пеббл (Pebble) планируется на первом этапе (в течение 80 лет) карьерами (глубина 1200 м), будут сооружены несколько шламонакопителей (высота дамб более 200 м, длина около 6 км). Это приведет выщелачиванию металлов и формированию кислых вод из-под отвалов и хвостов переработки (в том числе и после завершения добычи); к изъятию огромного количества воды, что отрицательно повлияет на весь водосбор Бристольского залива, который является крупнейшим в мире нерестилищем лосося (нерки). Проект Пеббл Майн (Pebble Mine) был заблокирован в 2014 г. администрацией Б. Обамы, но после прихода в Белый Дом Д.Трампа, который неоднократно высказывался в поддержку увеличения добычи полезных ископаемых, инвесторы заручились поддержкой американского корпуса инженеров (U.S. Army Corps of Engineers) и подали апелляцию в Американское Агентство по защите окружающей среды (US EPA). Однако US EPA снова высказалось против реализации проекта строительства Пеббл Майн (Pebble Mine) [EPA Administrator ..., 2018].

В России по результатам экологического аудита проекта строительства Томинского ГОКа, выполненного по настоянию жителей Челябинской области, Русская медная компания пересмотрела технологию переработки руды Томинского медно-порфирового месторождения и отказалась от использования

гидрометаллургии. Кроме того, вместо сооружения хвостохранилища (площадью более 800 га с дамбой высотой около 100 м) планируется реализовать проект по сгущению нетоксичных хвостов обогащения и отправлять закладочный материал по пульпопроводу длиной в 14 км для рекультивации отработанного Коркинского угольного разреза (глубиной 500 м). Таким образом, возможно, будет решена (частично) одна из главных экологических проблем Южного Урала. Это также может стать крупнейшей в России инициативой по ликвидации накопленного экологического вреда: на рекультивацию Коркинского разреза понадобится около 2,5 млрд рублей (общие инвестиции в проект строительства Томинского ГОКа оцениваются в 65,9 млрд рублей) [Медь на Томинском ..., 2017].

Эти примеры показывают, что ситуация в горном деле находится в общем тренде развития идей зеленой экономики, которые становятся определяющими при разработке стратегических решений экономического развития как в развитых, так и в развивающихся странах [Романова О.А., Пономарева А.О., 2017]. С 2020 года в России в 4 раза увеличится плата за выбросы и сбросы сверх установленных нормативов, поэтому к 2019 году должны заработать основные механизмы по внедрению наилучших доступных технологий [ГОСТ Р 55100-2012; ИТС 16-2016]. Эти технологии, которые называют «природоподобными», становятся определяющими в процессе перехода к новому технологическому укладу. Такой уклад ориентирован не только на технологический рост, но, главным образом, на повышение качества жизни. Появилось новое научное направление, связанное с разработкой экологии технологий, основу которого составляет концепция управления рисками [Иванов, 2011; Иванов, Малинецкий, 2016]. Применение технологий, не соответствующих уровню культурного развития, приводит к катастрофам. Любая технология, даже сама прогрессивная и социально-направленная, имеет пределы своего применения, при переходе через которые она может нанести ущерб, сопоставимый с положительным эффектом или превосходящим его. Принципиальным решением является поиск оптимального соотношения между риском и реально существующими возможностями обеспечения безопасности.

1.2 Современное состояние исследований по проблеме

Гидрогеологическим, гидрохимическим, гидродинамическим, геомеханическим, геоэкологическим проблемам, которые возникают при отработке месторождений твердых полезных ископаемых, посвящено большое количество работ российских и зарубежных исследователей.

Научно-методические разработки в области горной гидрогеологии принадлежат таким ученым, как Д.И. Щеголев (1948, 1957), Г.Н. Каменский и др. (1953), П.П. Климентов, А.М. Овчинников (1953, 1966), С.П. Прохоров (1955), Н.И. Плотников и др. (1957, 1984, 1987), С.В. Троянский (1960), В.А. Мироненко и др. (1965, 1970, 1976, 1982), С.К. Абрамов, О.Б. Скиргелло (1968), В.Д. Бабушкин и др. (1969), Ю.А. Норватов (1976, 1988, 2007), В.А. Мироненко и В.Г. Румыниным (1980, 1988, 1989, 1999).

Целью горной гидрогеологии является обеспечение экономически эффективных и безопасных условий ведения горных работ на обводнённых месторождениях, обеспечивающих полноту извлечения полезных ископаемых и охрану водных ресурсов [Мироненко и др., 1989]. Эти задачи, как правило, ориентированы на проблемы, которые возникают в процессе разведки месторождений полезных ископаемых и оценки экономической целесообразности их отработки; при проектировании и собственно эксплуатации месторождения: оценка влияния подземных вод на условия разработки месторождений; гидрогеологическое обоснование мер защиты горных выработок; прогнозные оценки водопритоков; охрана подземных и поверхностных вод в горнодобывающих районах; дренаж водоносных комплексов при горных разработках, обеспечение устойчивости бортов, снижение техногенного загрязнения подземных вод. Продолжительность этих работ обычно составляет несколько десятков лет, поскольку добыча приносит прибыль, то и финансирование всех работ, в том числе природоохранных, выполняется достаточно стабильно.

Теоретические основы формирования техногенных процессов, мероприятия по защите окружающей среды, систематизация техногенных изменений гидрогеологических условий при отработке месторождений полезных ископаемых разработаны Н.И. Плотниковым [Плотников, 1989]. Гидрогеологические и геоэкологические проблемы отработки рудных месторождений на Урале освещены в работах О.Н. Грязнова с соавторами [Грязнов и др., 1995], О.Н. Грязнова и С.Н. Елохиной [Грязнов, Елохина, 2017], О.М. Гуман с соавторами [Гуман и др., 2013, 2014], С.Н. Елохиной [Елохина, 2004, 2013, 2014].

Проблемы загрязнения окружающей среды горнопромышленных территорий рассмотрены в работах Ю.Е. Саета с соавторами [Геохимия окружающей ..., 1990], Е.П. Янина [Янин, 1993], В.В. Веселова с соавторами [Веселов и др., 1992], А.М. Плюснина и В.И. Гунина [Плюснин, Гунин, 2001], А. П. Белоусовой с соавторами [Белоусова и др., 2006]. Особенности процессов в пределах техногенных провинций Уральского региона являются предметом работ В.Г. Зотеева [Зотеев, 2001], А.В. Хохрякова с соавторами [Хохряков и др., 2011]. В работе В.Н. Удачина исследованы геохимические условия миграции микроэлементов и раскрыта их роль в функционировании природных экосистем при разработке крупных месторождений цветных металлов Южного Урала [Удачин, 2012].

Закономерности формирования качества поверхностных вод в районах с высокой техногенной нагрузкой, в том числе в горнопромышленных районах Уральского региона, рассмотрены в работах А.Н. Попова [Попов, 1995], А.П. Носаля [Носаль 2004], А.Н. Попова и др. [Попов и др., 2009], Н.Г. Максимовича и др., [Максимович и др., 2006], Б.А. Бачурина [Бачурин, 2006], С.А. Мирошниченко [Мирошниченко, 2011], С.Н. Елохиной и В.А.Елохина [Елохина, Елохин, 2014].

Систематизация техногенно-минеральных образований на территории Свердловской области, оценка их экономической значимости как потенциального источника извлечения полезных компонентов, влияние на окружающую среду

выполнена в работах С.И. Мормиля с соавторами [Мормиль и др., 2002], Е.П. Жуковской [Жуковская, 2003], А.И. Семячкова с соавторами [Семячков и др. 2009]. На Урале наиболее масштабные из них формируются базовыми отраслями уральской промышленности - черной и цветной металлургией в районах добычи и переработки исходного сырья, они представлены вмещающими горными породами и забалансовыми рудами, хвостами обогащения, шламами, шлаками, золами, металлоносными грунтами [В.Л. Яковлев и др., 1999; С.И. Мормиль и др., 2002; А.Б.Макаров, 2007]. Роль отвалов некондиционных руд в загрязнении окружающей среды и методы предотвращения загрязнения гидросферы стоком с техногенных образований, методика химической рекультивации отвалов с попутным извлечением полезных компонентов рассмотрены в работах Ю.С. Рыбакова [Рыбаков, 1998], а также в ряде работ, выполненных под его руководством [Пирмагомедов, 1996; Блинков, 1997; Комин, 2000; Чижов, 2000]. Физико-химические процессы, закономерности формирования макро и микрокомпонентного состава воды, преобразование минерального состава в техногенных массивах (отвалах, шламонакопителях) рассмотрены в работах Э.Ф. Емлина [Емлин, 1991], М.А. Пашкевич [Пашкевич, 2001], О.Л. Гаськовой [Гаськова, 2005], С.Б. Бортниковой с соавторами [Бортникова и др., 2010]; Д.Л. Джамбора [Jambor, 2003], Б.Г. Лоттермозера [Lottermoser, 2010], Р.Т. Амоса с соавторами [Amos et al., 2015].

Начиная с 1980-х годов количество статей, связанных с гидрогеологическими, гидродинамическими, гидрохимическими проблемами формирования шахтных вод, превысило 10 тыс. В 1979 г. на первом международном симпозиуме по шахтному дренажу была создана Международная ассоциация шахтных вод (The International Mine Water Association, IMWA). Она является междисциплинарной организацией, цель которой – всестороннее изучение шахтных вод, включая их гидрогеологию, химию, биологию, влияние на окружающую среду, возможность повторного использования, а также проблемы прогноза, контроля, управления и очистки. С 1982 г. Ассоциация издает журнал «Journal of International Mine Water Association» (предыдущее название

«International Journal of Mine Water»), импакт-фактор 1,15. Ежегодно IMWA проводит симпозиумы, раз в три года – конгресс. В 2017 г. в Финляндии прошел 13-й конгресс - «Шахтные воды и экономика с многооборотным использованием продукции» (Mine Water & Circular Economy – A Green Congress).

Международное сообщество по профилактике кислотности (International Network for Acid Prevention, INAP) - это ассоциация ведущих горнодобывающих компаний (Anglo American, Barrick Gold Corporation, Rio Tinto и др.), созданная для содействия решению этой задачи. Целью деятельности INAP является значительные улучшения в области управления сульфидными рудными материалами при отработке и после ее завершения, сокращению последствий, связанных с кислотным дренажом, путем обобщения информации и опыта работ в области кислотного дренажа, обмена знаниями и исследованиями, разработкой технологий. INAP была основана в 1998 году и с тех пор стала активным мировым лидером в этой области.

В 2009 году INAP опубликовала руководство по наилучшим доступным технологиям для предотвращения и смягчения последствий формирования кислых шахтных вод - Global Acid Rock Drainage (GARD), ставшее признанным ведущим руководством по этой теме. Каждые три года INAP выбирает горнодобывающий объект с лучшей практикой предотвращения и смягчения последствий отработки месторождений, на которых формируются кислые воды.

Несмотря на активное изучение процессов, сопровождающих отработку месторождений твердых полезных ископаемых, исследований, посвященных отработанным и закрытым (затопленным) шахтам, карьерам, рудникам намного меньше. В последние годы появилось несколько работ, в которых выполнен анализ, систематизация, обобщение информации об особенностях процессов, протекающих на территориях отработанных рудников: на Урале [Елохина, 2013, 2014], на угольных месторождениях России [Тарасенко, 2014], в Германии и других странах мира [Wolkersdorfer, 2008].

В работах С.Н. Елохиной выполнена систематизация и анализ эмпирических данных по природно-техногенным геологическим процессам

постэксплуатационной стадии освоения рудных месторождений; обобщены результаты изучения последствий «мокрой» ликвидации (консервации) остановленных рудников в условиях Уральского складчатого пояса, разработана методика оценки, прогнозирования опасных природно-техногенных геологических процессов в зависимости от техногенного преобразования гидрогеологических структур и систем [Елохина, 2013, 2014].

И.А. Тарасенко обобщена информация о последствиях ликвидации шахт в угольных бассейнах Приморского края, Сахалинской области, а также Донецкого, Кизеловского, Кузнецкого, Печорского и Челябинского бассейнов [Тарасенко, 2014]. Определены закономерности формирования подземных вод в природно-техногенных гидрогеологических структурах районов ликвидированных угольных шахт. Установлено, что после затопления формируется техногенный водоносный комплекс, фильтрационные и гидрохимические параметры которого приводят к формированию техногенно-трансформированных вод и определяют масштабы их воздействия на окружающую природную среду.

В монографии К. Волкерсдорфера [Wolkersdorfer, 2008] выполнено обобщение ряда оригинальных работ (в том числе автора монографии), посвященных проблемам затопленных рудников по всему миру. В исследовании представлены теоретические основы гидродинамических и гидрохимических процессов, которые определяют последствия затопления рудников, приведены результаты тематических исследований, которые необходимы для решения проблем, возникающих при затоплении рудников, в том числе таких, как управление водными ресурсами на территориях отработанных рудников, подходы к методам очистки.

Проведенный литературный поиск и анализ показал, что вопросы изучения процессов, определяющих накопление и миграцию химических элементов в гидросфере горнопромышленных территорий, представляют собой интенсивно развивающуюся область исследований, их решение позволяет получить количественную информацию о состоянии гидросферы, установить взаимосвязи между химическим составом вод, геологическим строением и техногенной

средой, обосновать экономически целесообразный выбор мероприятий, направленных на снижение негативных последствий, вызванных многолетней горной деятельностью, и устранения накопленного вреда окружающей среде в старопромышленных районах.

1.3 Основные задачи исследования

Считается, что за счет загрязненных шахтных вод отработанных рудников формируется самый крупный поток сточных вод на земле [Wolkersdorfer, 2008]. Заброшенные медноколчеданные рудники Испании (бассейн рек Одиель и Тинто) уже сотни лет обеспечивают более 10% глобального валового потока растворенного цинка и сульфата, транспортируемого реками в океан [Sarmiento et al., 2009]. Вынос металлов с территории отработанного рудника Ричмонд (Калифорния, США) до начала реабилитационных работ составлял четверть всего национального сброса в поверхностные воды из промышленных и муниципальных источников [Iron Mountain ..., 2006]. Формирование кислых шахтных вод в течение десятков и сотен лет на остановленных объектах дало основание называть такие объекты *acid perpetuum mobile* – вечный двигатель производства кислоты [Wolkersdorfer, 2008; Nordstrom, 2011].

Приоритеты горного дела за последние десятилетия значительно изменились: если раньше основным критерием целесообразности разработки месторождения была прибыль, то начиная с 80-х годов прошлого столетия первоочередными становятся вопросы безопасности, значимую роль начинают играть проблемы охраны окружающей среды. Наравне с задачами развития горной промышленности все более актуальными становятся вопросы управления опасностями в районах старых отработанных рудников.

Постэксплуатационный этап, наступающий после завершения отработки, имеет специфические особенности, вызванные последствиями разработки месторождения, особенно с позиций влияния на окружающую среду. Продолжительность этого этапа на порядок больше и может достигать несколько

столетий, а задачи рекультивации и реабилитации горнопромышленного ландшафта диктуют необходимость прогноза изменения компонентов окружающей среды, в первую очередь, подземной и поверхностной гидросферы, на длительный период. С точки зрения гидродинамических и гидрохимических особенностей процессов, протекающих в этих районах, принципиально важным является то, что добыча прекращена, водоотлив отключен или значительно уменьшен, а степень нарушенности территории столь велика, что возврат системы в исходное состояние в большинстве случаев невозможен. По сравнению со множеством экологических проблем, стоящих перед горнодобывающей деятельностью, проблема заброшенных рудников решается чрезвычайно медленно.

Отработка месторождений полезных ископаемых приводит к принципиальному изменению гидродинамической обстановки прилегающей территории. Дренажный водоотлив, глубина которого в десятки и сотни раз превышает масштабы естественной дренируемости, является причиной образования обширных депрессионных воронок; формирования техногенной зоны аэрации большой мощности; изменения направления, скорости, массовых расходов потоков подземных и поверхностных вод.

Прекращение водоотлива приводит не просто к затоплению горных выработок, но к существенному изменению гидродинамической и гидрохимической обстановки в пределах горнопромышленных районов, сложившейся в течение десятилетий отработки. Появившиеся в процессе отработки техногенные объекты изменяют как условия питания-разгрузки потока подземных вод, так и фильтрационные свойства массива горных пород. 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; скрытое (латентное) загрязнение поверхностных вод и др.

После отключения всех откачивающих устройств начинается заполнение емкости горных выработок, подработанного массива, а также восстановление уровня подземных вод в пределах ранее созданной депрессионной воронки. После закрытия рудников требуется определить скорость и время полного затопления (восстановления уровня подземных вод); место возможного выхода (излива) на поверхность и расход разгрузки; площадь и величину подъема уровня подземных вод на осушенных ранее территориях (степень подтопления).

В каждом конкретном случае методы прогнозирования могут основываться как на простых вычислениях, так и на трехмерных моделях с использованием сложных компьютерных вычислений. Выбор и правильное применение соответствующей техники требует оценки степени “нестандартности” гидрогеологии шахтных систем. В любом случае залогом успеха является концептуальная модель, в которой обосновывается набор упрощающих предположений о сложной реальной системе и которая обеспечивает адекватное представление этой системы, включая все основные функции, избегая ненужных деталей.

Эффективное решение практических задач, направленных на прогноз изменения состояния гидросферы, обоснование дренажных мероприятий, оценка риска развития негативных процессов в области влияния объектов горнопромышленного комплекса в сложных случаях практически всегда основывается на использовании численного моделирования геофильтрации. Использование аналитических исследований позволяет повысить доступность, оперативность, наглядность полученных решений при различной степени обеспеченности объекта исследований информацией.

Для выполнения как модельных, так и аналитических расчетов требуется создание расчетной гидродинамической модели массива горных пород. Адекватность модели определяется точностью задания исходных параметров и достоверностью гидродинамической типизации условий движения подземных вод на разных этапах развития горнопромышленной территории.

Поток воды через отработанные шахтные системы контролируется планировкой шахтных выработок и их размерами. Кроме того, фильтрационные и емкостные свойства не только в пределах горных выработок, но вблизи от них, зависят от способа отработки. Камерно-столбовая система разработки, разработка длинными забоями выработок и с помощью субвертикальных очистных выработок приводят к формированию различной структуры массива пород [Мохов, 2015; Younger, Adams, 1999].

С гидродинамической точки зрения скорость затопления определяется соотношением шахтных пустот (объемом шахтных выработок) и пустотностью (пористостью, трещиноватостью) пород. Геометрия шахтного пространства намного сложнее, чем в природных водоносных горизонтах: сеть горных выработок может рассматриваться как аналог карстовой системы или в более упрощенном виде как система трубок.

В начале процесса идет очень быстрое заполнение шахтных выработок, в то время как горные породы остаются ненасыщенными. Затем начинается более медленный процесс насыщения матрицы пород, причем его интенсивность на разных этапах определяется разными видами проницаемости и пористости: в общем виде трещинной (доступной для течения за счет гидравлического градиента), поровой (происходящей за счет разности влажности). На первых этапах главным фактором является пустотность горных выработок и турбулентный режим течения в них (не подчиняющийся закону Дарси) в центральной части депрессионной воронки, для которой характерны высокие гидравлические градиенты.

Основной причиной неудач при прогнозировании последствий затопления чаще всего является некорректная концептуальная модель. Результатом создания концептуальной модели является такой набор упрощений сложной реальной системы, который обеспечивает представление всех значимых элементов этой системы, включает главные особенности и лишен несущественных деталей. Другими словами, концептуальная модель описывает, как и откуда вода

поступает в водоносную систему, как распределяется в ней, как и куда из нее уходит [Younger, Adams, 1999; Rushton, 2003; Wolkersdorfer, 2008].

Особенности формирования гидродинамического режима горнопромышленных ландшафтов, анализ последствий отключения водоотлива, процессы затопления выработанного пространства и подтопления прилегающих территорий рассмотрены в работах А.Н. Рюмина [Рюмин, 1998], С.Н. Елохиной [Елохина, 2002, 2003, 2004, 2014], А.К. Имайкина [Имайкин, 2005], Е.И. Питаленко [Питаленко, 2007], Ю.А. Норватова и И.Б. Петровой [Норватов, Петрова, 2009], О.А. Ягуновой [Ягунова, 2010], И.А. Тарасенко [Тарасенко, 2014].

Простейшими методами анализа являются эмпирические расчеты скорости заполнения. Они могут выполняться путем построения кривых зависимости объема выработанного пространства от глубины, а также экстраполяции экспоненциальных кривых затопления по данным начального этапа восстановления. В тех случаях, когда анализируются крупные системы, задачи затопления могут решаться для отдельных бассейнов, которые соединяются друг с другом только на участках гидравлической связи - в точках перетока [Younger, Adams, 1999; Норватов, Петрова, 2008].

Для оценки скорости затопления шахт, расхода, поступающего в горные выработки, успешно используются как аналитические методы, так и численное моделирование геофильтрационных процессов [Рошаль, 2001; Норватова, 2005; Савельев, 2015]. Для геофильтрационного и геомиграционного моделирования, в том числе проблем горного дела, применяется множество программных кодов. В первую очередь это программный код MODFLOW и связанные с ним MODPATH, MT3DMS, PEST); FEMWATER, FEFLOW - трехмерные конечно-разностные или конечно-элементные модели [Wels et al., 2012]. MODFLOW и FEFLOW доступны для бесплатного скачивания с сайта геологической службы США (USGS) и Агентства по охране окружающей среды (US EPA). Для упрощения ввода данных и визуализации результатов расчетов используются PMWIN, Visual Modflow, GMS.

ЗАО "Геолинк Консалтинг" разработана программная система моделирования фильтрации и массопереноса в подземной гидросфере ModTech

[Программная ..., 2009]. Интегрированная информационная технология изучения природно-техногенных систем ModInfo, в которой объединено несколько программных продуктов - ModTech, ГИС GeoLink, AquaBase и др., использовалась для решения водохозяйственных проблем горнодобывающих предприятий, в том числе оценки последствий затопления шахт Восточного Донбасса, обоснования систем осушения, обеспечивающих благоприятные экологические условия территории [Прогноз ..., 2006].

В работах P.L. Younger, R. Adams рассмотрены разные подходы к численному моделированию геофильтрации при затоплении шахт, позволяющие учитывать как ламинарный, так и турбулентный режим фильтрации в горных выработках [Younger, Adams, 1999; Adams, Younger, 2001]. Для моделирования ламинарного потока эффективно использование компьютерного кода MODFLOW. Для имитации турбулентного потока в выработках, соединяющих отдельные участки - мини бассейны, использовались модели с сосредоточенными параметрами (специальный компьютерный код GRAM - Groundwater Rebound in Abandoned Mineworkings, восстановление подземных вод в отработанных шахтах, с анализом неопределенности методом Монте-Карло). Для совместного исследования процесса затопления, включая и ламинарный, и турбулентный поток; использована комбинация модели с переменным насыщением среды (VSS, variably saturated subsurface) с гидравлической моделью (NET), способной моделировать турбулентный поток в открытых пустотах шахты в процессе затопления. Такое наблюдается в шахтах, где есть штольни, горные выработки большого диаметра (например, с подземными дорогами). Использование сети трубок значительно уменьшает гидравлический градиент в моделируемой области по сравнению с имитацией только ламинарного потока.

Прогноз скорости, времени затопления и расхода разгрузки в районах отработанных шахт наиболее чувствителен, во-первых, к коэффициенту емкости (которая определяется объемом открытых пустот горных выработок и емкостью пород), а во-вторых, к интенсивности питания. Гидравлические свойства массива

играют подчиненную роль, о чем свидетельствуют результаты тематического исследования, проведенного на ряде затопленных шахт [Adams, Younger 2002].

Выполненные в конце 1990-х и начале 2000-х годов прогнозы затопления шахт были критически рассмотрены и сопоставлены с фактическими данными мониторинга [Adams, 2014]. Модельные и прогнозные скорости затопления хорошо согласуются на угольной шахте (Whittle Colliery) в северо-восточной Англии. Затопление отработанной оловянной шахты в Корнуолле, Англия (South Crofty), которая закрылась в 1998 году, происходило быстрее, чем первоначально предполагалось по VSS-NET модели; однако, после корректировки коэффициента емкости наблюдаемая скорость также соответствовала модели. В третьем исследовании, проведенном на угольной шахте в Южном Уэльсе, удалось воспроизвести скорость потока, поступающего из штольни, достаточно близко к фактическому положению. Однако на четвертом участке наилучшее соответствие кривой подъема уровня было получено с использованием более простой модели с сосредоточенными параметрами.

Эти исследования показывают целесообразность использования различных моделей для прогнозирования затопления и разгрузки из затопленных шахт.

Прогноз предельного положения уровня и времени его достижения определяет восстановительные мероприятия и способы очистки шахтных вод, но является весьма неопределенным. Несмотря на наличие хорошо проработанных моделей (аналитических, эмпирических и численных) для прогноза заполнения депрессионных воронок в районе отработанных шахт, достоверная оценка для конкретного объекта всегда проблематична независимо от сложности используемого аппарата. Как правило, закономерности, установленные опытным путем, в значительной мере могут определить успех калибровки численных моделей, которые основываются на концептуальных моделях.

Отсюда формулируется *первая задача диссертационного исследования: обоснование концептуальной гидродинамической модели горнопромышленной территории на основе анализа процессов, приводящих к формированию техногенной фильтрационной зональности подработанного массива.*

Разработка колчеданных и сульфидизированных месторождений (в первую очередь золота, серебра, меди, цинка, свинца, никеля) провоцирует появление кислых шахтных вод с высоким содержанием металлов, которые являются угрозой водным ресурсам и окружающей среде. На характер формирования качества дренажных вод оказывают влияние многие факторы: геологические (тип и строение месторождения); геохимические (состав рудного тела и вмещающих пород; наличие, количество и вид сульфидных минералов, форма и размер минералов, присутствие и количество потенциально нейтрализующих минералов); гидрогеологические (фильтрационные свойства зоны аэрации и водоносного горизонта, пути движения подземных вод, расход, направление потока, скорость инфильтрации); климатические (осадки, температура, влажность); технологические (технология отработки, методы переработки полезного ископаемого, эффективность извлечения компонентов, стадия освоения).

Формирование химического состава подземных вод под влиянием природных и техногенных факторов является фундаментальной проблемой современной гидрогеохимии.

Основы учения о гидрогеохимических процессах, протекающих в зоне гипергенеза, заложены С.Л. Шварцевым [Шварцев, 1978, 1998]. Ведущие факторы, процессы, закономерности миграции химических элементов в земной коре рассмотрены в монографии «Основы гидрогеологии. Гидрогеохимия» (1982), в работах С.Р. Крайнова с соавторами [Крайнов и др., 2004], монографиях ведущих ученых-гидрогеохимиков «Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода» [Геологическая эволюция ..., 2005, 2006]. Особенности гидрогеохимических преобразований в подземной гидросфере под влиянием техногенеза являются предметом работ К.Е. Питевой [Питьева 1984], Ф.И. Тютюновой [Тютюнова, 1987], А. Я. Гаева [Гаев, 1989], Р.Ф. Абдрахманова, В.Г. Попова [Абдрахманов, Попов, 1990, 2010].

Изучение и систематизация процессов, приводящих к формированию кислых шахтных вод, началось еще в середине XX века. В работах А.В. Докукина,

Л.С. Докукиной, А.А. Веселова было выполнено исследование особенностей формирования кислотного дренажа на медноколчеданных рудниках и угольных шахтах, оценена роль геологического строения, условий залегания, способов и интенсивности отработки [Докукин, 1947; Докукин, Докукина, 1950; Веселов, 1956].

Гидрогеохимические особенности рудных и ореольных вод сульфидных месторождений Урала рассматривались в работах Г.А. ВострокнUTOва [ВострокнUTOв, 1969]. Л.С. Табаксблат систематизировал закономерности техногенного накопления металлов в ландшафтах рудных и угольных месторождений Урала, рассмотрел особенности формирования подземных вод при отработке месторождений Урала, оценил микроэлементную «нагрузку» рудничных вод колчеданных месторождений [Табаксблат, 1993, 1995, 1997].

Гидрогеохимия и процессы формирования кислых вод, особенности окисления сульфидных минералов рассмотрены в работах А.И. Перельмана [Перельман, 1972], Л.К. Яхонтовой и В.П. Зверевой [Яхонтова, Зверева, 2007]; в трудах зарубежных ученых: W. Stumm и J.J. Morgan [Stumm, Morgan, 1981], C.A.J. Appelo и D. Postma [Appelo, Postma, 1993, 2005], в ряде работ D.K. Nordstrom с соавторами [Alpers, Nordstrom, 1991; Nordstrom, Alpers, 1999; Nordstrom, 2011; Nordstrom et al., 2015], D. Banks [Banks et al., 1997], D.W. Blowes с соавторами [Blowes et al., 2003], P.L. Younger с соавторами [Mine Water ..., 2002].

Геохимические особенности и физико-химические параметры гипергенных процессов в зонах техногенеза определяют интенсивность окислительного выветривания пирита и других сульфидных минералов, что приводит к формированию кислотных вод с повышенным содержанием металлов и редкоземельных элементов [Смирнов, 1951; Перельман, 1972; Емлин, 1991; Яхонтова, Зверева, 2007; Лехов, 2010; Рыженко и др., 2015; Stumm, Morgan, 1981; Appelo, Postma, 1993, 2005; Blowes et al., 2014; Nordstrom et al., 2015]. Для зоны гипергенеза характерна повышенная геохимическая подвижность химических элементов, активные процессы их рассеивания и концентрирования, в ней происходит разрушение и переотложение минералов [Шварцев, 1998, 2007, 2008].

В техногенной коре агентами выветривания наряду с природными физическими, химическими и биологическим факторами проявляются антропогенный и техногенный факторы, которые значительно ускоряют процессы выветривания и степень преобразования пород [Сунгатуллин, 2010].

В результате геомеханических и гидрохимических процессов в открытых горных выработках, в зонах обрушения, в отвалах формируется техногенная сернокислотная кора выветривания, где происходит формирование и накопление водорастворимых вторичных минералов, или неосульфатов, которые включают соли продуктов выветривания сульфидов - гидросульфаты железа, магния, алюминия [Емлин, 1991; Белогуб, 2009; .Nordstrom.. Alpers, 1999; Hammarstrom et al., 2005; Amos et al., 2015]. Нестационарный характер изменения гидрохимических показателей зафиксирован на многих закрытых шахтах [Ягунова, 2010; Имайкин, 2012; Рыбникова, Рыбников, 2012, 2013; Елохина, 2014; Younger, 1997; Wolkersdorfer, 2008]. П.Л. Янгер [Younger, 1997] предложил называть это явление «first flush» или первый смыв, продолжительность которого составляет десятки лет и представляет собой большой экологический риск. Закономерности формирования этого опасного гидрогеохимического явления до конца не раскрыты.

Особенности образования и строения зоны окисления сульфидных месторождений, миграции элементов, формирования коры выветривания и ее зональность рассмотрены в работах С.С. Смирнова [Смирнов, 1951], Л. К. Яхонтовой и А. П. Груднева [Яхонтова, Груднев, 1978], Э.Ф. Емлина [Емлин, 1991], А.М. Плюснина и В.И. Гунина [Плюснин, Гунин 1998], Е.В. Белогуб [Белогуб, 2009], Я.Э. Юдович и М.П. Кетрис [Юдович, Кертис, 2014].

Роль вторичных минералов в формировании кислотности подземных вод, их виды, условия образования описаны в работах Э.Ф. Емлина [Емлин, 1991], Е.В. Белогуб с соавторами [Белогуб и др., 2007], Л.К. Яхонтовой и В.П. Зверевой [Яхонтова, Зверева, 2007], О.К. Смирновой с соавторами [Смирнова и др., 2013]; в трудах зарубежных ученых: D.K. Nordstrom и C.N. Alpers [Nordstrom, Alpers,

1999], D.W. Blowes с соавторами [Blowes et al., 2003], J.M. Hammarstrom с соавторами [Hammarstrom et al., 2005], B.G. Lottermoser [Lottermoser, 2010].

Физико-химические процессы, закономерности формирования макро- и микрокомпонентного состава воды, преобразование минерального состава в теле отвала рассмотрены в работах Э.Ф. Емлина [Емлин, 1991], О.Л. Гаськовой [Гаськова, 2005], С.Б. Бортниковой с соавторами [Бортникова и др., 2010]; J.L. Jambor [Jambor, 2003], B.G. Lottermoser [Lottermoser, 2010], R.T. Amos с соавторами [Amos et al., 2015].

Формирование кислых вод определяется множеством процессов: это растворение, окисление, сорбция, осаждение, концентрирование (в результате испарения, вымораживания, капиллярного поднятия), биогеохимия, конвективный и диффузионный перенос. В отвалах пустых пород и некондиционных руд, в шламонакопителях эти процессы протекают с момента возникновения таких объектов. В подземных горных выработках и зонах, нарушенных горными работами, для начала процесса образования кислых воды необходимо изменение окислительно-восстановительных условий, что происходит при понижении уровня подземных вод на десятки и сотни метров при организации водоотлива на рудниках.

Остановка водоотлива является причиной перестройки гидродинамического баланса горнопромышленной территории, изменения окислительно-восстановительных условий, инициирует развитие новых гидрогеохимических процессов.

Вторая задача: выявление закономерностей формирования гидрогеохимических систем в результате перераспределения химических элементов в процессе горнодобывающей деятельности и после ее завершения для условий горноскладчатого Урала.

Начиная с работ Р.М. Гаррелса и Ч.Л. Крайста [Гаррелс, Крайст, 1968], закономерности формирования химического состава подземных вод с учетом процессов взаимодействия в системе вода-порода-газ-органическое вещество в

различных обстановках изучаются на количественном уровне с привлечением аппарата термодинамического физико-химического моделирования.

Существующие подходы к компьютерному моделированию физико-химических процессов в системе вода-порода, а также подробный обзор существующих программных продуктов приведен в 1-ом томе монографии «Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода» [Геологическая эволюция ..., 2005]. История развития термодинамического физико-химического моделирования, описание геохимических баз данных и их роль в адекватном применении геохимических компьютерных кодов, специфика моделирования гидрогеохимических задач, в том числе связанных с формированием шахтных вод, рассмотрены в работах D.K. Nordstrom [Nordstrom, 2007, 2011].

В настоящее время наиболее распространенными и используемыми программными кодами в России, в том числе, для решения задач, связанных с формированием подземных вод в горнопромышленных районах, являются отечественные разработки Селектор, HydroGeo, HCh (GIBBS), а также зарубежные продукты PHREEQC, Visual MINTEQ, GWB (Geochemist's Workbench) и др. [Лехов, Шваров, 2002; Гаськова, 2005; Бортникова и др., 2006; Семячков и др., 2009; Елохина, Рыженко, 2014; Рыженко и др., 2015; Лиманцева и др., 2015; Алексеева, 2016; Зверева и др., 2016; Appelo, Postma, 1993, 2005; Merkel et al., 2005; Nordstrom, Alpers, 1999; Nordstrom, 2011; Pearce et al., 2017]. Обычно используется два подхода к моделированию: расчет минимизации энергии Гиббса (этот принцип реализован в программных кодах Селектор, HCh) и решение системы уравнений констант равновесия химических реакций с учетом баланса масс (программные коды HydroGeo, PHREEQC, Visual MINTEQ и др.).

Программный комплекс Селектор [Карпов, 1981; Чудненко, 2010] предназначен для компьютерной имитации и моделирования равновесных и неравновесных физико-химических процессов в геохимии, позволяет формировать модель системы «вода–порода–газ–органическое вещество»,

определять формы нахождения элементов в растворах, оценивать их недо/пересыщенность по отношению к ряду минералов

Программный комплекс HydroGeo [Букаты, 1999, 2002] предназначен для физико-химического моделирования состава природных водных растворов и пород (форм миграции-комплексобразования, смешения, испарения, сорбции, химического взаимодействия с минералами, кинетики, при заданных РТ-условиях), моделирования геофильтрации с учетом взаимодействия воды с породами.

Физико-химическое моделирование с использованием программы HCh (GIBBS) [Шваров, 1999] позволяет выполнять расчеты равновесного состояния сложных многокомпонентных гетерогенных гидрогеохимических систем и динамических геохимических процессов

Компьютерный код PHREEQC [Parkhurst, Appelo, 2013] предназначен для моделирования химических реакций и процессов переноса вещества в природных или загрязненных водах. PHREEQC расшифровывается как PH REdox EQUilibrium (на языке C) pH-редокс-равновесие (на языке Си). Он доступен для бесплатного скачивания с сайта геологической службы США (USGS). PHREEQC позволяет рассчитывать индексы насыщения растворов, моделировать обратимые и необратимые реакции, учитывать кинетику, при разных давлениях и температурах.

Visual MINTEQ ver. 3.1 является вторым после PHREEQC наиболее часто используемым программным кодом за рубежом, он так же как PHREEQC доступен для бесплатного скачивания. Код использует программное обеспечение MINTEQA2, разработанное по заказу Агентства по охране окружающей среды США (US EPA) [Allison et al., 1991]. Он сочетает в себе современные описания химического равновесия, сорбционных и комплексных реакций с простыми в использовании меню и опциями для импорта и экспорта данных в/из Excel в последней версии.

Третья задача: разработка модели формирования состава подземных вод и процессов их самореабилитации на основе физико-химического и гидрогеомиграционного моделирования.

Загрязнение окружающей среды горнопромышленных территорий происходит в результате образования как твердых, так и жидких отходов, в том числе шахтных и подотвальных вод. Ущерб, наносимый водным объектам вследствие сброса шахтных вод как при отработке рудника, так и после его ликвидации, превышает сотни миллионов рублей на объекте. В Свердловской области наиболее неблагополучными объектами накопленного вреда окружающей среде являются затопленные в конце прошлого-начале этого века медноколчеданные рудники, в частности, Дегтярский, Левихинский, Карпушихинский и др. Затраты на их очистку с начала 2000-х годов покрываются из областного бюджета по программе «Экология и природные ресурсы Свердловской области».

Извлечение металлов из шахтных вод осуществлялось в разных видах и разными способами в течение последних четырех тысячелетий [Nordstrom et al., 2017]. В последние годы из-за необходимости использования 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. Основными проблемами эффективной технологии извлечения металлов из шахтных вод является их непостоянный состав.

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 их составе обнаруживается большое количество цветных, редких и редкоземельных элементов, что стимулирует переработку техногенных отходов. 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. В последние десятилетия, в связи с массовым закрытием горнодобывающих предприятий, под шахтными водами следует понимать не

только те, которые извлекаются попутно при добыче полезного ископаемого и осушении шахт, но и образованные в результате остановки водоотлива и подъема уровня подземных вод, а именно техногенные водоносные горизонты, водоемы, родники и водотоки.

В Свердловской области в настоящее время при добыче полезных ископаемых осуществляется водоотведение в поверхностные водные объекты 219,4 млн м³/год загрязненных дренажных вод (23% от суммарного водоотведения). С шахтными и дренажными водами в поверхностные водотоки ежегодно поступает 116,4 тыс. т загрязняющих веществ (24% от общего сброса). При этом значительное количество поллютантов (22,7 тыс. т при объеме сброса 7,95 млн м³/год) связано с рудниками, эксплуатация которых завершилась 10 и более лет назад [Государственный доклад, 2015].

Поскольку в ближайшие годы планируется совершенствование порядка расчета и взимания платы за негативное воздействие на водные объекты [Костылева и др., 2010; Мерзликина, Прохорова, 2013], оценка безопасности освоения природных месторождений и техногенно-минеральных образований должна включать определение размера экологического ущерба (вреда), что позволит выбрать эффективные методы очистки сточных дренажных вод, разработать мероприятия для предотвращения попадания в водный объект вредных (загрязняющих) веществ и отходов с водосборной площади, простимулирует внедрение технологии извлечения ценных компонентов из сточных вод.

Вопросы изучения и анализа химического состава дренажных вод, извлекаемых при водоотливе на месторождениях полезных ископаемых, а также подотвальных вод с точки зрения их перспективности как источника гидроминерального сырья для извлечения цветных металлов рассматривались в работах О.В. Зотеева и С.В. Корнилкова [Зотеев, Корнилков, 1995], О.Н. Грязнова с соавторами [Грязнов и др., 1997], Л.С. Табаксблата [Табаксблат, 1997], И.В. Шадруновой и Н.Н. Ореховой [Шадрунова, Орехова, 2009], В.Н. Никонова и др. [Никонов и др., 2014], Л.В. Чупровой [Чупрова, 2016], Д. Нордстрема с

соавторами [Nordstrom et al., 2017]. Применительно к горнопромышленным объектам на постэксплуатационной стадии эти проблемы являются предметом активного исследования.

Отсюда формулируется четвертая задача работы: эколого-экономический анализ потенциальной ценности шахтных вод и ущерба водным объектам; обоснование целесообразности использования шахтных вод как источника гидроминерального сырья.

Особенности формирования месторождений питьевых подземных вод (МППВ) в зоне, нарушенной горными работами, и возможность использования подземных вод после завершения горнодобывающей деятельности определяются как природными, так и горно-эксплуатационными факторами, в том числе типом полезного ископаемого, способом рекультивации нарушенной территории, конструкцией водозабора.

Месторождение подземных вод – это часть водного объекта, где может быть обеспечена возможность отбора подземных вод (в необходимом количестве при соответствующем целевому назначению качестве). Для формирования месторождения подземных необходимо сочетание благоприятных геолого-гидрогеологических, технико-экономических и экологических условий [Боревский и др., 2010].

Подземные воды, представляющие собой один из видов специфических минеральных ресурсов, являются полезным ископаемым, соответственно, добыча их регулируется законодательством о недрах [Закон о недрах, 1992]. С другой стороны, подземные воды (бассейны подземных вод, водоносные горизонты) представляют собой водные объекты [Водный ..., 2006], использование и охрана которых регулируется Водным кодексом.

Значимость подземных вод закреплена ст.34 Водного кодекса, в соответствии с которой в случае возникновения чрезвычайной ситуации резервное питьевое и хозяйственно-бытовое водоснабжение должно осуществляться на основе защищенных от загрязнения и засорения подземных (исключительно) водных объектов [Водный ..., 2006].

В отличие от месторождений твердых полезных ископаемых (МТПИ) месторождения подземных вод представляют собой возобновляемый ресурс и являются динамической системой: эксплуатация месторождений подземных вод приводит к изменению существующих и образованию новых гидродинамических и гидрогеохимических условий, перераспределению балансовых составляющих системы, привлечению новых источников формирования эксплуатационных ресурсов месторождения [Боревский и др, 1989; Палкин, Палкин, 2003; Плугина, 2003; Язвин, 2015].

Подземные воды, поступающие в горные выработки при разработке месторождений твердых полезных ископаемых, являются попутным полезным ископаемым и могут использоваться для водоснабжения, орошения, извлечения ценных компонентов, в бальнеологических целях [Методические ...,1992; Рошаль, 2006].

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 [Плотников, Рогинец, 1987; Рошаль, 2006; Мироненко, Румынин, 1999; Информационный бюллетень..., 2011].

Возможность использования подземных вод для питьевых целей определяется санитарно-эпидемиологическими требованиями, которые предъявляются к источникам водоснабжения питьевого назначения санитарными нормами и правилами [СанПиН 2.1.4.1074-01; СанПиН 2.1.4.1110-02; ГН 2.1.5.1315-03]. При этом одним из существенных ограничений является необходимость организации зоны санитарной охраны (ЗСО) водозабора в составе трех поясов для обеспечения защиты от микробного и химического загрязнения

на весь период его эксплуатации, причем в пределах ЗСО запрещено размещение объектов, обуславливающих опасность микробного и химического загрязнения подземных вод, в том числе закачка отработанных вод в подземные горизонты, подземное складирование твердых отходов и разработка недр [СанПиН 2.1.4.1110-02].

Для выполнения этих требований в процессе отработки месторождения твердого полезного ископаемого необходимо обеспечить управление гидродинамическим режимом территории таким образом, чтобы формирование областей питания питьевого водозабора происходило в пределах «чистых» территорий. Этого можно достичь при использовании внешних систем осушения, расположенных вне горных выработок шахт и карьеров (законтурные водопонижительные системы скважин с поверхности или подземные дренажные устройства); автономных каптажей в подземных горных выработках, не связанных с внутришахтным водоотливом. При этом формирование подземных вод происходит за пределами возможного влияния источников загрязнения, в том числе без взаимодействия подземных вод с осушенной частью рудной толщи, что позволяет избежать значительного ухудшения качества дренажных вод в результате окисления тяжелых металлов в условиях свободного доступа кислорода.

Месторождение подземных дренажных вод¹ представляет собой часть водоносной системы, в пределах которой при разработке твердого полезного ископаемого создаются условия для отбора подземных вод, количество и качество которых позволяет осуществлять их целевое использование [Методические ...,1992]. Схема осушения в процессе отработки МТПИ изменяется вслед за развитием горных работ, так же как и санитарно-экологическая обстановка в пределах дренируемой территории, в частности, в результате создания отвалов некондиционных руд, засыпки отработанных карьеров и т.п. Наиболее

¹“Подземные дренажные воды” или “дренажные воды” – подземные воды, участвующие в обводнении месторождений твердых полезных ископаемых [Методические ...,1992]. В действующем стандарте понятие дренажные воды отсутствует [ОК 032-2002].

значительные изменения горнотехнических условий происходит каждые 12–15 лет [Плотников, Рогинец, 1987], продолжительность эксплуатации МТПИ обычно значительно превышает этот срок, соответственно, при изменении водохозяйственной обстановки должна периодически выполняться переоценка эксплуатационных запасов дренажных подземных вод.

На постэксплуатационном этапе, после завершения отработки МТПИ, как правило, осуществляется мокрая консервация горнорудного объекта, что приводит к принципиальному перераспределению источников формирования эксплуатационных запасов месторождения подземных вод (их видов, количественного и качественного состава); изменению границ и площади месторождения; образованию новых объектов загрязнения или вовлечению ранее образованных в область захвата. Тем не менее, многие водозаборы продолжают эксплуатироваться, благодаря сложившейся в течение десятилетий инфраструктуре, в которой месторождения подземных вод (до консервации рудника – дренажных) являются важной составляющей системы водоснабжения. Для обоснования возможности использования в качестве источника питьевого водоснабжения должны выполняться специальные работы, результатом которых является перераспределение или сокращение нагрузки, создание барражного (защитного) водоотлива, создание систем водоподготовки.

Месторождения пресных подземных вод в зоне ведения горных работ постоянно существуют в условиях значительной перестройки балансовой структуры водоотбора: как в процессе горнодобывающей деятельности, так и особенно после завершения отработки месторождения твердого полезного ископаемого.

Пятая задача диссертационного исследования: оценка ресурсного потенциала и закономерностей изменения источников формирования эксплуатационных запасов месторождений питьевых подземных вод, запасы которых утверждались как элемент дренажной системы месторождения твердых полезных ископаемых. Обоснование возможности использования подземных вод в постэксплуатационный период.

Таким образом, *целью работы является* 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.

Основные *задачи исследования* направлены на разработку научно-методических основ решения проблем горнопромышленной гидрогеологии на постэксплуатационном этапе:

- обоснование концептуальной гидродинамической модели горнопромышленной территории на основе анализа процессов, приводящих к формированию техногенной фильтрационной зональности подработанного массива;

- выявление закономерностей формирования гидрогеохимических систем в результате перераспределения химических элементов в процессе горнодобывающей деятельности и после ее завершения для условий горноскладчатого Урала;

- разработка модели формирования состава подземных вод и процессов их самореабилитации на основе физико-химического и гидрогеомиграционного моделирования;

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

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

2 ОСНОВНЫЕ РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СРЕДНЕГО УРАЛА. ОБЩАЯ ГИДРОГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА

2.1. Орографическая характеристика

Свердловская область расположена в пределах Уральского горного хребта на границе Восточно-Европейской и Западно-Сибирской равнин, на восточных склонах Среднего и Северного Урала и на прилегающих территориях Западно-Сибирской низменности, на западных склонах Среднего Урала. Территория Среднего Урала сильно сглажена, западные предгорья более возвышены, наиболее высокие вершины области (Конжаковский Камень и Денежкин Камень) находятся на Северном Урале. На востоке области развит холмистый Зауральский пенеплен, на юго-западе небольшую площадь занимают увалисто-холмистое и слабо всхолмлённое Предуралье, части Уфимского плато и Сылвинского кряжа. На северо-востоке и востоке области развиты плоские участки Западно-Сибирской равнины.

В пределах горноскладчатого Урала горнодобывающие предприятия и их инфраструктура размещаются преимущественно либо в верховьях, либо на малых реках [Попов, 1995; Носаль, 2004]. Здесь находится большой уральский водораздел между бассейнами Карского и Каспийского морей, который проходит по осевым хребтам Уральских гор; формируются западные притоки р. Оби и восточные притоки Волги. Водные объекты региона относятся к бассейнам двух крупнейших рек России - Иртыша и Камы (соответственно, 85% и 15% территории области). Гидрографическая сеть включает более 18 тыс. рек общей протяженностью более 68 тыс. км (густота речной сети 0,07 км/км²), около 1 тысячи рек (длиной от 10 до 200 километров общей протяженностью 8,15 тыс. км) относится к категории малых рек²

² Малой считается река, бассейн которой располагается в одной географической зоне, площадь водосбора не более 2000 км², или длина не более 100 км независимо от площади бассейна [Малые реки ..., 1988].

Основные реки представлены бассейнами рек Тавда, Тура, Пышма, Исеть, Чусовая, Уфа. Основная река Иртышского бассейна - Тобол и его притоки Тура (с притоками Ница, Пышма, Тагил), Тавда (с притоками Лозьва, Сосьва, Пелым), Исеть. Основными реками Камского бассейна являются Чусовая (с притоком Сылвой) и Уфа (приток р. Белой).

Водные ресурсы области отличаются существенной неравномерностью распределения как по территории, так и во времени. На бассейны рек Пышма и Исеть с наивысшей концентрацией населения и промышленности (35 % населения области) приходится всего лишь 6 % стока рек, а на бассейн реки Тавда, где проживает 4 % населения области - 54 % стока рек.

Для горных рек характерны быстрое течение и глубокий врез долин; равнинные реки имеют спокойное течение и широкие долины. Питание рек смешанное с преобладанием снегового, которое составляет 85–90% в южных районах области и 60–65% в пределах возвышенностей горного Урала. Водный режим рек Камского бассейна характеризуется высоким весенним половодьем, низкой летней меженью, которая прерывается дождевыми паводками, низкой зимней меженью. На севере региона водный режим большинства рек Иртышского бассейна отличается невысоким и растянутым весенним половодьем, устойчивой летне-осенней меженью, прерываемой дождевыми паводками, низкой зимней меженью, на юге области – коротким половодьем с продолжительной маловодной летней меженью, в период которой некоторые водотоки могут частично пересыхать. В конце октября–ноябре реки замерзают, в апреле вскрываются [Ресурсы ..., 1973; Черняев, 1987].

Наибольшее количество осадков выпадает в бассейнах рек Чусовой, Сылвы, Уфы и в верховьях реки Туры – от 600 до 800 мм в год. В бассейнах Исети, Туры, Пышмы количество осадков уменьшается до 500–600 мм. Коэффициент стока варьирует от 0,11-0,19 для бассейна р. Пышмы до 0,24-0,39 для бассейн р. Чусовой, в целом по области на сток расходуется 25% атмосферных осадков (коэффициент стока равен 0,25). Поверхностный сток характеризуется значительными вариациями – слой стока изменяется от 400 мм/год (модуль 12

л/с*км²) на северо-западе до 40 (модуль 1,2 л/с*км²) на юго-востоке (Рисунок 2.1). Большой диапазон изменения стока определяется с одной стороны разнообразием климатических условий, с другой – горными понятиями Урала, которые накладывают вертикальную поясность на широтную зональность.

Уральские горы являются барьером для воздушных масс, несущих влагу с Атлантического океана и создают большую разницу в водообильности рек Предуралья и Зауралья: относительная водоносность бассейна р. Камы в 4 раза выше, чем р. Тобол, который собирает воду с восточных склонов Урала. При этом в верховьях бассейна р. Тобол реки Лозьва, Сосьва, Вагран, стекающие с хребтов Северного Урала, характеризуются очень высокой водностью 10-12 л/с*км².

Реки Среднего Урала по внутригодовому распределению стока принадлежат к группе с весенним половодьем: на весну приходится 40–60 % и более объема годового стока [Черняев, 1987].

Экологическая обстановка на площади водосбора рек Среднего Урала, условия формирования стока находятся в значительной степени под техногенным влиянием, что является причиной неблагоприятного состояния большинства малых рек, преобладающих на территории Свердловской области, особенно в зонах крупных промышленных центров. По степени загрязненности поверхностные воды подразделяются на 5 классов: условно чистая, слабо загрязненная, загрязненная, грязная и экстремально грязная [РД 52.24.643-2002]. На территории области к классу «загрязненных» относится вода на 22% створов пунктов наблюдений, к классу «грязных» – 72%, к классу «экстремально грязных» – 6 % створов [Государственный доклад ..., 2017]. Вода Исетского и Белоярского водохранилищ оценивалась как «грязная», Волчихинского водохранилища (основного источника водоснабжения г. Екатеринбурга) – как «очень загрязненная». Критические показатели загрязненности воды представлены азотом, органическими веществами, фенолами, медью, марганцем, никелем.

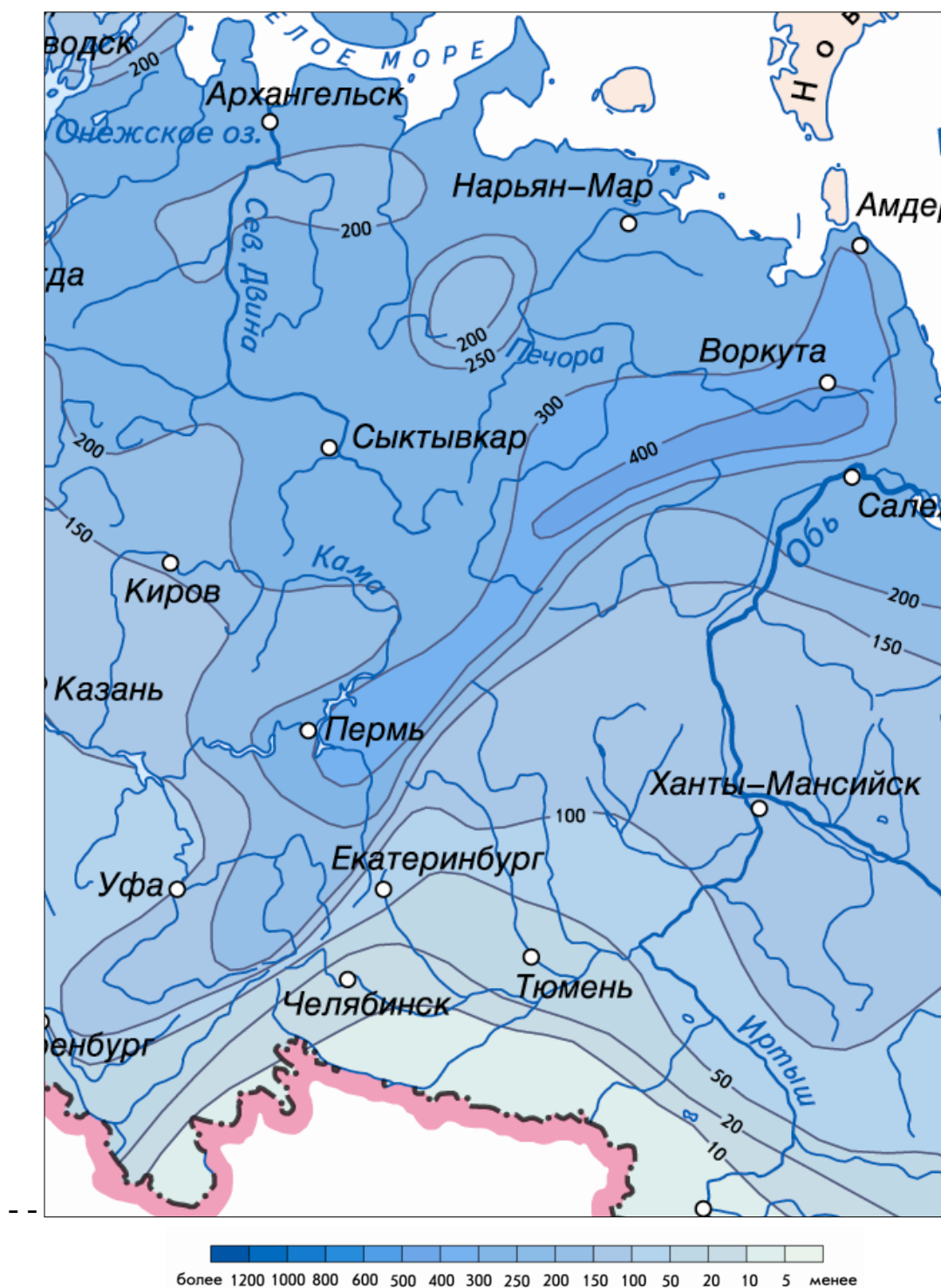


Рисунок 2.1 – Схема распределения слоя поверхностного стока (мм/год)
[Ресурсы ..., 1973]

Ежегодно в сфере экологической безопасности в области выявляется несколько тысяч нарушений, в том числе несанкционированный сброс вод. Одним из основных источников воздействия на водные объекты является неконтролируемый рассредоточенный (диффузный) сток с сельскохозяйственных и селитебных территорий, площадей, занятых отвалами и отходами

промышленного производства, на долю которого приходится до 60% от общего загрязнения [Федорова, 1999; Михайлов, 2000; Носаль, 2004; Беляев, 2018; Mayes et al., 2009]. Восстановление самоочищающей способности рек и экологическая реабилитация малых рек в значительной степени определяется сокращением антропогенного воздействия диффузного стока [Водная..., 2009].

2.2 Гидрогеологические условия

Территория Свердловской области находится в пределах четырех крупных гидрогеологических структур первого порядка (с запада на восток) Восточно-Русский артезианский бассейн; Предуральский предгорный артезианский бассейн; Большеуральская гидрогеологическая складчатая область (ГСО); Западно-Сибирский артезианский бассейн. В пределах Большеуральской ГСО по условиям формирования подземного стока зоны интенсивного водообмена выделяются гидрогеологические районы более мелкого порядка: Западно-Уральский гидрогеологический массив, Центрально-Уральский гидрогеологический массив, Тагило-Магнитогорская гидрогеологическая складчатая область, Восточно-Уральская гидрогеологическая складчатая область.

В каждом из бассейнов существуют своеобразные орографические и гидрографические условия, особое геолого-структурное и геоморфологическое строение, что определяет гидрогеологические условия формирования ресурсов и качества подземных вод, различную степень их защищенности от антропогенного воздействия. характер раскрытости гидрогеологических структур [Гидрогеология ..., 1972; Новиков, Герасименко, 2000ф].

Для верхней гидродинамической зоны Камско-Вятского и Предуральского артезианских бассейнов характерны платформенные условия формирования подземных вод, горизонты и комплексы пермских отложений в той или иной мере связанные с поверхностью.

Иртыш-Обский артезианский бассейн имеет двухэтажное строение. Нижняя часть сложена палеозойскими породами с развитыми в них подземными водами в

зонах трещиноватости и закарстованности. Среди преимущественно глинистых мезо-кайнозойских отложений покровного чехла получили распространение нескольких водоносных горизонтов, основными из них являются олигоцен-четвертичный, нижнеэоценовый горизонт, верхнемеловой. По мере их погружения на восток и разобщения относительно водоупорными глинистыми пластами условия питания и разгрузки подземных вод существенно меняются.

Большеуральская ГСО располагается в пределах орографически выраженного Уральского горноскладчатого сооружения, которое переживает длительный континентальный период при господстве эрозионных процессов. В пределах Свердловской области Большеуральская ГСО простирается в субмеридиональном направлении, занимая площадь 64,6 тыс.км² (33% от площади области). Здесь расположены основные города и промышленные предприятия, территория имеет высокую плотность населения.

Распространение подземных вод на площади Большеуральской ГСО имеет черты, типичные для регионов геосинклинального развития. Водоносность связана с двумя видами трещиноватости. Региональная зона развита до глубины 30-50 м в метаморфических и интрузивных образованиях и 80-100 м в карбонатных породах. В результате процессов физического и химического выветривания в верхней части разреза формируется элювиальная кора выветривания, представленная глинами или суглинками, заполняющими пустоты, мощностью 10-20 м и более.

Для горноскладчатого Урала характерны линейные крутопадающие трещиноватые зоны, которые связаны с дизъюнктивными нарушениями, с глубоким выветриванием пород в зонах контактов разнородных пород, с внедрением интрузивных пород. Мощность таких зон достигает 100-150 м. Эти зоны выражены в рельефе и сопровождаются развитием линейных кор выветривания. Фильтрационные свойства линейных зон выше, чем в зоне регионального выветривания.

По геоморфологическим и структурно-фациальным условиям подземные воды зоны региональной трещиноватости имеют безнапорный или субнапорный

характер, они образуют небольшие бассейны подземного стока с интенсивным водообменом, границы этих бассейнов, как правило, совпадают с поверхностными водоразделами.

По формационному принципу в верхней части фильтрационного разреза выделяется тринадцать разновидностей водоносных зон трещиноватости различных комплексов пород: карбонатных, карбонатно-терригенных, терригенных, вулканогенных, метаморфических, интрузивных.

В пределах Западно-Уральской зоны и Восточно-Уральского прогиба на площади карбонатных отложений развиты водоносная зона палеозойских преимущественно карбонатных пород и водоносная зона рифейско-палеозойских преимущественно карбонатных пород. В границах Центрально-Уральского поднятия, Тагило-Магнитогорского прогиба и Восточно-Уральского поднятия на площади переслаивающихся карбонатных и терригенных пород выделяются водоносная зона палеозойских преимущественно терригенных пород и водоносная зона рифейско-палеозойских карбонатно-терригенных пород. На площади терригенных образований развиты водоносная зона палеозойских терригенных пород и водоносная зона рифейско-палеозойских пород.

Коллекторами подземных вод водоносных зон палеозойских и рифейско-палеозойских пород являются песчаники, алевролиты, аргиллиты, сланцы глинистые, углисто-кремнисто-глинистые, филлиты и филлитовидные сланцы.

На площади распространения вулканогенной формации выделяется водоносная зона палеозойских вулканогенных пород. На площади развития метаморфических пород выделяются водоносная зона рифейско-палеозойских метаморфических пород и водоносная зона рифейско-палеозойских метаморфических кристаллических пород. Вулканогенные и метаморфические породы обладают приблизительно одинаковыми коллекторскими свойствами. Наличие в составе метаморфических пород пластичных разностей с очень низкой водопроводимостью, таких как глинистые, слюдистые и другие сланцы, способствует формированию мозаичной структуры фильтрационного поля

благодаря сочетанию проницаемых трещин регионального выветривания и разломов и водонепроницаемых (слабопроницаемых) экранов.

Водовмещающими вулканогенными породами являются эффузивные и пирокластические породы, представленные различного состава порфиритами, диабазами, базальтами, липаритами и их туфами, туффитами, туфобрекчиями, туфоконгломератами, туфопесчаниками и другими туфогенными породами. Возраст их изменяется от рифея до нижнего карбона.

Коллекторами подземных вод метаморфических пород являются кремнистые и глинисто-кремнистые сланцы, зеленые сланцы по осадочным и вулканогенным породам, амфиболиты и т.д. Наиболее древние породы представлены гнейсами и кристаллическими сланцами, которые существенно менее водообильны по сравнению с более молодыми метаморфическими образованиями.

Гидрогеологические подразделения в пределах площади распространения интрузивных пород представлены водоносными зонами палеозойских интрузивных пород кислого и щелочного, основного и среднего, ультраосновного, различного состава. Водовмещающими породами водоносной зоны гранитоидов являются граниты, гнейсо-граниты, а также кварцевые диориты и сиениты. Гранитоиды являются наименее обводненными из всех интрузивных пород. Водоносная зона основных и средних интрузий представлена габбро и диоритами. Водовмещающими породами водоносной зоны ультрабазитов являются дуниты, порфириты, пироксениты и их метаморфические разности: серпентиниты, талькокарбонатные и другие породы. Породы ультраосновного состава (особенно серпентинизированные) по обводненности заметно превосходят интрузивные разности кислого или основного состава.

Образования триасовой системы занимают специфическое положение в пределах горноскладчатого Урала: на восточном склоне Урала и в Зауралье они выполняют многочисленные субмеридиональные тектонические и эрозионно-тектонические впадины. В их составе выделяются две серии: нижняя – туринская (нижний-средний триас) и верхняя – челябинская (верхний триас). Угленосные

терригенные осадки челябинской серии выделяется в составе водоносного верхнетриасового (челябинского) угленосного комплекса, а эффузивно-осадочные образования туринской серии – в составе водоносного нижнесреднетриасового (туринского) эффузивно-осадочного комплекса.

Питание водоносные горизонты получают за счет инфильтрации атмосферных осадков, независимо от геологического строения площади питания и распространения подземных вод на большей части территории горноскладчатого Урала совпадают. Особенностью верхнего гидродинамического этажа является совпадение водоразделов подземных и поверхностных вод. Разгрузка подземных вод происходит в реки, которые являются дренами по отношению к водоносным горизонтам. Участки повышенных фильтрационных свойств приурочены к долинам рек и зонам тектонических нарушений.

По условиям формирования режима подземных вод территория Свердловской области относится к району с типом режима сезонного преимущественно весеннего и осеннего питания, в условиях отсутствия мерзлоты, но наличия устойчивого зимнего промерзания верхней части зоны аэрации, по интенсивности питания - к району обильного питания, где среднее количество осадков с учетом поверхностного стока превышает испарение.

Закономерности формирования внутригодового естественного режима подземных вод первых от поверхности водоносных горизонтов зоны активного водообмена установлены по материалы многолетних наблюдений за изменением гидродинамических характеристик подземных вод в естественных (ненарушенных или слабонарушенных) условиях по скважинам наблюдательной сети [Иванова, 2007ф; Елохина, 2012ф].

Определяющее значение в питании грунтовых вод имеет весеннее снеготаяние, в меньшей степени - летне-осенние осадки. С начала года наблюдается спокойное (с незначительными колебаниями) снижение уровней, связанное с отсутствием инфильтрационного питания. В конце марта–начале апреля наступает зимняя межень. После установления положительных среднесуточных температур воздуха начинается резкий весенний подъем уровней.

В мае–начале июня уровни достигают наивысшего положения. Амплитуда весеннего подъема уровней по среднемноголетним значениям в среднем составляет 1,5-2,3 м и зависит от геоморфологического положения точки наблюдения, количества накопленных в зимний период осадков, степени промерзания грунтов, характера повышения температуры воздуха весной, литологического состава пород, мощности зоны аэрации.

Летняя межень по среднемноголетним значениям приходится на июль–август. Осадки в летний период мало влияют на ход уровней (за исключением северных районов, что связано с ливневым характером дождей и высокой температурой воздуха, способствующих увеличению поверхностного стока и испарения. Небольшой подъем уровней с амплитудой 0,1-0,5 м происходит при понижении температур и, соответственно, уменьшении испарения в сентябре–октябре. После этого до конца года происходит плавное снижение уровней.

Качество подземных вод, в том числе и извлекаемых различными каптажными сооружениями, формируется под влиянием природных и антропогенных факторов. Это физико-географические, геолого-гидрогеологические, физико-химические и биологические факторы природной среды, а также разнообразная производственно-хозяйственная деятельность человека, в том числе добыча и извлечение воды из недр.

В Большеуральской ГСО, где зона активного водообмена имеет небольшую мощность и в Восточно-Русском и Предуральском бассейнах, где верхняя зона активного водообмена развивается на гораздо большую глубину, развиты преимущественно гидрокарбонатные воды с диапазоном величины минерализации (от 0,1 до 0,6 г/дм³). Верхняя часть разреза в гидрогеологическом отношении представляет собой элемент геофильтрационной схемы, обеспечивающий питание подземных вод, межсезонное регулирование и защиту палеозойского субстрата от внешнего воздействия. Интенсивный водообмен определяет развитие пресных и ультрапресных вод. Катионный состав их, как правило, является результатом углекислотного выщелачивания горных пород и

грунтов зоны аэрации и характеризуется присутствием ионов кальция, магния, натрия в различных соотношениях.

На площадях развития гипсоносных толщ в Восточно-Русском и Предуральском артезианских бассейнах (юго-запад области), а также в структурах горноскладчатого Урала, где зеленокаменные горные породы палеозоя содержат сульфидную минерализацию, благодаря активно протекающим здесь процессам сернокислотного выщелачивания, получил развитие преимущественно сульфатный тип вод с преобладающим содержанием кальция. В верхних водоносных горизонтах Западно-Сибирского артезианского бассейна к востоку от меридиана Камышлов-Ирбит-Сосьва развиты смешанные типы вод гидрокарбонатно-сульфатного, сульфатно-гидрокарбонатного, хлоридно-гидрокарбонатного кальциево-магниевого облика. Вблизи зоны сочленения со структурами горноскладчатого Урала развита зона активного водообмена с пресными подземными водами. В восточном направлении, по мере погружения нижнеэоценового и верхнемелового горизонтов под водоупорные глинистые отложения и снижения в связи с этим в них скорости водообмена, минерализация подземных вод возрастает до 1 г/л, а на самом востоке-юго-востоке Свердловской области до 1,5-3,0 г/л. Подземные воды характеризуются бедным микрокомпонентным составом, однако очень часто обогащены соединениями железа и марганца.

Модуль подземного стока в среднем по области имеет значение 1,32 л/с*км², Величина модуля определяется природно-климатическими условиями и геологическом строением. Максимальная величина модуля оценивается в 5-7 л/с*км² на площади развития карбонатных пород, слагающих Уфимское плато; минимальная (0,1-0,5 л/с*км²) на юго-востоке области, где основные водоносные горизонты погружаются под регионально-выдержанные водоупоры и содержат некондиционные для питья соленоватые воды (Рисунок 2.2).

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Модуль эксплуатационных ресурсов
подземных вод (л/с/км²)

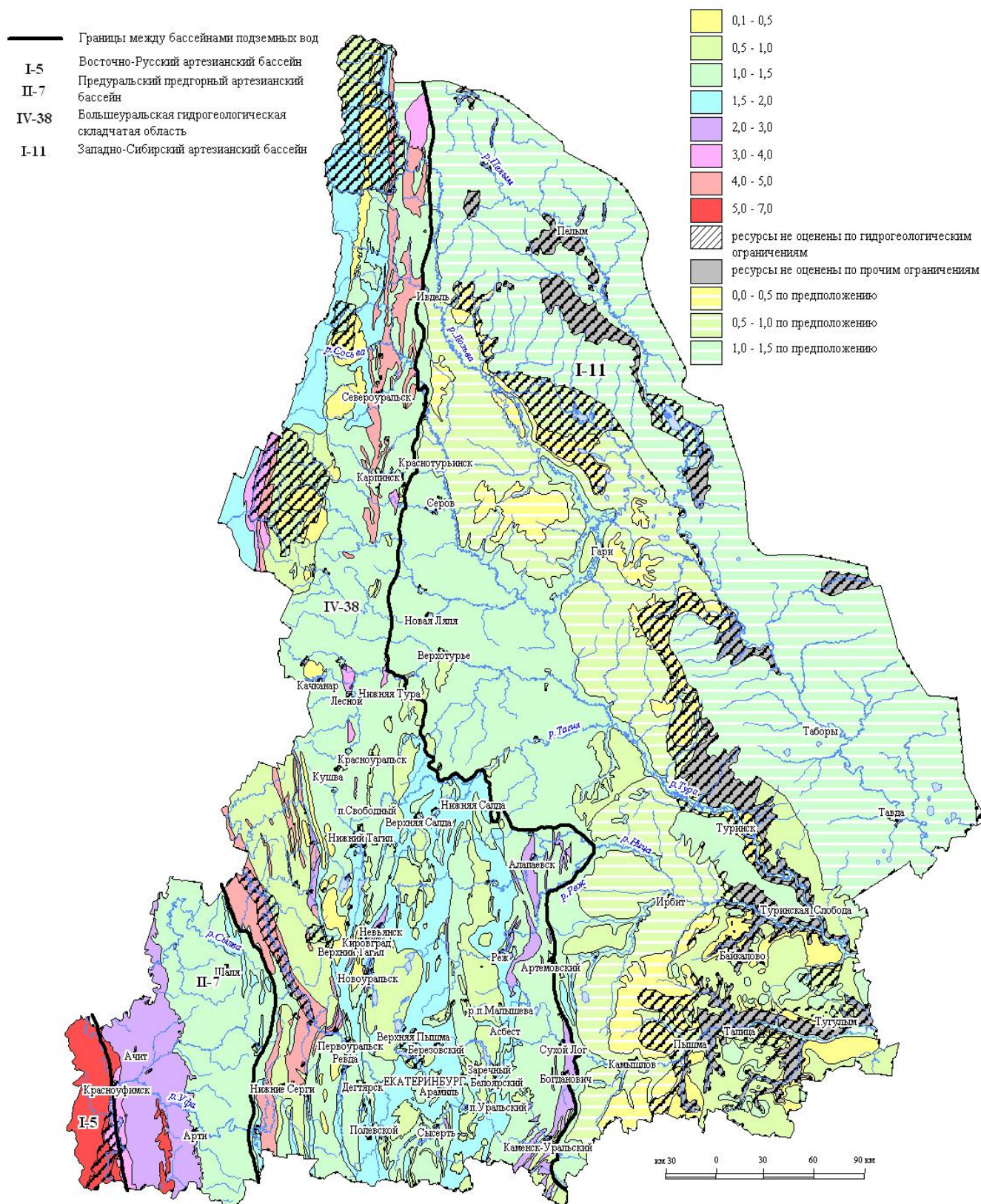


Рисунок 2.2 - Обзорная карта прогнозных эксплуатационных ресурсов Свердловской области [Новиков, Герасименко, 2000ф]

2.3 Техногенное воздействие горнодобывающей промышленности

Уральский регион – старейший в России горнодобывающий район. В течение десятков и сотен лет вокруг перерабатывающих заводов и отрабатываемых рудных месторождений Урала (железных, медных, никелевых и др.), как и на других горнопромышленных территориях, происходило строительство основных городов и поселков: в частности, комплекс бывших и нынешних заводов-городов трассирует Зеленокаменную полосу – региональную провинцию медноколчеданных месторождений [Емлин, 1991].

Разработка рудных месторождений является одним из основных источников загрязнения подземных и поверхностных вод. При подземной и открытой разработке месторождений вынос токсичных металлов из недр происходит за счет их растворения подземными водами, поступающими в водоотлив.

В настоящее время на территории области ведется разработка порядка двухсот объектов из учтенных 1700 месторождений полезных ископаемых. По разведанным запасам и прогнозным ресурсам полезных ископаемых Свердловская область является одной из крупнейших в России. Минерально-сырьевая база Свердловской области обеспечивает значительную часть добычи в России ванадия, бокситов, хризотил-асбеста, железных руд, огнеупорных глин.

В области имеются значительны запасы никелевых руд, драгоценных металлов, горнохимического сырья, нерудного сырья для металлургии, камнесамоцветного сырья, минеральных и пресных подземных вод, практически неограниченны запасы строительных материалов. Разведаны, хромитов, марганца, имеются определенные перспективы выявления месторождений нефти и газа.

В Свердловской области учтено около 200 техногенно-минеральных образований с суммарным объемом отходов в 8,5 млрд. тонн, в которых содержатся практически все элементы таблицы Менделеева (Рисунок 2.3).

Из общего количества нарушенных земель (25,5 тыс. га) земли, нарушенные при добыче полезных ископаемых, занимают 70% [Государственный ..., 2017].

Глубина отработки полезных ископаемых на действующих подземных рудниках Свердловской области превысила тысячу метров³ (запасы бокситов на СУБР разведаны до глубины 2000 м), на карьерах - 350 м (на конец отработки глубина карьера Баженовского месторождения хризотиласбеста достигнет 500 м).

Интенсивная многолетняя горнодобывающая деятельность привела к существенным изменениям природного состояния геологической среды, поверхностной и подземной гидросферы, активизации геохимических и геомеханических процессов. Подземная разработка сопровождается горными ударами, над выработанными шахтными полями развиваются процессы обрушения и сдвижения поверхности земли (СУБР; шахты Магнетитовая, Евстюнинская, Лёвиха Х, Чекист на Тагило-Кушвинской группе месторождений; шахта Южная на Крылатовском месторождении; Северопесчанское, Березовское, Дегтярское месторождения), отмечается заболачивание (Буланашское месторождение) [Сергеева, 2015ф].

Отработка месторождений практически всегда происходит под защитой водопонижительных систем. Большая часть месторождений твердых полезных ископаемых Среднего Урала расположена в пределах горно-складчатого Урала. В Свердловской области эксплуатируется около 60 водопонижительных систем (Рисунок 2.4). Наибольшее количество подземных вод при ведении горных работ извлекается на Североуральском бокситовом руднике (353 тыс.м³/сут), Березовском золоторудном месторождении (41 тыс.м³/сут), Высокогорском железорудном месторождении (34 тыс.м³/сут), Галкинском карьере известняков (30 тыс.м³/сут) в Свердловской области, на Агаповском карьере известняков в Челябинской области (64 тыс.м³/сут).

³ В 2015 г. введена в эксплуатацию шахта «Черемуховская-Глубокая», глубиной 1500 м - самая глубокая шахта России.

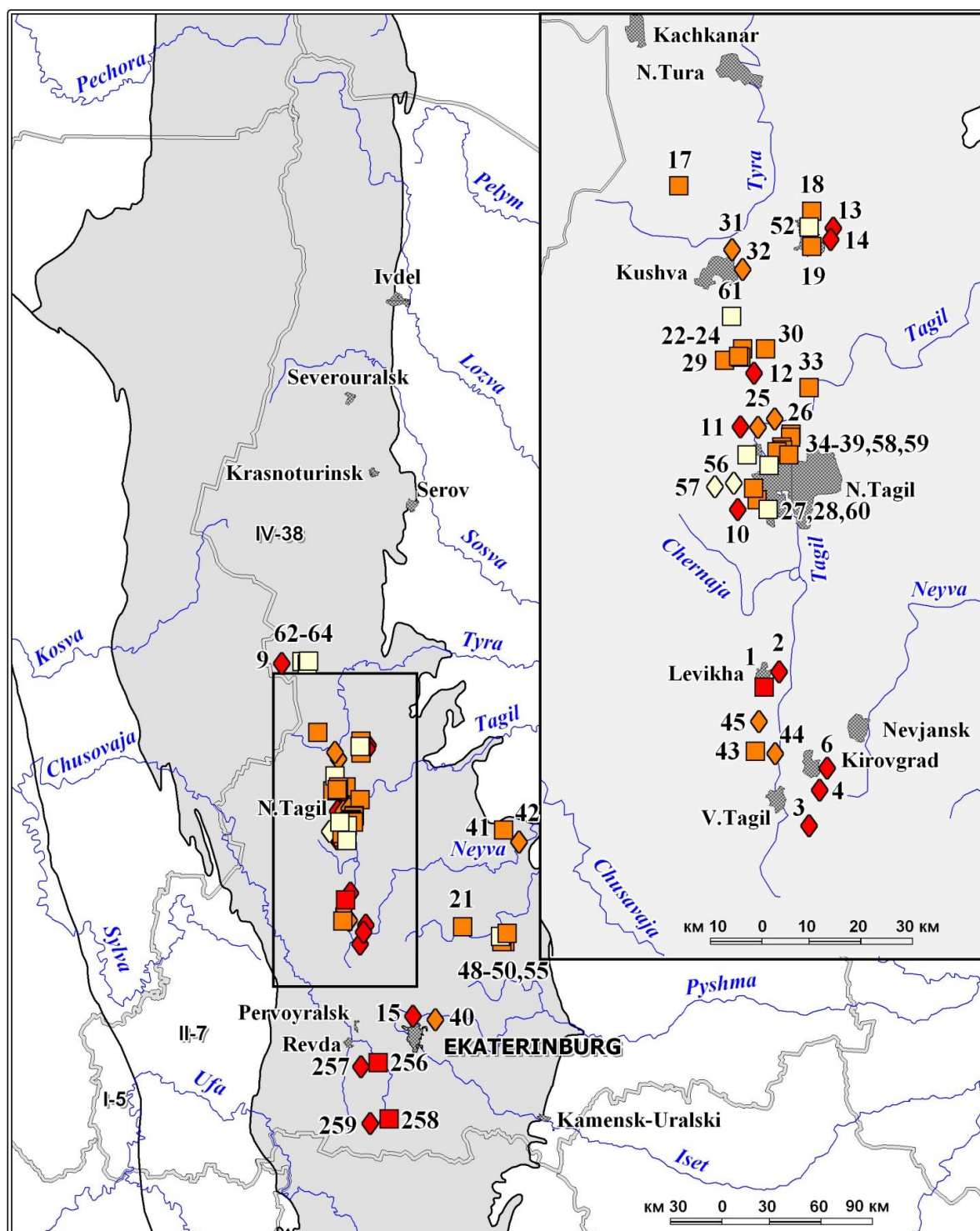


Рисунок 2.3 - Схема размещения техногенно-минеральных образований Свердловской области и врезка на центральную часть (по данным [Мормиль и др., 2002])

Объемы извлечения подземных вод, сопровождающие добычу полезных ископаемых на горноскладчатом Урале, весьма значительны. Так, извлечение подземных вод (доля дренажного водоотлива) на территории Свердловской и Челябинской областей составляет около 20% от суммарного по России, при этом добыча подземных вод - меньше 4% от суммарной (Таблица 2.1). При осушении месторождений полезных ископаемых на территории Свердловской области извлекается в 1,7 раза больше подземных вод, чем добывается для хозяйственно-питьевых нужд, при этом практически вся дренажная вода (больше 90%) сбрасывается без использования [Информационный ..., 2011].

Таблица 2.1 - Структура добычи, извлечения и использования подземных вод в Российской Федерации, Свердловской и Челябинской областях

Тип водоотбора	Добыча, извлечение и использование подземных вод, тыс.м ³ /сут		
	добыча, извлечение	использование	сброс, потери
<i>Российская Федерация</i>			
Добыча	22975	20804	2171
Извлечение	4939	839	4100
Всего	27914	21643	6271
<i>Свердловская область</i>			
Добыча	458	455	3
Извлечение	772	65	707
Всего	1230	520	710
<i>Челябинская область</i>			
Добыча	406	338	68
Извлечение	171	19	152
Всего	577	357	220

Примечания. Добыча – изъятие подземных вод из недр с целью их использования для питьевого, хозяйственно-бытового, производственно-технического водоснабжения, орошения земель. Извлечение – изъятие подземных вод из недр, осуществляемое попутно в процессе других видов недропользования: карьерный, шахтный водоотлив; поддержание пластового давления на нефтепромыслах; защита территории от подтопления [Информационный ..., 2011].

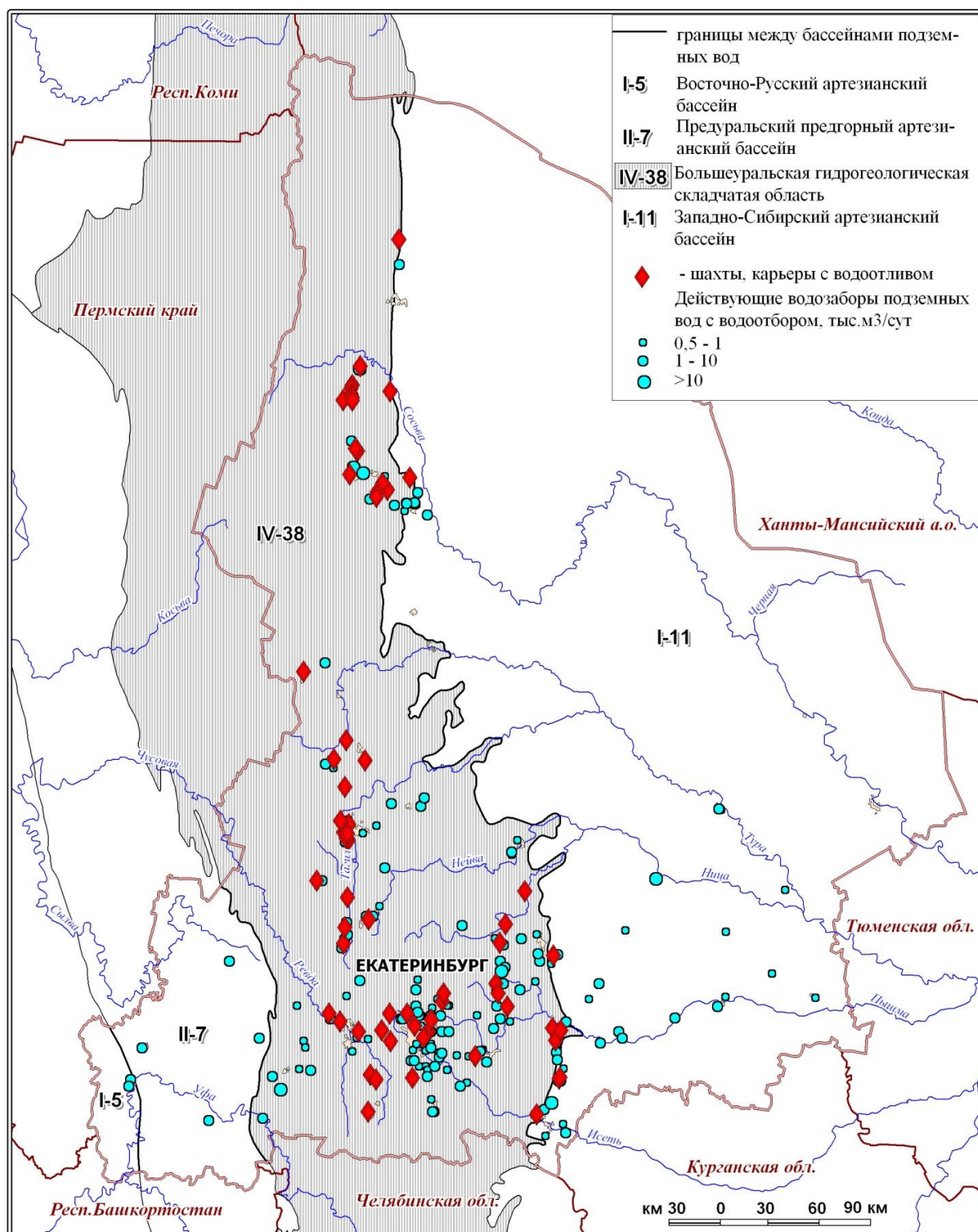


Рисунок 2.4 – Схема размещения объектов добычи и излечения подземных вод на территории Свердловской области (составлена с использованием материалов [Иванова, 2007ф; Елохина, 2010ф])

Качество дренажных вод чаще всего не соответствует установленным требованиям для питьевого водоснабжения. Кроме того, с годами происходит заметное ухудшение качества подземных вод, извлекаемых при эксплуатации месторождений, которые, как правило, сбрасываются без очистки или с недостаточной очисткой в речную сеть. С дренажными водами сбрасываются такие элементы, как железо, медь, цинк, свинец, марганец, никель в количествах, превышающих десятки (марганец) и сотни (железо) тонн. С шахтным водоотливом железорудных месторождений Высокогорского ГОКа выносятся 11,6 тыс. т/год загрязняющих веществ, с шахтными водами Березовского золоторудного месторождения – 9,36 тыс. т/год (таблица 2.2).

На дренажных узлах Североуральского бокситового рудника, откачивающих подземные воды с глубин 25 (Черемуховский дренажный узел) - 200 м (Северо-Восточный дренажный узел), хорошее качество воды сохраняется в течение десятков лет (с 1950 г.). Подземные воды являются попутно извлекаемым полезным ископаемым: по ним утверждены запасы в количестве 50 тыс.м³/сут (Кальинское месторождение), они используются для хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Североуральска. Качество воды, откачиваемой дренажными узлами, отвечает требованиям СанПиН 2.1.4.1074–01, величина сухого остатка (0,2-0,3 г/дм³) и содержание хлоридов (5-11 мг/дм³) соответствуют фоновым значениям. Отмечается некоторый рост содержания сульфатов: среднегодовые значения 28-42 мг/дм³, при эпизодическом увеличении до 114 мг/дм³. При этом на глубоких горизонтах (620-680 м) в шахтных водах Североуральского бокситового рудника (шахты 14-14бис, 15-15бис) величина сухого остатка достигла 2,9 г/дм³ (2,9 ПДК), жесткость – 25 ммоль/дм³ (3,6 ПДК), содержание сульфатов возросло до 925 мг/дм³ (1,85 ПДК), хлоридов - до 457 мг/дм³ (1,3 ПДК), железа - до 3,3 мг/дм³ (11 ПДК), никеля – до 0,28 мг/дм³ (2,8 ПДК), алюминия - до 0,51 мг/дм³ (1 ПДК), нефтепродуктов – до 1,69 мг/дм³ (16,9 ПДК) [Иванова, 2001ф; Халитов, Никифорова, 2002ф].

Таблица 2.2 - Вклад в загрязнение поверхностных водных объектов основных предприятий горнодобывающей отрасли в 2016 г. (по данным [Государственный ..., 2017])

Предприятие	Сброшено загрязненных сточных вод, млн. м ³	Масса сброса загрязняющих веществ, тыс. т	Минерализация, г/л
ОАО «Высокогорский горно-обогатительный комбинат», шахта «Южная»	4,54	4,54	1,00
ОАО «Высокогорский горно-обогатительный комбинат»	11,87	7,10	0,60
АО «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат»	10,29	4,79	0,47
ООО «Березовский рудник», Березовский ГО	11,71	9,36	0,80
ЗАО «Золото Северного Урала», ГО Краснотурьинск	3,71	2,43	0,65
ОАО «Богословское рудоуправление», ГО Краснотурьинск	3,91	2,19	0,56
ГКУСО «УралМонацит»* Кировградский ГО	1,70	9,75	5,74
ГКУСО «УралМонацит»* ГО Дегтярск	5,81	7,99	1,38

Примечание *ГКУСО «УралМонацит» осуществляет нейтрализацию шахтных вод остановленных медноколчеданных рудников.

2.4 Гидрогеоэкологические последствия горных работ на постэксплуатационном этапе

В конце прошлого – начале этого века десятки горнодобывающих предприятий прекратили добычу, в том числе медноколчеданные рудники (Рисунок 2.5).

После завершения отработки и прекращения водоотлива на территории ряда городов и поселков Свердловской области (таких как Артемовский, Верхняя Пышма, Крылатовский, Нижний Тагил, Полевской и др.) возникли такие эколого-гидрогеологические проблемы, как подтопление населенных пунктов, выход кислых вод на поверхность, активизация процессов карстообразования и сдвижения, загрязнение поверхностной и подземной гидросферы, почв.

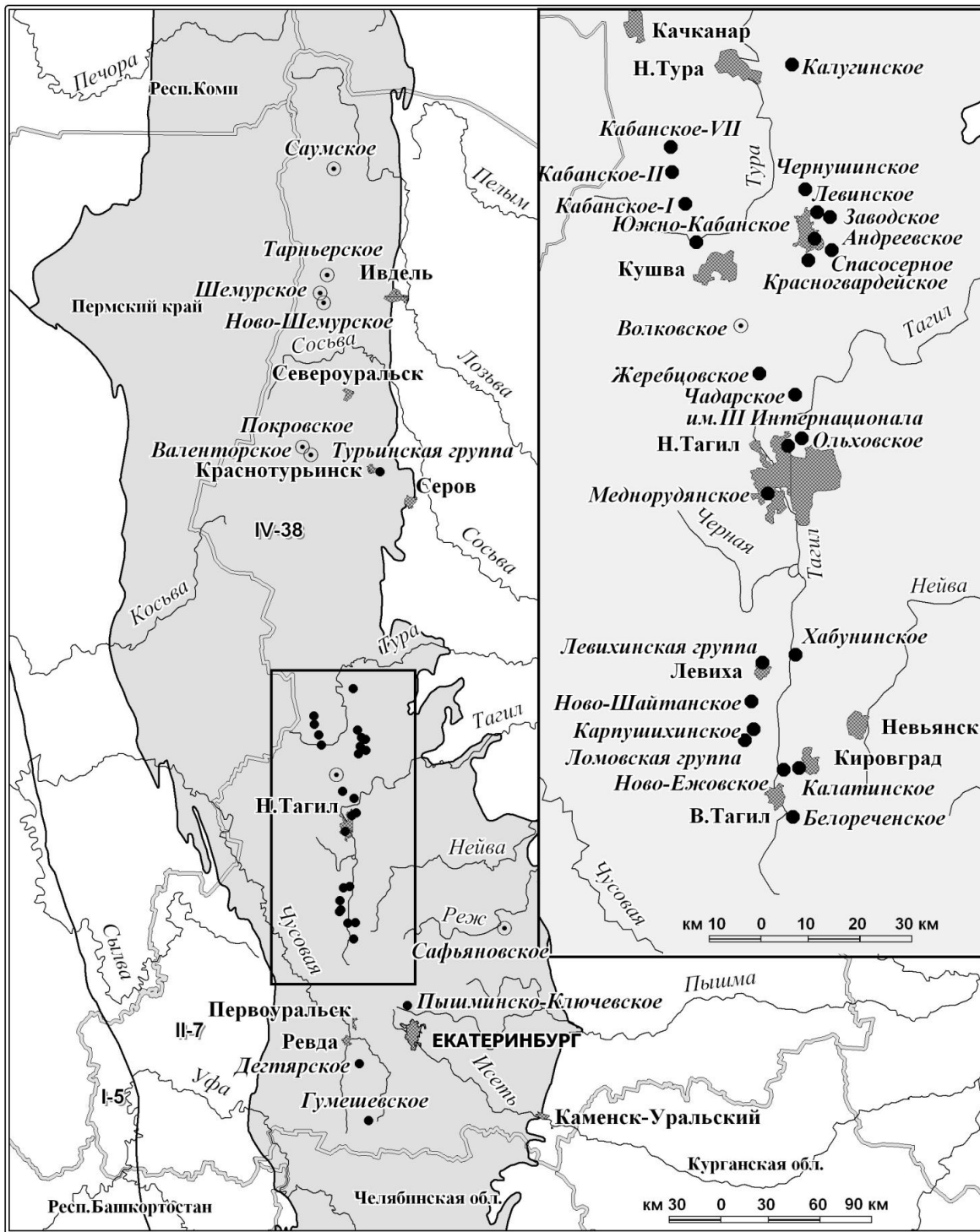


Рисунок 2.5 - Схема размещения обрабатываемых и законсервированных медноколчеданных месторождений Свердловской области и врезка на центральную часть (по данным [Мормиль и др., 2002] с изменениями и дополнениями). 1 – граница между бассейнами подземных вод; 2 – Восточно-Русский артезианский бассейн; 3 – 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, 9 – обрабатываемые.

В 2001 г. С.Н. Елохиной было выполнено обследование основных объектов завершенной добычи на территории Свердловской области [Елохина, 2001ф]. В течение 2001-2009 гг. на ряде рудников, представляющих повышенную экологическую опасность, в том числе отработанных, по заказу Уралнедра были проведены работы по мониторингу геологической среды. Это Лаврово-Николаевский участок Волковского месторождения [Парфенова, 2002ф], Пышминско-Ключевское медно-кобальтовое месторождение [Четверкин, 2003ф], Высокогорское железорудное месторождение [Вишняк, Кадук, 2004ф], Левихинская группа месторождений [Вишняк, 2005ф], Дегтярское медноколчеданное месторождение [Вишняк, Силина, 2005ф], Буланашское месторождение каменного угля [Вишняк, 2005ф], Березовское золоторудное месторождение [Четверкин, Вишняк, 2005ф], Гумешевское месторождение меди [Парфенова, 2009ф]. В 2016 г. по заказу Министерства природных ресурсов Свердловской области институтом РосНИИВХ было выполнено комплексное исследование источников загрязнения Северского водохранилища, в площади водосбора расположено несколько опасных объектов, в том числе отработанные Зюзельский и Гумешевский медные рудники [Попов, 2017].

В Таблице 2.3 приведены показатели современного эколого-гидрогеологического состояния территорий, испытывающих влияние отработанных рудников.

Закрытие в 2003 г. шахты Крылатовская (бассейн реки Чусовой) и прекращение водоотлива привело к 2008 г. к катастрофическому подтоплению 136 домов в пос. Крылатовский, пострадало более 500 человек: глубина до воды составила от нескольких сантиметров до 0,5 м [Семячков и др., 2009]. Рудник, расположенный в 300 м выше по потоку от поселка, более 200 лет отрабатывал месторождение золото кварцевых руд, глубина отработки до 400 м, расход водоотлива составлял около 220 м³/час. После затопления рудника на территорию поселка поступают подземные воды с расходом около 10 л/с, что превышает расход подземного потока в естественных условиях. Большая часть атмосферных осадков в пределах подработанной территории с многочисленными

заброшенными горными выработками инфильтруется в трещиноватую водоносную зону, что приводит к увеличению модуля подземного стока до $2,7 \text{ л/с*км}^2$ при региональном значении модуля около $1,5 \text{ л/с*км}^2$.

В некоторых случаях предприятие и после завершения отработки месторождения вынуждено продолжать откачку подземных вод для предотвращения подтопления на флангах депрессионной воронки [Четверкин, 2003ф]. Так, после прекращения водоотлива в 1981 году на Пышминско-Ключевском медно-кобальтовом руднике (отрабатывался с 1854 года) в течение одного года депрессионная воронка заполнилась, уровень подземных вод вышел на свои естественные отметки и выше, подтопив часть города Верхняя Пышма (город-спутник г. Екатеринбурга, бассейн р. Пышмы). Предприятие возобновило водоотлив производительностью около $500 \text{ м}^3/\text{час}$ (при максимальном в период отработки порядка $1000 \text{ м}^3/\text{час}$), при этом вода сбрасывается без использования в озеро Ключи. Количество отбираемой воды более чем в 3 раза превышает естественные ресурсы участка: модуль естественных ресурсов $2,12 \text{ л/с*км}^2$, эксплуатационный модуль 7 л/с*км^2 (следует учесть, что в формировании водоотбора участвуют поверхностные воды озера Ключи и реки Пышмы, а также утечки из городских коммуникаций). Осушение территории в радиусе 1,5–2 км через шахтные стволы нельзя считать эффективным, тем более, что на подтапливаемой территории за 30 лет так и не были рассмотрены и реализованы альтернативные мероприятия, обеспечивающие ее удовлетворительное состояние. За последние десятилетия были закрыты и затоплены десятки медноколчеданных рудников. Однако их территории по-прежнему являются одним из основных источников загрязнения гидросферы.

Таблица 2.3 - Последствия затопления шахт и рудников Свердловской области. Используются материалы [Елохина, 2001ф; Четверкин, 2003ф; Фельдман и др., 2004ф, 2008ф; Вишняк, 2005ф; Вишняк, Силина, 2005ф; Семячков и др., 2009; Парфенова, 2009ф; Елохина, 2014; Сергеева, 2015ф; Соколкин, 2016ф; Старицина, Старицина, 2017; Далатказин, Харисов 2017].

Год прекращения водоотлива. Объект. Река. Водохозяйственный район	Показатели современного эколого-гидрогеологического состояния территории
1954 г. Карпушихинское медноколчеданное месторождение бассейн р.Тагил Тобол -Иртыш- Обь	• излив кислых шахтных вод через шахтные стволы • очистка шахтных вод перед сбросом в речную сеть • формирование серии провалов по ул. Ленина и автодороге Кировград-Лёвиха в пос. Карпушиха
1955 г. Богомоловское золоторудное месторождение бассейн р.Туры Тобол -Иртыш- Обь	• водоотлив 40 л/с
1958 Ломовское медноколчеданное месторождение бассейн р.Тагил Тобол -Иртыш- Обь	• излив кислых шахтных вод через шахтные стволы • очистка перед сбросом в речную сеть
1964 Белореченское медноколчеданное месторождение бассейн р.Тагил Тобол -Иртыш- Обь	• излив кислых шахтных вод через шахтные стволы • очистка перед сбросом в речную сеть
1976 г. Зюзельское медноколчеданное месторождение Северский пруд бассейн р.Чусовой Кама-Волга	• излив кислых шахтных вод через шахтные стволы • деформация зданий в зоне сдвижения от выработок бывшего Зюзельского рудника • развитие трещин отрыва размером 2-3 см в зоне сдвижения

Продолжение Таблицы 2.3

Год прекращения водоотлива. Объект. Река. Водохозяйственный район	Показатели современного эколого-гидрогеологического состояния территории
1981 г. (прекращение добычи в 1976 г.) Пышминско-Ключевское медно-кобальтовое месторождение бассейн р.Пышмы Тобол -Иртыш- Обь	• подтопление территории • возобновление дренажа с расходом $Q = 500 \text{ м}^3/\text{час}$ ($0,5 * Q$ водоотлива) в 1981 г. • увеличение модуля подземного стока до 4 л/с*км^2 (при региональном $2,1 \text{ л/с*км}^2$)
1989 г. Красногвардейское медноколчеданное месторождение бассейн р.Туры Тобол -Иртыш- Обь	• подтопление территории
1991 г. медноколчеданное месторождение им. III интернационала бассейн р.Тагил Тобол -Иртыш- Обь	• сезонный выход через шахтные стволы
1994 г. Гумешевское месторождение медных окисленных руд Северский пруд бассейн р.Чусовой Кама-Волга	• подтопление территории • формирование выхода газифицирующих родников с кислыми водами • разгрузка кислых шахтных вод с расходом $Q = 50 \text{ м}^3/\text{час}$ • отработка методом подземного выщелачивания с 2004 г.
1995 г. Дегтярское медноколчеданное месторождение Волчихинское водохранилище бассейн р.Чусовой Кама-Волга	• подтопление территории • формирование выхода газифицирующих родников с кислыми водами • формирование техногенного водоема кислых вод с расходом $Q = 180 \text{ м}^3/\text{час}$ ($\sim 0,6 * Q$ водоотлива) • очистка шахтных вод перед сбросом в речную сеть

Продолжение Таблицы 2.3

Год прекращения водоотлива. Объект. Река. Водохозяйственный район	Показатели современного эколого-гидрогеологического состояния территории
2003 г. Крылатовское золотрудное месторождение бассейн р.Чусовой Кама-Волга	• подтопление территории • обрушение, сдвигание, оседание земной поверхности • формирование свежих провалов • рост расхода подземного потока в 2 раза • увеличение модуля подземного стока до 2,7 л/с*км² (при региональном 1,5 л/с*км²)
2003 г. Шахта Егоршинская бассейн р.Пышмы, Тобол -Иртыш- Обь	• водоотлив для поддержания уровня подземных вод на глубине около 20 м
2003 г. Левихинское медноколчеданное месторождение бассейн р.Тагил Тобол -Иртыш- Обь	• формирование техногенного водоема кислых шахтных вод • обрушение, сдвигание, оседание земной поверхности • формирование свежих провалов (шахта Левиха X, XI, Чекист, у станции перекачки) • разгрузка кислых вод с расходом $Q = 120 \text{ м}^3/\text{час}$ ($\sim 0,5 * Q$ водоотлива) • увеличение модуля подземного стока до 2 л/с*км² (при региональном 0,9 л/с*км²) • очистка шахтных вод перед сбросом в речную сеть
2014 г. Турьинское меднопорфировое месторождение бассейн р.Турьи Тобол -Иртыш- Обь	• подтопление территории г. Краснотурьинска • активизация процессов карстообразования активизация процессов сдвижения (заполнение депрессионной воронки не завершено, прогноз)

На Дегтярском медноколчеданном руднике шахтный водоотлив был прекращен в 1995 г. после 80 лет эксплуатации (глубина отработки 600 м). Выход шахтных вод на поверхность начался в октябре 1998 г., через 34 месяца после остановки водоотлива. Уровни подземных вод на территории бывшего горного отвода и вблизи него залегают на глубине менее 1 м, вызывая затопление подвалов, снижение устойчивости фундаментов и разрушение коммуникаций. Дома на двух улицах были снесены, ранее застроенная территория не подлежит застройке. Вдоль всего шахтного поля наблюдается большое количество провалов, протянувшихся в меридиональном направлении, которые сформировались в процессе отработки Дегтярского медноколчеданного месторождения с использованием систем обрушения. Глубина провалов в основном от 30 до 70 м [Еловских и др., 1994]. Самым крупным является провал шахты Колчеданной (бывший карьер, который попал в зону обрушения шахты) (Рисунок 2.6). В настоящее время карьер (провал) шахты Колчеданной затоплен и является участком излива шахтных вод на поверхность земли. [Елохина, 2001ф; Вишняк, Силина, 2005ф; Елохина, 2014]. В период работы шахт сброс шахтных вод производился в русло р. Дегтярка (приток р. Исток). После затопления гидродинамическая ситуация изменилась, зона разгрузки сформировалась в бассейне р. Исток (приток р. Ельчевка, бассейн р. Чусовой, Камский бассейновый округ).

В настоящее время шахтные воды дренируются карьером шахты Колчеданной (расход $180 \text{ м}^3/\text{час}$), воды кислые с pH 2–3, с минерализацией около 10 г/л, содержанием сульфатов около 6 г/л, высокой концентрацией меди (10 мг/л), цинка (116 мг/л), железа (995 мг/л), марганца (40 мг/л) меди (10 мг/л). По сравнению с периодом отработки в зоне сосредоточенной разгрузки шахтных вод содержание компонентов стало в 1,5–2 раза выше, кроме меди, ее количество в воде уменьшилось в 8 раз.



Рисунок 2.6 – Ситуационная схема района Дегтярского месторождения (покрытие Google, 2017)

В период с августа 2003 г. по ноябрь 2004 г. на объекте проводились детальные наблюдения за расходами и химическим составом шахтных вод, разгружающихся в провале шахты Колчеданной. Массовый расход сульфатов варьировал от 5 до 11,7 т/год, железа от 1 до 2,4 т/год, цинка от 120 до 161 кг/год, меди от 9 до 14 кг/год (Таблица 2.4).

Кроме зоны разгрузки в районе шахты Колчеданной (расход $180 \text{ м}^3/\text{ч}$) кислые шахтные воды разгружаются в провале на западном склоне горы Лабаз и в виде газирующего родника в восточной части шахты Колчеданной [Вишняк, Силина, 2005ф]. Состав воды в газирующем роднике весьма специфичный: при $\text{pH}=5,2$ минерализация 25 г/л, содержание сульфатов около 15 г/л, а содержание большинства компонентов в 2–3 раза выше, чем в основной зоне разгрузки (кроме меди, концентрация которой в три раза ниже и составляет 3,4 мг/л) (Таблица 2.5).

Таблица 2.4 – Содержание компонентов в шахтных водах и массовый расход разгрузки в карьер шахты Колчеданной

Единица измерения	Компоненты										
	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Fe общ.	Mn ²⁺	Zn ²⁺	Cu ²⁺	Cd
В период отработки (использованы данные [Грязнов и др., 1997])											
мг/л, от-до	27-35	4-5	258-329	130-267	нс	2 080-5 574	734-992	14-21	347-447	27-77	нс
После затопления (использованы данные [Вишняк, Силина, 2005ф])											
мг/л, от-до	14-34	6,1-8,2	162-368	170-611	34-52	2 182-8 703	477-2562	8,3-81,3	54-151	4,6-12,2	0,04-0,26
т/год, от-до	27-39	6-17	194-891	211-911	29-93	5 056-11 689	1 089-2 427	10-436	120-161	9-14	0,1-0,4
Средний вынос, т/год	33	10	364	479	56	7 593	1 575	72	142	12	0,2

Примечание. нс –нет сведений. Расход излива после затопления 23-61 л/с (замер расхода 169,87 л/с от 23.05.2004 г. исключен из расчета среднего). Содержание Fe²⁺ составляло 14-2475 мг/л; Fe³⁺ 57-905 мг/л.

Шахтные воды поступают в р. Исток, где нейтрализуются известковым молоком, которое подается по трубопроводу от станции нейтрализации. Весь сток нейтрализованных вод с территории отработанного Дегтярского месторождения направляется по реке Исток к Ельчевскому пруду-отстойнику (построен в 1952 г., в настоящее время объем 9,4 млн м³, площадь 220 га).

Нейтрализация воды известковым молоком и отстаивание в пруду приводят к росту pH (от 2,8 до 7,5), снижению минерализации (в 8 раз, от 10 г/л до 1,3 г/л), сульфатов (в 18 раз, от 14,8 г/л до 0,8 г/л), существенному уменьшению содержания основных компонентов-загрязнителей: железа в 33 тыс. раз (от 995 мг/л до 0,03 мг/л), меди в 1000 раз (от 10 мг/л до 0,01 мг/л), цинка в 580 (от 116 мг/л до 0,2мг/л), марганца в 200 раз (от 40 мг/л до 0,2 мг/л). Тем не менее, значения сухого остатка, содержание сульфат-иона и концентрации ряда компонентов в ходе нейтрализации и осветления в Ельчевском пруду-отстойнике не доводятся до питьевых кондиций (коэффициент концентрации по ПДК для

централизованного питьевого водоснабжения для сухого остатка $K_{ПДК}=1,3$; для сульфат-иона $K_{ПДК}=1,7$; для марганца $K_{ПДК}=2$) и до требований водоемов рыбохозяйственного значения (коэффициент концентрации по ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения для сухого остатка $K_{ПДК}=1,3$; для сульфат-иона $K_{ПДК}=8$; для меди $K_{ПДК}=10$; для марганца $K_{ПДК}=20$; для цинка $K_{ПДК}=20$) (Таблица 2.6) [Рыбникова и др., 2014]. После очистки воды поступают в Волчихинское водохранилище, которое является основным источником питьевого водоснабжения для г. Екатеринбурга.

Прекращение в 2003 г. водоотлива на месторождениях Левихинской рудоносной зоны (Кировоградская рудный район, бассейн реки Тагил) привело к формированию техногенных водоемов с выходом кислых ($pH = 3,5$) подземных вод на поверхность [Фельдман и др., 2004ф, 2008ф; Вишняк, 2005ф]. Разгрузка шахтных вод достигает 100-120 м³/час (величина водоотлива при отработке составляла около 250 м³/час) (Рисунок 2.7). Из образовавшегося техногенного водоема организована откачка и последующая нейтрализация кислых вод, что обеспечило возможность своевременного перехвата и предотвращения поступления значительных объемов загрязненных вод в р.Тагил и что фактически предотвратило экологическую катастрофу в этом районе. Последствия отработки и затопления Левихинского рудника будут детально рассмотрены в следующих главах.

Таблица 2.5 - Характеристика шахтных и сточных вод в районе Дегтярского рудника после затопления (использованы данные [Вишняк, Силина, 2005ф])

Компоненты	ПДК _{р/х} *	ПДК _{хпв} **	Фон ***	Шахтные воды			Сточные воды		
				затопленны й карьер шахты Колчеданна я	газирующий родник в восточной части шахты Колчеданная	затопленный провал на западном склоне горы Лабаз	река Исток ниже станции нейтрализации	река Дегтярка- пункт нейтрализации	сброс с Ельчевского пруда- отстойника
рН	6,0-9,0	6,0-9,0	7,19	2,8	5,2	2,7	2,6	3,9	7,5
Сухой остаток, мг/л	1 000	1000	149	10 343	25386	3 068	4 032	704	1 300
Сульфаты, мг/л	100	500	16,9	5 916	14 467	2 201	2 064	397	826
Хлор, мг/л	300	350	11	52	49	21	57	37	32
Медь, мг/л	0,001	1	0,03	10	3,4	1,7	3,9	3,5	0,01
Цинк, мг/л	0,01	5	0,03	116	292	2,5	3,8	7,7	0,2
Железо, мг/л	0,1	0,3	0,2	995	4 724	215	517	41	0,03
Марганец, мг/л	0,01	0,1	0,11	40	158	8	13,6	1,9	0,2
Мышьяк, мг/л	0,05	0,05	0,005	0,005	0,005	н.с.	0,005	0,007	0,005
Кадмий, мг/л	0,005	0,001	0,0001	0,12	1,50	0,015	0,032	0,021	0,0008

Примечание. * ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения [Нормативы ..., 2011]; ** ПДК для централизованных систем питьевого водоснабжения [СанПиН 2.1.4.1074–01]; *** р. Исток выше излива шахтных вод.

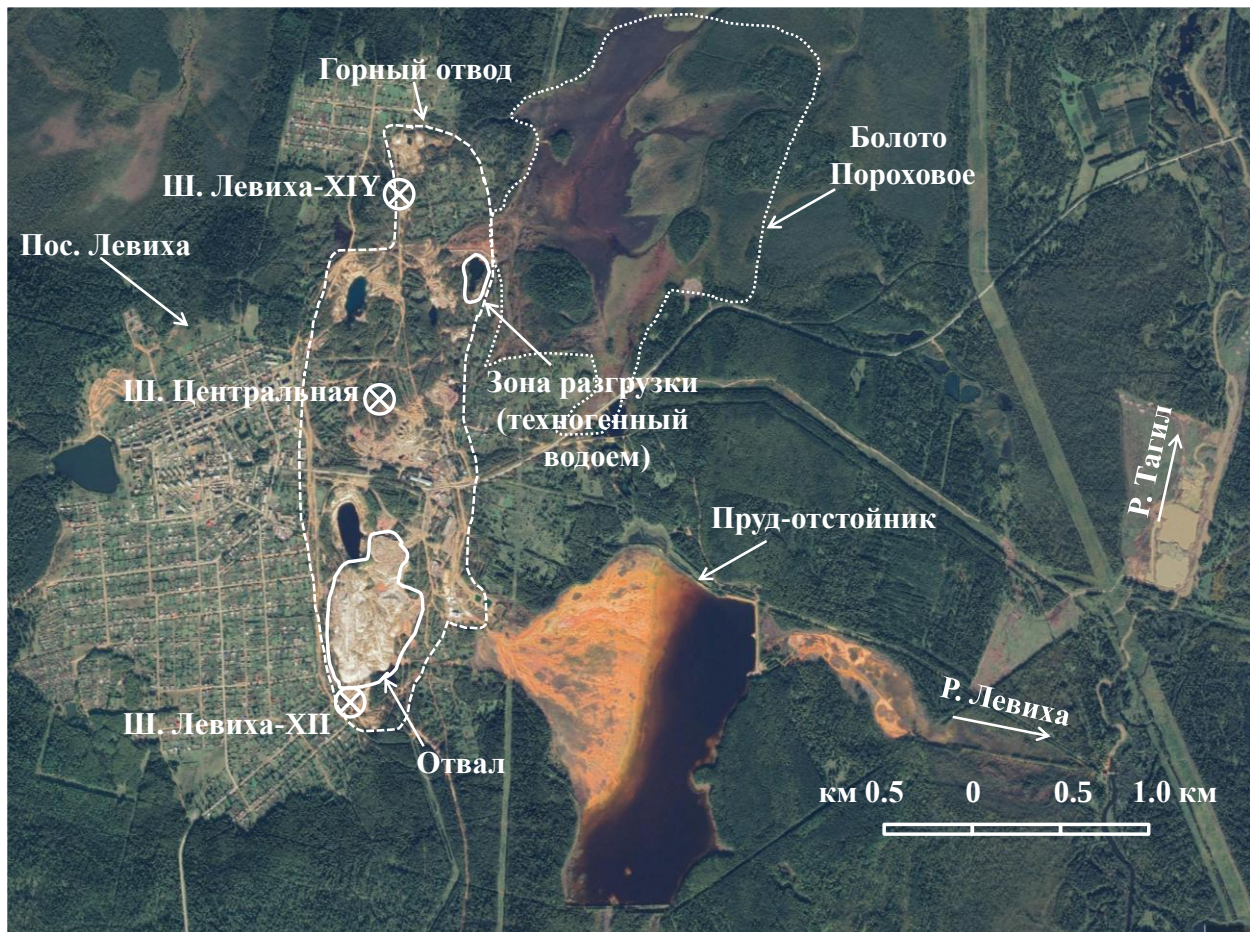


Рисунок 2.7 – Ситуационная схема и техногенные объекты в нарушенной зоне района Левихинского месторождения (покрытие Google, 2017)

Нейтрализация кислых шахтных вод, поступающих на поверхность в пределах затопленных Дегтярского, Левихинского, Карпушихинского, Белореченского, Ломовского рудников, уже в течение многих лет осуществляется за счет средств по областного бюджета программе «Экология и природные ресурсы Свердловской области» [Постановление ..., 2009; Областная ..., 2012]. Эти месторождения являются бесхозными и считаются основными объектами накопленного вреда окружающей среде на территории Свердловской области [Федеральная целевая..., 2013].

Таблица 2.6 - Кратность превышения ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения в шахтных и сточных водах в районе Дегтярского рудника после затопления

Компоненты	Шахтные воды			Сточные воды		
	затопленный карьер шахты Колчеданная	газирующий родник в восточной части шахты Колчеданная	затопленный провал на западном склоне горы Лабаз	р. Исток ниже станции нейтрализации	р. Дегтярка -пункт нейтрализации	сброс с Ельчевского пруда-отстойника
Сухой остаток	10	25	3,1	4,0	0,7	1,3
Сульфаты	59	148	22	21	4	8
Медь	10000	3 400	1 700	3 900	3 500	10
Цинк	11 600	29200	250	380	770	20
Железо	9950	47240	2 150	5 168	405	0,30
Марганец	4000	15800	800	1 360	190	20
Мышьяк	0,10	0,10	нс	0,10	0,14	0,10
Кадмий	24	300	3	6,4	4,2	0,16

Выводы по разделу

Таким образом, можно констатировать, что необходимо развитие методов решения проблем горнопромышленной гидрогеологии, вызванных 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). При этом особенно значимой становится концепция контролируемого загрязнения, повышается роль мониторинга как инструмента получения достаточной и надежной информации для создания адекватных гидрогеоэкологических моделей.

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. Деградация 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.

3 ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В РАЙОНАХ ОТРАБАТЫВАЕМЫХ И ЛИКВИДИРУЕМЫХ РУДНИКОВ

3.1 Гидродинамические процессы, сопровождающие затопление подземных рудников, и их последствия

В процессе затопления приток воды в шахту все время изменяется: максимальные значения наблюдаются в начале процесса затопления, к завершению его при подъеме уровня приток уменьшается. Это связано с тем, что с одной стороны снижается градиент потока между поднимающимся уровнем в затапливаемой шахте и уровнем подземных вод в области питания, с другой - уменьшается объем депрессионной воронки

В обобщенном виде время затопления t может быть представлено как функция ряда параметров [Wolkersdorfer, 2008; Younger, Adams, 1999]

$$t = f(V_m, V_r, c_r, A, P, E, R),$$

где V_m – объем выработанного пространства;

V_r – объем пористой матрицы пород;

c_r – соотношение между пустотностью (пористостью, трещиноватостью) пород и объемом шахтных выработок;

A – осушенная площадь;

P – осадки;

E – испарение и эвапотранспирация;

R – поверхностный сток.

Основная задача при прогнозе затопления заключается в определении осушенного объема пород и величины водопритоков. Даже если все исходные данные оценены достаточно точно и решены прогнозные задачи, технические и метеорологические особенности конкретных шахт могут приводить к катастрофическим прорывам. Например, 13 января 1994 г. на оловянной шахте Cornish Wheal Jane (Англия) 30 тыс.м³ загрязненных шахтных вод залпово вышло на поверхность [Wolkersdorfer, 2008]. Для прогноза последствий и процесса

затопления медно-цинковой шахты Mežica (Словения) был выполнен большой объем работ (запуск трассеров, лабораторные исследования, детальный анализ периода отработки шахты), время затопления было оценено в 1245 дней, реально затопление завершилось в три раза быстрее. При анализе возможных причин ошибочного прогноза было высказано предположение, что был завышен объем осушенных пород, т.е. объем депрессионной воронки.

Массовое закрытие угольных шахт Кузнецкого, Донецкого, Кизеловского, Приморского бассейнов, рудников Урала в конце 90-х годов привело к необходимости разрешения различных гидрогеологических проблем, в первую очередь связанных с определением площади подтопления территорий, застроенных промышленными и гражданскими объектами, прогнозной оценки ущерба, который может быть нанесен объектам, попадающим в эту зону.

Процесс затопления шахты и связанные с ним явления подтопления земной поверхности можно разделить на два периода. Первый - заполнение водой горных выработок. Продолжается он в зависимости от величины шахтного водопритока не более двух-трех лет. Второй – формирование зон подтопления. Масштабы подтопления зависят от степени и характера преобразования геологической среды, геологического строения, геоморфологических условий местности.

Установлено, что трещиноватость массива в пределах горного отвода значительно увеличивается, а процессы подтопления получают развитие на периферии депрессионной воронки [Рюмин, 1998; Семячков и др., 2009; Елохина, 2014].

3.2 Обоснование принципов геофильтрационной схематизации области гидродинамического воздействия рудника

Отработка месторождений полезных ископаемых приводит к значительным изменениям геологической среды и гидрогеологических условий в области влияния горнодобывающих комплексов. Основой достоверного прогноза изменения гидрогеологических условий, оценки балансовых составляющих

водопритоков в процессе отработки рудников и последствий прекращения водоотлива является геофильтрационная модель.

Пространственная структура и граничные условия фильтрационного потока имеют принципиальные отличия в естественных условиях, на этапе отработки и после ее завершения. Внутреннее строение потока определяется распределением фильтрационных параметров, характеризуется неоднородностью, анизотропией и в естественных условиях зависит от геологических, тектонических и геоморфологических факторов.

В процессе отработки месторождения появляется дополнительный фактор - сложное напряженно-деформированное состояние массива, которое формирует фильтрационную зональность подработанного массива. Геомеханические процессы при деформировании массива горных пород вследствие нарушения его естественного равновесия приводят к изменению фильтрационных, емкостных свойств и условий питания.

Закономерности формирования свойств массива горных пород, условий питания подземных вод в области влияния отрабатываемых и ликвидируемых рудников горноскладчатого Урала отличается в естественных и нарушенных условиях. Анализ процессов формирования фильтрационной зональности массива горных пород в пределах горнопромышленной территории должен выполняться с использованием гидрогеомеханического подхода. Принципы геофильтрационной схематизации условий формирования потока подземных вод в области влияния отрабатываемых и ликвидируемых рудников Среднего Урала, обеспечивающие учет изменчивости пространственной структуры и параметров пласта в естественных условиях, на этапе отработки и после ее завершения, должны учитывать историю и технологию отработки месторождения.

Использование гидрогеомеханического подхода для обоснования фильтрационной зональности подработанного массива в пределах горнопромышленной территории позволяет рассматривать движение подземных вод в рамках единых с механикой горных пород построений.

Геомеханические процессы формирования свойств массива горных пород в области влияния отрабатываемых рудников. В результате подземной разработки месторождений с использованием технологии отработки с обрушением выработанного пространства в толще земной коры образуются полости. Постепенно устойчивость их нарушается, они заполняются обрушающимися из кровли породами, что приводит к перемещению и деформированию массива горных пород вследствие нарушения его естественного равновесия. Со временем процесс обрушения охватывает всю толщу налегающих пород, обрушение распространяется вверх, поверхность оседает, образуются так называемые зоны обрушения и сдвижения. Такое развитие наиболее заметно, если выемка руды осуществляется с обрушением вмещающих пород. При плавном оседании над месторождением возникает углубление в земной поверхности – мульда сдвижения, в которой сдвижения распределяются неравномерно, и вследствие этого возникают вертикальные и горизонтальные деформации (Рисунок 3.1).

В мульде сдвижения различают зоны [Кузнецов и др., 1971; Инструкция ..., 1986; Сашурин, 1999; Еловских и др., 1994; Казикаев, 2005]:

а) *обрушения* – часть мульды, где земная поверхность подверглась сдвигению с образованием воронок, провалов, террас и крупных трещин с раскрытием или смещением краев 0,25 м и более; беспорядочное перемещение горных пород с потерей естественной структуры под влиянием подземных горных разработок;

б) *трещин* – часть мульды, где происходит разрыв сплошности земной поверхности с образованием видимых трещин (за ее внешнюю границу принимают контур крайних хорошо различимых трещин);

в) *плавных сдвижений* – часть мульды, где земная поверхность подверглась сдвигению без разрыва сплошности.

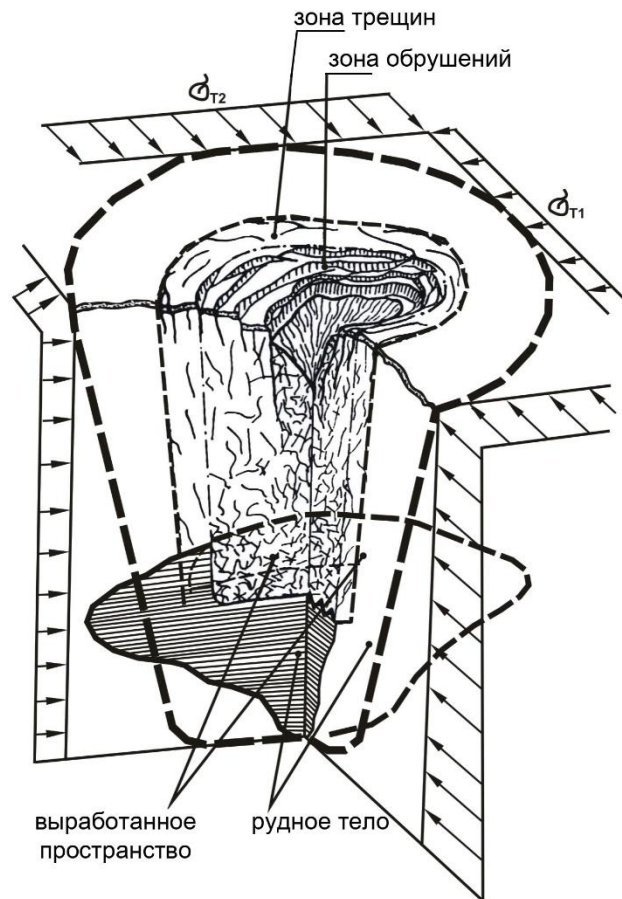


Рисунок 3.1 - Схематическая модель сдвижения [Сашурин, 1999]

Зоной сдвижения называют участок поверхности, где сдвижение пород происходит без разрыва сплошности, зоной обрушения – участок, где наблюдается оседание террасами с образованием трещин и нарушением сплошности. Площадь на земной поверхности, подвергающаяся сдвигению, по размеру всегда превышает размеры (проекцию на поверхность земли) отработанного пласта (рис. 3.2).

На медноколчеданных рудниках Среднего Урала использование при подземной добыче полезного ископаемого технологии отработки с обрушением кровли выработанного пространства приводит к образованию в пределах горного отвода провалов глубиной до 15-35 м, зон обрушения и сдвижения площадью в десятки и сотни гектаров [Кузнецов и др., 1971; Еловских и др., 1994; Мормилъ и др., 2002] (рис. 3.3).

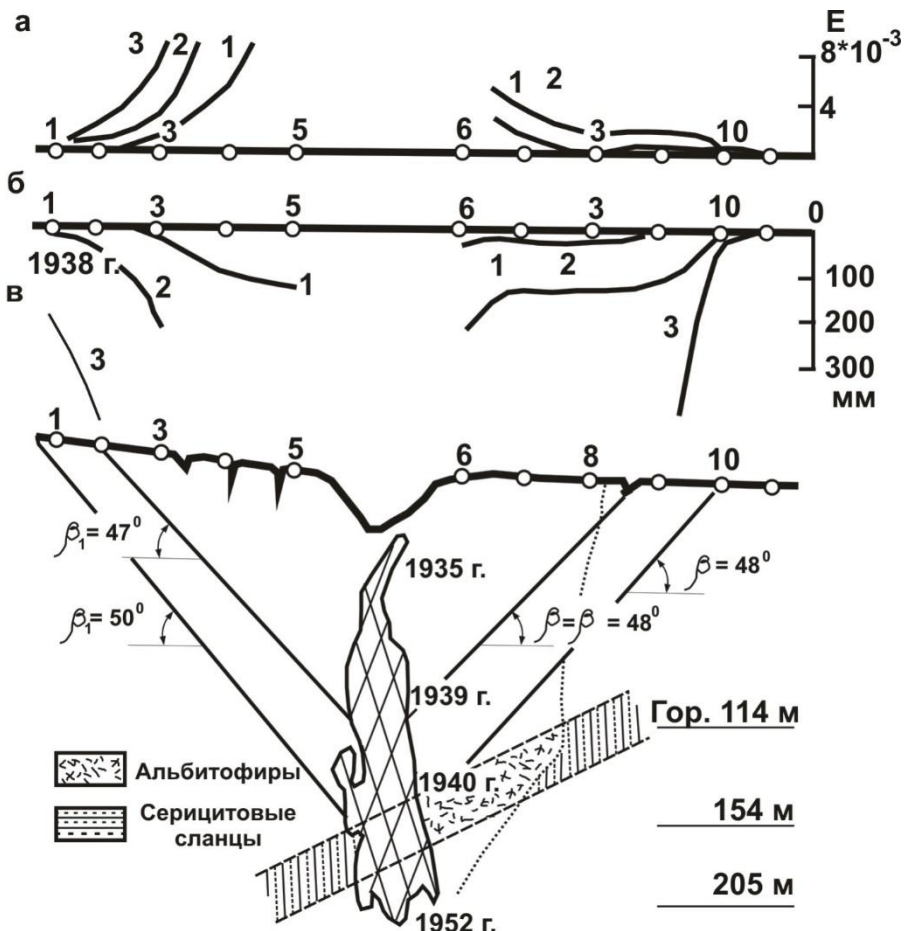


Рисунок 3.2 - Сдвигения земной поверхности по профильной линии № 3
Левихинского медноколчеданного месторождения: а – горизонтальные
деформации; б – вертикальные сдвигения; в – вертикальный разрез [Кузнецов и
др., 1971]

Фильтрационные свойства массива горных пород. Месторождения полезных ископаемых 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 [Гидрогеология..., 1972]. В процессе геологического развития территории осадочные породы подверглись интенсивному воздействию орогенных движений, были смяты в складчатые структуры, претерпели метаморфизм, на восточном склоне Урала изменены вулканической деятельностью.

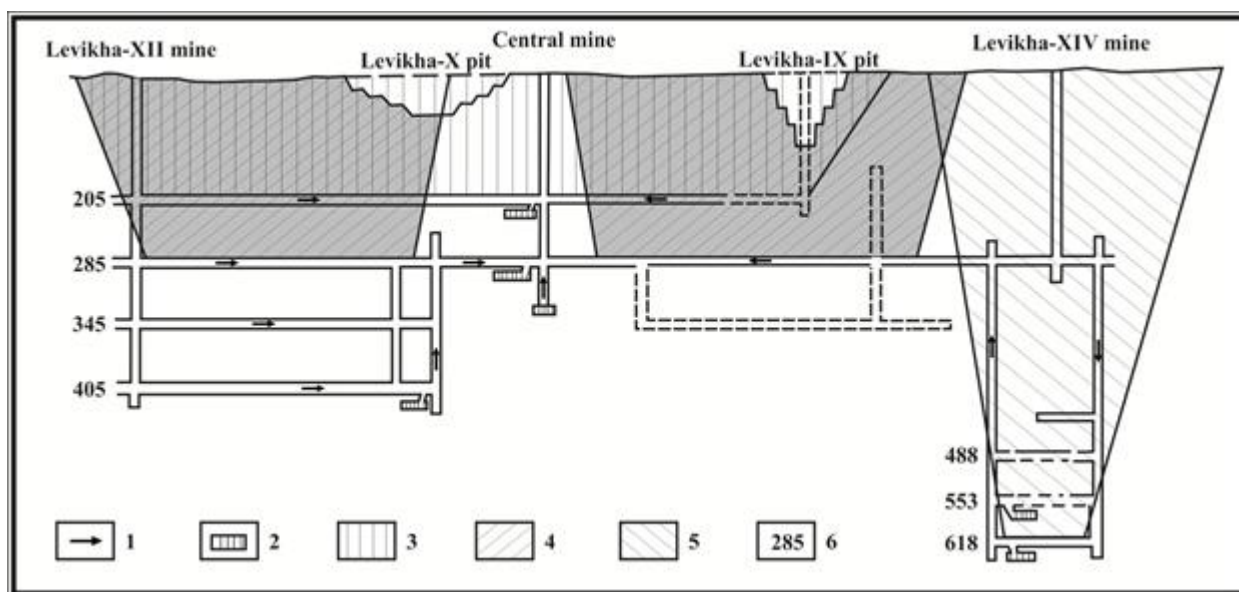


Рисунок 3.3 - Формирование зон обрушения и сдвижения горных пород на Левихинском медноколчеданном руднике (по данным института УНИПРОМЕДЬ). 1 – направление движения шахтных вод; 2 - водосборники; зоны обрушения и сдвижения: 3 - от горизонта 205 м; 4 – от горизонта 285 м; 5 – от горизонта 618 м; 6 – отметка горизонта от поверхности земли, м

В гидрогеологическом отношении - это Большеуральский сложный бассейн пластово-блоковых и пластовых вод. Формирование подземных вод в пределах горноскладчатого Урала определяются развитием зоны трещиноватости палеозойских и протерозойских осадочных, метаморфических и вулканогенных пород. Закономерности развития этих зон имеют общие для всего Уральского региона черты: основным коллектором подземных вод является региональная зона трещиноватости коренных скальных пород в верхней части земной коры; маломощный чехол элювиально-делювиальных образований, а также аллювиальные отложения самостоятельного значения не имеют.

Фильтрационные свойства скальных пород определяются характеристиками открытых проницаемых трещин (их густотой, раскрытием и степенью взаимосвязи). Развитие трещиноватости скальных массивах связано с действием современных горизонтальных тектонических напряжений и происходит, преимущественно, в пределах приповерхностной зоны хрупкой деформации [Тагильцев, 2001; Тагильцев, Лукьянов, 2010].

Процессы выветривания и тектоническая деятельность при господстве эрозионных процессов в течение длительного континентального периода развития Уральского горноскладчатого сооружения привели к образованию двух видов трещиноватости, определяющей закономерности накопления, циркуляции и стока подземных вод [Гидрогеология..., 1972; Буданов, 1964].

Ведущая роль эрозионных процессов и физико-механического и химического выветривания обусловила формирование региональной трещиноватости, развитой до глубины 30-60, реже 100 м. Характер трещиноватости и как следствие – проницаемость и степень водоотдачи выветрелых пород массива горных пород определяются структурно-фациальными условиями, физическими свойствами и устойчивостью пород к выветриванию. Большое влияние на формирование фильтрационной неоднородности имеют тектонические нарушения и литологические контакты, обеспечивающих притоки трещинно-жильных вод до глубины 120-200 м и более.

Несмотря на многообразие литологических разностей пород, подземные воды в пределах горноскладчатого Урала образуют систему небольших бассейнов гидравлически связанных потоков подземных вод, преимущественно безнапорных [Новиков, 1989]. Область формирования потока подземных вод определяется в первую очередь геоморфологическими условиями, поскольку, как правило, границы частного подземного водосбора совпадают с поверхностным; базисом дренирования подземных и поверхностных вод являются поверхностные водотоки. В пределах этих замкнутых бассейнов локального стока площадь распространения и питания подземных вод совпадает. Благодаря этому уровень подземных вод в сглаженном виде повторяет рельеф земной поверхности, образуя замкнутые бассейны локального стока подземных вод.

Наибольшая водообильность зоны трещиноватости наблюдается в придолинных участках рек, где мощность трещинной зоны больше, а фильтрационные свойства выше [Гидрогеология..., 1972; Буданов, 1964; Боровский и др., 1976]. Литологический состав играет определяющую роль в водообильности пород трещинной зоны. Литологические комплексы пород,

однотипные в гидрогеологическом отношении, слагают единую разновозрастную толщу – водоносный комплекс. В зоне трещиноватости различные комплексы пород слабо отличаются между собой по величине водопроводимости [Новиков, 1989].

В естественных условиях закономерности изменения фильтрационных свойств водоносного горизонта, как правило, следующие: коэффициент фильтрации уменьшается при увеличении расстояния от реки и росте абсолютной отметки устья скважины (Рисунок 3.4).

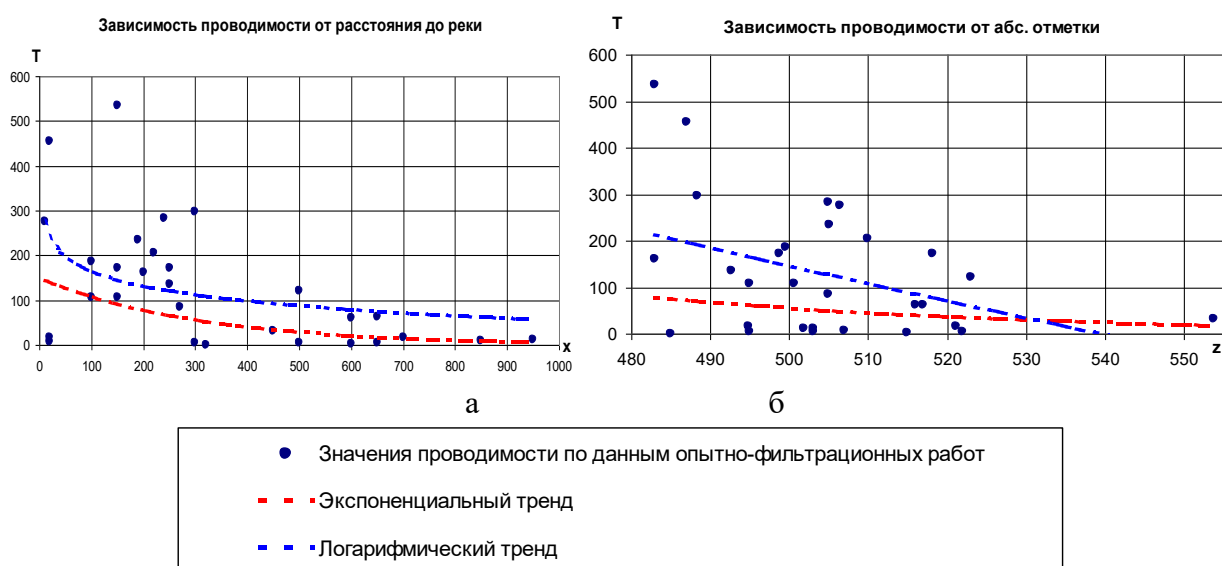


Рисунок 3.4 - Зависимость изменения проводимости (T , $\text{м}^2/\text{сут}$) от расстояния до реки (x , м) и абсолютной отметки устья скважины (z , м) (Узельгинское медно-цинковое месторождение) [Рыбников, 2004]

При увеличении глубины величина коэффициенты фильтрации резко снижается (на 2-3 порядка): при глубине более 200 м значения коэффициента фильтрации не превышают $0,01 \text{ м/сут}$ (Рисунок 3.5, 3.6).

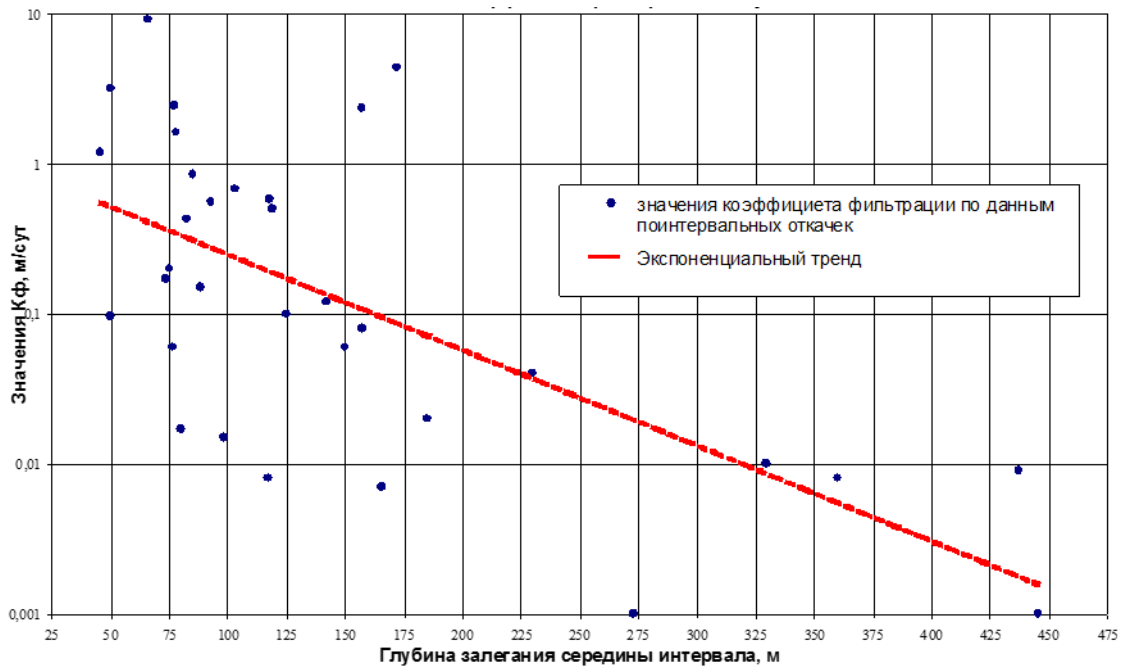


Рисунок 3.5 - Зависимость изменения коэффициента фильтрации (k , м/сут) от глубины (z , м) (Узельгинское медно-цинковое месторождение) [Рыбников, 2004]

В результате детального гидрогеологического обследования, выполненного в шахтах Левихинского месторождения [Вострокнутов, 1988ф], было установлено, что с глубиной отработки величины водопритокков сокращаются (Рисунок 3.7, Таблица 3.2). Это объясняется слабым развитием трещинных зон на глубинах ниже горизонта 285 м. В обводнении нижних горизонтов Левихинских месторождений существенную роль играют вертикальные отработанные стволы, зоны обрушения, неликвидированные разведочные скважины. Водопроявления в виде рассредоточенного капежа, струйчатых выходов подземных вод приурочены к отдельным трещинным зонам и раскрытым трещинам. Дебиты водопроявлений, приуроченных к неликвидированным скважинам и горным выработкам, изменялись от 0,04 до 25,9 м³/час. Водопроявления в виде отдельных струй приурочены к зонам трещиноватости и литологическим контактам, их дебит изменяется в пределах 0,02-7,2 м³/ч. Выходы подземных вод в виде рассредоточенного капежа, приуроченные к небольшим зонам повышенной трещиноватости и отдельным раскрытым трещинам, имеют дебиты от 0,04 до 2,8 м³/час.

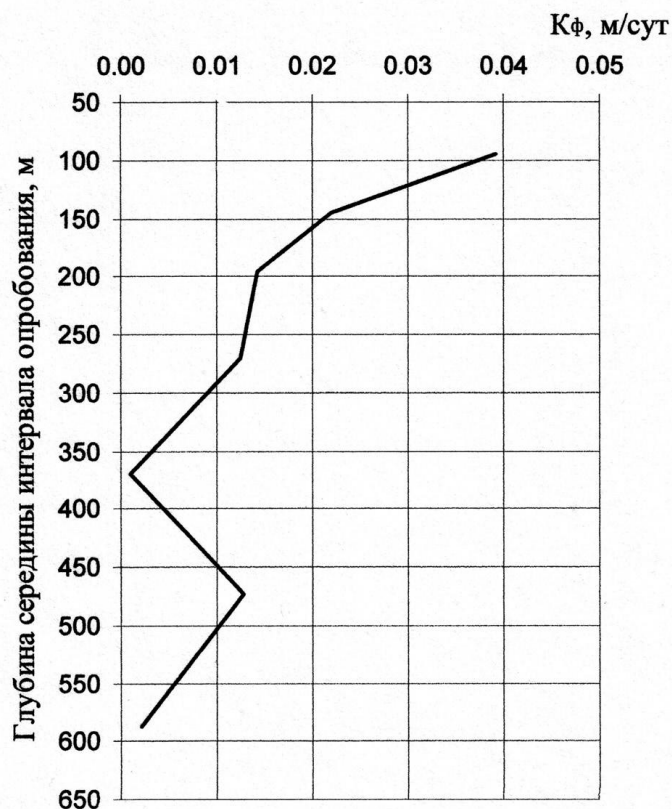


Рисунок 3.6 – Зависимость изменения фильтрационных свойств скальных пород с глубиной в массиве Петропавловского рудного поля (Юбилейное медно-цинковое месторождение) [Тагильцев, Лукьянов, 2010]

Таблица 3.2 - Распределение величины суммарного водопритока по горизонтам Левихинского месторождения [Вострокнутов, 1988ф]

Горизонт отработки	Длина горных выработок, м	Водоприток, м ³ /час		Удельный водоприток, м ³ /час	
		27.10.1986	09.1987	27.10.1986	09.1987
285 м	4500	230	159	0,035	0,051
345 м	1500	34	46	0,026	0,031
405 м	1300	17	30	0,013	0,023
553 м	1680	54	28	0,016	0,032
618 м	1300	12	16	0,009	0,012
Итого	10280	347	279	0,027	0,034

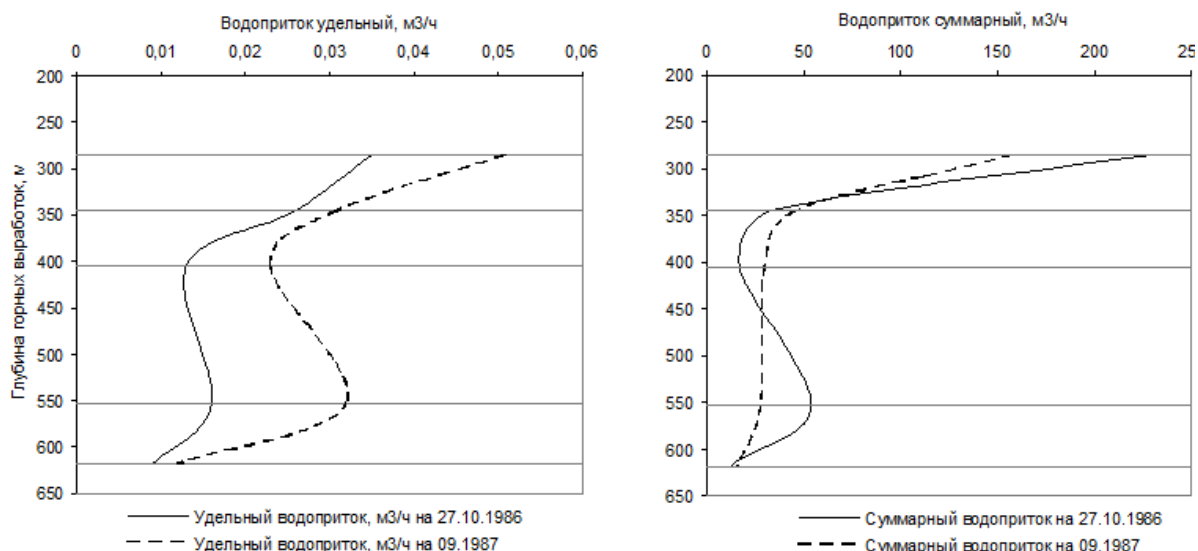


Рисунок 3.7 – Изменение водоприток по глубине горных выработок Левихинского рудника [Вострокнутов, 1988ф]

По данным разведочных работ на Левихинской группе медноколчеданных месторождений массив является чрезвычайно трещиноватым (мелкоблочным). Мелкая трещиноватость образует сетку в виде параллелепипедов и развита в пределах всего массива, трещины имеют длину от 0,5 до 5 м и раскрытие (b) до 1-5 мм. Расчетное раскрытие трещин по Ново-Шемурскому медноколчеданному месторождению (Северный Урал) составляет около 0,1 мм [Тагильцев, 2001]. Удельная трещиноватость (Γ – густота трещин, количество трещин, приходящихся на 1 м длины) более 10.

При отработке рудного тела происходит ослабление массива и разрушение свода, что приводит к деформации и разуплотнению пород. В результате деформации образуются новые и расширяются существующие трещины: под действием растягивающих напряжений порода разрывается, под действием внутреннего напряжения раскрываются имеющиеся трещины. Наибольшее разуплотнение происходит в пределах зоны обрушения. В зоне трещин происходит появление новых и расширение естественных нормальносекущих трещин и трещин напластования. Это ведет к увеличению проницаемости пород, но оно меньше, чем в зоне обрушения. По данным Р.Ф. Крушатина (неопубликованные материалы, 2000 г.) ширина трещин расслоения достигает

нескольких сантиметров, они становятся каналами для движения воды и не закрываются после завершения процесса обрушения, особенно в крепких породах. В зоне обрушения Соколовского подземного рудника зафиксированы трещины разрыва шириной от 0,2 до 0,5-0,7 м [Крутиков, Менгель, 2014]. В зоне плавных сдвижений (прогибов) проницаемость по нормали к слоистости и по напластованию остается практически такой же, как и в естественном состоянии.

По степени водопроницаемости в подработанном массиве выделяются три характерные зоны.

1. Зона сквозных каналов включает область обрушенных пород и упорядоченного сдвижения пород в виде связных плито-блочных структур с наличием крупных трещин разрыва. Центральная часть этой зоны характеризуется значительной проницаемостью.

2. Зона водопроводящих трещин, границей которой принято считать горизонтальные деформации растяжения с образованием трещин с раскрытием 1–2 мм и более. В этой зоне происходит соединение двух взаимно перпендикулярных систем трещин, что сопровождается резким увеличением проницаемости массива.

3. Зона наведенной трещиноватости соответствует зоне плавного сдвижения пород и характеризуется наличием отдельных изолированных трещин с раскрытием меньше 1–2 мм. С удалением от выработки деформации в этой зоне затухают, проницаемость выходит на уровень природного фона.

Условия питания подземных вод. Условия питания подземных вод и динамика подземного стока в пределах горноскладчатого Урала определяется величиной осадков, гидрогеологическими условиями и степенью дренированности территории, которая зависит от глубины эрозионного вреза. Подземные воды в пределах горноскладчатого Урала имеют весьма совершенные условия дренирования, инфильтрационное питание характеризуется незначительным разбросом и оценивается величинами от 0,1-0,5 до 4-5 л/с*км², минимальные значения отмечаются для массивных преимущественно кислых интрузивных пород, максимальные - для закарстованных карбонатных пород

[Новиков, 1989; Новиков, Герасименко, 2000ф]. Преимущественное значение величины питания отмечается в диапазоне 1-2 л/с*км².

При отработке рудников под защитой дренажа или с водоотливом (так же, как и при эксплуатации водозаборов) величина инфильтрационного питания (w) водоносных горизонтов по сравнению с естественными условиями возрастает. Так, при региональном значении величины питания 1-2 л/с*км² (около 30-60 мм/год) [Новиков, Герасименко, 2000ф] определено значение эксплуатационного модуля 4–6,5 л/с*км² (130–205 мм/год) в процессе отработки Гороблагодатского, Высокогорского железорудных месторождений, Пышминско-Ключевском медно-кобальтовом, Дегтярского и Левихинского медноколчеданных [Буданов, 1964; Вострокнутов, 1989ф; И.А. Четверкин, 2003ф; Вишняк А.И., Кадук О.М., 2004ф; Фельдман А.Л., 2004; Вишняк А.И., 2005ф; Вишняк А.И., Силина О.А., 2005ф; Семячков, 2009]. Причиной увеличения инфильтрации является:

- 1) уменьшение испарения с поверхности подземных вод при увеличении глубины их залегания;
- 2) увеличение инфильтрации на участках с техногенной трещиноватостью.

При ликвидации и затоплении рудников происходит сокращение величины ресурсов по сравнению с периодом отработки, тем не менее, величина питания в этот период выше, чем в естественных условиях, за счет участков с техногенной трещиноватостью, в которых происходит скопление дождевых и талых вод вплоть до полного поглощения осадков [Гидрогеологические..., 1976; Фельдман и др., 2010].

Анализ и сопоставление балансовых составляющих в пределах Левихинского рудника (результаты численного моделирования [Фельдман и др., 2010; Рыбникова и др., 2011] на моменты отработки (1958 и 2002 год) и после прекращения водоотлива (2007 год) показывает, что после затопления рудника инфильтрация на площади водосбора остается более высокой, чем в естественных условиях, причем преимущественно (на 2/3) за счет наличия участков полного поглощения атмосферных осадков в подработанных зонах. Модуль подземного стока почти в 2,5 раза выше, чем в естественных условиях. Именно это и является

причиной подтопления прилегающих территорий после остановки рудничного водоотлива и формирования областей с более высоким по сравнению с естественными ненарушенными условиями положением уровня подземных вод.

Параметрическое обоснование геофильтрационной модели массива горных пород. Геофильтрационная схематизация условий формирования потока подземных вод в области влияния отрабатываемых рудников Среднего Урала должна осуществляться с учетом того, что его пространственная структура, параметры пласта, граничные условия имеют принципиальные отличия в естественных условиях, на этапе отработки и после ее завершения.

Геомеханические процессы при деформировании массива горных пород вследствие нарушения его естественного равновесия приводят к формированию фильтрационной зональности подработанного массива. Модель массива горных пород в нарушенных отработкой условиях определяется строением и составом пород (Рисунок 3.8): в массивных скальных породах развитие зон деформации затрагивает всю толщу пород [Кузнецов и др., 1971; Еловских и др., 1994; Сашурин, 1999]; в пластичных породах при слоистом строении в пределах нижних двух зон формируется зона водопроводящих трещин, при этом в третьей, зоне плавных сдвижений, могут сохраняться водоупорные свойства разделяющих толщ [Гидрогеологические..., 1976].

Трещинная пористость (n) находится в линейной зависимости от раскрытия трещин (b) и густоты трещин (Γ): $n = b\Gamma$ [Боревский и др., 1976]. Для чисто трещиноватых пород трещинная проницаемость (k) имеет степенную зависимость от трещиноватости: $k = b^a\Gamma$ [Ромм, 1985; Боревский и др., 1976; Румынин, 2011], где степенной параметр $a=3$ для трещин одинакового раскрытия [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 [Поздняков, 1996].

Кроме того, появление дополнительной системы трещин увеличивает проницаемость на 30% [Боревский и др., 1976]. В зоне обрушения проницаемость практически неограниченная [Гидрогеологические..., 1976].

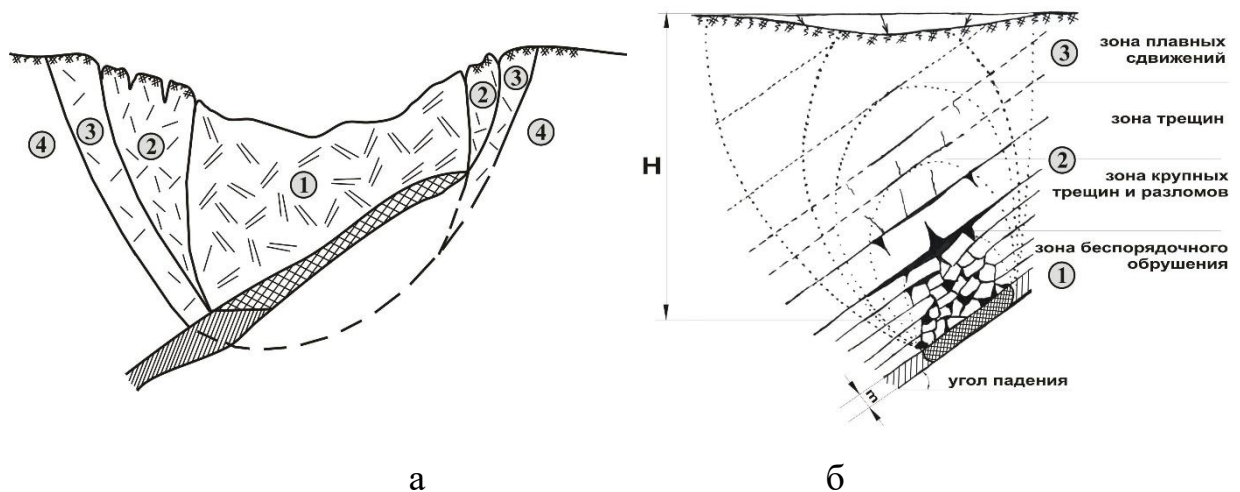


Рисунок 3.8 - Модель массива горных пород в области влияния отработываемых и ликвидируемых рудников: а – при массивном строении (скальные породы); б – при слоистом строении (пластичные породы)

По оценкам, выполненным для условий Учалинского меднорудного месторождения (Южный Урал), пористость (пустотность) обрушенного массива может достигать (при высоте самообрушения крепких скальных пород 96 м и 38 м, соответственно) 0,21-0,53, удельная поверхность пустот в обрушенном массиве 17,44-10,38 м²/м, средний радиус гидравлических каналов составляет 0,024-0,102 м [Ахмедьянов и др., 2014].

Геомеханические процессы в зоне влияния горных выработок формируют новые свойства массива горных пород. В зонах обрушения развивается техногенная трещиноватость, что приводит к росту проницаемости, значительному увеличению емкостных свойств массива горных пород, увеличению площадного модуля подземного стока в несколько раз. Экспертная оценка возможного диапазона изменения геофильтрационных параметров массива горных пород в области влияния отработываемых рудников горноскладчатого Урала выполнена исходя из предпосылки об увеличении

раскрытия трещин во второй зоне примерно в 5-10 раз в соответствии с данными геолого-маркшейдерских работ [Кузнецов и др., 1971; Казикаев, 2005; Крутиков, Менгель, 2014] (Таблица 3.3).

Таблица 3.3 - 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	$\leq m \cdot 10^{-1}$ m	$\sim p \cdot 10^{-4}$ $\sim p \cdot 10^{-3}$	15 ÷ 60

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

3.3 Прогноз подтопления эмпирическими методами

В литературе, связанной с оценкой и прогнозом затопления угольных шахт, предлагается выделять два водоносных горизонта – техногенный и приповерхностный (ПВГ), исходя из значительного различия фильтрационных и емкостных свойств водовмещающих пород, а также факторов, формирующих эти свойства [Питаленко и др., 2007; Норватов и др., 2008; Ягунова, 2010]. Мощность техногенного горизонта определяется глубиной отработки и развитием системы водопроводящих трещин и может составлять сотни метров, фильтрационные и емкостные свойства невысокие; мощность приповерхностного горизонта обычно не более десятков метров, он приурочен к приповерхностной зоне региональной

трещиноватости и выветривания, связан с поверхностной гидросферой и получает инфильтрационное питание на всей площади своего развития.

При затоплении выделяется два этапа: в течение первого происходит достаточно быстрый подъем уровня в зоне, расположенной ниже глубины развития региональной трещиноватости, где вода расходуется на заполнение шахтных стволов и штреков, а также емкости зон обрушения и сдвижения горных пород. В течение второго этапа после достижения регионального водоносного горизонта скорость подъема уровня замедляется. По результатам анализа скорости затопления десятков угольных шахт Кузбасса и Донбасса скорость подъема уровня воды варьирует от 4 до 16 м в месяц, в среднем около 10 м в месяц [Питаленко и др., 2007; Ягунова, 2010; Тарасенко, 2014]. По продолжительности затопления выделены 2 группы шахт: быстро затапливаемые (от 10 до 45 месяцев) и медленно затапливаемые (более 45 месяцев). Для первой характерны повышенные водопритокі (200–500 м³/час) и небольшой удельный объем горной массы (от 20 тыс.м³ до 120 тыс.м³ на 1 погонный метр глубины отработки). Характерные индикаторные кривые процесса затопления угольных шахт Кузбасса приведены на Рисунке 3.9.

На основе статистического анализа результатов мониторинга режима затопления 26 шахт Кузбасса получена эмпирическая зависимость для расчета времени затопления, которое прямо пропорционально объему удельной горной массы и обратно пропорционально среднегодовому водопри току в шахту перед его отключением [Ягунова, 2010]

$$t_i = 0,0783 K_r \frac{V_{удгм}}{Q_3},$$

где t_i – время затопления, месяцы;

$K_r = H_{1i}/H_{1cp}$ (при $H_{cp}=205$ м);

$V_{удгм} = V_{гм}/H$ – объем удельной горной массы, м³ на 1 погонный метр глубины шахты;

$V_{гм}$ - объем вынутой горной массы;

H – глубина горных работ;

Q_3 – зафиксированный среднегодовой водоотлив перед остановкой добычи, $\text{м}^3/\text{час}$;

0,0783 – обобщенный эмпирический коэффициент.

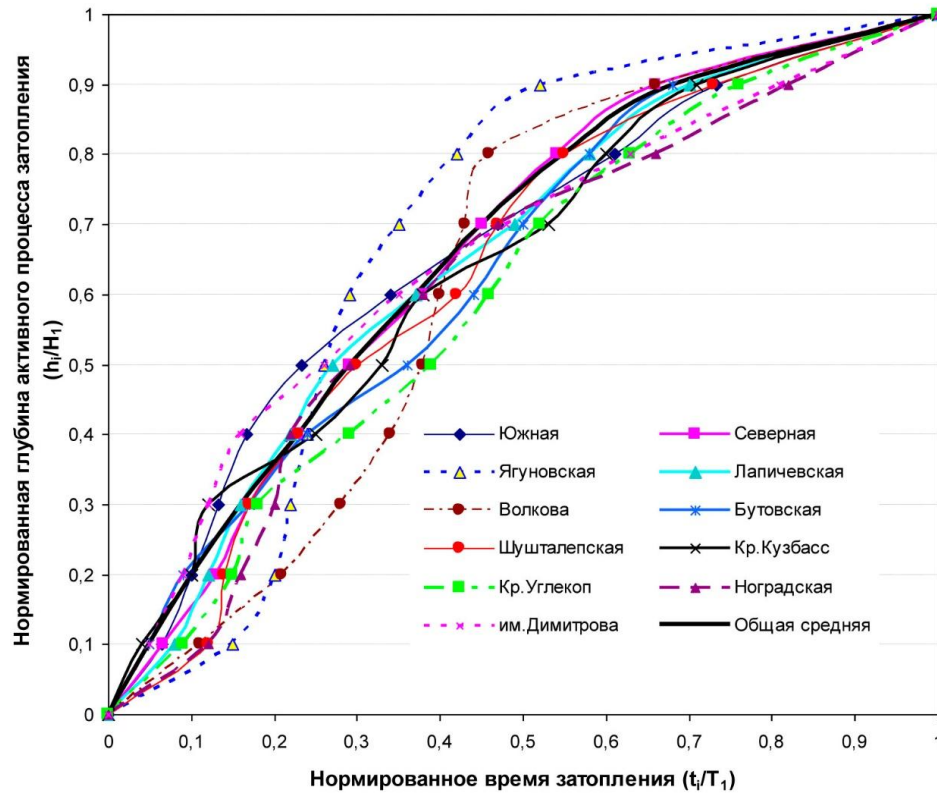


Рисунок 3.9 - Зависимость между относительными показателями глубины и временем затопления шахт Кузбасса до подошвы приповерхностного водоносного горизонта [Ягунова, 2010]

Достоверная оценка времени затопления является первоочередной задачей при ликвидации рудника. На практике используются зависимости, отражающие историю отработки шахты [Питаленко и др., 2007; Норватов и др., 2008]

$$t = \frac{K_{\text{п}} V_{\text{м}}}{Q},$$

где t – время затопления;

$K_{\text{п}}$ - коэффициент пустотности (заполнения);

$V_{\text{м}}$ - объем вынутой горной массы;

Q – среднегодовой водоприток, зафиксированный перед остановкой водоотлива.

Коэффициент пустотности (заполнения) характеризует техногенную пустотность подработанного массива и выработанного пространства и равен отношению техногенных пустот и трещин в подработанной толще, образованных при выемке полезного ископаемого, к объему извлеченной горной массы. Значение коэффициента пустотности (заполнения) может приниматься на основе анализа результатов, полученных при затоплении и откачке воды из шахт. В случае отсутствия режимных наблюдений на шахтах-аналогах и при наличии данных об оседании земной поверхности в районе конкретной шахты коэффициент техногенной пустотности (K_{Π}) может быть рассчитан по зависимости вида [Норватов и др., 2008]

$$K_{\Pi} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\eta_i}{m_i} F_i}{n \sum_{i=1}^n F_i},$$

где η_i, m_i – оседание земной поверхности и мощность вынутаго пласта на i -том участке,

F_i – площадь i -го участка,

n – количество расчетных участков.

При отсутствии фактических данных об оседаниях земной поверхности значения коэффициента пустотности можно определить по формуле

$$K_{\Pi} = 1 - a \cdot \cos \alpha,$$

где a – эмпирический коэффициент ($a = 0,6 \div 0,85$),

α – угол падения пласта.

Коэффициенты пустотности зависят от горно-геологических условий, параметров отработки, для шахт Донбасса оцениваются величинами от 0,2 до 0,8 [Питаленко и др., 2007]. Для ориентировочных оценок режима затопления горных выработок рекомендуется применять значения коэффициента пустотности $K_{\Pi} = 0,2 \div 0,3$ [Норватов и др., 2008].

3.4 Прогноз подтопления аналитическими методами

Продолжительность затопления рудников Среднего Урала, как правило, составляет 4-6 лет, скорость затопления в среднем около 15 м в месяц (от 30-40 м в месяц в начале процесса до 5–10 м в месяц и менее 1 м на завершающем этапе). Режимных фактических данных о затоплении рудников в пределах Уральского региона немного. Так, имеется достаточно детальная режимная информация по Дегтярскому руднику за весь период восстановления уровня; данные о положении уровня воды в шахтах Левихинского рудника (Рисунок 3.10) [Вишняк А.И. и др., 2005ф; Фельдман и др., 2008ф; Елохина, 2014].

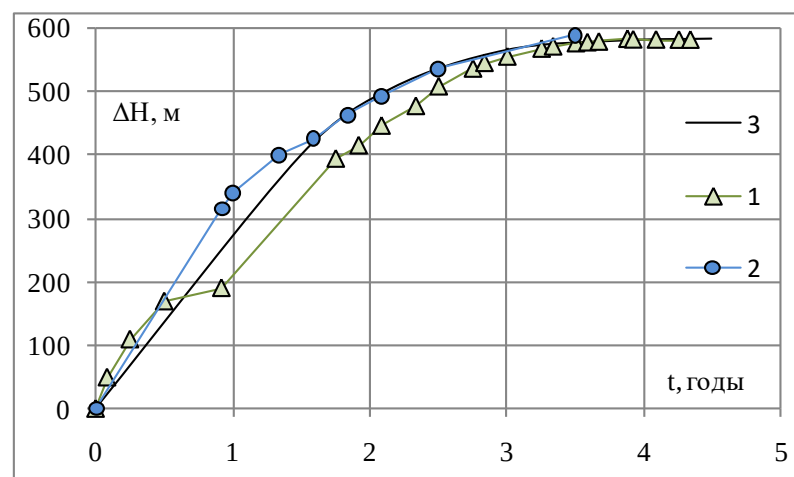


Рисунок 3.10 – График восстановления уровня в шахтных стволах после прекращения водоотлива, фактические данные Дегтярский (1) и Левихинский (2) рудники, рассчитанные по аналитической зависимости (3)

Использование приведенных выше зависимостей для оценки времени затопления рудников Урала дает неправдоподобные результаты. Так, ориентировочный объем воды, израсходованной на затопление Дегтярского и Левихинского рудников, составляет около 5 млн.м³ [Фельдман и др., 2003ф; Вишняк, 2005ф;], что при глубине отработки 600 м дает удельный объем горной

массы 8,3 тыс. м³/м. Тогда при водоотливе $Q = 5$ тыс.м³/сут и объеме вынутой горной массы $V_m = 5$ млн.м³ время затопления шахт должно было бы составить

$$t = \frac{K_{\pi} V_m}{Q} = \frac{(0,2 \div 0,3) * 5 * 10^6}{5 * 10^3} = 200 \div 300 \text{ сут},$$

т.е. меньше 1 года, тогда как реально это происходит в течение 4–5 лет (в этом случае коэффициент пустотности должен составлять $K_{\pi} = 1,2$).

Процесс восстановления уровня подземных вод после прекращения водоотлива в гидродинамическом плане идентичен процессу восстановления уровня после остановки откачки. Для оценки пространственно-временных закономерностей формирования гидродинамической обстановки можно воспользоваться зависимостями, предложенными В.М. Шестаковым для обработки данных восстановления [Шестаков, 1995].

Повышение (восстановление) уровня ΔH от предельно достигнутого S_0 в процессе водоотлива на расстоянии r от шахтного ствола в общем виде описывается выражением

$$\Delta H = S_0 - S = S_0 - \frac{Q}{4\pi T} [W(u) - W(u_o)], u = \frac{r^2}{4a(t_o + t_b)}, u_o = \frac{r^2}{4at_b}, \quad (3.1)$$

где t_o - продолжительность откачки (водоотлива, сутки);

t_b - продолжительность восстановления (время после остановки водоотлива, сутки);

S_0, S – понижение уровня, максимальное и текущее, соответственно (м);

Q – установившийся перед отключением расход водоотлива (м³/сут);

T – проводимость пласта (м²/сут);

r – расстояние (м),

a – уровне(пьеzo)проводность (м²/сут).

Начиная с момента времени $t_b \geq 3r^2/a^4$ повышение уровня можно оценить, используя выражение

$$\Delta H = S_0 - S = S_0 - \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{t_o + t_b}{t_b} = S_0 - \frac{Q}{4\pi T} \lg \frac{t_o + t_b}{t_b} \quad (3.2)$$

⁴ $r \leq 0,3R$, где R – радиус питания

Соответственно, временную зависимость восстановления уровня после остановки водоотлива можно определить по уравнению

$$t_b = \frac{t_o}{10^A - 1}, \quad A = \frac{S T}{0,183 Q}. \quad (3.3)$$

Если время восстановления уровня значительно превышает время откачки $t_b \geq 10t_o$, то

$$t_b = \frac{Qt_o}{4\pi TS}, \quad (3.4)$$

где Qt_o соответствует полному объему воды, откачанной за весь период эксплуатации.

Использование приведенных выше зависимостей для рудников, отрабатываемых в течение десятков лет, приводит к получению неправдоподобных результатов: так, при водоотливе 5 тыс.м³/сут в течение 50 лет время восстановления уровня до глубины 5 м составило бы сотни лет ($T = 20$ м²/сут), на самом деле продолжительность этого периода не более 3-5 лет. Указанное расхождение связано с тем, что в случае весьма продолжительного водоотлива 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 — по сути не общий объем откачанной за весь период эксплуатации, а расход водоотлива, обеспеченный сработкой емкостных запасов и естественными ресурсами, что соответствует времени стабилизации t_c . Особенностью развития депрессионных воронок в пределах горноскладчатого Урала является то, что они развиваются в пределах замкнутых водосборов, которые, как правило, совпадают с поверхностными. Как показывает опыт отработки многих месторождений, формирование стационарных условий происходит через относительно небольшой промежуток времени (обычно не превышающий 1 - 3 года) [Фельдман и др., 2008ф].

Оценить продолжительность процесса формирования установившегося режима при водоотливе можно, исходя из следующих соображений⁵. Радиус питания водоотлива R зависит с одной стороны от естественных ресурсов района⁶

$$R = \sqrt{\frac{Q}{\pi \varepsilon}}, \quad (3.5)$$

где ε – инфильтрационное питание (м/сут); с другой может быть определен как

$$R = 1,5\sqrt{at_c}. \quad (3.6)$$

Тогда продолжительность установления стационарного режима при водоотливе t_c составит

$$t_c = \frac{R^2}{2,25a} = \frac{Q}{2,25\pi\varepsilon a} = \frac{Q\mu}{2,25\pi\varepsilon T}, \quad (3.7)$$

где $a = T/\mu$,

μ – гравитационная (или упругая для напорных пластов) водоотдача.

Для условий, характерных для месторождений полезных ископаемых горноскладчатого Урала ($Q = 5000$ м³/сут, $\mu = 0,002$, $\varepsilon = 1,5$ л/с/км² = $1,3 \cdot 10^{-4}$ м/сут, $T = 20$ м²/сут), продолжительность этого периода ориентировочно оценивается как

$$t_c = \frac{Q\mu}{2,25\pi\varepsilon T} = \frac{5000 \cdot 0,002}{2,25\pi \cdot 1,3 \cdot 10^{-4} \cdot 20} = 544 \text{ сут}, \quad (3.8)$$

при этом радиус питания составит 3,5 км.

На динамику затопления и характер восстановления уровня после прекращения водоотлива, особенно на начальных этапах затопления, существенное влияние оказывает заполнение емкости горных выработок, в первую очередь шахтных стволов. Это время может быть оценено по зависимости [Шестаков, 1995]

$$t' = \frac{a \omega \Delta H}{Q}, \quad (3.9)$$

где ω – площадь поперечного сечения шахтного ствола,

⁵ Достоверные режимные наблюдения не всегда имеются в наличии.

⁶ Размещение объекта водоотлива у границы обеспеченного питания является более простым случаем, поскольку для такой схемы радиус питания будет определяться расстоянием до такой границы.

ΔH – высота подъема уровня воды в стволе,

Q – расход откачки (водоотлива),

a – эмпирический коэффициент.

Общая продолжительность и динамика заполнения депрессионной воронки оценивается по зависимостям (3.3) или (3.4) с учетом (3.9).

Общая методика оценка времени заполнения депрессионной воронки после остановки шахтного водоотлива следующая. По зависимости (3.7) определяется продолжительность периода формирования установившегося режима t_c , при этом для учета неоднородности фильтрационных, емкостных свойств и питания по площади необходимо использовать обобщенные параметры в области гидродинамического влияния горной выработки.

Для расчета обобщенных фильтрационных и емкостных параметров (k_o , μ_o), величины питания (ε_o) могут быть использованы следующие зависимости

$$\frac{L_o}{k_o} = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{k_i}, \quad \mu_o = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i L_i}{\sum_{i=1}^n L_i}, \quad \varepsilon_o = \frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i L_i}{\sum_{i=1}^n L_i} \quad (3.10)$$

где k_o , μ_o , ε_o , L_i – коэффициент фильтрации, емкость, инфильтрационное питание, размер участка, соответственно.

Характерные графики восстановления уровня для условий Левихинского рудника, рассчитанные по аналитическим зависимостям, и их сопоставление с фактическими данными приведены на Рисунке 3.10

При повышении уровня на 170 м от горизонта 285 (абс. отм. -11 м) в течение года график подъема уровня имеет линейный вид, скорость подъема составляет около 14 м в месяц (на заполнение горных выработок потребовалось 165 сут и 200 сут на заполнение емкости пород). Далее темп повышения снижается, график повышения уровня принимает параболический вид, в течение следующего года подъем уровня составил 80 м, скорость подъема уровня снижается до 7 м в месяц (на заполнение выработок потребовалось 65 сут и 310 сут на заполнение емкости пород). В течение третьего года (до выхода на поверхность) подъем уровня составил около 25 м, скорость подъема уровня снижается до 2 м в месяц (на заполнение шахтных выработок потребовалось 15

сут и 350 сут на заполнение емкости пород). В целом за весь период затопления распределение объемов воды, пошедших на заполнение горных выработок и емкость массива горных пород, составляет 20% и 80%, соответственно.

3.5 Модель планового потока подземных вод в области гидродинамического воздействия рудника

Формирование потока подземных вод в условиях, характерных для горно-складчатого Урала, происходит в пределах частного водосбора, границы которого совпадают, как правило, с поверхностным; базисом дренирования подземных и поверхностных вод является река [Буданов, 1964; Гидрогеология ..., 1972; Новиков, 1989]. Основной водоносный горизонт или комплекс приурочен к зонам региональной трещиноватости, развитой до глубины 50–70 м, реже 100 м.

Учитывая, что стабилизация гидродинамических возмущений в трещиноватых породах, развитых в ограниченных гидрогеологических структурах, происходит достаточно быстро (в течение трех - пяти лет), большую часть фильтрационных задач можно решать в стационарной постановке [Боревский и др., 1976].

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

В этом случае расчетные зависимости для оценки распределения напоров и расходов по потоку составляются с использованием метода фрагментов [Шестаков, 1995]. Плановый поток может быть схематизирован в виде нескольких участков с постоянными в пределах фрагмента параметрами проводимости и питания (Рисунок 3.11): водораздельный (T_1, w_1), центральный - отработываемый (T_2, w_2 в естественных условиях и T_2^*, w_2^* после отработки), и приречный (T_3, w_3),

длиной L_1 , L_2 и L_3 , соответственно. Начало координат x_1 , x_2 и x_3 отсчитывается от левой границы каждого из фрагментов.

Граничные условия для первого фрагмента: левая граница непроницаемая (соответствует водоразделу) $q = 0$ при $x_1 = 0$; правая $H = H_1$ при $x_1 = L_1$, напор на границе первого и второго фрагментов. Граничные условия для второго фрагмента: левая граница напор на границе первого и второго фрагментов $H = H_1$ при $x_2 = 0$; правая граница напор на границе второго и третьего фрагментов $H = H_2$ при $x_2 = L_2$. Граничные условия для третьего фрагмента: левая граница - напор на границе второго и третьего фрагментов $H = H_2$ при $x_3 = 0$; правая граница напор, совпадающий с уровнем в реке $H = H_p$ при $x_3 = L_3$ (при наличии фильтрационного сопротивления ложа водоема длина расчетного участка увеличивается на величину ΔL).

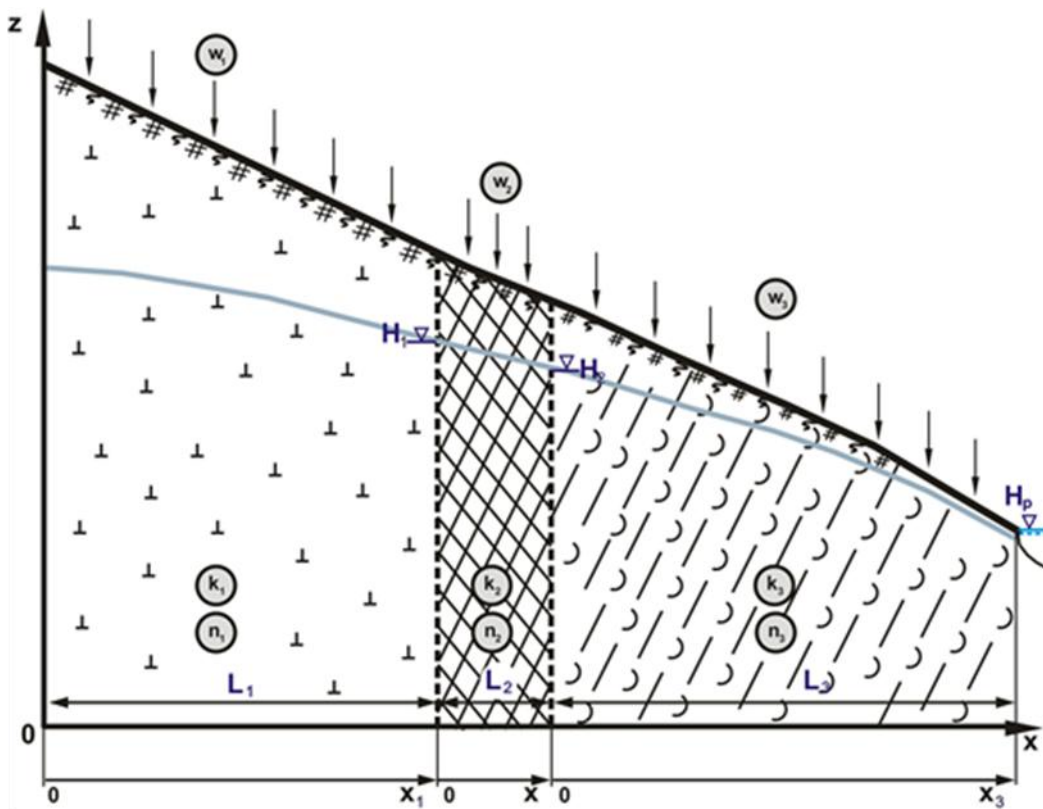


Рисунок 3.11 – Схема к расчету подтопления

Уравнение неразрывности потока для бесконечно малого элемента имеет вид [Шестаков, 1995]

$$\frac{dq}{dx} = w, \quad (3.11)$$

где q – удельный расход планового потока в направлении x .

Учитывая, что

$$q = -T \frac{dH}{dx}, \quad (3.12)$$

уравнение, описывающее распределение напоров одномерного фильтрационного потока, принимает вид

$$\frac{d}{dx} \left(T \frac{dH}{dx} \right) + w = 0. \quad (3.13)$$

Интегрирование уравнения (3.20) для каждого из фрагментов с постоянными значениями питания и проводимости дает выражения, описывающие распределение уровней в пределах каждого из них.

Так, в первом фрагменте

$$H = H_1 + \frac{w_1}{2T_1} (L_1^2 - x_1^2), \quad (3.14)$$

во втором фрагменте

$$H = H_1 + \frac{H_2 - H_1}{L_2} x_2 + \frac{w_2 x_2}{2T_2} (L_2 - x_2), \quad (3.15)$$

в третьем фрагменте

$$H = H_2 + \frac{H_p - H_2}{L_3} x_3 + \frac{w_3 x_3}{2T_3} (L_3 - x_3). \quad (3.16)$$

Выражения для H_1 и H_2 находятся, исходя из условия неразрывности потока. Балансовое уравнение на границе центрального (второго) и приречного (третьего) фрагментов имеет вид

$$T_1 \frac{H_p - H_1}{L_1} + \frac{w_1 L_1}{2} = -w_2 L_2 - w_3 L_3, \quad (3.17)$$

соответственно, распределение напоров в пределах приречного (третьего) фрагмента описывается выражением

$$H = H_p + \frac{w_3}{2T_3}(L_3^2 - x_3^2) + \frac{w_1L_1 + w_2L_2}{T_3}(L_3 - x_3) \quad (3.18)$$

в естественных условиях и выражением

$$H^* = H_p + \frac{w_3}{2T_3}(L_3^2 - x_3^2) + \frac{w_1L_1 + w_2^*L_2}{T_3}(L_3 - x_3) \quad (3.19)$$

после затопления.

Аналогично получаются зависимости для второго и третьего фрагментов.

Величина подтопления ($\Delta H = H^* - H$) в пределах третьего фрагмента определяется как разница положений уровня подземных вод в естественных условиях (3.25) и после затопления рудника (3.26)

$$H^* - H = \frac{w_2^* - w_2}{T_3} L_2 (L_3 - x_3) \quad (3.20)$$

Интегрирование уравнения (3.18) для каждого из фрагментов при условии сохранения баланса потока позволяет определить расходы на границах фрагментов

$$q_{1-2} = w_1L_1; \quad q_{2-3} = w_1L_1 + w_2L_2; \quad q_p = w_1L_1 + w_2L_2 + w_3L_3.$$

Величина увеличения (по сравнению с естественными условиями) расхода потока подземных вод, поступающего от водораздела и шахтного поля к дрене, составит

$$q_p^* - q_p = (w_2^* - w_2)L_2.$$

Масштаб и интенсивность подтопления (величина превышения уровня подземных вод по сравнению с естественными условиями и площадь подтопления) определяются наличием зон обрушения и сдвижения: размерами нарушенной горными работами территории (L_2) и интенсивностью питания, поступающего в ее пределах после прекращения водоотлива (w_2^*). Кроме того, имеет значение фильтрационное сопротивление приречного участка (L_3/T_3): степень подтопления уменьшается при более высокой проводимости пласта и при приближении отработанного участка к дрене.

Оценочные аналитические расчеты для условий и параметров, характерных для Среднего Урала, показывают, что в пределах ленты тока постоянной ширины

в направлении от водораздела к дрене формирование зоны повышенного питания приводит к подъему уровня подземных вод после прекращения водоотлива на 1–5 м по сравнению с естественными условиями. (Рисунок 3.12).

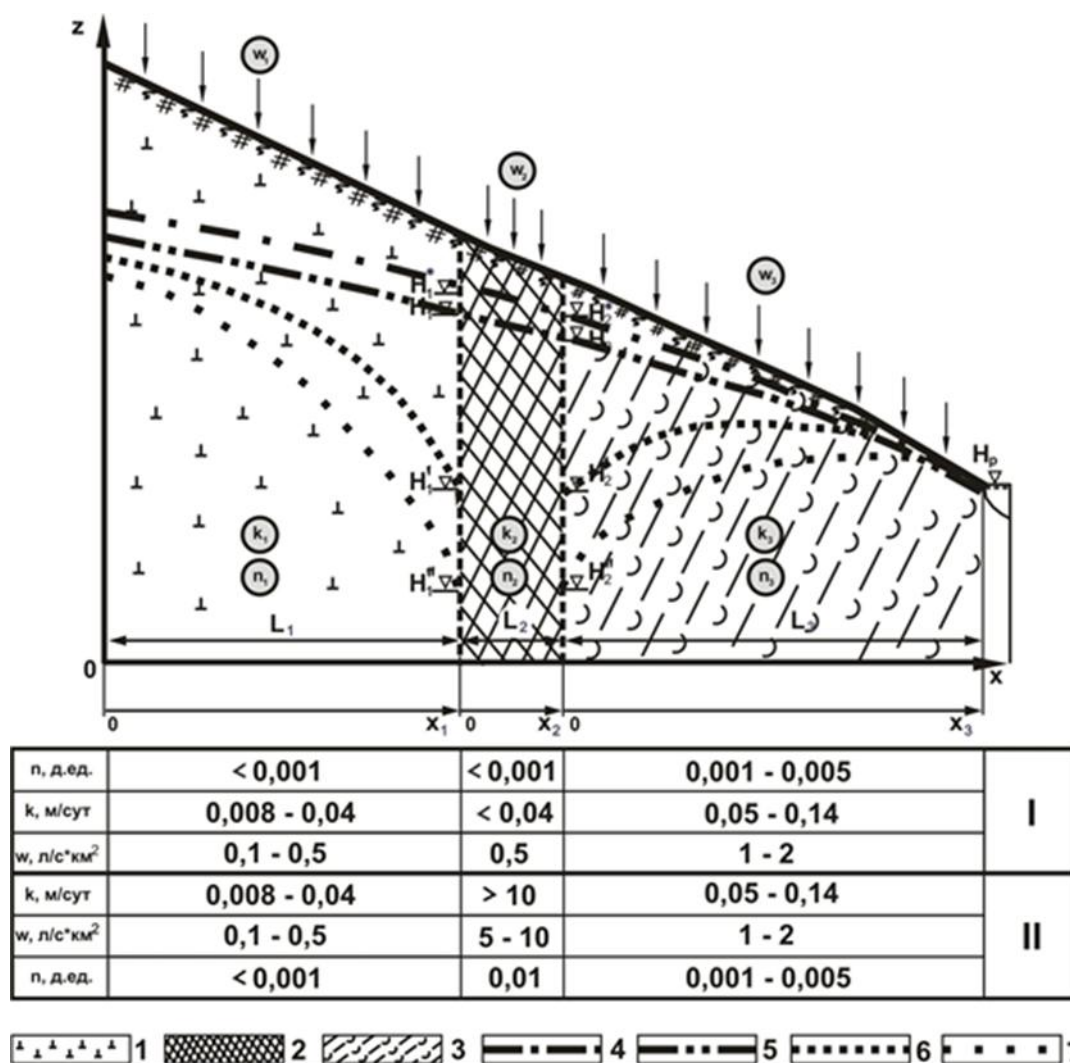


Рисунок 3.12 – Формирование гидродинамической обстановки в области воздействия рудника при его отработке и после ликвидации. Таблица – параметры пласта на этапах: I - естественные (ненарушенные) условия, II - нарушенные условия. Условные обозначения: породы: 1 - магматические; 2 – рудосодержащие (зона обрушения и сдвижения); 3 – метаморфические; уровень подземных вод: 4 – после прекращение 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 (латентное) поступление загрязнения в поверхностные водотоки подземным путем сопоставимо с массой вещества в реке Тагил [Рыбникова и др., 2011]. 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*км²); концентрации меди и цинка в шахтных водах техногенного водоема, образовавшегося в краевой части зоны обрушения, 30–1000 мг/дм³; 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 [Фельдман и др., 2004ф; Фельдман и др., 2010; Рыбникова и др., 2011] и свидетельствуют о том, что рассмотренная аналитическая гидродинамическая модель может использоваться для оценки степени опасности подтопления территории и масштабов латентного загрязнения гидросферы.

3.6 Численная модель и водно-балансовые составляющие (на примере Левихинского рудника)

Левихинская группа медноколчеданных месторождений расположена в 120 км на север от г. Екатеринбурга (Рисунок 2.7). Левихинский рудник отрабатывался с 1927 г. по 2003 г. Было добыто более 10 млн т. медной руды. Левихинское рудное поле имеет протяженность 6 км, приурочено к западному крылу Тагильской синклинали и сложено вулканитами и метасоматитами кировградской свиты, которые с запада ограничиваются плагиогранитами Тагильского интрузивного массива, а с востока перекрываются более молодыми отложениями шуралинской свиты (Рисунок 3.13). Рудоносная формация достигает видимой мощности около 2 км. При эксплуатации месторождения

гидродинамическую обстановку определяли техногенные объекты: карьеры, шахтный водоотлив, провалы, зоны обрушения и сдвижения, отвалы пустых пород и некондиционных руд, пруд-отстойник (Рисунок 3.14).

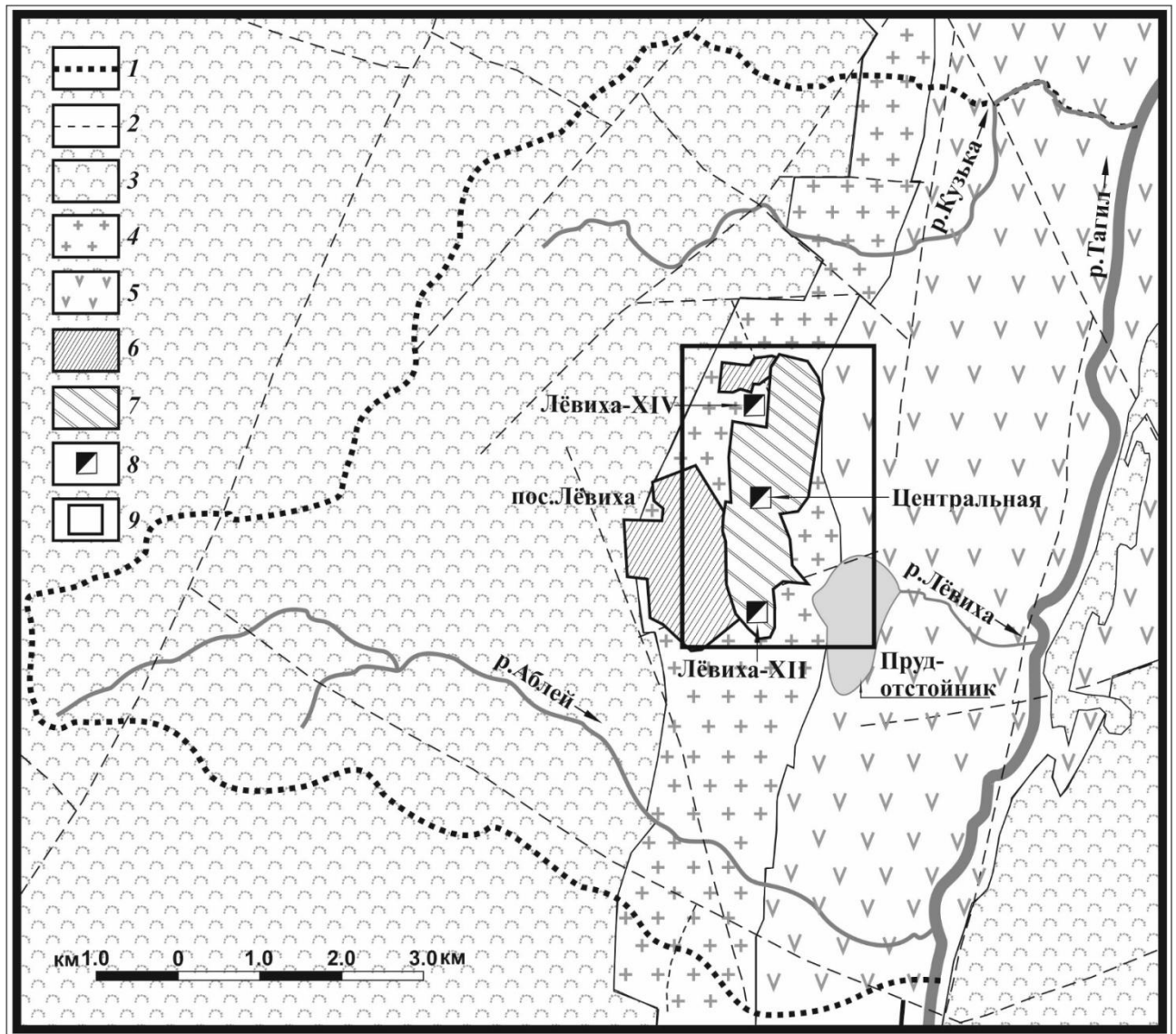


Рисунок 3.13 - Схематическая гидрогеологическая карта Левихинского района. 1 – граница водосборной площади; 2 – разломы; 3 – плутонические образования; 4 – вулканогенные образования; 5 – вулканогенно-осадочные породы; 6 – селитебная зона; 7 – горный отвод; 8 - шахты; 9 – контур врезки (Рисунок 3.14)

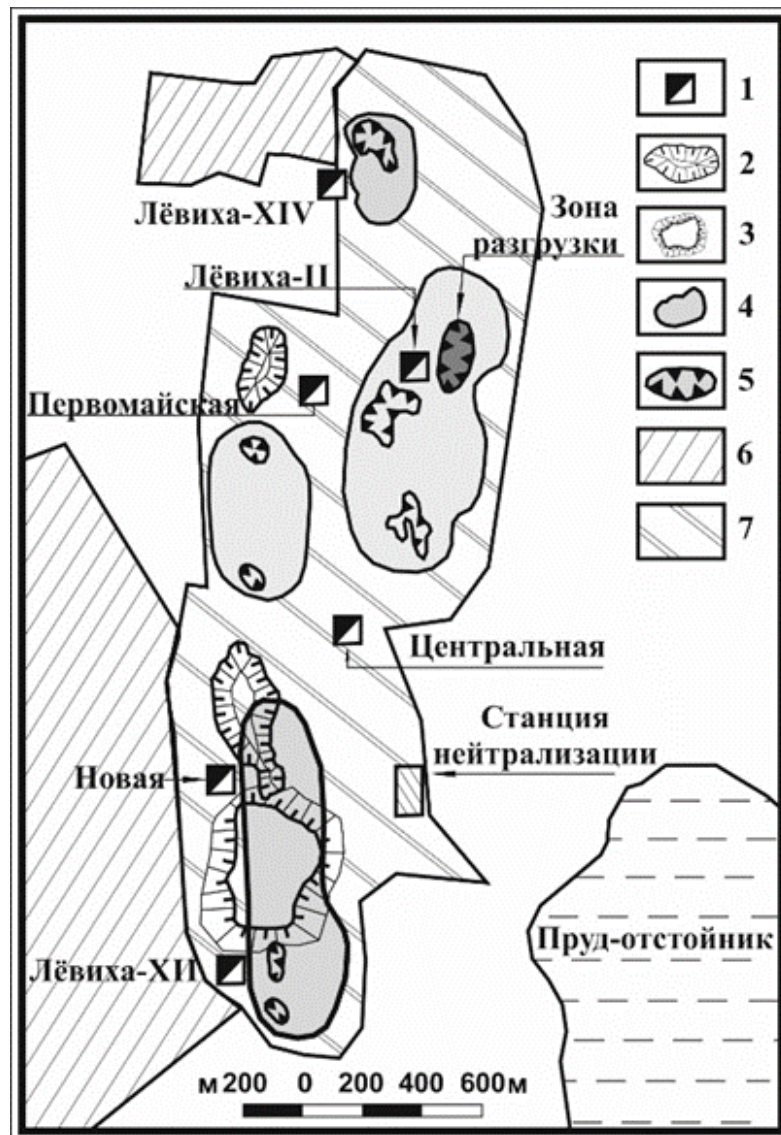


Рисунок 3.14 - Схема расположения техногенных объектов, определяющих экологическую и гидродинамическую обстановку в районе Левихинского рудника. 1 – шахта и ее наименование; 2 – карьер; 3 – отвал; 4 – зона обрушения и сдвига; 5 – провал; 6 – селитебная зона; 7 – горный отвод

В 2003 году добыча была прекращена, водоотлив остановлен. Прекращение водоотлива и затопление подземных выработок кардинально изменяет существующую экологическую и гидрогеологическую обстановку. Ликвидация рудника приводит к заполнению депрессионной воронки; подтоплению шахтными водами прилегающих территорий; выходу шахтных вод в пониженных участках рельефа на поверхность; образованию болот и водоемов, содержащих опасные с экологической точки зрения воды; миграции загрязненных подземных вод, формирующихся на территории рудника, в реки.

После прекращения водоотлива возникла необходимость решения ряда практических задач, направленных на обеспечение экологической безопасности района. Целью работ в такой ситуации является оценка экологических, водохозяйственных и гидрогеологических последствий развития затопления Левихинского рудника, а также обоснование эффективных природоохранных мероприятий.

Существенные изменения фильтрационных характеристик некоторых участков водоносного горизонта в процессе эксплуатации месторождения (отработка месторождения карьерами, шахтами с подэтажным обрушением, образование при этом зон обрушения и сдвижения) определяют необходимость воспроизведения методами математического моделирования всей гидродинамической истории отработки и последующей ликвидации месторождения. Решение обратных задач не обязательно должно воспроизводить непрерывный во времени процесс изменения гидрогеологической ситуации. Учитывая достаточно быструю стабилизацию гидродинамических возмущений (для трещиноватых пород в ограниченных гидрогеологических структурах не более пяти лет), можно выделить опорные стационарные периоды и выполнять решение обратных задач для этих периодов в стационарной постановке [Боревский и др., 1976; Мироненко, Румынин, 1999].

Основной водоносный горизонт представлен выдержанной в плане фильтрационной структурой без разрыва сплошности потока. При создании модели гидрогеологический разрез обобщается, выделяются два модельных пласта. Первый напорно-безнапорный модельный пласт (мощностью 50-70 м) соответствует зоне региональной трещиноватости, второй (мощностью 135 м) соответствует зонам глубокой трещиноватости пород, обводненность которых приурочена в первую очередь к тектоническим нарушениям и контактам пород. Распределение коэффициента фильтрации первого модельного пласта определяется геологическим строением, геоморфологическими условиями и представлено на Рисунке 3.15: западная зона, представленная плутоническими образованиями (сиениты, диориты, граниты и проч.), низкими фильтрационными

свойствами, коэффициент фильтрации изменяется в диапазоне 0,008 (водоразделы) – 0,04 м/сут (область месторождения); восточная зона, представленная образованиями силурийской и девонской системы (порфириты, порфиры, лавы и туфы андезито-базальтового состава и т.д.) рассматривается как более трещиноватая среда, коэффициенты фильтрации варьируют в диапазоне 0,04 (область месторождения) – 0,21 м/сут (долина реки Тагил); зоны тектонических нарушений и контактов пород характеризуются повышенными значениями коэффициента фильтрации, наибольшие значения принимают в областях пересечения, коэффициенты фильтрации меняются в диапазоне 0,1 до 5 м/сут.

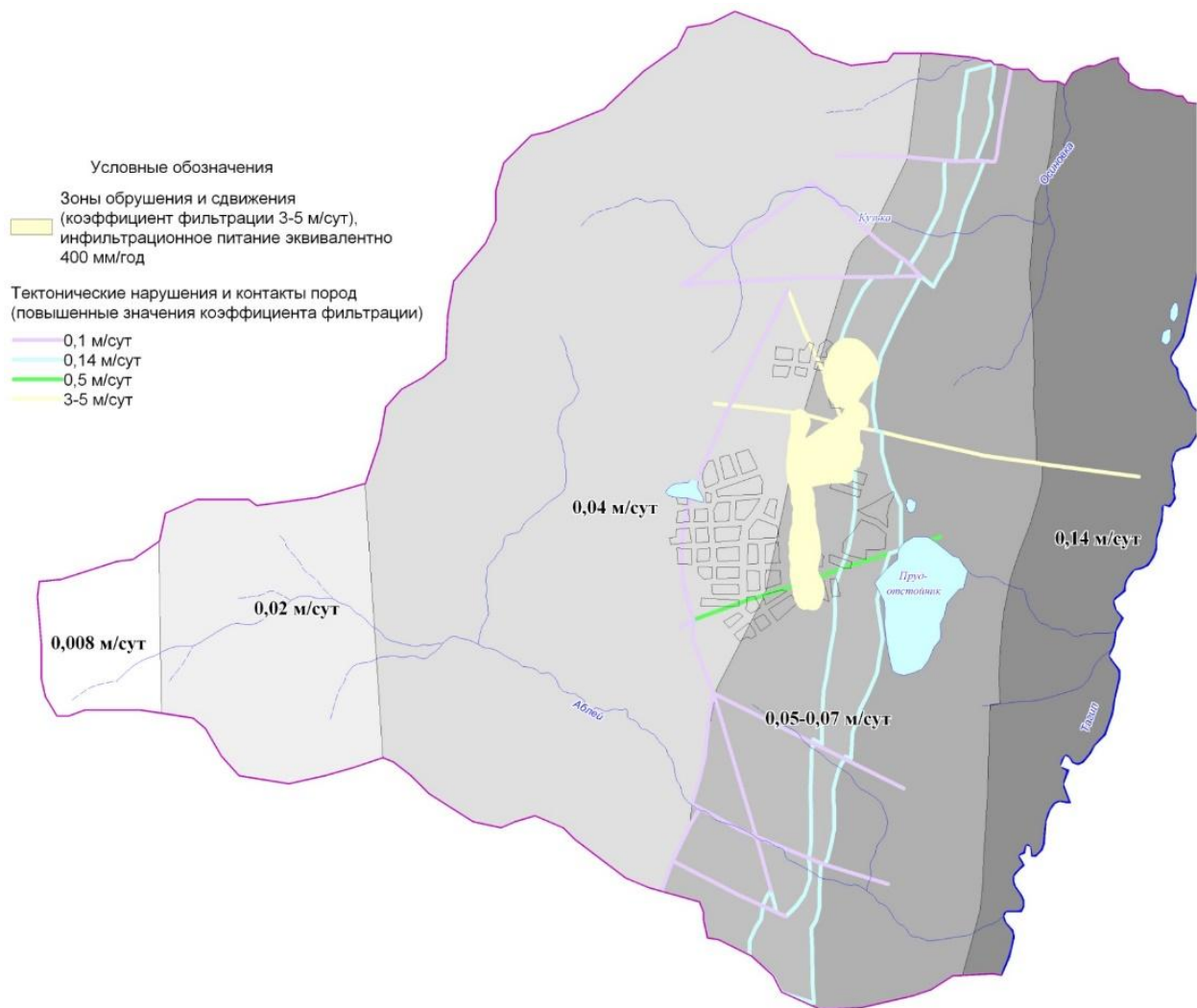


Рисунок 3.15 –Схематическая карта закономерностей изменения фильтрационных свойств [Фельдман и др., 2004ф]

Фильтрационные характеристики второго пласта приняты величиной коэффициента фильтрации 0,005 м/сут.

При моделировании нарушенных условий (начиная с 1956 года) в областях модели, соответствующих зонам обрушения и сдвижения, параметры задавались в соответствии с закономерностями, представленными в Таблице 3: предполагались повышенные значения интенсивности инфильтрационного питания (в связи с увеличением фильтрационных свойств пород и образованием участков пониженного рельефа, которые являются областями поглощения поверхностного стока). Интенсивность инфильтрационного питания в таких зонах принималась близкой к среднемноголетней величине осадков (~400 мм/год).

Модель наиболее чувствительна к изменению параметров инфильтрационного питания, глубины заложения дрены (соответствует глубине развития региональной и техногенной трещиноватости) и фильтрационных характеристик тектонических нарушений, зон обрушения и сдвижения.

Целью прогноза было оценить параметры предельного режима уровней подземных вод, установить участки подтопления после завершения заполнения депрессионной воронки, определить скорость подъема уровня подземных вод, установить места выхода шахтных вод на поверхность и балансовые составляющих расхода разгрузки на поверхность.

По гидравлическим условиям наиболее вероятным местом выхода шахтных вод на поверхность должны быть зоны обрушения - пониженные участки рельефа, в районе шахты Левиха XII, здесь благоприятные условия для образования техногенного водоема, заполненного шахтными водами. В случае отсутствия мероприятий по откачке шахтных вод из водоема высока вероятность частичного подтопления прилегающих территорий, миграции шахтных вод в реку Тагил (как подземным путем, так и в результате перетока в водотоки, впадающие в реки Осиновку и Тагил).

Для определения скорости заполнения горных выработок подземными водами, динамики изменения уровня режима на прилегающих к шахтам территориях, обоснования эффективности возможных природоохранных

мероприятий была решена прогнозная задача в нестационарной постановке. В пределах зон обрушения емкость пород может быть оценена по скорости подъема уровня воды: в интервале глубин 285-115 м она составляет 0,006-0,015, выше 0,03. Для водоносного горизонта вне зон обрушения было принято значение гравитационной емкости – 0,001, характерное для эффузивных пород (для нижнего пласта и зоны развития плутонических пород 0,0001 и 0,0005) [Боревский и др., 1976].

Закономерности формирования водно-балансовых составляющих

Особенности формирования гидродинамического режима горнопромышленной территории определяются как природными (инфильтрация, проводимость, границы), так и техногенными факторами: увеличением глубины техногенной трещиноватости; формированием источников дополнительного питания (приток из пруда-отстойника). Для анализа изменения водно-балансовых составляющих выполняется моделирование для нескольких опорных (базовых) этапов. 1 этап – естественные ненарушенные условия (далее 1928 год). 2 этап – формирование депрессионной воронки при водоотливе до создания пруда-отстойника. 3 этап – ситуация перед остановкой водоотлива. 2007 год – завершение заполнения депрессионной воронки, выход шахтных вод на поверхность, формирование техногенного водоема. В области гидродинамического влияния рудника на разных этапах его освоения особенности формирования гидродинамической обстановки в районе месторождения характеризуются следующими закономерностями (Рисунок 3.16, Таблица 3.4):

до строительства пруда-отстойника больше трети притока воды к горным выработкам формировалось за счет инфильтрационного питания на площади зон обрушения и сдвижения ($50 \text{ м}^3/\text{час}$ из $130 \text{ м}^3/\text{час}$);

после строительства пруда-отстойника водопритоки в шахту при отработке нижних горизонтов месторождения увеличились почти в два раза (до $250\text{--}290 \text{ м}^3/\text{час}$) по следующим причинам: а) произошло увеличение площади зон обрушения и сдвижения; б) были вскрыты высокопроницаемые тектонические нарушения на всю мощность зоны повышенной проводимости; в) увеличилась

глубина техногенной трещиноватости; г) сформировался приток из пруда отстойника;

расход разгрузки шахтных вод техногенного водоема на 60% обеспечивается инфильтрацией в пределах зон обрушения.

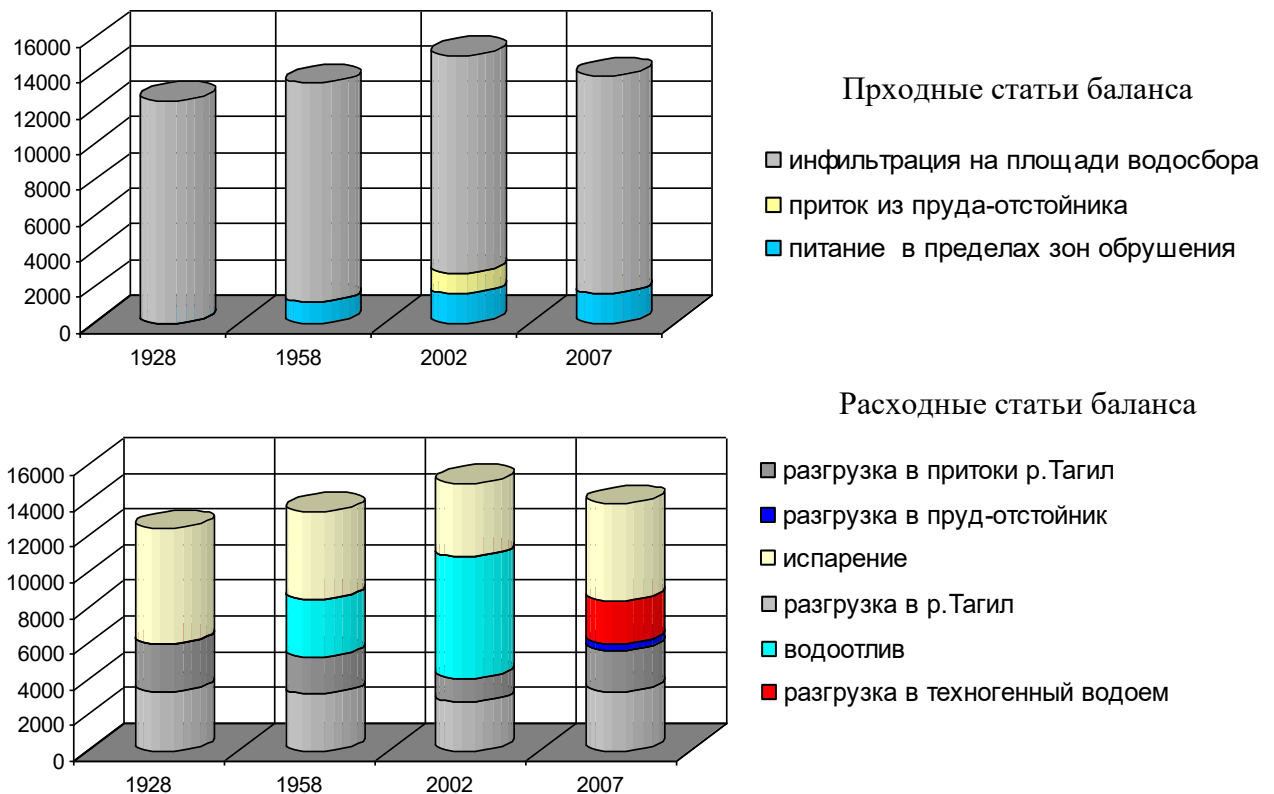


Рисунок 3.16 - Балансовые составляющие в области гидродинамического влияния Левихинского рудника в различные моменты его освоения (м³/сут)

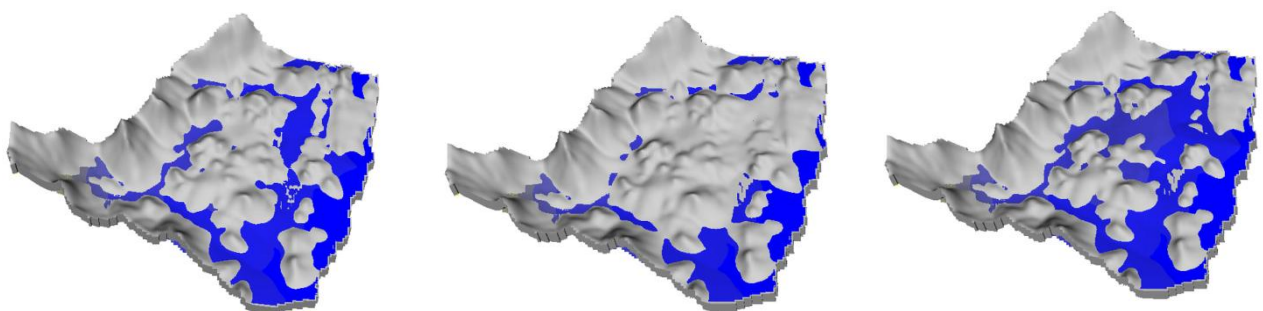
Анализ изменения балансовых составляющих территории на разных этапах ее освоения свидетельствует о том, что расход водоотлива формируется за счет увеличения питания, в том числе в зонах обрушения, а также в результате сокращения разгрузки в реки (Таблица 3.5).

На первом этапе отработки основной вклад в расход водоотлива определяется увеличением инфильтрационного питания при понижении уровня подземных вод. На завершающем этапе отработки при полном развитии горных работ составляющие баланса, обязанные увеличению питания и сокращению,

разгрузки становятся сопоставимыми. При этом доля питания, поступающего в пределах зон обрушения, составляет на всех этапах существования объекта значительный вклад в величину общего расхода водоотлива.

Решение прогнозных фильтрационных задач, имитирующих затопление Левихинского рудника, дало возможность определить зоны выхода шахтных вод на поверхность, скорость заполнения подземных выработок, области подтопления (Рисунок 3.18).

Приведенный прогноз полностью подтвердился при затоплении рудника в 2003-2007 гг. [Фельдман и др., 2008ф]. Подземное пространство, включая горные выработки, было полностью затоплено за 3 года, в районе бывшей шахты Левиха-ХП сформировался техногенный водоем, заполненный кислыми водами. Его расход, как и прогнозировалось, составляет порядка $100 \text{ м}^3/\text{час}$ (что примерно в 2,5 раза меньше расхода водоотлива).. Строительство станции перекачки в районе бывшей шахты Левиха П, где произошло формирование техногенного водоема, обеспечило возможность своевременного перехвата и последующей очистки кислых вод, предотвратило поступление значительных объемов загрязненных вод в р.Тагил и фактически предотвратило экологическую катастрофу в этом районе. Сбор и обезвреживание загрязненных шахтных вод за счет средств областного бюджета осуществляет Уралмонацит предприятие «Экология».



а

б

и

Рисунок 3.18 – Подтопление территории Левихинского рудника (синим цветом показаны участки, где глубина залегания уровня подземных вод менее 1 м):
а – в естественных условиях б - при работе водоотлива, в - после прекращения водопонижения

Таблица 3.4 - Балансовые составляющие в области гидродинамического влияния Левихинского рудника (м³/сут)

Балансовые составляющие	Период			
	1928	1958	2002	2007
Приходные статьи				
- инфильтрационное питание всего, в т.ч.:	12505	13474	13880	13474
<i>по площади водосбора</i>	12505	12291	12215	12215
<i>в пределах зон обрушения</i>	0	1183	1665	1665
- приток из пруда-отстойника	0	0	1153	0
Всего	12505	13474	15033	13880
Расходные статьи				
- шахтный водоотлив	0	3189	6789	0
- разгрузка в реки всего, в т.ч.	6062	5322	4126	5652
<i>в притоки р. Тагил</i>	2700	2100	1364	2294
<i>в р. Тагил</i>	3362	3222	2762	3358
- испарение	6443	4973	4115	5446
- разгрузка в пруд-отстойник	0	0	0	401
- разгрузка в техногенный водоем	0	0	0	2391
Всего	12505	13484	15030	13890

Таблица 3.5 – Изменение составляющих водоотлива (дренажа) на разных этапах развития рудника

Год отработки/ ликвидации рудника	Расход водоотлива/ дренажа (м ³ /сут)	Составляющие водоотлива/дренажа (м ³ /сут)		Модуль подземного стока* (л/с*км ²)
		увеличение питания (в скобках – в пределах зон обрушения)	сокращение разгрузки в реки (в скобках – из/в пруд-отстойник)	
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 естественных условиях 0,88 л/с*км².

В 2007 г. в связи с ростом цен на медь было принято решение о возобновлении эксплуатации Левихинского подземного рудника после его осушения. С использованием постоянно-действующей математической модели

были решены следующие задачи: оценка экологических, водохозяйственных и гидрогеологических последствий восстановления рудника; оценка эффективности проектных решений по осушению рудника; обоснование мероприятий по защите горных выработок от поверхностных и подземных вод; разработка системы мониторинга геологической среды (Фельдман и др., 2008ф). Срок полного осушения рудника был определен условиями лицензионного соглашения - 80 месяцев, исходя из этого проектный водоотлив должен быть около $600 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Основные закономерности процесса осушения рудника заключаются в следующем:

при работе водоотлива достаточно быстро (в течение 3-4 месяцев) сформируется депрессионная воронка;

разгрузка шахтных вод на поверхность прекратится через 2 месяца после начала осушения, произойдет инверсия стока: подземные воды, ранее разгружавшиеся в провал в зоне сосредоточенной разгрузки, будут участвовать в формировании водопритока к горным выработкам и шахтным стволам;

для осушения рудника до горизонта 285 м потребуется 24 месяца, до горизонта 405 м – 29 месяцев, 618 м – 40 месяцев

в течение 10 месяцев в процессе снижения уровня подземных вод до глубины 100 м (зона интенсивной трещиноватости) водоприток будет формироваться в основном за счет сработки емкостных запасов, в том числе в зонах обрушения, – 500 из $600 \text{ м}^3/\text{сут}$, в дальнейшем происходит постепенный рост доли расхода естественного потока, формирующегося на площади водосбора.

- через 18 месяцев после начала осушения гидродинамическая ситуация в области влияния Левихинского рудника будет аналогична ситуации 2000 года: зона разгрузки осушится, миграция загрязненных подземных вод из затопленного пространства и прудов-отстойников в долину реки Тагил прекратится.

До настоящего времени проект не реализован.

В целом, решение серии эпигнозных и прогнозных задач позволило уточнить фильтрационные параметры исследуемой области, проверить

физическую непротиворечивость модели, а также разработать концептуальную и математическую гидрогеологическую модель района Левихинского медно-колчеданного рудника (Рисунок 3.19).

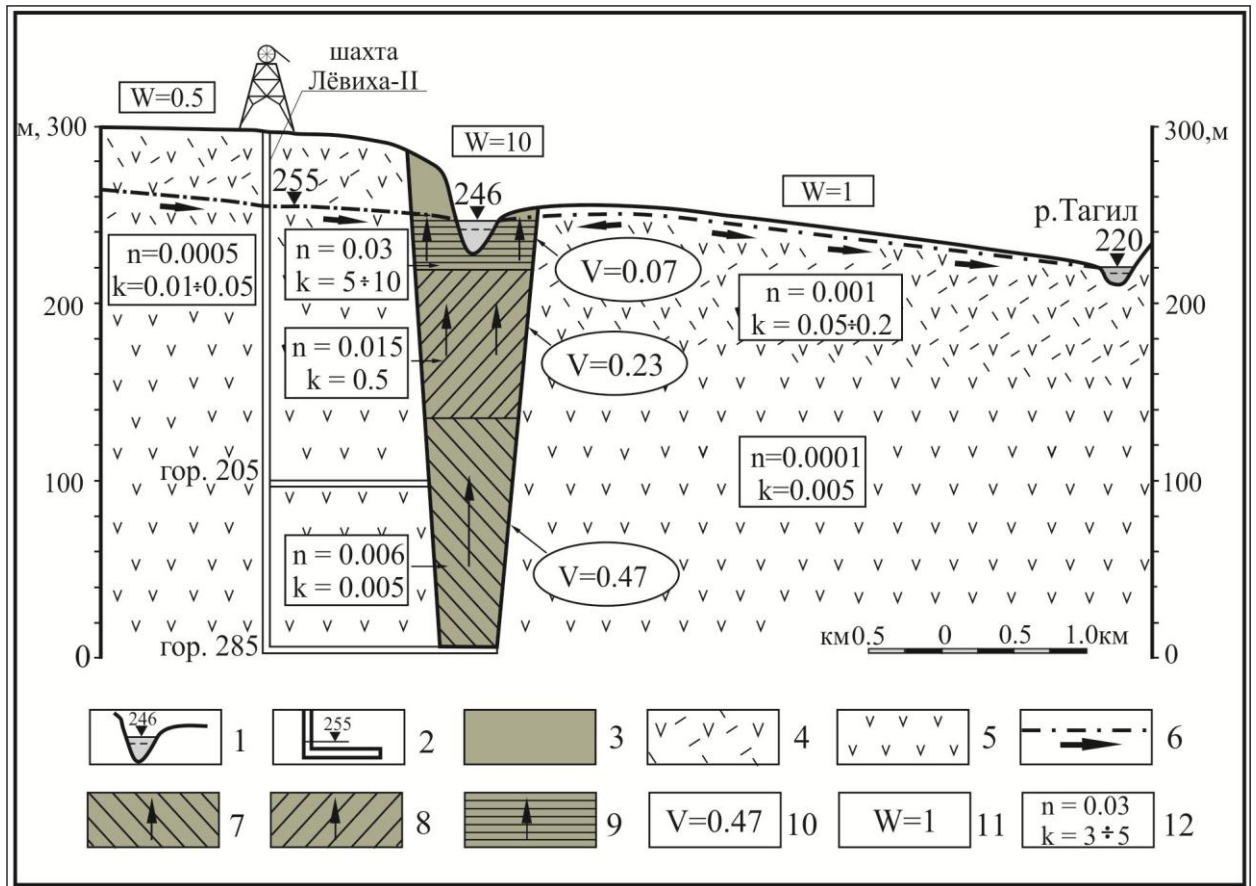


Рисунок 3.19 – Концептуальная гидрогеологическая модель района Левихинского рудника. 1 - провал (зона сосредоточенной разгрузки, техногенный водоем) и абсолютная отметка уровня воды в нем; 2 - шахтный ствол и абсолютная отметка уровня воды в нем; 3 – зона сдвижения и обрушения (зона развития техногенной трещиноватости); 4, 5 – вулканогенно-осадочные породы (4 - зона развития региональной трещиноватости); 6 – уровень подземных вод и направление движения подземных вод после затопления; 7, 8, 9 – затопление зоны сдвижения и обрушения от горизонта 285 м (7 – в течение первого года, 8 – второго года; 9 – третьего года); 10 - скорость подъема воды, м/сут; 11 – инфильтрационное питание (л/с*км²); 12 – параметры пласта (n – емкость, k - коэффициент фильтрации, м/сут)

Движение подземных вод происходит водоносном горизонте зоны региональной трещиноватости от водораздела к региональной дрене – р. Тагил,

часть потока поступает в горизонт техногенной трещиноватости в пределах зон обрушения и сдвижения и разгружается в провал, формируя техногенный водоем. Коэффициенты фильтрации верхней части горизонта техногенной трещиноватости составляют 5–10 м/сут и на 2–3 порядка больше, чем коэффициенты фильтрации водоносного горизонта региональной трещиноватости; параметры пористости нарушенного массива (горизонт техногенной трещиноватости), определенные по результатам решения обратной нестационарной задачи при затоплении рудника, составляют 0,01–0,03 д.ед. и на порядок выше емкости основного массива. Инфильтрационное питание в пределах зон обрушения формируется в результате практически полного поглощения осадков на этой площади (модуль питания 10 л/с*км^2 при величине регионального модуля $0,5\text{--}2,0 \text{ л/с*км}^2$). Расход шахтных вод в техногенном водоеме зоны разгрузки на 60% обеспечивается инфильтрационным питанием, поступающим в пределах нарушенной зоны.

Выводы по разделу

Закономерности изменения фильтрационных и емкостных свойств массива горных пород, условий питания подземных вод в области влияния отрабатываемых и ликвидируемых рудников горноскладчатого Урала в нарушенных условиях зависит не только от геоморфологических и геологических факторов, но и от способа отработки полезного ископаемого.

Процесс формирования фильтрационной зональности массива горных пород в пределах горнопромышленной территории определяется напряженно-деформированным состоянием массива. В зонах обрушения развивается техногенная трещиноватость, что приводит к росту проницаемости массива горных пород на один – два порядка, увеличению трещинной пористости и площадного питания в несколько раз.

Геофильтрационная схематизация условий формирования потока подземных вод в области влияния отрабатываемых и ликвидируемых рудников

Среднего Урала должна осуществляться с учетом того, что его пространственная структура и параметры пласта имеет принципиальные отличия в естественных условиях, на этапе отработки и после ее завершения.

Формирование гидродинамического режима горнопромышленной территории определяется интенсивностью дренажных мероприятий на этапе отработки месторождения полезных ископаемых и степенью нарушенности территории после прекращения водоотлива.

Использование наряду с численным математическим моделированием аналитических расчетов позволяет оперативно получить прогнозные оценки развития негативных процессов, разработать мероприятия, направленные на предотвращение ущерба.

Аналитическая гидродинамическая модель (стационарная модель планового потока) массива горных пород в области влияния рудников описывает предельное распределение уровней подземных вод и расходов потока для условий, типичных для месторождений полезных ископаемых Среднего Урала. Масштаб и интенсивность подтопления определяются размерами нарушенной зоны и интенсивностью питания, поступающего в ее пределах. После прекращения водоотлива подъем уровня подземных вод может достигать 1–5 м по сравнению с естественными условиями.

Процесс восстановления уровня подземных вод после прекращения водоотлива в гидродинамическом плане идентичен процессу восстановления уровня после остановки откачки. Использование для оценки пространственно-временных закономерностей формирования гидродинамической обстановки в районе затопленного рудника зависимостей, описывающих процесс восстановления, свидетельствует об удовлетворительном совпадении фактических данных и результатов аналитических расчетов.

Общая методика оценки времени заполнения депрессионной воронки после остановки шахтного водоотлива включает определение продолжительности периода формирования установившегося режима, для учета неоднородности фильтрационных, емкостных свойств и питания по площади используются

обобщенные параметры в области гидродинамического влияния горной выработки.

Продолжительность затопления рудников Среднего Урала, как правило, составляет 4-5 лет. До глубины около 150 м график подъема уровня имеет линейный вид, скорость подъема составляет около 20 м в месяц. Далее темп повышения уменьшается, график повышения уровня принимает параболический вид, скорость подъема уровня снижается до 7 м в месяц. В течение года, предшествующего выходу на поверхность, скорость подъема уровня снижается до 2 и менее метров в месяц. В целом за весь период затопления распределение объемов воды, пошедших на заполнение горных выработок и емкость массива горных пород, в первую очередь в зонах обрушения, составляет 20% и 80%, соответственно.

Применение эмпирических зависимостей, основанных на учете коэффициента пустотности, для оценки времени затопления рудников Урала дает неправдоподобные результаты: время затопления шахт должно было бы составить меньше 1 года, тогда как реально это происходит в течение 4–5 лет.

На примере типичного для условий Среднего Урала Левихинского месторождения с использованием геофильтрационного моделирования были установлены основные закономерности формирования и изменения гидродинамической обстановки, выполнен детальный анализ балансовых составляющих, разработана концептуальная и математическая гидрогеологическая модель. Коэффициенты фильтрации горизонта техногенной трещиноватости (зоны обрушения) составляют 5–10 м/сут и на несколько порядков больше, чем коэффициенты фильтрации ненарушенного массива; параметры пористости нарушенного массива, определенные по результатам решения обратной нестационарной задачи при затоплении рудника, составляют 0,01-0,03 д.ед., что на порядок выше емкости основного массива – горизонта экзогенной трещиноватости.

Ведущей составляющей дренажного водоотлива является инфильтрационное питание в пределах зон обрушения, которое формируется в

результате практически полного поглощения осадков на этой площади (модуль питания 10 л/с*км^2 при величине регионального модуля $0,5\text{--}2,0 \text{ л/с*км}^2$). В период отработки дренажный водоотлив формируется как за счет естественных ресурсов (60%) и питания в пределах зон обрушения (40%). После затопления расход шахтных вод в зоне разгрузки более чем на 60% обеспечивается инфильтрационным питанием, поступающим в пределах нарушенной зоны.

Емкость выработанного пространства составляет не более 20%, остальная емкость определяется техногенной трещиноватостью и сосредоточена в зонах обрушения и сдвижения (в том числе в провалах).

Некондиционные подземные воды на участках ликвидированных рудников являются источником скрытого (латентного) загрязнения поверхностной гидросферы: массовый расход, поступающий с подземными водами в поверхностные водотоки, может достигать по основным загрязняющим компонентам (меди и цинку) 1–30 тонн в год.

4 ГИДРОГЕОХИМИЯ ОТРАБАТЫВАЕМЫХ И ЗАТОПЛЕННЫХ МЕДНОКОЛЧЕДАННЫХ РУДНИКОВ

4.1 Проблемы формирования кислых шахтных вод

Спецификой формирования кислых шахтных вод является широкий диапазон изменения рН, наличие разнообразных цветных металлов, железа, содержание которых зачастую превышает типичные для подземных вод катионы - кальций, магний, натрий. Традиционно для графического представления результатов анализа качества воды применяются такие графики, как треугольник Пайпера, диаграмма Дурова и др. [Wolkersdorfer, 2008]. Для наглядного представления и интерпретации особенностей дренажных вод широко используется диаграмма У. Фиклина [Plumlee et al., 1992]. Диаграмма Фиклина дает возможность наглядно представить гидрогеохимические особенности различных типов дренажных вод для месторождений полезных ископаемых, позволяет провести полноценный гидрогеохимический анализ их формирования, выполнить геоэкологическую их оценку и сделать предварительный прогноз с использованием данных на объектах-аналогах как при отработке месторождения, так и на постэксплуатационном этапе.

В работе Дж. Пламли с соавторами [Plumlee et al., 1999] было выполнено обобщение результатов изучения состава шахтных (AMD – acid mine drainage) и природных (ARD – acid rock drainage) кислых вод для широкого спектра типов месторождений полезных ископаемых и минералогических зон в пределах залежей в различных климатических условиях.

Результаты интерпретации этих данных позволили установить диапазоны изменения показателей в шахтных водах, которые формируются в различных минералогических зонах и при наличии разнообразных типов руд [Plumlee et al., 1999]. Возможные значения концентраций металлов в шахтных водах и содержания сульфат-иона в зависимости от рН показаны на Рисунках 4.1 и 4.2.

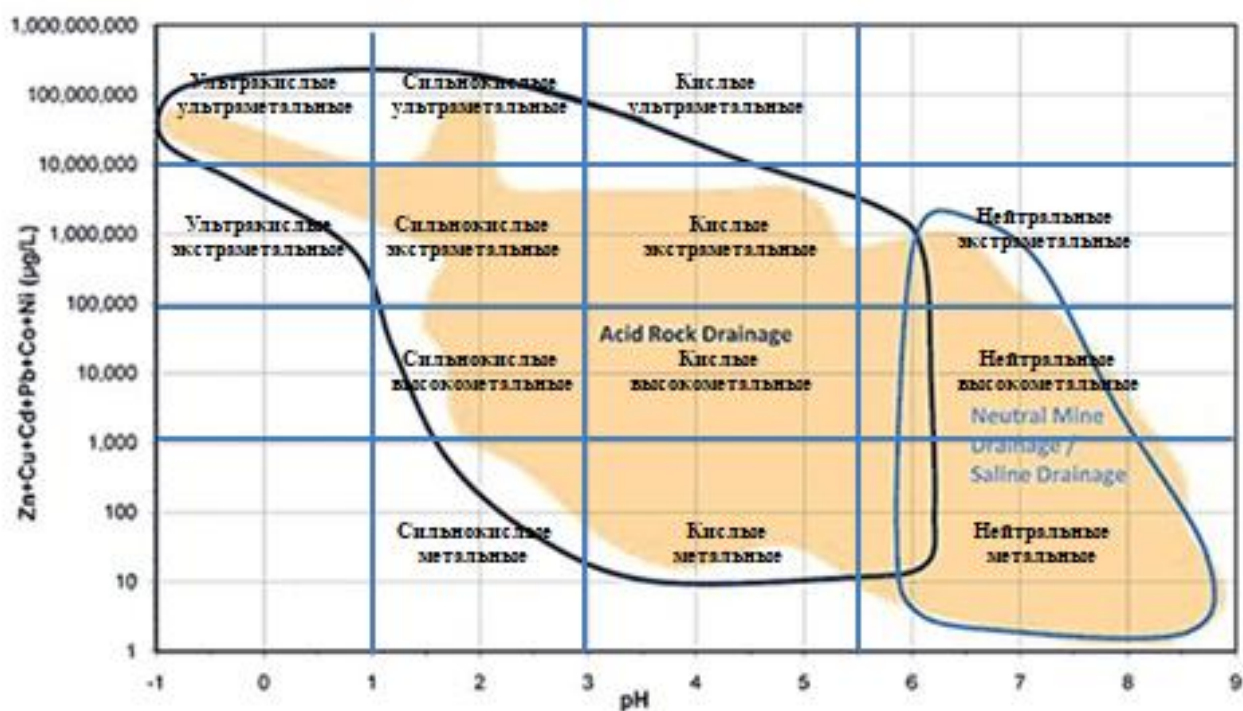


Рисунок 4.1 – Качество шахтных вод. Зависимость содержания металлов от pH в дренажных водах - диаграмма У. Фиклина [Plumlee et al., 1999]

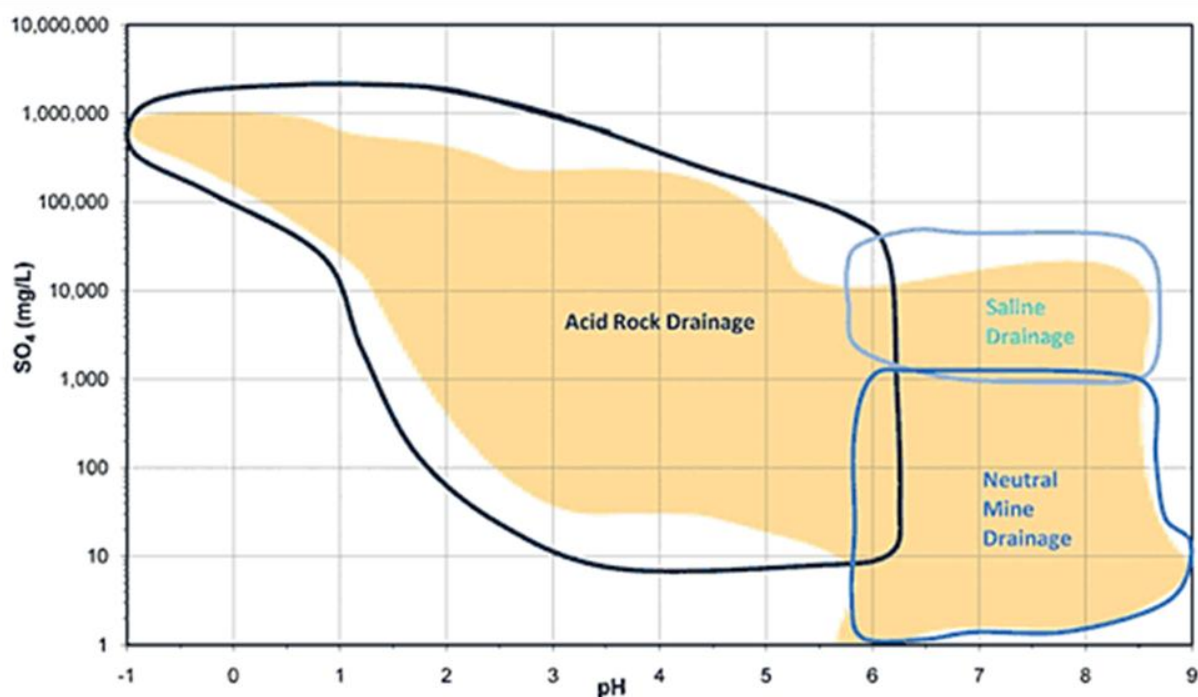


Рисунок 4.2 - Качество шахтных вод. Зависимость содержания сульфат-ионов от pH в дренажных водах – диаграмма У. Фиклина [Plumlee et al., 1999]

Комбинация реакций нейтрализации и производства кислоты обычно приводит к поэтапному (ступенчатому) развитию кислотности дренажных вод (Рисунок 4.3). С течением времени pH снижается, проходя несколько платообразных ступеней, продолжительность которых определяется буферизацией ряда минеральных комплексов [INAP, 2009]. Время задержки генерации кислоты является очень важным фактором в отсрочке и даже предотвращении формирования кислых вод, особенно на ранних стадиях процесса. Время такой задержки также имеет значительные последствия для интерпретации результатов лабораторных испытаний: поскольку первый этап может длиться очень долгое время, ранние результаты геохимических испытаний могут не соответствовать долговременной экологической стабильности и качеству формирующихся кислых вод [Maest et al., 2005].

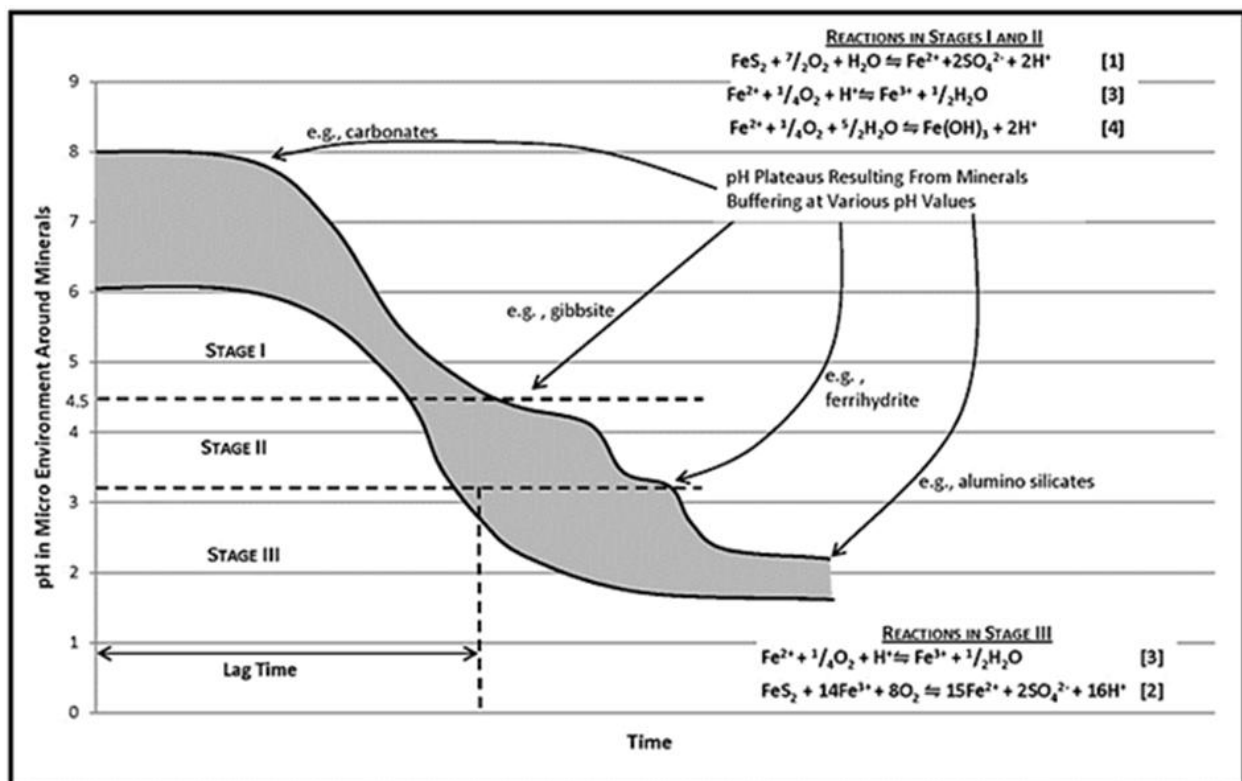


Рисунок 4.3 – Стадии формирования кислых дренажных вод и основные управляющие реакции [INAP, 2009]

Значительную роль в формировании конкретного состава дренажных вод наряду с окислением сульфидов играют реакции нейтрализации. Эффективными

нейтрализующими минералами является большинство карбонатов. Однако после их растворения и осаждения вторичных минералов в результате гидролиза растворенных железа или марганца рост кислотности продолжается. Несмотря на то, что алюмосиликатные минералы более распространены, чем карбонатные, они, как правило, являются менее реакционноспособными, а их роль в стабилизации кислотности раствора может быть успешной только в том случае, когда были достигнуты достаточно низкие значения pH [Jambor, 2003].

Ведущие факторы и процессы, которые определяют качество шахтных вод, приведены на обобщенной диаграмме (Рисунок 4.4). Увеличение содержания сульфидов и рост содержания карбоната являются разнонаправленными процессами, регулирующими кислотность шахтных вод. Повышение содержания металлов в сульфидах способствует формированию более металлоносных вод. Процессы, способствующие концентрированию раствора (испарение, вымораживание), способствуют формированию экстракислых экстраметалльных вод; разбавление шахтных вод снижает их кислотность и содержание металлов.

Самые кислые из известных шахтных вод обнаружены в горных выработках шахты Ричмонд отработанного медноколчеданного месторождения Айрон Маунтен (Richmond Mine of Iron Mountain, Калифорния, США) [Alpers and Nordstrom, 1991; Nordstrom и Alpers, 1999]. Измеренные значения pH достигают отрицательных значений вплоть до -3,6, зафиксированная концентрации сульфатов составляет 760 г/л, содержание растворенных металлов и железа - десятки граммов на литр (Таблица 4.1). Фактически это уже раствор серной кислоты.

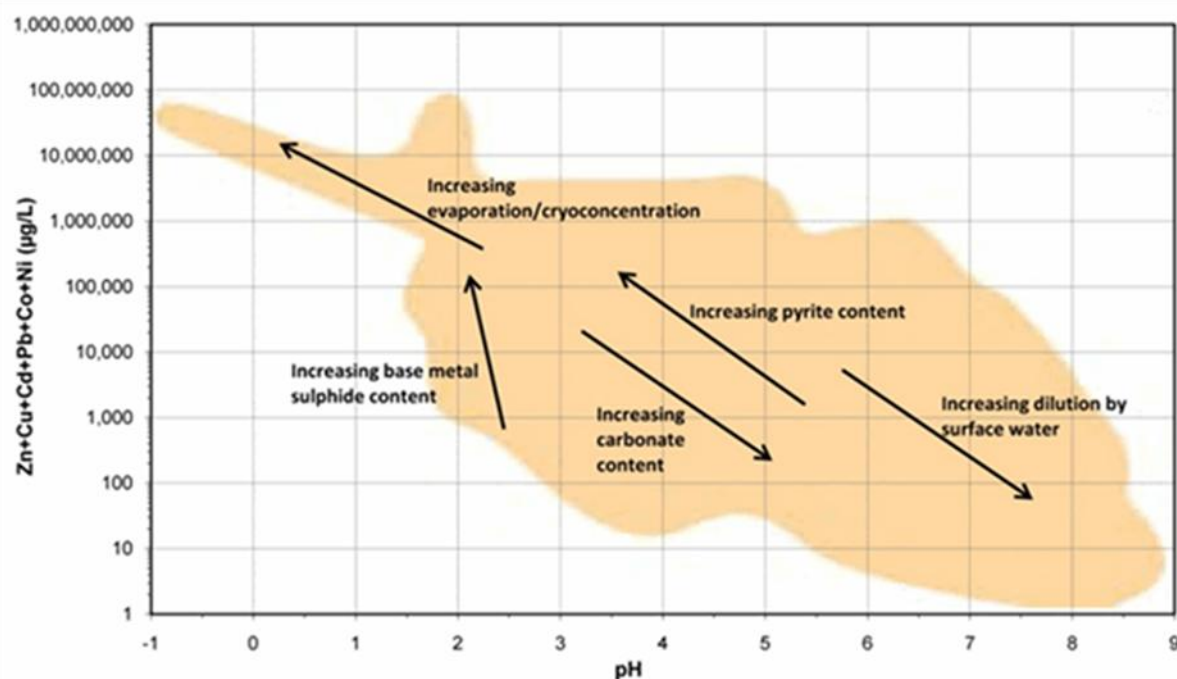


Рисунок 4.4 – Основные процессы, определяющие качество шахтных вод - диаграмма Фиклина [Plumlee et al., 1999]

Таблица 4.1 - Состав экстремально кислых шахтных вод в шахте Ричмонд месторождения Айрон Маунтен (мг/л) [Alpers, Nordstrom, 1991]

pH	SO ₄	Fe _{общ}	Al	Mn	Zn	Cu	As	Cd	Ca	Mg
0.48	118000	20300	2210	17	2010	290	56	16	183	821
-0.35	420000	55600	4710	42	6150	578	169	43	424	1380
-0.7	360000	86200	6680	42	7650	2340	154	48	330	1450
-1.0	760000	11000	1420	23	23500	4760	340	211	279	437

Такой экстремальный состав, скорее всего, формируется благодаря сочетанию нескольких факторов. Во-первых, шахтные воды протекают через линзу массивного сульфида и не взаимодействуют с потенциально нейтрализующими породами; во-вторых, температура воды достигает 46-47°C (благодаря экзотермическим процессам окисления); в-третьих, влажность воздуха достаточно высокая. Шахтные воды на других участках шахты Ричмонд также являются кислыми и высокометальными, однако таких показателей уже не достигают.

В горных выработках установлено наличие значительного количества вторичных сульфатов - растворимых сульфатных солей металлов, таких как мелантерит, халькантит, кокимбит, ромбоклаз, копиапит, галотрихит и др. (Таблица 4.2). Некоторые из них формируются только при значениях pH, близких к 0 или отрицательных.

Таблица 4.2 – Сульфатные минералы, обнаруженные в шахте Ричмонд, в порядке образования [Nordstrom, Alpers, 1999]

Минерал	Идеализированная формула
Melanterite	$\text{FeIISO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Rozenite	$\text{FeIISO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Szomolnokite	$\text{FeIISO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Copiapite	$\text{FeIIFe}_4\text{III}(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$
Roemerite	$\text{FeIIFe}_2\text{III}(\text{SO}_4)_4 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$
Coquimbite	$\text{Fe}_2\text{III}(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$
Kornelite	$\text{Fe}_2\text{III}(\text{SO}_4)_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Rhombochase	$(\text{H}_3\text{O})\text{FeIII}(\text{SO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Voltaite	$\text{K}_2\text{Fe}_5\text{IIFe}_4\text{III}(\text{SO}_4)_{12} \cdot 18\text{H}_2\text{O}$
Halotrichite–bilinite	$\text{FeII}(\text{Al,FeIII})_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$
Gypsum	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Chalcanthite	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

На большинстве медноколчеданных рудников Урала дренажные воды в период отработки характеризуются как экстра- и высокометалльные сильноокислые и кислые, имеют низкие значения pH и повышенные содержания металлов - до $n \cdot 10^2$ - $n \cdot 10^3$ мг/л (Рисунок 4.5).

В середине прошлого века при изучении процессов, определяющих формирование кислых шахтных вод, в том числе на медноколчеданных рудниках Уральского региона, было замечено, что зачастую наибольшая кислотность характерна для рудников, обрабатывающих более бедные медные руды, такие как на рудниках им. III Интернационала, Дегтярский, Карабашский [Веселов, 1956]. Это объяснялось тем, что серный колчедан (FeS_2) менее твердый, чем медистый (CuFeS_2), при добыче легло дробится в более мелкие фракции, что увеличивает поверхность соприкосновения руды с водой и воздухом и ускоряет окисление. Формирование кислых шахтных вод определяется повышенным содержанием

серы, интенсивностью ведения добычных работ (при одинаковом качестве руды чем интенсивнее работы, тем выше кислотность), удельной поверхностью сульфидов (наличием колчеданной мелочи), температурой, скоростью потока, омывающего участок окисления (при снижении притока воды в горные выработки кислотность снижалась) [Докукин, 1947]. Было отмечено, что кислотность шахтных вод возрастает при наличии в воде алюминия, железа, калия, взвешенных веществ. Смешение слабокислых рудничных вод со слабокислыми или нейтральными приводит к формированию кислых вод в горных выработках, т.е. в этом случае нарушается правило аддитивности [Докукин, Докукина, 1950].

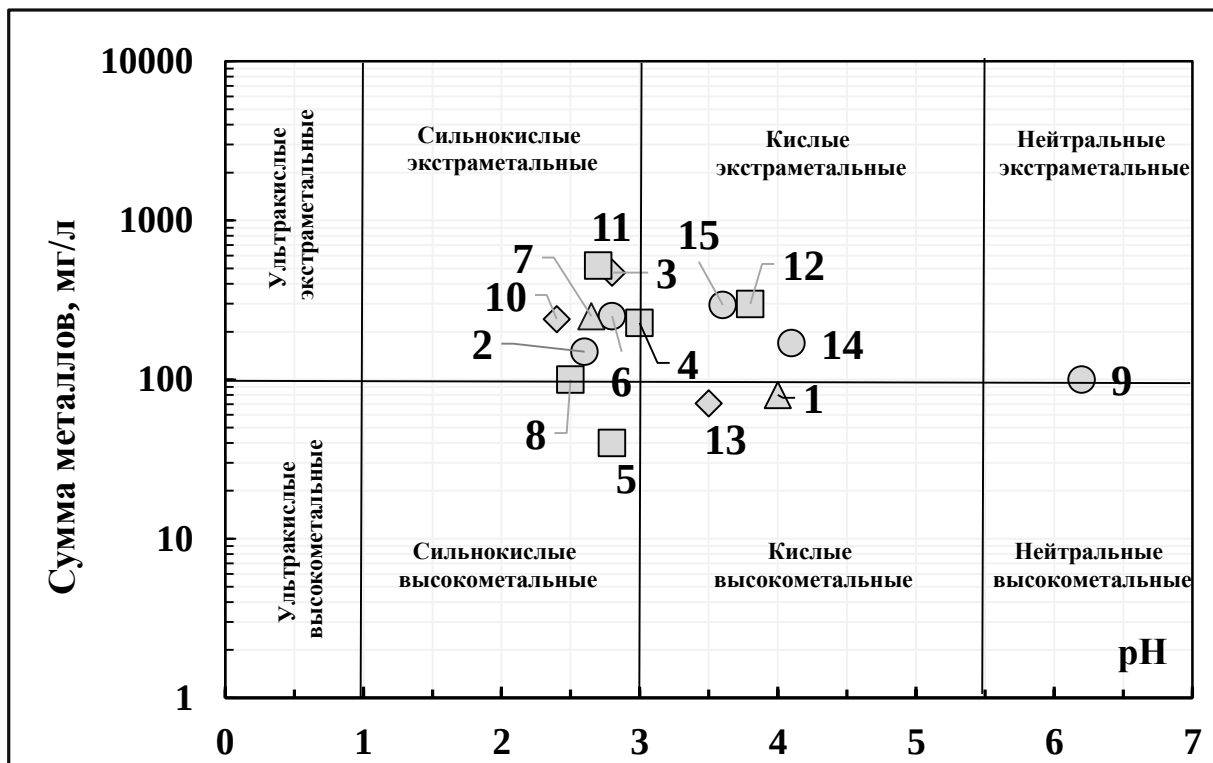


Рисунок 4.5 - Зависимость содержания металлов от pH в дренажных водах медноколчеданных рудников Урала; использованы данные [Зотеев и др., 1995, 2009; Грязнов и др., 1997; Елохина, Рыженко, 2014; Никонов и др., 2014; Рыбникова и др., 2014]. Рудники: 1 - Им. III Интернационала, 2 – Красногвардейский, 3 – Левихинский, 4 - Ломовский, 5 – Белореченский, 6 – Карпушихинский, 7 – Ковеллиновский, 8 – Дегтярский, 9 – Гумешевский, 10 – Карабашский, 11 – Блявинский, 12 – Гайский, 13 – Бурибайский, 14 – Учалинский, 15 – Сибайский

В последние десятилетия на Среднем Урале большое количество рудников было закрыто и затоплено, в том числе медноколчеданных - наиболее опасных по степени экологического влияния. После завершения отработки и прекращения водоотлива состав шахтных вод изменяется, однако они по-прежнему остаются экстра- и высокометальными сильноокислыми и кислыми (Рисунок 4.6).

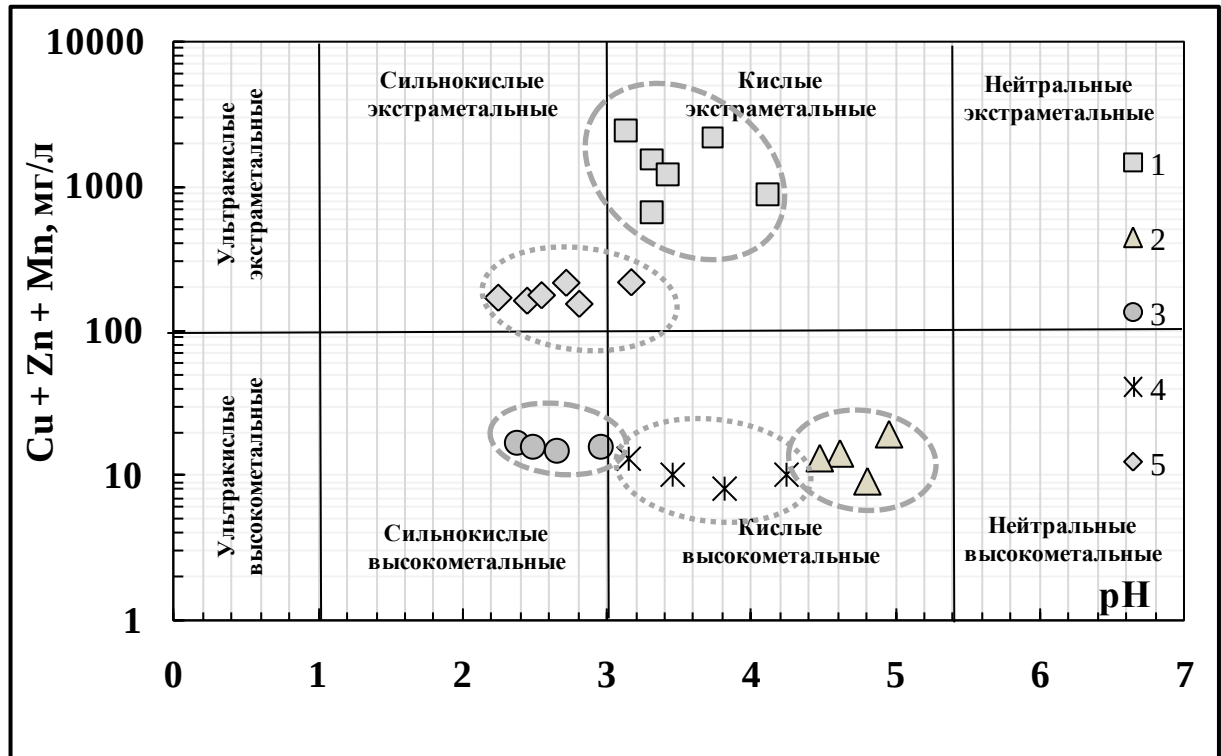


Рисунок 4.6 - Зависимость содержания металлов от рН в шахтных водах затопленных медноколчеданных рудников Урала. Рудники: 1 - Левихинский, 2 – Ломовский, 3 – Белореченский, 4 - Карпушихинский, 5 – Дегтярский

Среди отработанных рудников Среднего Урала по степени контрастности и особенностей химического состава шахтных вод наиболее заметными являются Дегтярский и Девихинский рудники. Обстоятельства затопления и особенности формирования химического состава шахтных вод Дегтярского рудника рассмотрены в работах [Вишняк, 2005ф; Елохина, Рыженко, 2014; Елохина, 2014]. Особенности гидрохимии 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 их результатов. Этот объект по значимости может быть сопоставим с изучением процессов на месторождении Айрон Маунтен (Iron Mountain, Colorado, USA), проводившихся за счет средств Супрефонда, начиная с 80-х годов прошлого столетия [Alpers, Nordstrom, 1991; Nordstrom, Alpers, 1999; Fifth Five-Year, 2103].

В пределах горнопромышленных ландшафтов отработанного Левихинского рудника формируется несколько типов подземных вод, которые приурочены к шахтным стволам, отвалам, зонам обрушения (Рисунок 4.7). Максимальные значения практически всех показателей характерны для шахтных вод, разгружающихся в техногенный водоем. Содержание цинка, алюминия, железа, марганца, меди, кадмия, кобальта, серы на три-четыре порядка выше кларка, в качестве которого приняты средние содержания в подземных водах смешанно-лесной зоны [Шварцев, 1998].

Состав подземных вод отличается также и от того, который формировался при дренажном водоотливе на руднике (Таблица 4.3). Содержание большинства показателей химического состава шахтных вод, разгружающихся на поверхность в провал (расход разгрузки составляет половину от дренажного водоотлива при эксплуатации), до настоящего времени выше, чем при отработке.

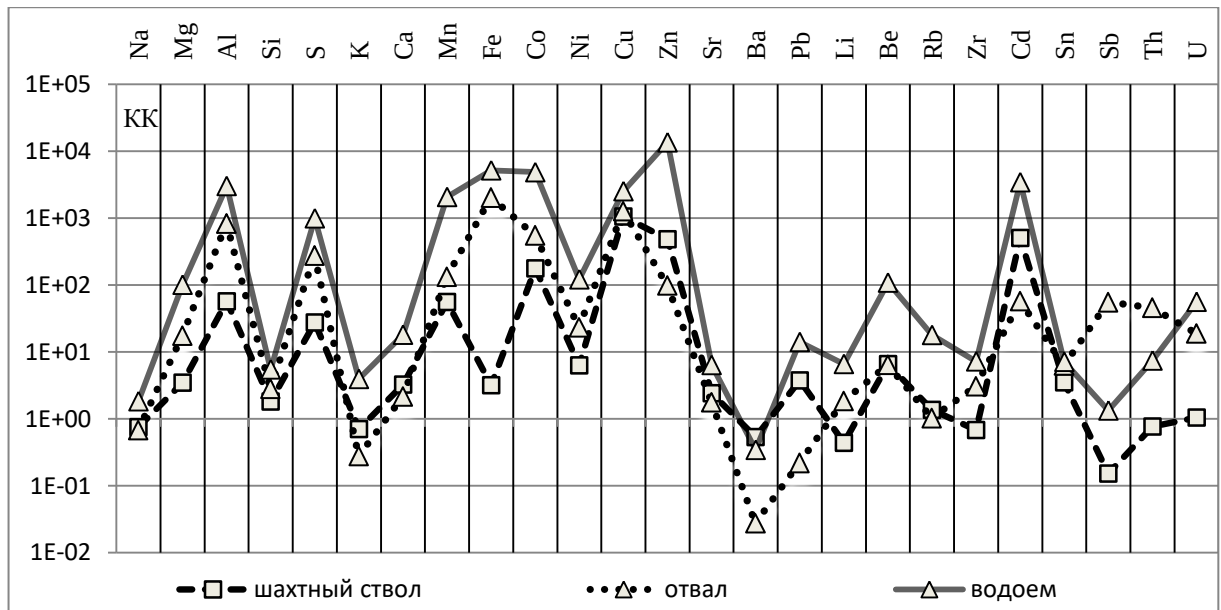


Рисунок 4.7 – Геохимический спектр макро- и микрокомпонентов в водных объектах Левихинского рудника (кларки концентраций)

4.2 Гидрогеохимия процесса

Закономерности формирования кислых шахтных вод. Формирование кислых шахтных вод связано с растворением сульфидных минералов, находящихся в зоне оруденения. Окисление пирита представляет собой важный процесс в геохимических циклах серы и железа. Начальный шаг – это окисление сульфида кислородом, которое начинается при свободном доступе кислорода в результате понижения уровня подземных вод в процессе осушения пород и протекает в соответствии со следующими известными реакциями [Смирнов, 1951; Nordstrom, Alpers, 1999; Appelo, Postma, 2005; Яхонтова, Зверева, 2007]



Процесс окисления сульфидов (степень окисления серы – 2-) до сульфатов (степень окисления серы – 6+) протекает стадийно с образованием различных промежуточных соединений серы с различными промежуточными степенями её окисления – сульфиты, тиосульфаты, политионаты и др. Данный процесс может растягиваться на десятки суток и даже на месяцы, однако при реальных

Таблица 4.3 – Характеристика химического состава подземных вод Левихинского рудника на этапе отработки и после затопления

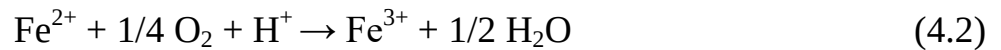
Показатели	ПДК _{рх} *	Средние содержания в подземных водах **	Этап, объект, дата			
			отработка	затопление		
				водоем - провал (15.09.2014)	шахтный ствол (15.07.2013)	отвал (21.07.2017)
pH	6.0-9.0	6.88	2.35 (2.10-2.75)	3.18	3.90	2.48
ΣМ	1	0.231	11.6 (7.1-24.8)	14.5	0.68	6.1
SO ₄ ²⁻	100	13.0	5 970 (816-13785)	9 954	400	3 671
Cl ⁻	300	13.3	31 (0-202)	28	36	41
Na ⁺	120	16.1	13 (7-39.8)	28	11	12
K ⁺	-	3.02	1	6	2	4
Ca ²⁺	180	26.7	260 (71-415)	423	71	55
Mg ²⁺	40	8.67	340 (35-856)	703	27	145
Al ³⁺	0.04	0.202	375 (20-806)	603	11	157
Cu ²⁺	0.001	0.00429	154 (109-453)	11	5	6
Zn ²⁺	0.01	0.0364	317 (119-556)	323	17	4
Fe _{общ}	0.1	0.469	730 (210-3 242)	1 373	2	1023
Mn ²⁺	0.01	0.0573	47 (31-110)	94	3	8
Ni ²⁺	0.01	0.00411	0.2 (0.13-0.29)	0.5	0.03	0.1
Co ²⁺	0.01	0.00037	0.2	1.5	0.07	0.2
Cd ²⁺	0.005	0.00015	0.8 (0.7-1.0)	0.3	0.08	0.01
As ³⁺	0.05	0.00246	0.1	<по	<по	0.44
РЗЭ	-	нс	6,1	8,9	0,28	0,51

Примечания. Размерности: суммарная минерализация – г/л, остальные компоненты – мг/л; <по – меньше погрешности определения; нс – нет сведений; ΣМ – суммарная минерализация; РЗЭ – сумма редкоземельных элементов; * предельно допустимые концентрации для водоемов рыбохозяйственного значения [Нормативы ..., 2011]; ** [Шварцев, 1998]; *** среднееголетние значения и диапазон их изменений (в скобках), данные института «Унипромедь», [Зотеев и др., 1995; Табаксблат, 1995; Грязнов и др., 1997].

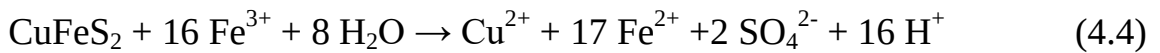
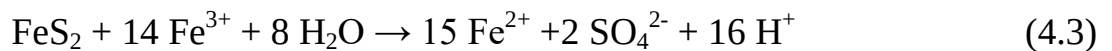
временных характеристиках формирования зоны окисления отрабатываемых месторождений (более 50 лет) можно ориентироваться на то, что соединения серы

с различными промежуточными степенями её окисления (сульфиты, тиосульфаты, дитиониты, политионаты) неустойчивы при 25⁰С и 1 атм [Гаррелс, Крайст, 1968; Перельман, 1972; Драйвер, 1985]. При высоких значениях Eh вся сера будет находиться в форме сульфата, при низких – сульфидов, в случае промежуточных значений Eh важной формой может стать элементарная сера.

Существует много окислителей, которые могут принять электроны от минералов сульфида железа (включая NO₃, Cl₂, и H₂O₂), но самый важный кроме кислорода - это Fe³⁺. Его образование происходит в результате окисления Fe²⁺ в соответствии с реакцией



Для сульфидов типа сфалерита, халькопирита с соотношением металл/сера, равным 1, основным окислителем является Fe³⁺ [Nordstrom, Alpers, 1999; Hammarstrom et al., 2005]. Fe³⁺ окисляет сульфиды железа и меди согласно реакциям



По сравнению с реакцией окисления сульфида кислородом (4.1) эти реакции протекают достаточно быстро при низких pH [Appelo, Postma, 2005]. Тем не менее, именно кислород является необходимым окислителем, либо участвуя непосредственно в окислении пирита по реакции (4.1), либо опосредованно через производство Fe³⁺ по реакции (4.2) (Рисунок 4.8).

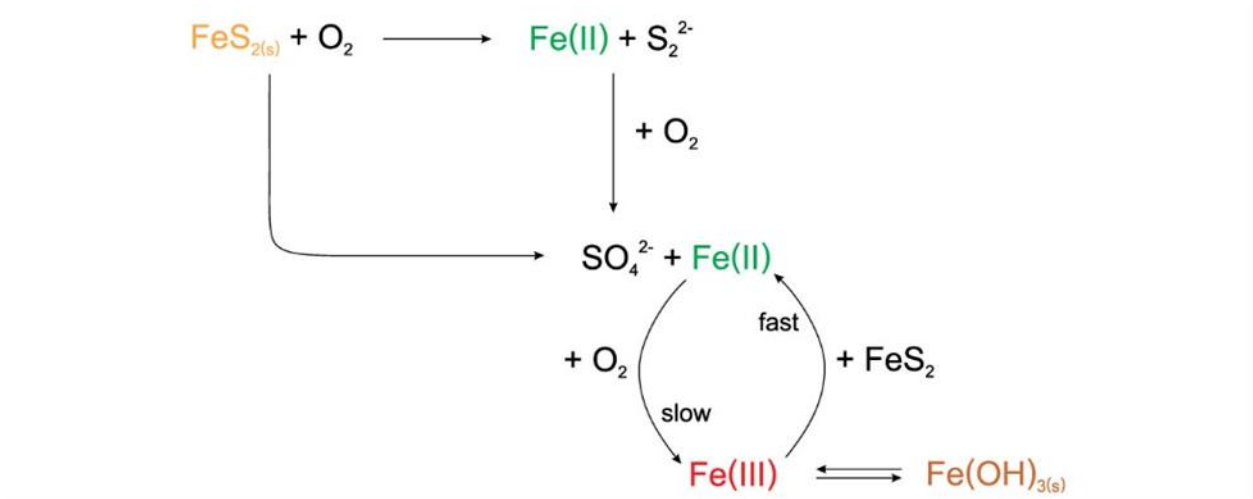
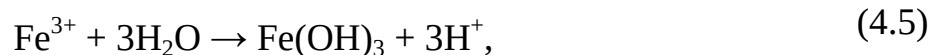


Рисунок 4.8 - Модель окисления пирита [Stumm, Morgan, 1981]

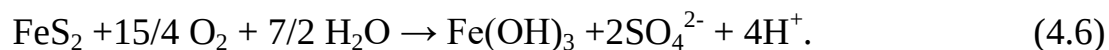
Массовый расход кислорода через зону аэрации оценивается величиной $20 \div 80$ моль $\text{O}_2/\text{м}^2/\text{год}$ [Appelo, Postma, 2005]. Согласно уравнению (4.1) это может приводить к окислению $2/7 \cdot (20 \div 80) = 6 \div 20$ моль $\text{FeS}_2/\text{м}^2/\text{год}$. При этом если отсутствуют органические вещества, на окисление которых потребляется кислород, глубина его проникновения может достигать десятков метров. Диффузионный перенос обеспечивает практически постоянное поступление кислорода в зону аэрации и окисление сульфидов, снижение его концентрации с глубиной происходит по экспоненциальной зависимости [Румынин, 2011].

Конвективный приток кислорода обычно играет несущественную роль, поскольку происходит в течение нескольких суток после снеготаяния или выпадения атмосферных осадков. Значимость конвективного переноса кислорода возрастает при появлении температурного градиента [Blowes et al., 2003; Pearce, Barteaux, 2017].

При повышении pH происходит осаждение гидроксида железа



поэтому результирующий процесс окисления пирита, описываемый уравнениями (4.1), (4.2) и (4.5), может быть представлен как



Окисление пирита в водных растворах является объектом обширных исследований не только в геохимии и в образовании кислых шахтных вод, но и в экстрактивной металлургии (например, выделении золота из упорных руд), переработке угля. Термодинамические расчеты показали, что возможные реакции окисления пирита являются метастабильными, так как не могут быть осуществлены в пределах электрохимической устойчивости воды. При достаточном количестве кислорода в растворе основным продуктом окисления пирита является сульфат-ион. На свежееобнаженной поверхности пирита формируется пленка продуктов окисления, состоящая из внутреннего плотного слоя сульфидокарбоната или сульфидогидрата и наружного пористого слоя $\text{Fe}(\text{OH})_3$, которая затрудняет доступ электролита к поверхности FeS_2 . [Appelo, Postma, 2005]. Установлено, что при pH 1,5-1,7 начинается интенсивное растворение этой пленки [Соболев, 2004].

Выветривание пирита – активный процесс производства кислоты в природных условиях. В случае, если отсутствуют нейтрализующие породы, pH испаряющихся шахтных вод может достигать отрицательных значений, как это было зафиксировано в штольне шахты Iron Mountain (США) [Nordstrom, Alpers, 1999]. Для протекания процесса сернокислотного выщелачивания достаточно наличия в породе 1–2% пирита, доступного для воды и кислорода.

Кинетика процесса окисления сульфидов. Кинетика реакции окисления сульфидов описывается эмпирическими формулами, в которых скорость реакции зависит от активности кислорода и ионов водорода, а также удельной поверхности зерен сульфида [Williamson, Rimstidt, 1994; Акинфиев и др., 2001; Лехов, 2010; Румынин, 2011]. Диапазон изменения скорости растворения сульфидов (r , $\text{мол/м}^2/\text{с}$) достаточно широк: $r = n \cdot 10^{-9} \div n \cdot 10^{-11}$. Изучение кинетики растворения наиболее распространенных медных и цинковых минералов показало, что в процессе окисления сульфидов могут формироваться промежуточные продукты: при растворении халькопирита и сфалерита это

элементная сера, халькозина - ковеллин и сера, которые образуются на поверхности минерала и создают диффузионное ограничение [Халезов, 2009].

Расход поступления продуктов окисления пирита в раствор (мол/л/с) зависит от поверхности взаимодействия. Известно, что чем меньше размеры кристаллов и больше поверхность окисления, тем быстрее происходит формирование кислых вод, поэтому горные породы, которые содержат пирит фрамбоидальной формы, состоящий из кристаллов с очень высокой удельную поверхность, производят кислоту гораздо более высокими темпами, чем породы, содержащие зерна пирита или марказита большего размера. Химическое выветривание во влажном воздухе приводит к возникновению трещин внутри кристалла, что увеличивает поверхность взаимодействия, подвергающуюся окислению. Причиной этого является то, что пирит имеет молярный объем $23,9 \text{ см}^3$, что гораздо меньше, чем у мелантерита – $146,5 \text{ см}^3$, поэтому, когда в результате окисления пирита возникает мелантерит или другие кристаллогидраты сульфатов, их минералы в трещинах работают как клинья, разрушающие кристалл пирита, а это приводит к увеличению площади поверхности, где протекает окисление. Таким образом, изменения площади открытой поверхности взаимодействия, которая может отличаться на много порядков, являются гораздо более важным фактором в контроле скорости окисления, чем состав или кристаллическая структура, которые вызывают изменения скорости окисления всего на 1 порядок [Williamson, Rimstidt, 1994]. Именно поэтому нарушение сплошности пород при отработке способствует активизации процесса окисления сульфидных минералов.

Бактерии. Диапазон Eh-pH условий, в которых в природных водах могут существовать бактерии, очень широк (Рисунок 4.9). Скорость окисления железа в присутствии бактерий может возрасть в миллион раз по сравнению с абиотическим окислением. Роль микроорганизмов двоякая: ускоряют окисление сульфидов и железа, что приводит к формированию кислых шахтных вод; но также способствуют эффективному очищению загрязненных вод.

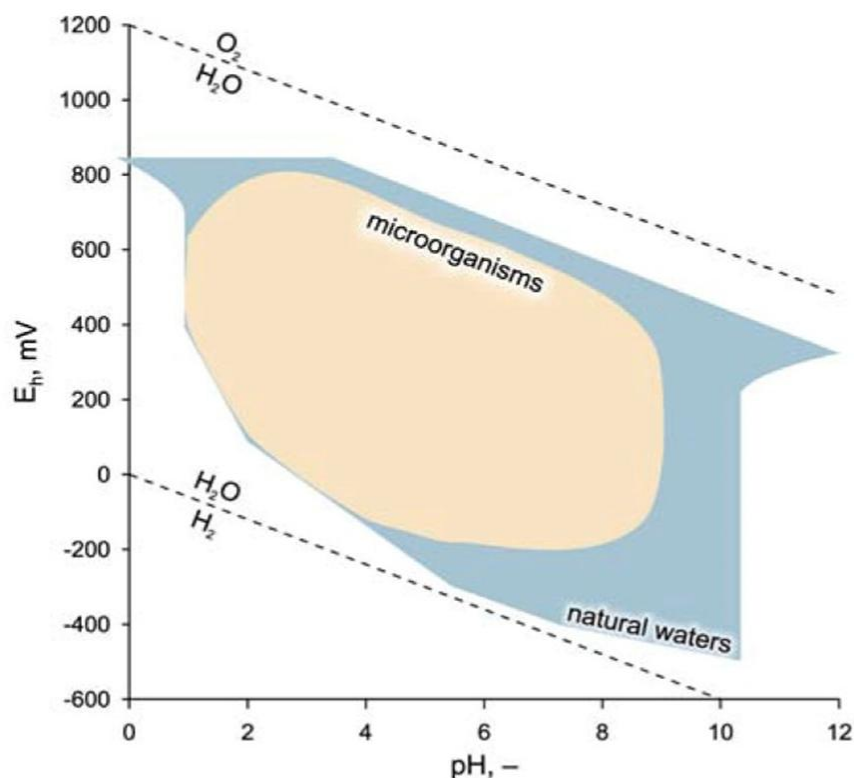


Рисунок 4.9 - Область природных Eh – pH условий, в том числе в шахтных водах, и область предпочтительного нахождения в них микроорганизмов [Wolkersdorfer, 2006]

Микроорганизмы Th. Ferrooxidans способны окислять в присутствии кислорода не только ионы двухвалентного железа, но также серу [Халезов, 2009]. При наличии микроорганизмов в количестве 10^7 - 10^8 клеток/см³ скорость растворения минералов возрастает в среднем в 2 раза по сравнению с растворением халькопирита только в присутствии ионов Fe^{3+} (до 0,1-0,2 моль/см²/с). Установлено, что в тех опытах, в которых содержание микроорганизмов спонтанно повышалось до 10^9 клеток/см³, скорости растворения увеличивались в 10 и даже в 50 раз

Обычно упоминаются два типа бактерий, ответственных за формирование кислых дренажных вод: *Thiobacillus ferrooxidans* и *Thiobacillus thiooxidans*. В новой классификации (основанной на генетическом анализе) они получили названия

Acidithiobacillus ferrooxidans и *Acidithiobacillus thiooxidans*, подчеркивающие принадлежность к группе микроорганизмов, предпочитающих pH от 0 до 5 (Таблица 4.4).

Вторичные минералы. В открытых горных выработках, в зонах обрушения, в отвалах образуется зона окисления, здесь основные минералы колчеданных месторождений (пирит, халькопирит, сфалерит, марказит) неустойчивы, происходит формирование и накопление водорастворимых вторичных минералов [Nordstrom, Alpers, 1999; Blowes et al., 2003; Hammarstrom et al., 2005; Белогуб, 2009] или неосульфатов [Емлин, 1991]. Процессы окисления, гидролиза, испарения приводят к формированию ряда сульфатных солей, которые включают продукты выветривания сульфидов (Рисунок 4.10, Таблица 4.5).

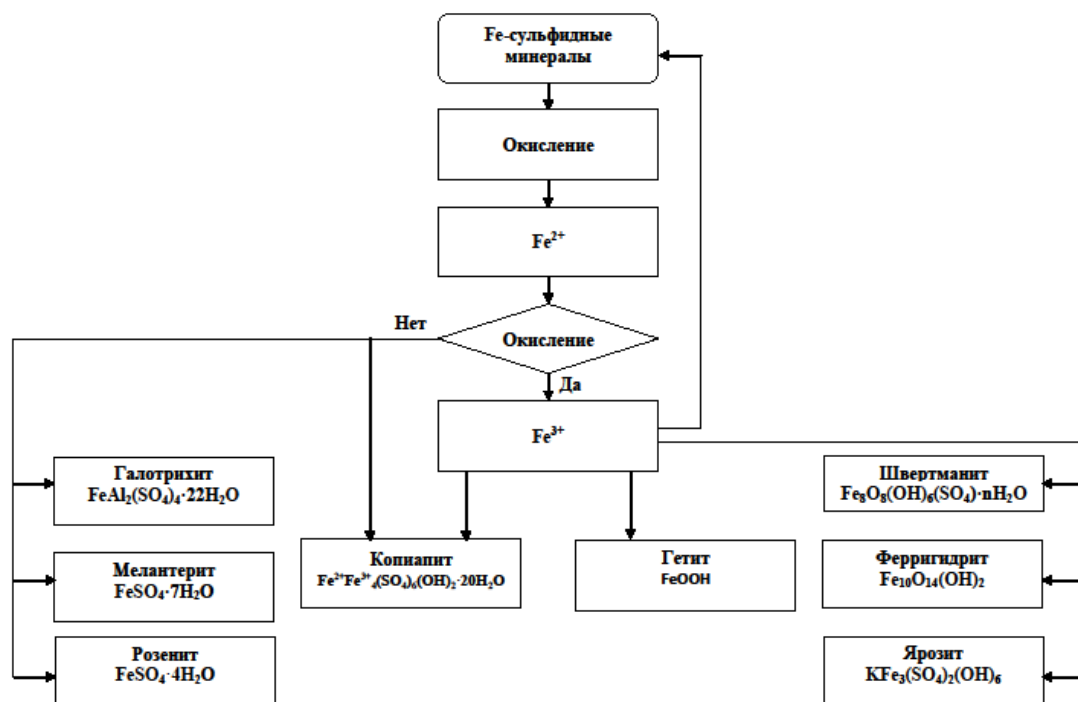


Рисунок 4.10 – Схематическое представление процесса формирования вторичных минералов железа (с использованием материалов [Hammarstrom et al., 2005])

Таблица 4.4 – Ацидофильные прокариотические микроорганизмы, связанные с шахтными водами [Hallberg, Johnson, 2005]. Meso: мезофилы $T < 40^{\circ}\text{C}$, Mod Thermo: умеренные термофилы, $T = 40\div 60^{\circ}\text{C}$, ExtThermo: экстремальные термофилы ($T > 60^{\circ}\text{C}$)

Mineral-degrading Acidophiles	Thermal classification	Phylogenetic Affiliation
Iron-oxidisers		
<i>Leptospirillum ferrooxidans</i>	Meso	Nitrospira
<i>L. ferriphilum</i>	Meso	Nitrospira
<i>L. thermoferrooxidans</i>	Mod Thermo	Nitrospira
<i>“Thiobacillus ferrooxidans” m-1</i>	Meso	β -Proteobacteria
<i>“Ferrimicrobium acidiphilum”</i>	Meso	Actinobacteria
<i>Ferroplasma acidiphilum</i>	Meso	Thermoplasmatales
<i>“Fp. acidarmanus”</i>	Meso	Thermoplasmatales
Sulphur-oxidisers		
<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	Meso	β/γ -Proteobacteria
<i>At. caldus</i>	Mod Thermo	β/γ -Proteobacteria
<i>Thiomonas cuprina</i>	Meso	β -Proteobacteria
<i>Hydrogenobaculum acidophilum</i>	Mod Thermo	Aquificales ¹
Iron- and sulphur-oxidisers		
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Meso	β/γ -Proteobacteria
Iron-reducers		
<i>Acidiphilium spp.</i>	Meso	α -Proteobacteria
Iron-oxidisers/reducers		
<i>Acidimicrobium ferrooxidans</i>	Meso	Actinobacteria
Iron-oxidisers/reducers and sulphur-oxidisers		
<i>Sulfobacillus spp.</i>	Meso Mod Thermo	Firmicutes
Heterotrophic acidophiles (non mineral-degrading)		
<i>Acidocella spp.</i>	Meso	α -Proteobacteria
<i>Acidisphaera rubrifaciens</i>	Meso	α -Proteobacteria
<i>Acidobacterium capsulatum</i>	Meso	Acidobacterium
<i>Acidomonas methanolica</i>	Meso	α -Proteobacteria
<i>Alicyclobacillus spp.</i>	Meso	Firmicutes
<i>Picrophilus spp.</i>	Mod Thermo	Thermoplasmatales
<i>Thermoplasma spp.</i>	Mod Thermo	Thermoplasmatales

Таблица 4.5 – Вторичные минералы, формирующиеся в зоне окисления колчеданных месторождений - кристаллогидраты сульфатных солей. Составлена с использованием материалов [Емлин, 1991; Alpers, Nordstrom, 1991; Hammarstrom et al., 2005; Белогуб и др., 2007]

Кристаллическая система	Группа сульфатов		Общая формула	Катионы
Monoclinic	Melanterite		$M^{2+}SO_4 \cdot 7H_2O$	$M = Co^{2+}, Cu^{2+}, Fe^{2+}, Mn^{2+}, Zn^{2+}$
Orthorhombic	Epsomite		$M^{2+}SO_4 \cdot 7H_2O$	$M = Mg^{2+}, Zn^{2+}, Ni^{2+}$
Monoclinic	Hexahydrite		$M^{2+}SO_4 \cdot 6H_2O$	$M = Co^{2+}, Cu^{2+}, Fe^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+}, Ni^{2+}, Zn^{2+}$
Triclinic	Chalcantite		$M^{2+}SO_4 \cdot 5H_2O$	$M = Cu^{2+}, Fe^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+}$
Monoclinic	Rozenite		$M^{2+}SO_4 \cdot 4H_2O$	$M = Co^{2+}, Cd^{2+}, Fe^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+}, Ni^{2+}, Zn^{2+}$
Monoclinic	Halotrichite		$AB_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$	$A = Fe^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+}, Ni^{2+}, Zn^{2+}$ $B = Al^{3+}, Cr^{3+}, Fe^{3+}$
Triclinic	Copiapite	mixed-valence	$A^{2+}Fe^{3+}_4(SO_4)_6(OH)_2 \cdot 18-20H_2O$	$A = Ca^{2+}, Cu^{2+}, Fe^{2+}, Mg^{2+}, Zn^{2+}$
		trivalent	$B_{2/3}^{3+}Fe^{3+}_4(SO_4)_6(OH)_2 \cdot 20H_2O$	$B = Al^{3+}, Fe^{3+}$
Iron hydroxysulfate minerals	Schwertmannite		$Fe^{3+}_{16}O_{16}(OH)_{12}(SO_4)_2$	Fe^{3+}
	Jarosite		$KFe^{3+}_3(SO_4)_2(OH)_6$	Fe^{3+}
Secondary Al sulfates	Alunogen		$Al_2(SO_4)_3 \cdot 17H_2O$	Al^{3+}
	Basaluminite		$Al_2(SO_4)(OH)_4 \cdot 7H_2O$	Al^{3+}

Они могут содержать как двухвалентные катионы (общая формула $M^{2+}SO_4 \cdot nH_2O$, где $M = Fe^{2+}, Mg, Zn, Ca, Cu$), так и комбинацию двух-трехвалентных катионов (общая формула $A^{2+}Fe^{3+}_4(SO_4)_6(OH)_2 \cdot 18-20H_2O$, где $A=Ca, Cu, Fe^{2+}, Mg, Zn$). Основными из них являются минералы, содержащие железо (такие как ярозит $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$, кокимбит $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$), а также семиводные сульфаты, аналогичные мелантериту, но с переменным соотношением четырех главных металлов – железа, меди, цинка, магния: это собственно мелантерит ($Fe(SO_4) \cdot 7H_2O$), бутит ($Cu(SO_4) \cdot 7H_2O$), госларит ($Zn(SO_4) \cdot 7H_2O$), эпсомит ($Mg(SO_4) \cdot 7H_2O$). Повышенной растворимостью характеризуются сульфаты из групп мелантерита, розенита, эпсомита,

галотрихита, копиапита [Емлин, 1991; Hammarstrom et al., 2005; Белогуб и др., 2007].

Большое количество водорастворимых сульфатов изучено на сульфидных месторождениях Урала, в частности, значительная часть запасов меди на Блявинском месторождении связана с водорастворимыми сульфатами Белогуб и др., 2007].

В зоне окисления перенос элементов и формирование гипергенных профилей происходит в результате фильтрации воды под действием сил гравитации. Однако только этим процессом нельзя объяснить геохимические ореолы рассеяния. Возможным механизмом их образования является капиллярный подъем растворов и их испарение, а также движение заряженных частиц под действием электрических сил [Белогуб, 2009]. Лабораторными экспериментами установлено, что образование вторичных сульфатов металлов может происходить при прохождении раствора по капиллярам и порам в породе, содержащей 10% сульфидов [Михайлов и др., 2016].

Известно, что на интенсивность и скорость протекания реакций большое влияние оказывает температура. Так, растворимость мелантерита при понижении температуры от 50°C до 0°C падает почти в 6 раз (моделирование с использованием Visual MINTEQ) (Рисунок 4.11). Формирование кислых вод и выпадение в осадок мелантерита может происходить при испарении и соответствующем концентрировании раствора, а также в результате снижения температуры раствора при поступлении более теплых инфильтрующихся вод вглубь массива породы.

Процессы вторичного минералообразования активно протекают и в условиях холодного климата, в том числе при отрицательных среднегодовых температурах. На отвалах и хвостохранилищах отработанных сульфидных месторождений проводилось изучение закономерностей изменения по глубине физико-химических показателей пород в условиях холодного климата на северо-востоке США (Elizabeth Mine, Strafford, Vermont [Hammarstrom et al., 2005]), в

Канаде (Heath Steele mine, Newcastle, New Brunswick [Blowes et al., 1992], Sherritt-Gordon Mine, Winnipeg [Moncur, 2015]).

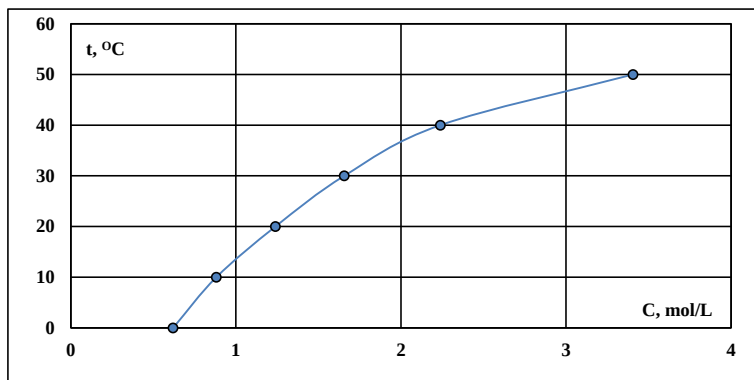


Рисунок 4.11 – Зависимость растворимости мелантарита от температуры

Поровые воды ненасыщенной зоны в отвалах и шламонакопителях месторождения Sherritt-Gordon локально содержат до 280 г/л SO_4 , 129 г/л Fe, 55 г/л Zn, 7,2 г/л Al, 1,6 г/л Cu, 0,02 г/л Ni, 0,11 г/л Co, 0,003 г/л Cr, 0,01 г/л Cd и являются одними из самых высоких задокументированных значений в мире [Moncur et al., 2005]. Отмечается обогащение пород минералами Fe (II) -сульфата (мелантерит $[\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}]$ и розенита $[\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$), а также уменьшение пористости, связанной с процессами цементации вторичных минералов [Moncur, 2015]. Стадии окисления сульфидов и формирование зональности в толще пород имеют различную продолжительность: "самый ранний" и "ранний" этапы продолжаются в течение нескольких месяцев или нескольких лет, в то время как "зрелый" и "поздний" этапы могут потребовать много веков (Рисунок 4.12).

Для раскрытия механизма формирования кислых вод зоны гипергенеза активно используется термодинамическое геохимическое моделирование [Лехов, Шваров, 2002; Гаськова, 2005; Вишняк, 2005; Бортникова и др., 2006; Семячков и др., 2009; Елохина, Рыженко, 2014; Рыженко и др., 2015; Лиманцева и др., 2015; Алексеева, 2016; Зверева и др., 2016; Appelo, Postma, 1993, 2005; Nordstrom, Alpers, 1999; Merkel et al., 2005; Nordstrom, 2007, 2011, 2012; Pearce et al., 2017].

Так, на примере отработанного Дегтярского медноколчеданного месторождения (Средний Урал) реконструированы условия образования

вторичных сульфатов за счет окисления сульфидов [Елохина и Рыженко, 2014]. При моделировании рассматривалось окисление пирита и халькопирита в системах “сульфиды–порода–вода” и определялось состояние систем при последовательном удалении H_2O из состава системы. Равновесные минеральные ассоциации содержат кировит $((Fe,Mg)SO_4 \cdot 7H_2O)$, алунит $(K(Al_3(SO_4)_2(OH)_6))$, гипс $(CaSO_4 \cdot 2H_2O)$, гематит (Fe_2O_3) , каолинит $(Al_2Si_2O_5(OH)_4)$, кварц (SiO_2) , а также халькозин (Cu_2S) . Минеральная фаза $(Fe,Mg)SO_4 \cdot 7H_2O$ (кировит) устойчива при повышении минерализации водного раствора (благодаря удалению H_2O) до ионной силы $\sim 2\text{--}6$ моль/кг H_2O . Вторичные сульфаты в минеральной ассоциации образуются при смене окислительно-восстановительного потенциала системы с восстановительного на окислительный в поле устойчивости форм $Fe(II)$ при полном “высушивании” раствора (на 90%).

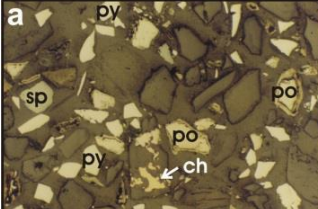
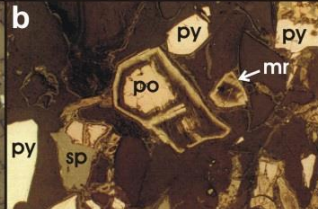
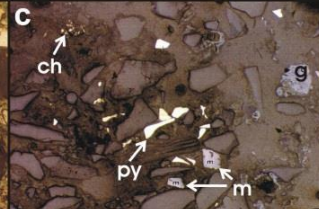
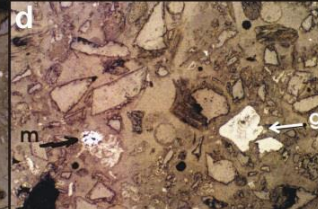
EARLIEST	EARLY	MATURING	LATE
oxidation of Fe sulfides	acceleration	slowing	consumed
native sulfur (from po)	_____	_____	_____
marcasite (from po)	_____	_____	_____
Fe oxyhydroxides (fine-grained)	Fe oxyhydroxides (coarsening + recycling)	goethite	goethite
Fe^{2+} sulfates (mainly from po)	Fe^{2+} sulfates $\rightarrow Fe^{2+} - Fe^{3+}$	Fe^{3+} sulfates	_____
_____	jarosite (K ⁺ mainly from biotite)	jarosite	jarosite
po + py	py > po	py	_____
a	b	c	d
			

Рисунок 4.12 – Концептуальная модель стадийности процесса формирования зоны окисления в отходах добычи [Moncur, 2015]. po – пирротин, py – пирит, sp – сфалерти, ch – халькопирит

4.3 Особенности формирования гидрохимического режима в районе Левихинского рудника

Геохимический тип Левихинских месторождений – медно-цинковый. Минералогический состав руд: пирит, халькопирит, сфалерит, борнит, блеклые руды, пирротин, магнетит, галенит, халькозин, ковеллин, самородное золото. Особенность Левихинских месторождений – большое количество рудных тел (около 800, отработано около 100) и обилие вкрапленных руд, которые окружают тела массивного колчедана. Размеры рудных тел обычно невелики, длина их редко превышает 200 м, мощность от 5-10 м до 50 м, протяженность по падению 150-200м. Содержание меди в сульфидных рудах колеблется в значительных пределах, начиная от почти безмедистых серных руд (Левиха-Х) до руд с содержанием меди 10-12% (бывшая Левиха-II). Содержание меди во вкрапленных рудах не превышает 1.5%.

По содержанию попутных компонентов руды являются комплексными, содержащими селен, теллур, индий, золото, серебро, галлий, кадмий, германий, мышьяк и другие элементы [Медноколчеданные..., 1988]. Основные типы рудовмещающих пород – диабазы (5%), альбитофиры (10%), порфиристы (10%), кварц-серицитовые и кварц-хлоритовые сланцы (75%). Породообразующие минералы представлены плагиоклазом, альбитом, хлоритом, серицитом, кварцем.

Шахтный водоотлив формировался, в основном, за счет инфильтрации атмосферных осадков, которые проникали в горные выработки в местах выхода коренных пород на поверхность, по зонам обрушения, а также через многочисленные заброшенные разведочные скважины, пробуренные в пределах рудного поля. Наиболее активно инфильтрация атмосферных осадков происходила в пределах зон сдвижения и обрушения, где в результате вертикальных подвижек отмечается нарушение сплошности пород (см. раздел 3.6). Профильтровавшиеся осадки по трещинам и приконтактовым зонам поступали в горные выработки в виде рассредоточенного капежа и реже струйчатых выходов.

Химический состав подземных вод верхней трещиноватой зоны выветривания по данным исследований 1960-х годов гидрокарбонатный кальциево-магниевый с минерализацией до 0,3 г/л [Гидрогеология СССР, 1972].

На глубоких горизонтах в зоне затрудненного водообмена были развиты высокоминерализованные сульфатные воды с очень кислой реакцией ($pH = 2.5$) и повышенным содержанием меди, цинка, железа, алюминия и других микрокомпонентов. Было установлено, что содержание компонентов увеличивается как в зависимости от продолжительности эксплуатации горных выработок, так и от глубины отработки. Наиболее высокая минерализация шахтных вод в 60-е годы наблюдалась по шахте Левиха XII, где она достигала 32-36 г/л (Таблица 4.6).

Таблица 4.6- Химический состав шахтных вод Левихинского медноколчеданного месторождения при эксплуатации [Гидрогеология СССР, 1972]

Наименование шахт и горизонтов	Сухой остаток, г/л	Химические компоненты, мг/л								
		Na+K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Al	SO ₄	Cl
Левиха VII, горизонт 85 м	1.2	-	84	38	86	125	-	-	816	55
Левиха XII, горизонт 145 м	7.1	-	415	353	546	133	-	294	5293	34
Левиха XII, горизонт 205 м	24.8	-	384	856	3516	214	-	1805	13785	202
Левиха XII, горизонт 205 м	36	1045	938	735	4688	2548	1177	-	23411	232

Примечания. – нет данных.

Температурный режим подземных вод в процессе отработки был довольно постоянный в течение года. Температура подземных вод глубоких горизонтов колебалась в пределах 4-5⁰С. Температура верхней части водоносного горизонта до глубины 10-15 м полностью зависит от температуры воздуха [Деркач, 1957ф]. В пределах зон окисления сульфидов температура шахтных вод повышается до 15-20⁰С [Вострокнутов, 1988ф].

На момент консервации рудника глубина вскрытия месторождения составляла 618 м, добычные работы велись на горизонтах 405 м (месторождения

Левиха-ХІ, -ХІІ) и 618 м (месторождение Левиха-ХІІІ). Водоотлив шахтных вод Левихинского рудника производился через ствол шахты «Центральная», который по горизонту 285 м сбит со всеми месторождениями рудного поля.

При отработке месторождения воздействие на окружающую среду до создания шламохранилища в 1959 г. в первую очередь было связано со сбросом неочищенных шахтных вод на рельеф в болото Пороховое, расположенное на северо-восток от шахтного поля. Эта территория до сих пор не вернулась в исходное состояние (Рисунок 2.8). Гидрохимическую и геоэкологическую обстановку в настоящее время в районе Левихинского рудника определяют несколько объектов: затопленные шахтные стволы, затопленные карьеры, зона сосредоточенной разгрузки шахтных вод (техногенный водоем в провале), отвалы, содержащих сульфиды и тяжелые металлы, подотвальные воды, пруд-накопитель, сброс с пруда в р. Левиха и далее в р. Тагил, разгрузка поверхностных и подземных вод в р. Тагил с площади водосбора.

На территории Левихинского рудного поля расположено 11 отвалов общей площадью 0,4 км² объемом 3,5 млн м³ [Мормиль и др., 2002]. Самый большой из них находится в южной части возле шахты Левиха-ХІІ, имеет размеры 500*350 м. Отвалы сложены пустыми вмещающими породами, содержащими вкрапленные сульфиды (преимущественно пирит) и вскрышными породами, представленными рыхлыми покровными отложениями из карьеров [Мормиль и др., 2002; Вишняк, 2005ф]. В отвале преобладает дресвяно-щебнистая фракция. Среднегодовой расход подотвальных вод составляет 1,1-1,3 л/с.

Основным участком выхода подземных вод на поверхность с апреля 2007 года является провал (зона обрушения) в районе шахты Левиха-ІІ, где в результате сосредоточенной разгрузки подземных вод сформировался техногенный водоем глубиной порядка 20 м объемом порядка 45000 м³. Шахтные воды из провала перекачиваются на станцию нейтрализации, после обработки известковым молоком эти воды поступают в осветлительный пруд и далее самотеком по старому руслу р. Левихи попадают в р. Тагил (долина р. Тагил находится в 4 км к востоку от рудника). Инструментальный учет расхода

откачиваемой из провала воды не ведется, примерный объем оценивается по производительности насосного оборудования. Расход откачки варьирует от 15 л/с в межень до 30 л/с в паводок (в среднегодовом разрезе около 20 л/с, что в 2 раза меньше величины шахтного водоотлива при отработке).

Опробование и химические анализы. Состав подземных вод в районе Левихинского рудника анализируется на основе массива данных мониторинга за период с начала 1950-х годов до настоящего времени.

С момента выхода подземных вод на поверхность в апреле 2007 г. организация, осуществляющая обезвреживание шахтных вод, проводит опробование воды ежесуточно. Определяются pH, Cu^{2+} , Zn^{2+} , $\text{Fe}_{\text{общ}}$, Mn^{2+} , As^{2+} , SO_4^{2-} , суммарная минерализация, взвешенные вещества. Точки отбора проб: шахтные воды, пруд-осветлитель, сбросной канал, река Тагил выше и ниже сброса.

Кроме того, начиная с 2007 г. нами регулярно выполняются расширенные лабораторные исследования макро- и микрокомпонентного состава проб воды (с привлечением химико-аналитического центра Института промышленной экологии УрО РАН и аналитического испытательного центра Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН). Определяется содержание 70 компонентов атомно-эмиссионным и масс-спектральным методами с индуктивно-связанной плазмой ИСП-МС (ICP-MS) на приборах iCAP-6500, Thermo Scientific и X-7, Thermo Elemental (США). ИСП-МС (ICP-MS, Inductively coupled plasma mass spectrometry) - это разновидность масс-спектрометрии, отличающаяся высокой чувствительностью и способностью определять ряд металлов и нескольких неметаллов в концентрациях до $10^{-10}\%$, т.е. одну частицу из 10^{12} . Метод основан на использовании индуктивно-связанной плазмы в качестве источника ионов и масс-спектрометра для их разделения и детектирования. Точки отбора проб: шахтные воды (техногенный водоем), подотвальные воды, затопленные шахтные стволы (поинтервальное опробование) (Таблица 4.7).

Таблица 4.7 - Характеристика химико-аналитических исследований на Левихинском рудном поле

Точка отбора	Дата (месяц, год)	Компоненты	Лаборатория	Метод
Провал (техногенный водоем)	2007 – настоящее время, ежедневно	pH, Cu, Zn, Fe _{tot} , Mn, As, SO ₄ , Cl, TDS, взвешенные вещества, нефтепродукты	Государственное казенное учреждение Свердловской области "УралМонацит"	- потенциометрический метод ПНД Ф 14.1:2:3:4. 121-97 (pH)
Пруд-осветлитель				- фотометрический метод с сульфосалициловой кислотой ПНД Ф 14:1:2:4.50-96 (Fe)
Сбросной канал				- гравиметрический метод ФР 1.31.2005.01523 (TDS)
Река Тагил выше сброса				- гравиметрический метод РД 52.24.483-2005 (SO ₄)
Река Тагил ниже сброса				- эмиссионный пламенно-фотометрический метод ПНД Ф 14:1:2:4.138-98 (Na, K)
Провал (техногенный водоем)	02.2008 07.2013 09.2014 11.2016 07.2017	pH, Na, K, Mg, Fe ²⁺ , Fe ³⁺ , Fe _{tot} , NO ₃ , NO ₂ , NH ₄ , SO ₄ , Cl, HCO ₃ ⁺ , pH, TDS, Cu, Zn, Mn, Al, SiO ₂ , цветность,	Институт промэкологии УрО РАН	- фотометрический метод ПНД Ф 14:1:2:4.137-98 (Ca, Mg)
Подотвальные воды	09.2014 07.2017	мутность, окисляемость перманганатная		- метод атомно-абсорбционной спектроскопии ПНД Ф 14:1:2:4.139-98 (кобальта, никеля, меди, цинка, хрома, марганца, железа, серебра, кадмия и свинца)

Продолжение Таблицы 4.6

Точка отбора	Дата (месяц, год)	Компоненты	Лаборатория	Метод
Провал (техногенный водоем)	07.2007 02.2008 07.2010 07.2013 09.2014 11.2016 07.2017	B, Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Sr, Ba, Hg, Pb, Li, Be, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Cs, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Tl, Bi, Th, U	Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН	атомно-эмиссионный и масс-спектральный методы с индуктивно-связанной плазмой
Шахтный ствол Левиха–ХП	02.2008			
Шахтный ствол Левиха–ХІУ, 30, 40, 50 м	02.2008 07.2013			
Шахтный ствол Северная 40, 50 м	07.2013			
Подотвальные воды	09.2014 07.2017			
Зона обрушения юг	09.2014			

На месте определяются температура, Eh, pH. Для контроля степени изменения состава воды по глубине провала пробы отбирались со дна и на поверхности. Для исключения разубоживания опробования проводятся в меженный период.

Отбор проб воды производился в полиэтиленовые бутылки, материал которых не имеет сорбирующих свойств. Предварительно бутылки тщательно очищаются, при отборе проб воды ополаскиваются дважды водой из точки опробования, затем помещаются в темные контейнеры и в охлажденном виде ($\sim +4^{\circ}\text{C}$) в сжатые сроки транспортируются в лабораторию. Верификация аналитических методов и результатов определения химического состава вод проводилась при постоянном жестком внутрилабораторном контроле с использованием единой системы стандартных растворов. Химические анализы проб выполняли по стандартным методикам, внесенным в Государственный реестр методик количественного химического анализа и оценки состояния объектов окружающей среды, и в соответствии с рекомендациями к используемым средствам измерений.

Для обработки полученных данных применялись методы статистического анализа и геохимическое моделирование с использованием программного кода Visual MINTEQ ver. 3.0/3.1. Код построен на основе MINTEQA2, который был разработан Агентством по охране окружающей среды США (US EPA) [Allison et al., 1991]. Visual MINTEQ является вторым (после PHREEQC) наиболее используемым программным кодом для физико-химического моделирования и расчета химических равновесий в растворах. Начиная с 2000 года Visual MINTEQ развивает и поддерживает Йон Петтер Густафссон (Jon Petter Gustafsson, Королевский технический университет, Стокгольм, Швеция).

Закономерности изменения качества подотвальных вод. Отработка месторождений полезных ископаемых приводит к формированию на поверхности отвалов некондиционных руд и вмещающих пород, содержащих сульфидную минерализацию. Механические процессы, сопровождающие процесс добычи, приводят к разрушению, дроблению пород, в результате увеличивается

поверхность взаимодействия пород и агентов выветривания. Атмосферные осадки, обогащенные кислородом, поступают внутрь отвала по всей его поверхности. Благодаря высокой проницаемости пород, слагающих отвал, происходит практически полное поглощение атмосферных осадков, соответственно, величина питания на этих участках в несколько раз больше, чем региональное инфильтрационное питание водоносных горизонтов на ненарушенных территориях. Уплотнение основания отвала способствует формированию водоносного горизонта в теле отвала у его подошвы.

В отвале происходит смена окислительно-восстановительных условий, формируется несколько геохимических барьеров и определенная гидрогеохимическая зональность. Тело отвала расположено выше поверхности земли, температурный градиент между поверхностью отвала и его внутренней частью изменяется в зависимости от сезона и времени суток, это приводит к изменению растворимости минералов, особенно вторичных, в разные периоды года и суток (Рисунок 4.13) . Срок существования отвала исчисляется десятками лет, в течение которых происходит циклический процесс окисления, растворения, осаждения минералов. Это приводит к формированию специфического гидрохимического состава вод, разгружающихся по периметру отвала: они характеризуются низкими значениями pH, имеют повышенную минерализацию, обогащены тяжелыми металлами [Емлин, 1991; Nordstrom, 2011; Amos et al., 2015].

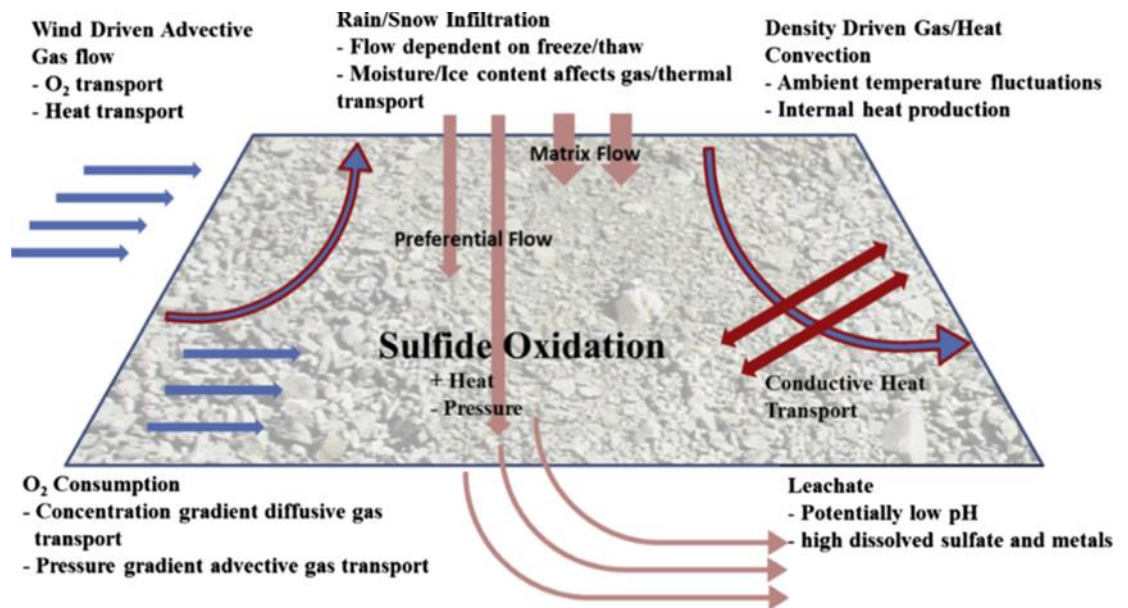


Рисунок 4.13 – Физико-химические процессы в теле отвала [Amos et al., 2015]

В таблице 4.8 приведен компонентный состав подотвальных и дренажных вод Левихинского рудника. В целом подотвальные воды имеют более кислую реакцию, измеренные значения рН составляют около 2 д.ед. Анионный состав их полностью определяется сульфат-ионом, его содержание достигает 51 г/л; среди катионов преобладают железо, алюминий и магний. Содержание металлов в водах очень высокое: 9,5 г/л Fe_{общ}, 2,7 г/л Al³⁺, 581 мг/л Zn²⁺, 479 мг/л Cu²⁺. По сравнению с шахтными водами периода отработки, подвальные воды более минерализованные (минерализация в 3-5 раз больше), концентрации алюминия и железа выше в 7 - 8 раз, меди и цинка в 3-4 раза больше. Учитывая то обстоятельство, что состав пород, участвующих в формировании дренажных и подотвальных вод, одинаковый, можно предположить, что гидрогеохимические процессы формирования дренажных и подотвальных вод имеют принципиальное отличие.

Таблица 4.8 – Основные компоненты дренажных (при водоотливе) и подотвальных вод Левихинского месторождения

Показатели	ПДК _{рх} *	Средние содержания в подземных водах**	Этап, объект, дата				
			отработка	Затопление, подотвальные воды			
			шахтный водоотлив***	16.06.2004 4*	11.09.2014 5*	11.09.2014 6*	11.07.2017 7*
pH	6,0-9,0	6,88	2,35 (2,10-2,75)	1,95	2,04	2,01	2,47
ΣM	1,0	0,231	11,6 (7,1-24,8)	49,6	14,1	57,2	6,1
SO_4^{2-}	100	13,0	5 970 (816-13785)	39 293	10 595	42 842	3 671
Cl^-	300	13,3	31 (0-202)	18,5	нс	11,3	4,8
NO_3^-	40	5,32	нс	0	0	0	17
NO_2^-	0,08	0,10	нс	0	0	0	0
Na^+	120	16,1	13 (7-39,8)	1,2	5,0	1,9	11,5
K^+	-	3,02	1	2,0	1,7	0,1	3,6
Ca^{2+}	180	26,7	260 (71-415)	334	158	199	55
Mg^{2+}	40	8,67	340 (35-856)	750	497	2 230	142
NH_4^+	40	0,37	нс	0	нс	2,1	0,5
Al^{3+}	0,04	0,202	375 (20-806)	нс	526	2747	157
Cu^{2+}	0,001	0,00429	154 (109-453)	561	71	546	71
Zn^{2+}	0,01	0,0364	317 (119-556)	358	79	356	4
$Fe_{общ}$	0,1	0,469	730 (210-3 242)	10606	2195	7460	929
Mn^{2+}	0,01	0,0573	47 (31-110)	443	45	188	8
Ni^{2+}	0,01	0,00411	0,2 (0,13-0,29)	5,28	0,35	1,90	0,10
Co^{2+}	0,01	0,00037	0,2	2,0	0,7	3,2	0,2
Cd^{2+}	0,005	0,00015	0,8 (0,7-1,0)	1,32	0,27	1,40	0,10
As^{3+}	0,05	0,00246	0,1	0,06	0,19	0,72	0,44
РЗЭ	-	нс	6,1	нс	1,53	6,54	0,51

Примечания. Размерности: суммарная минерализация – г/л, остальные компоненты – мг/л; <по – меньше погрешности определения; нс – нет сведений; ΣM – суммарная минерализация; РЗЭ – сумма редкоземельных элементов; * предельно допустимые концентрации для водоемов рыбохозяйственного значения [Нормативы ..., 2011]); ** [Шварцев, 1998]; *** среднесезонные значения и диапазон их изменений (в скобках), данные института «Унипромедь», [Табаксблат, 1995; Зотеев и др., 1995, 2009; Грязнов и др., 1997]; 4* [Вишняк, 2005ф]; 5* юг; 6* юго-восток; 7* $Fe^{2+} = 34$, $Fe^{3+} = 895$, $t = 25^0$, $Eh = 577$.

Отвал представляет собой зону окисления, в его строении по вертикали сверху вниз выделяется несколько подзон: окисления, выщелачивания и вторичного обогащения [Емлин, 1991]. В зоне вторичного обогащения в виде сульфидов накапливаются металлы, вынесенные из верхних горизонтов. Дезинтеграция пород при отсыпке отвала и в процессе его окисления способствует увеличению активной поверхности взаимодействия сульфидов и инфильтрующихся вод. Скорость водообмена невысокая, зависит от ряда факторов, таких как величина осадков, температурный градиент (степень промороженности поверхности), испаряемость, которые изменяются в течение года.

Дренажные воды формируются в пределах воронки депрессии большой площади (обычно несколько десятков квадратных километров), сложившейся при работе водоотлива на больших глубинах (до 600 м), режим водоотлива как правило становится стационарным через 3–5 лет. В составе дренажных вод проявляются интегрально все гидрогеохимические и геомеханические процессы, возникающие при водопонижении: разрушение горных пород при проходке шахтных выработок, поступление обогащенных кислородом инфильтрационных вод в осушенные горные породы, окисление сульфидов, растворение водовмещающих пород.

Особенностью условий формирования химического состава дренажных шахтных вод являются: 1) вертикальный температурный градиент, отражающий увеличение температуры с глубиной; 2) отсутствие зависимости температуры подземных вод от сезонов года; 3) высокие величины инфильтрационного питания и градиента потока (благодаря значительной глубине депрессионной воронки и постоянной откачке подземных вод). Все эти факторы предопределяют высокую скорость массообмена в пределах шахтного поля и, соответственно, более низкие содержания компонентов в шахтных подземных водах при отработке.

Закономерности изменения качества подземных вод в шахтных стволах. В процессе затопления проводились наблюдения за составом воды в стволах шахт

Левиха-ХІІ (южная часть шахтного поля) и Левиха-ХІV (северная часть шахтного поля). в период с июля 2004 г. по декабрь 2005 г.: было отобрано 6 проб [Вишняк, 2005ф]. Анализ состава подземных вод в процессе затопления не выявил каких-либо закономерностей изменения компонентов при подъеме уровня. Несмотря на то, что вода была кислой или слабокислой (рН в процессе подъема уровня варьировал от 3,0 до 5,1), содержание сульфатов не превышало 377 мг/л, железа – 7 мг/л (Рисунок. 4.14).

После завершения процесса заполнения депрессионной воронки нами было выполнено опробование в 2008 г. и в 2013 г., в том числе поинтервальное - на глубинах 30, 40 и 50 м. Во временном разрезе в течение 10 лет также не зафиксировано каких-либо особенностей: рН варьирует от 3,0 до 5,1, содержание сульфатов не превышает 391 мг/л, металлов от 5 до 45 мг/л (Таблица 4.9).

Качество воды в шахтных стволах принципиально отличается от того, которое было при работе шахтного водоотлива, содержание практически всех компонентов на один–два порядка ниже, чем среднееголетние значения в общешахтном водоотливе при отработке. Низкие значения рН свидетельствуют о том, что ведущим процессом формирования состава воды в шахтных стволах по-прежнему является сернокислотное выщелачивание, однако его интенсивность невысока как в процессе затопления, так и после его завершения и формирования установившегося режима фильтрации.

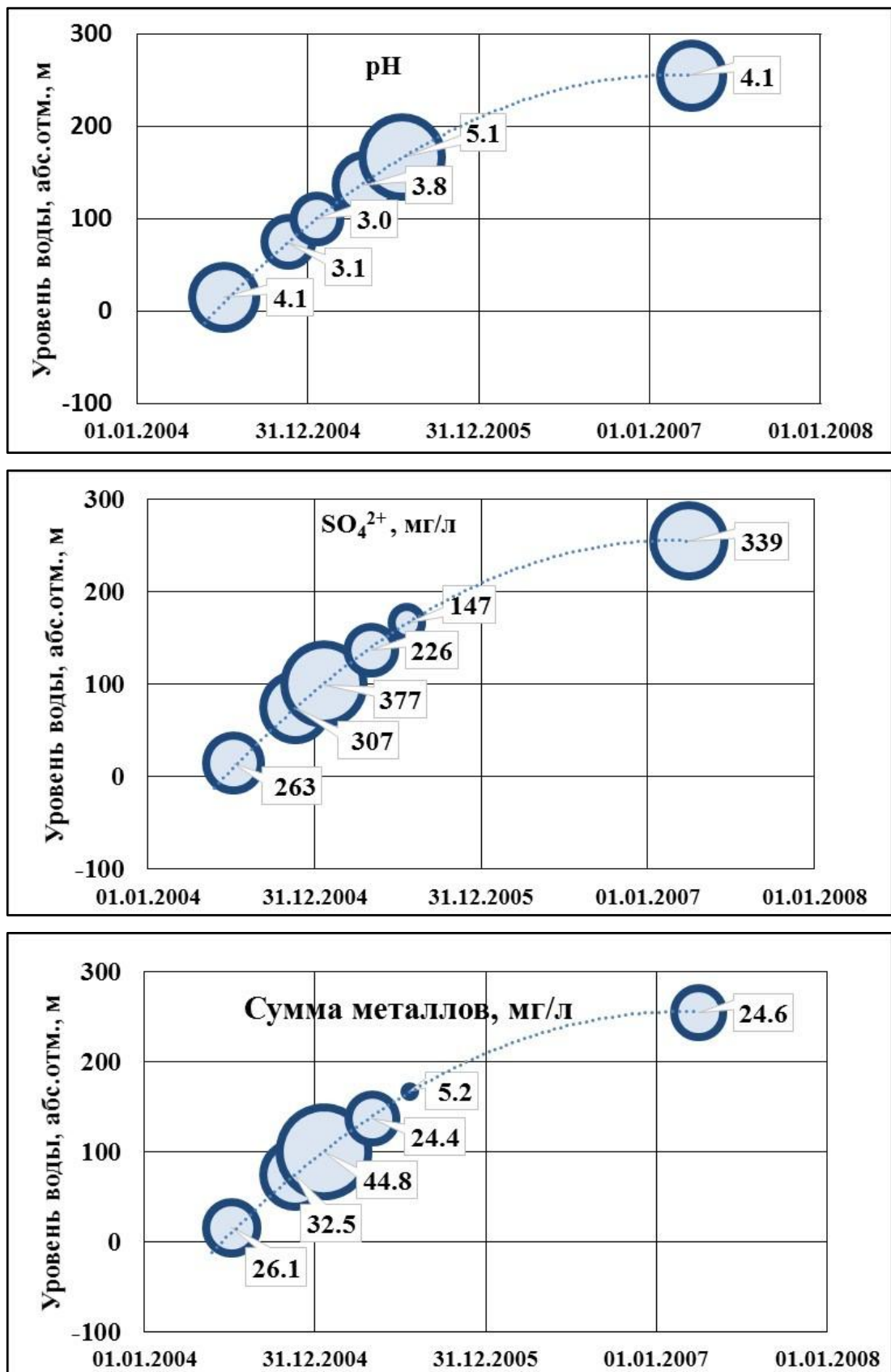


Рисунок 4.14 - Изменение pH, содержания сульфат-иона и суммы металлов в стволе шахты Левиха-XIV в процессе его затопления

Таблица 4.9 – Состав воды в шахтных стволах Левихинского рудника после завершения затопления

Показатели	Шахта, глубина и дата опробования						
	Левиха- XIV	Левиха- XIV, 30 м	Левиха- XIV, 40 м	Левиха- XIV, 50 м	Левиха- XII	Северная, 40 м	Северная, 50 м
	26.02.2008	20.07.2013	20.07.2013	20.07.2013	26.02.2008	21.07.2013	21.07.2013
pH	4.10	3.90	4.02	4.01	5.10	3.10	4.44
Na ⁺	12.0	12.1	11.9	11.8	11.5	13.2	12.3
Mg ²⁺	22	31	31	31	28	27	32
Al ³⁺	2.90	11.36	11.27	11.15	3.97	0.09	0.11
Si	10.9	13.4	13.7	13.6	14.7	6.8	8.2
K ⁺	1.8	2	2	2	4.2	9	6
Ca ²⁺	70.8	88	88	86	42.2	156	167
Mn ²⁺	1.99	3.18	3.14	3.08	1.01	0.268	0.641
Fe	0.98	1.50	2.22	1.35	59.97	0.28	0.59
Co ²⁺	0.053	0.066	0.064	0.063	0.021	0.003	0.010
Ni ²⁺	0.021	0.025	0.025	0.025	0.042	0.008	0.010
Cu ²⁺	2.01	4.55	4.45	4.40	3.60	0.066	0.064
Zn ²⁺	6.27	17.40	17.75	17.77	3.00	1.35	2.86
SO ₄ ²⁻	228	330	339	343	366	369	391
PЗЭ	0,073	0,284	0,285	0,286	0,050	0,004	0,005

На Дегтярском руднике была зафиксирована аналогичная ситуация: вода в затопленных шахтных стволах также имеет более высокие значения pH и характеризуется относительно невысокими (по сравнению с периодом отработки) содержаниями железа, цинка и меди (Таблица 4.10).

Таблица 4.10 - Результаты химических анализов по объектам Дегтярского рудника [Зотеев и др., 1995, 2009; Долматов, 1994; Фирсов и Мартынов, 1995]

Наименование объекта	Дата	pH	Содержание, мг/дм ³			Глубина опробования
			Fe	Cu	Zn	
Водоотлив (шахта “Капитальная № 2”)	1994	2,64	839,8	36,6	344,4	
	19.07.95	2,42	885,4	84,6	376,9	
Шахта “Капитальная № 2” (ствол) в процессе затопления	23.06.97	4,02	189,9	0,28	2,87	184 м
	05.11.97	3,98	397,1	2,34	2,95	122 м
	1998	4,07	110,6	7,16	3,35	91–28 м
	1999	5,48	37,7	5,69	1,35	23–17,4 м
Шахта “Капитальная № 1” (ствол)	26.06.99	6,02	9,2	11,3	0,11	3,6 м
Шахта “Средняя” (ствол)	1999	6,43	4,2	0,35	0,38	11–12 м

Содержание компонентов в шахтных стволах как в процессе затопления, так и после его завершения на 1-2 порядка ниже, чем фиксировались при работе рудника с водоотливом. Поскольку в процессе затопления прекращается доступ кислорода, активного окисления сульфидов больше не происходит. Источником повышенной кислотности может быть растворение вторичных минералов, которые формировались в горных выработках при осушении, однако их количество не столь велико, чтобы приводить к образованию воды такой же степени кислотности и насыщенности металлами, как при отработке.

Таким образом, можно констатировать, что выработанное пространство не является источником кислых вод, разгружающихся на поверхность после затопления рудника.

Закономерности изменения качества подземных вод в провале (зоне сосредоточенной разгрузки). На медноколчеданных рудниках Среднего Урала при подземной добыче как правило используются технологии отработки с обрушением кровли выработанного пространства, что приводит к образованию на поверхности земли провалов глубиной до 15–35 м и более, зон обрушения и сдвижения площадью в десятки и сотни гектаров (Рисунок 2.8, 3.14, 3.15).

После заполнения депрессионной воронки формируются участки сосредоточенной разгрузки подземных вод на поверхности, которые приурочены к провалам в зонах обрушения. Качество подземных вод характеризуется существенно нестационарным гидрохимическим режимом: в первые годы происходит резкий рост концентраций большинства компонентов, затем начинается постепенное снижение показателей, которое может продолжаться десятки лет и более.

На Левихинском руднике содержание большинства показателей химического состава шахтных вод, разгружающихся в провал, до настоящего времени выше, чем при отработке (Таблица 4.11). Состав подземных вод в зоне сосредоточенной разгрузки сульфатный, гидрокарбонат-ион отсутствует, хлор обнаружен в количестве 25-53 мг/л. Содержание азотистых соединений незначительно: нитрат- и нитрит-ионы не более 6 мг/л; аммоний-ион от 2 до 24

мг/л, отмечено однократное повышение аммоний-иона до 265 мг/л (опробование 20.09.2013 г.), которое объясняется тем, что местное население использует территорию для свалки.

Вода стала менее кислой, рН воды выше, чем при отработке, варьирует от 3,1 до 4,1 ед. Температура подземных вод 13-14,5⁰ С, Eh = 255-266 мВ, содержание Fe²⁺ = 1257-1209 мг/л, Fe³⁺ = 70-53 мг/л.

Среди катионов на первом месте либо алюминий, либо магний, либо железо, причем в течение первых месяцев после выхода на поверхность заметную роль в составе воды также играли цинк и марганец (на этапе отработки – цинк и медь) (Таблица 4.12).

Содержание железа снизилось от 73 до 22 ммоль/л, но до сих пор выше, чем было зафиксировано при отработке (13 ммоль/л); такая же ситуация с наличием в воде алюминия (максимальные значения 40 ммоль/л, через 10 лет - 18 ммоль/л, при отработке 14 ммоль/л) и магния (максимальные значения 78 ммоль/л, через 10 лет - 21 ммоль/л, при отработке 14 ммоль/л) (Рисунок. 4.15). Содержание кальция сохраняется практически на одном уровне 10-12 ммоль/л (при отработке 7 ммоль/л). Наиболее значительные изменения характерны для марганца (снизились от 12 до 1-2 ммоль/л, при отработке 1 ммоль/л) и меди (от 2 до 0.2 ммоль/л, при отработке 2 ммоль/л).

Таблица 4.11 - Характеристика химического состава подземных вод Левихинского рудника на этапе отработки и после затопления (t – время после завершения заполнения депрессионной воронки и выхода подземных вод на поверхность, в скобках дата опробования)

Показатели	ПДК _{рх} *	Средние в подземных водах**	Этап, объект, дата			
			отработка	затопление, провал (зона сосредоточенной разгрузки)		
			шахтный водоотлив***	t = 9 мес. (26.02.2008)	t = 90 мес. (15.09.2014)	t = 114 мес. (29.11.2016)
pH	6.0-9.0	6.88	2.35 (2.10-2.75)	3.86	3.18	3.57
ΣM	1	0.231	11.6 (7.1-24.8)	59.5	14.5	14.1
SO ₄ ²⁻	100	13.0	5 970 (816-13785)	25 672	9 954	6 985
NO ₃ ⁻	40	5.32	нс	4.0	0.3	<0.62
Na ⁺	120	16.1	13 (7-39.8)	42	28	24
Ca ²⁺	180	26.7	260 (71-415)	495	423	382
Mg ²⁺	40	8.67	340 (35-856)	1 876	703	587
Al ³⁺	0.04	0.202	375 (20-806)	1 093	603	412
Cu ²⁺	0.001	0.00429	154 (109-453)	62	11	16
Zn ²⁺	0.01	0.0364	317 (119-556)	1 755	323	183
Fe _{общ}	0.1	0.469	730 (210-3 242)	4 112	1 373	1262
Mn ²⁺	0.01	0.0573	47 (31-110)	795	94	70
Ni ²⁺	0.01	0.00411	0.2 (0.13-0.29)	1.3	0.5	0.4
Cd ²⁺	0.005	0.00015	0.8 (0.7-1.0)	3.5	0.3	0.3
As ³⁺	0.05	0.00246	0.1	<по	<по	<по
РЗЭ	-	нс	6.1	15.3	4.9	4.3

Примечания. Размерности: суммарная минерализация – г/л, остальные компоненты – мг/л; <по - меньше погрешности определения; нс – нет сведений; ΣM – суммарная минерализация; РЗЭ – сумма редкоземельных элементов; * предельно допустимые концентрации для водоемов рыбохозяйственного значения [Нормативы ..., 2011]; ** [Шварцев, 1998]; *** среднееголетние значения и диапазон их изменений (в скобках), данные института «Унипромедь», [Табаксблат, 1995; Зотеев и др., 1995, 2009; Грязнов и др., 1997].

Таблица 4.12 - Гидрогеохимические типы подземных вод в нарушенной зоне Левихинского рудника (в период отработки и после затопления)

Этап	Объект		Формула Курлова
Отработка	Шахтный водоотлив		$M_{11.6} \frac{SO_4 99}{Al 33 Mg 23 Fe 21 Ca 10 Zn 8 Cu 4} pH 2.75$
Затопление	Провал	t=9 мес.	$M_{59.5} \frac{SO_4 100}{Mg 29 Fe 27 Al 23 Zn 10 Mn 5 Ca 5} pH 3.86$
		t=90 мес.	$M_{14.5} \frac{SO_4 100}{Al 30 Mg 27 Fe 26 Ca 10 Zn 5} pH 3.18$
		t=114 мес.	$M_{14.1} \frac{SO_4 99}{Mg 28 Al 27 Fe 25 Ca 11} pH 3.57$

Для анализа и выявления основных гидрогеохимических закономерностей удобно использовать безразмерные показатели. В качестве величин, относительно которых нормируются анализируемые показатели, могут использоваться средние содержания в гидросфере (кларковые значения), фоновые показатели, предельно-допустимые значения. Например, коэффициент концентрации $K_c = C_i/C_{фон}$; коэффициент опасности $K_o = C_i/C_{пдк}$ [Галицкая, 2010].

Анализ ситуации, сложившейся в результате затопления, наглядно проводить относительно среднемноголетних значений, которые были зафиксированы при отработке рудника перед остановкой водоотлива (Таблица 4.11). Эти показатели интегрально отражают стационарную гидрогеохимическую ситуацию, в которой происходило формирование состава шахтных вод в течение многих лет, когда проявились все процессы на территории, нарушенной горными работами.

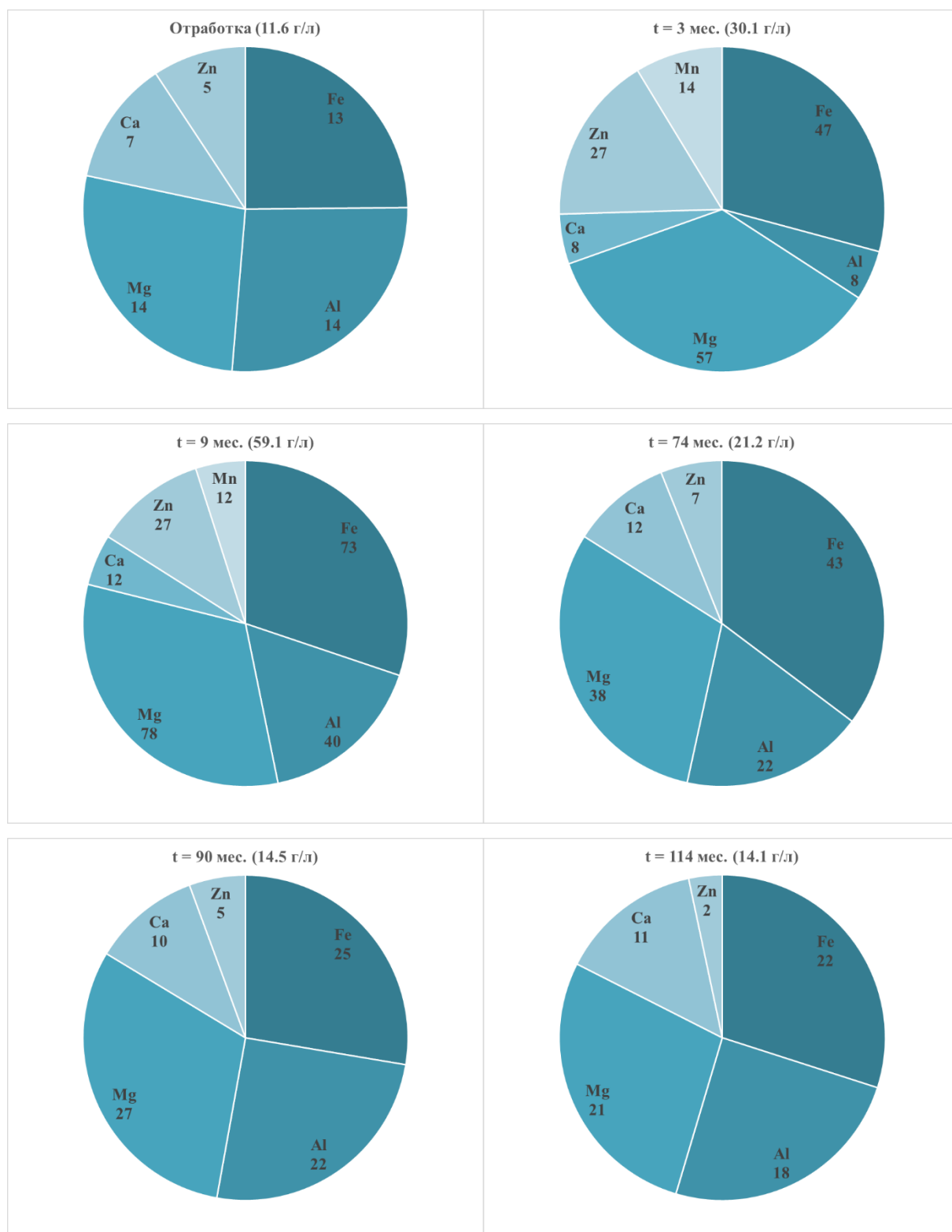


Рисунок 4.15 – Изменение содержания катионов в шахтной воде на период отработки и после завершения затопления ($t = 3, 9, 74, 90$ и 114 месяцев) (ммоль/л). В скобках – суммарная минерализация, г/л

Коэффициент концентрации компонентов по отношению к периоду отработки

$$K_{3/0} = C_3 / C_0,$$

где $K_{3/0}$ – коэффициент концентрации, отношение содержания компонента после затопления (C_3) к его значению при отработке (C_0),

Экстремальные значения коэффициентов концентрации отмечены для марганца: через 4 месяца после заполнения депрессионной воронки $K_{3/0}=21$, для остальных показателей (кроме меди) от 4 до 6. В среднемноголетнем разрезе за весь период наблюдений наиболее высокие значения коэффициентов концентрации зафиксированы для марганца ($K_{3/0}=5.7$) и железа ($K_{3/0}=4.3$); для цинка и сульфат-иона они ниже 3.

Поведение меди принципиально отличается: ее содержание в воде в зоне сосредоточенной разгрузки значительно ниже, чем было зафиксировано при отработке: максимальные значения коэффициента концентрации $K_{3/0}=0.5$, а через 10 лет после прекращения водоотлива $K_{3/0}=0.1$. Содержание всех остальных показателей и через 10 лет после прекращения водоотлива по-прежнему выше тех значений, которые были при работе водоотлива.

Нестационарный характер изменения показателей состава подземных вод в зоне сосредоточенной разгрузки отмечается для всех показателей. Однако закономерности этих изменений, как по абсолютным величинам, так и по темпам подъема и спада, различаются (Рисунок 4.16).

Можно выделить две группы показателей. В первую входит сульфат-ион, железо и цинк, а также суммарная минерализация как интегральный показатель. Уже через 5 месяцев после завершения заполнения депрессионной воронки и появления подземных вод в зоне обрушения значения сульфат-иона были выше 20 г/л ($K_{3/0}=4$), максимальные концентрации (22,7 г/л) были зафиксированы через 16 месяцев. В течение 5 лет содержание сульфатов варьировало от 11 до 23 г/л и только затем начало снижаться, сопровождаясь перепадами от 5 г/л до 20 г/л.

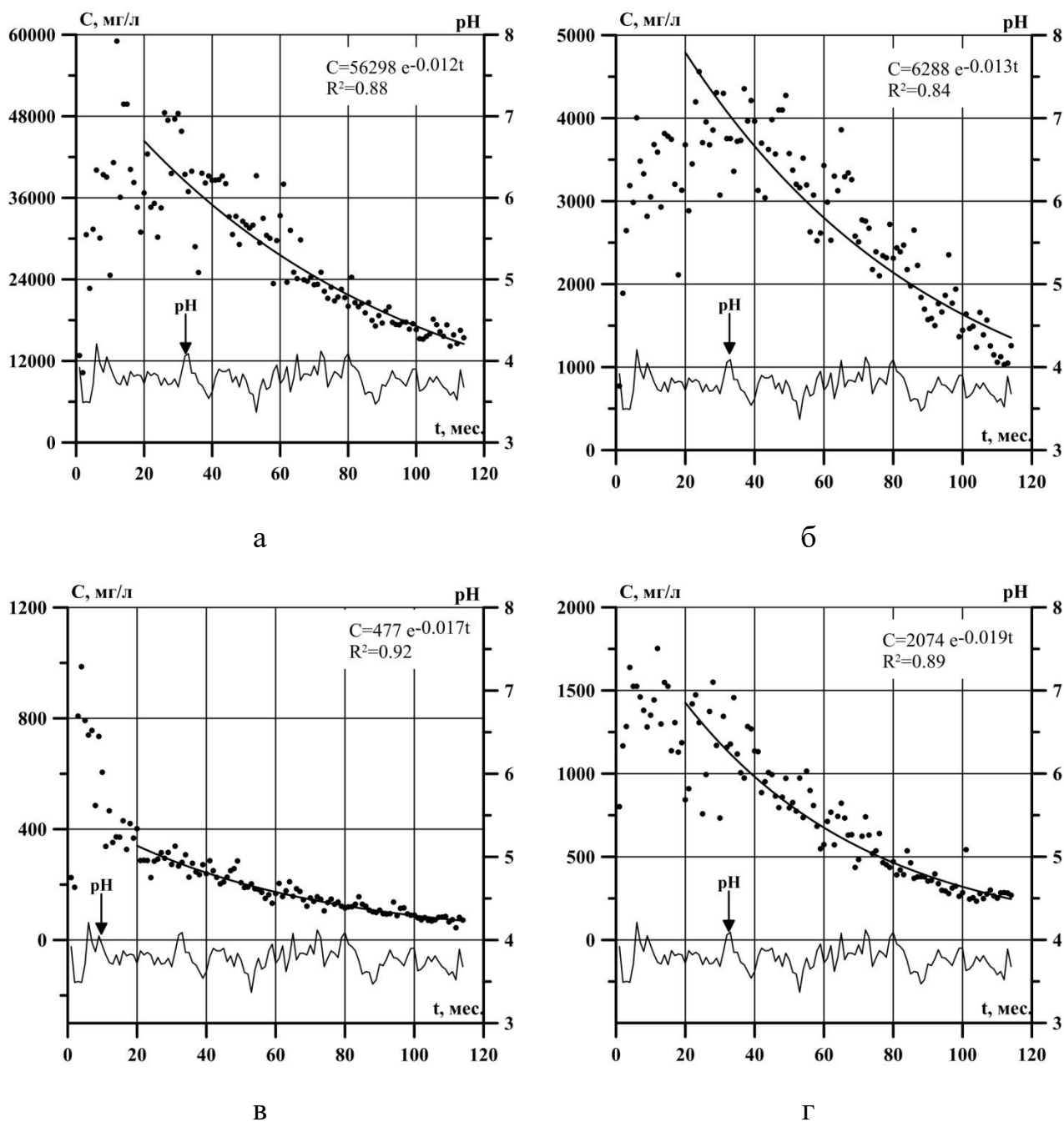


Рисунок 4.16 - Изменение содержания компонентов и pH в подземных водах зоны сосредоточенной разгрузки после затопления (точки – фактические данные, сплошная линия – экспоненциальная аппроксимация, R^2 - достоверность аппроксимации): а – суммарная минерализация, б - железо, в - марганец, г - цинк

В целом изменение сульфат-иона характеризуется очень большими амплитудами значений, которые зависят также и от сезонов года (Рисунок. 4.17). В период межени – в марте и июле – наблюдаются наименьшие значения сульфат-

иона (поскольку содержание сульфат-иона, так же, как и остальных компонентов, снижается со временем, для иллюстрации сезонных изменений использовался график накопленных значений по месяцам; представление данных для каждого отдельного года не позволяет выявить эту закономерность).

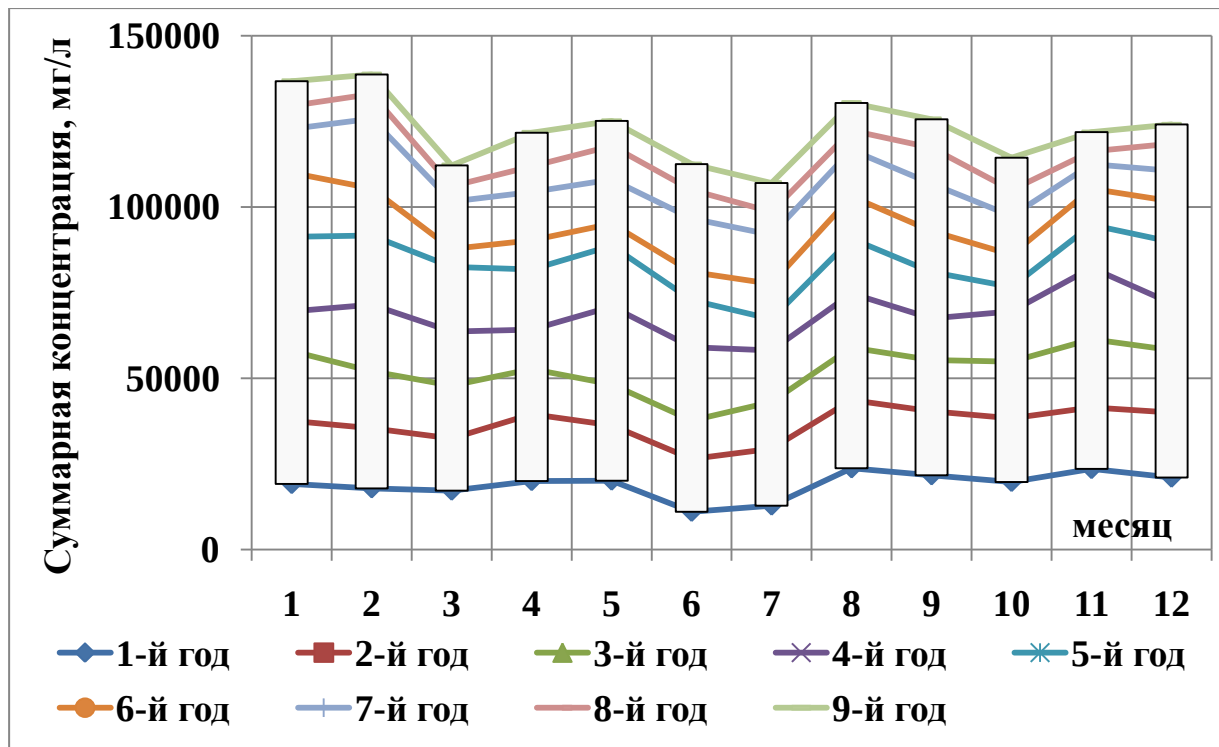


Рисунок 4.17 – Сезонные изменения сульфат-иона в шахтных водах зоны разгрузки в провале (зависимость суммарного значения содержания сульфат-иона за период наблюдений от месяцев года)

Для железа и цинка характерно увеличение значений в 5-6 раз в начале процесса затопления зоны обрушения (через 6 месяцев), максимальные значения достигаются через 1–2 года, продолжительность периода повышенных значений около 4 лет. Снижение идет достаточно плавно без больших амплитуд. Похожие закономерности характерны и для суммарной минерализации.

Вторая группа представлена марганцем и медью. На начальном этапе происходит резкий рост концентраций (максимальные значения достигаются через 4 месяца), этот период длится 0,5 года, снижение происходит очень резко, затем – плавно без больших колебаний. При этом по абсолютным значениям

превышений по отношению к периоду отработки оба компонента являются экстремальными; для меди коэффициенты концентрации чрезвычайно низкие ($K_{з/о}=0,5$), для марганца – экстремально высокие ($K_{з/о}=21$).

Пониженные по сравнению с периодом отработки содержания меди могут быть связаны с тем, что в техногенной зоне аэрации происходит активное окисление сульфидов меди и их вынос, при этом в нижней части коры выветривания формируется подзона цементации - вторичного обогащения сульфидами меди (халькозин, колвеллин, борнит) [Смирнов, 1951; Белогуб, 2009]. При формировании сернокислотных кор выветривания происходит преимущественный вынос марганца, однако в гумидных условиях марганец (II) может фиксироваться на вторичных геохимических барьерах путем сорбции на гидроксидах железа (II) [Юдович, Кетрис, 2014]. Для окислительных сред характерно отсутствие корреляции марганца и железа. После затопления накопленный ранее в коре выветривания марганец поступает в подземные воды, что проявляется в виде резкого роста значений марганца, в последующем происходит снижение его содержаний до концентраций, зафиксированных при шахтном водоотливе.

Поведение остальных показателей (Al^{3+} , Mg^{2+} , Ni^{2+} , Co^{2+} , Cd^{2+} , РЗЭ) соответствует тем закономерностям, которые были выявлены для цинка и железа.

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_i - текущая концентрация, C_{min} , C_{max} - его максимальная и минимальная концентрации. Значения показателя b составляют 0,13-0,22 год⁻¹, период полураспада (время, за которое концентрация компонента уменьшается вдвое) минимально для алюминия, цинка и марганца (1094 и 1155 сут), для большей части компонентов составляет 1890 сут (Таблица 4.13).

Таблица 4.13 – Период полураспада компонентов (время уменьшения содержания концентрации в два раза)

Показатель	R^2	a, мг/л	b, 1/мес.	$t_{1/2}$		K сут ⁻¹
				мес.	сут	
Минерализация	0,88	56298	-0.012	56	1733	4E-04
Сульфат	0,53	25081	-0.011	63	1890	4E-04
Железо	0,84	6288	-0.013	53	1599	5E-04
Цинк	0,89	2074	-0.019	36	1094	6E-04
Марганец	0,92	477	-0.017	41	1223	6E-04
Медь	0,34	30	-0.011	63	1890	4E-04
Алюминий	0.10	428	-0.019	36	1094	6E-04
Магний	0.77	1534	-0.011	63	1890	4E-04
Кальций	0.10	370	-0.011	63	1890	4E-04
РЗЭ	0.79	12	-0.011	63	1890	4E-04

Примечание. R^2 - достоверность аппроксимации фактических данных экспоненциальной зависимостью; a, b – коэффициенты уравнения $y = a e^{-bx}$; $t_{1/2}$ - период полураспада; K – коэффициент полураспада

Таким образом, для всех наблюдаемых показателей общим является их резкий быстрый рост в течение 4-7 месяцев. Повышенные значения коэффициентов концентрации ($K_{3/0}=3\div 5$) сохраняются в течение 3-5 лет, через 10 лет после заполнения депрессионной воронки коэффициенты концентрации сохраняются на уровне $K_{3/0}=1\div 3$. Аномальным характером поведения отличаются медь и марганец, как по величинам максимальных значений коэффициентов концентрации ($K_{3/0}=0,5$ и $K_{3/0}=21$, соответственно), так и по резкому спаду во времени. Ранжированный ряд по степени концентрации макрокомпонентов по отношению к периоду отработки выглядит следующим образом: $K_{Fe} > K_{Mg} > K_{Zn} > K_{Fe} > K_{SO4} > K_{Al} > K_{Ca}$.

4.4 Гидрогеохимия редкоземельных элементов техногенной зоны гипергенеза отработанного медноколчеданного рудника

Анализ распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) позволяет исследовать характер процессов, протекающих в различных геохимических средах [Дубинин, 2006; Вах, 2012; Алексеева, 2016; Харитонов и др., 2016; Piper

et al., 2013]. РЗЭ являются сильно когерентной группой элементов, концентрации которых в горных породах, почвах, поверхностных и подземных водах благодаря близким химическим свойствам и сходству поведения являются индикаторами источников вещества и физико-химических процессов. Свойства церия и европия делают группу редкоземельных элементов чувствительной к изменениям окислительно-восстановительной обстановки в природных процессах. Абсолютные значения концентраций РЗЭ имеют значительный разброс, нормализация содержания редкоземельных элементов по отношению к одному из нескольких стандартов горных пород позволяет получить гладкую кривую, анализ которой дает возможность оценить направленность процессов и фракционирование элементов в изучаемых средах. В работе использовалась нормализация на североамериканский сланец [Дубинин, 2006; Gromet et al., 1984].

Распределение РЗЭ в океанических водах, нормализованное на североамериканский сланец, характеризуется весьма низкими значениями и большим диапазоном изменения (от 10^{-9} до 10^{-6}), кроме того, в океанических водах прослеживается четкая тенденция обогащения тяжелыми РЗЭ и отрицательная аномалия церия. Анализ нормализованного распределения РЗЭ в нескольких крупнейших реках мира показывает довольно гладкую кривую в небольшом диапазоне от 10^{-6} до 10^{-5} и слабое обогащение тяжелыми РЗЭ [Piper et al., 2013]. Для пресных подземных вод зоны активного водообмена Дальнего Востока России установлено, что диапазон нормализованных значений РЗЭ более существенный, значения РЗЭ имеют более высокие показатели - от 10^{-6} до 10^{-3} [Харитонов и др., 2016]. Здесь отмечается отрицательная цериевая аномалия и положительная европиевая.

Нами было выполнено изучение распределения РЗЭ в подземных водах техногенно нарушенных территорий, сформировавшихся в процессе многолетней отработки Левихинского медноколчеданного месторождения.

Для анализа распределения РЗЭ в пробах использовалось нормирование по отношению к североамериканскому сланцу [Gromet et al., 1984]. Для

характеристики легких РЗЭ был использован лантан, средних РЗЭ – гадолиний и тяжелых РЗЭ – иттербий.

Для расчета аномалии европия использовалось выражение $Eu/Eu^* = \lg(2Eu^*/(Sm^* + Gd^*))$, где Eu^* , Sm^* , Gd^* - концентрации европия, самария и гадолиния, нормализованные на североамериканский сланец. Для расчета аномалии европия использовалось выражение $Ce/Ce^* = \lg(2Ce^*/(La^* + Pr^*))$, где Ce^* , La^* , Pr^* - концентрации церия, лантана и празеодима, нормализованные на североамериканский сланец [Дубинин, 2006; Харитонов и др., 2016].

По анионному составу все исследованные на Левихинском месторождении воды чисто сульфатные, а по катионному – смешанные железисто-алюминиево-магниевые. Минерализация их максимальная для вод зоны разгрузки и в подотвальных водах – от 10 до 50 г/л. В шахтных стволах минерализация не превышает 0,5 г/л.

По кислотнo-щелoчным условиям пробы в зоне разгрузки и в шахтных стволах кислые (pH от до 3 до 5), подотвальные воды - сильнокислые (pH~2,5). Ен раствора составляет около 250 mV для вод зоны разгрузки и шахтных стволов, в подотвальных водах 550 mV.

Содержание редкоземельных элементов в водах рассматриваемых объектов варьирует в весьма широких пределах: очень высокие значения от 3,5 до 15,3 мг/л наблюдаются в зоне разгрузки, в диапазоне 0,5÷6,5 мг/л в подотвальных водах, в шахтных стволах на один-два порядка ниже и изменяется от 0,005 до 0,3 мг/л (Таблица 4.12). Обычно концентрации РЗЭ в водных объектах на несколько порядков меньше и составляют 0,08÷1,01 мкг/л в поверхностных и пресных подземных водах [Харитонов и др., 2016], 0,003 мкг/л в воде океана [Дубинин, 2006]. Подобные аномально высокие концентрации РЗЭ в растворенных формах (от 0,4 до 16 мг/л) были зафиксированы как результат формирования кислых сульфатных вод в зоне окисления сульфидных руд золотополиметаллического Березитового месторождения на Дальнем Востоке [Вах, 2012], месторождений Иберийского пиритового пояса. [Ayora et al., 2015].

Анализ корреляционных связей суммы РЗЭ и компонентов на Левихинском месторождении показал, что наиболее тесная связь характерна для магния ($R^2=0,97$), цинка ($R^2=0,91$), марганца ($R^2=0,83$), железа ($R^2=0,82$).

Для всех опробованных объектов концентрации легких РЗЭ (цериевая группа) примерно в три раза выше, чем тяжелых (иттербиевая группа), легкие РЗЭ составляют $64\div 85\%$ от суммы всех РЗЭ. Отношение La^*/Yb^* , которое также характеризует поведение лёгких и тяжелых РЗЭ, отличается значительными вариациями и изменяется в пределах $0,05\div 0,76$ для зоны разгрузки, $0,45\div 1,59$ для шахтных стволов, $0,46\div 0,70$ для подотвальных вод (Таблица 4.14).

Большинство исследованных проб характеризуется небольшой положительной аномалией европия в диапазоне $0,02\div 0,16$. Исключение составляют пробы из ствола ш. Северная, где аномалия отрицательная и Eu/Eu^* изменяется от $-0,02$ до $-0,11$. Цериевая аномалия во всех пробах отрицательная и изменяется от 0 до $-0,07$ для зоны разгрузки, от $-0,05$ до $-0,11$ для шахтных стволов, от $-0,04$ до $-0,05$ для подотвальных вод.

Форма кривых распределения РЗЭ в водах зоны разгрузки начиная с 2008 года не изменяется, они характеризуются хорошо выраженным подъемом в области легких РЗЭ и плавным снижением в области тяжелых РЗЭ (Рисунок 4.18а). Такие же закономерности устанавливаются для подотвальных вод при более низких абсолютных значениях РЗЭ (Рисунок 4.18б). Для проб воды, отобранных из шахтных стволов, максимальные нормированные значения РЗЭ смещены группу средних и тяжелых РЗЭ (Рисунок 4.18в).

Степень фракционирования РЗЭ в шахтных водах ниже, чем в океанических, поверхностных и подземных водах зоны активного водообмена (Рисунок 4.19). Анализ распределения и фракционирования РЗЭ в техногенных объектах затопленного Левихинского рудника свидетельствуют о некотором различии механизмов формирования химического состава подземных вод в техногенной зоне гипрегенеза: в области разгрузки и в отвалах с одной стороны и в шахтных стволах с другой.

Таблица 4.14 - Характеристики распределения редкоземельных элементов в подземных водах зоны техногенного гипергенеза Левихинского медноколчеданного месторождения

Место отбора	Дата	Характеристики							
		Σ REE, мг/л	LREE, мг/л	HREE, мг/л	LR, %	HR, %	La*/Yb*	Eu/Eu*	Ce/Ce*
NASC *		172,61	152,84	19,77	89	11			
Океан **		3E-06	2E-06	1E-06	60	40	1,00	0,02	-0,80
Зона разгрузки									
Провал	2007	11,803	9,348	2,455	79	21	0,76	0,12	-0,04
Провал	2008	15,316	11,561	3,755	75	25	0,37	0,15	0,00
Провал	2010	5,090	3,997	1,093	79	21	0,44	0,09	-0,01
Провал	2013	6,526	4,884	1,642	75	25	0,26	0,13	-0,07
Провал	2014	4,792	3,588	1,204	75	25	0,05	0,11	-0,05
Провал	2016	4,337	3,261	1,075	75	25	0,31	0,05	-0,05
Провал (20 м)	2016	4,330	3,263	1,067	75	25	0,32	0,06	-0,04
Провал	2017	3,513	2,634	0,879	75	25	0,28	0,08	-0,06
Шахты									
Левиха XIV	2008	0,073	0,055	0,018	75	25	0,46	0,11	-0,05
Левиха XIV 30 м	2013	0,284	0,211	0,074	74	26	0,47	0,02	-0,08
Левиха XIV 40 м	2013	0,285	0,211	0,074	74	26	0,47	0,02	-0,08
Левиха XIV 50 м	2013	0,286	0,212	0,074	74	26	0,47	0,02	-0,08
Левиха XII	2008	0,050	0,037	0,013	74	26	0,45	0,09	-0,10
Северная 40 м	2013	0,004	0,003	0,001	79	21	0,86	-0,01	-0,11
Северная 50 м	2013	0,005	0,004	0,001	85	15	1,59	-0,12	-0,07
Отвалы									
Зона обрушения	2014	1,527	1,210	0,317	79	21	0,53	0,06	-0,05
Подотвальные воды	2014	6,536	5,042	1,495	77	23	0,46	0,10	-0,04
Подотвальные воды	2017	0,514	0,423	0,091	82	18	0,70	-0,01	-0,05
Близлежащие рудники									
Карпушиха	2010	0,041	0,026	0,014	64	36	0,81	0,16	-0,04
Ломовка	2010	0,004	0,003	0,001	85	15	1,65	-0,06	0,04

Примечания. * [Gromet et al., 1984]; ** [Дубинин, 2006]; NASC – североамериканский сланец; Σ REE - сумма РЗЭ; LREE – сумма легких РЗЭ (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu); HREE – сумма тяжелых РЗЭ (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu); LR – доля легких РЗЭ; HR - доля тяжелых РЗЭ; La*/ Yb* - отношения La* и Yb*, нормированные к североамериканскому сланцу; Eu/Eu*, Ce/Ce* - аномалии европия и церия, пояснения в тексте.

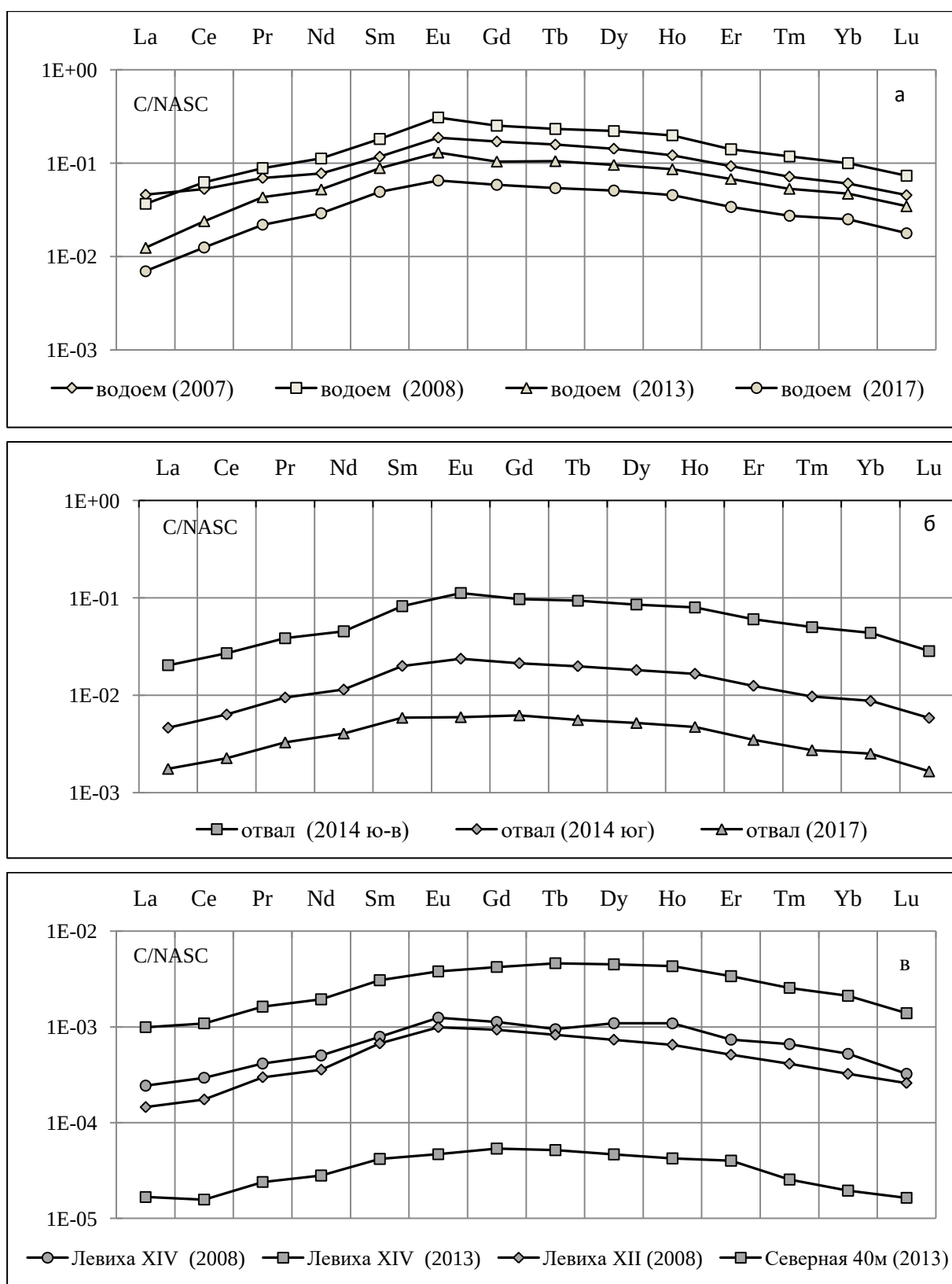


Рисунок 4.18 - Спектры распределения концентраций редкоземельных элементов в подземных водах: а - зона разгрузки, б - подотвальные воды, в - шахтные стволы. В скобках – год опробования

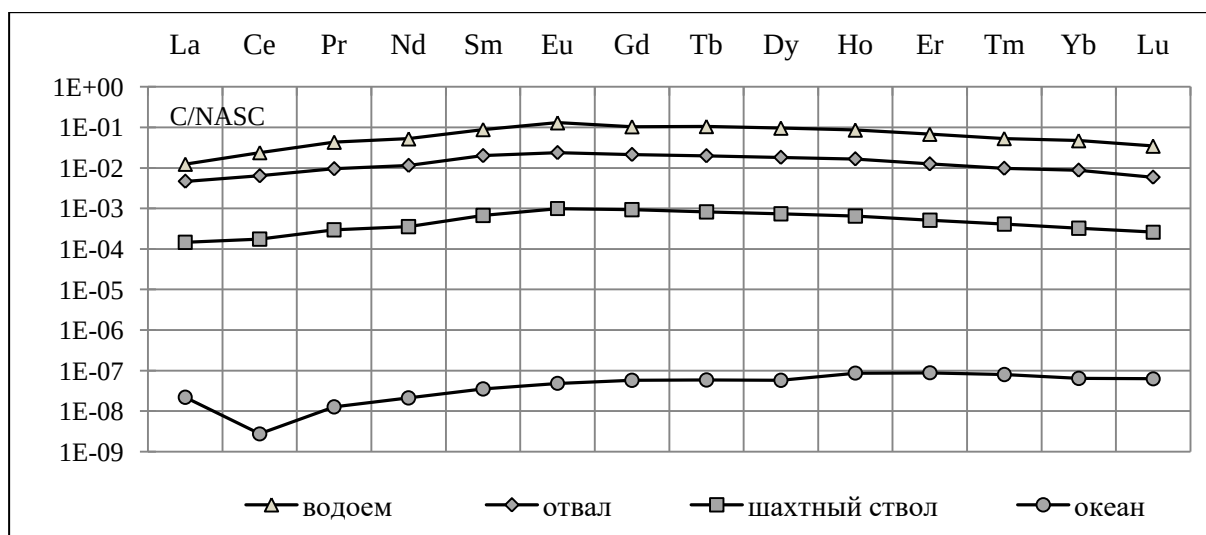


Рисунок 4.19 - Средние содержания редкоземельных элементов в подземных водах техногенной зоны гипергенеза Левихинского месторождения и в океане

При этом формирование шахтных вод сопровождается существенным выносом РЗЭ из водовмещающих пород, что приводит к их обогащению редкоземельными элементами на несколько порядков выше, чем в океане, поверхностных и подземных водах.

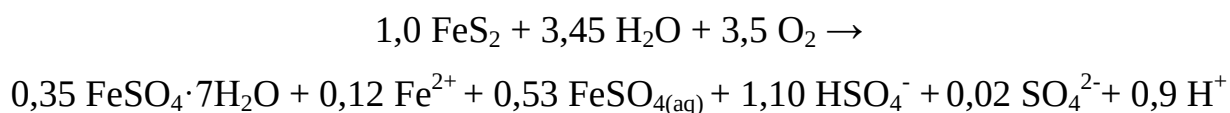
Максимальные значения РЗЭ (до 15 мг/л) зафиксированы в шахтных водах, разгружающихся на поверхность. В шахтных стволах значения РЗЭ не превышают 0,3 мг/л. Подотвальные воды занимают промежуточное положение. Химический состав подземных вод определяется процессами формирования и строением техногенной зоны гипергенеза, ее минералогическим составом, окислительно-восстановительными условиями.

4.5 Физико-химическое моделирование формирования растворов

Результаты расчета насыщенности подземных вод в зоне разгрузки показывают, что они: пересыщены по отношению к гематиту, магнетиту, гетиту, лепидокрокиту, ярозиту; близки к равновесию 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^{3+} и Fe^{3+} практически

полностью; двухзарядные катионы в количестве около 50%; однозарядные катионы не более 10% (применялся программный код Visual MINTEQ ver. 3.0/3.1).

Исследование закономерностей формирования состава подземных вод и твердых фаз, выпадающих в осадок в процессе окисления пирита, было выполнено на примере идеализированного случая растворения пирита в воде, находящейся в равновесии с кислородом воздуха, $t=10^0\text{C}$. Предполагалось, что система включает следующие компоненты: H^+ , H_2O , $\text{O}_2(\text{aq})$, SO_4^{2-} , HSO_4^- , HS^- , $\text{H}_2\text{S}(\text{aq})$, Fe^{2+} , FeSO_4^- , Fe^{3+} , 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



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 (Рисунок 4.20 а). При осаждении мелантарита Fe^{2+} расходуется его на образование, при этом в растворе в заметном количестве начинает формироваться Fe^{3+} (Рисунок 4.18 б); выпадение в осадок гетита и ярозита полностью удаляет из раствора Fe^{3+} (Рисунок 4.18 в, г).

При наличии достаточного объема достоверных данных о составе подземных вод может быть определен тот состав пород, в результате растворения-осаждения которых сформировался конкретный состав воды, для этого выполняется решение обратных задач путем расчета массового баланса [Nordstrom, 2011]. В Таблице 4.15 приведены результаты решения обратных задач для трех моделей, имитирующих вероятные геохимические сценарии формирования подземных вод Левихинского рудника через 90 месяцев после

заполнения депрессионной воронки и образования зоны сосредоточенной разгрузки подземных вод в провале.

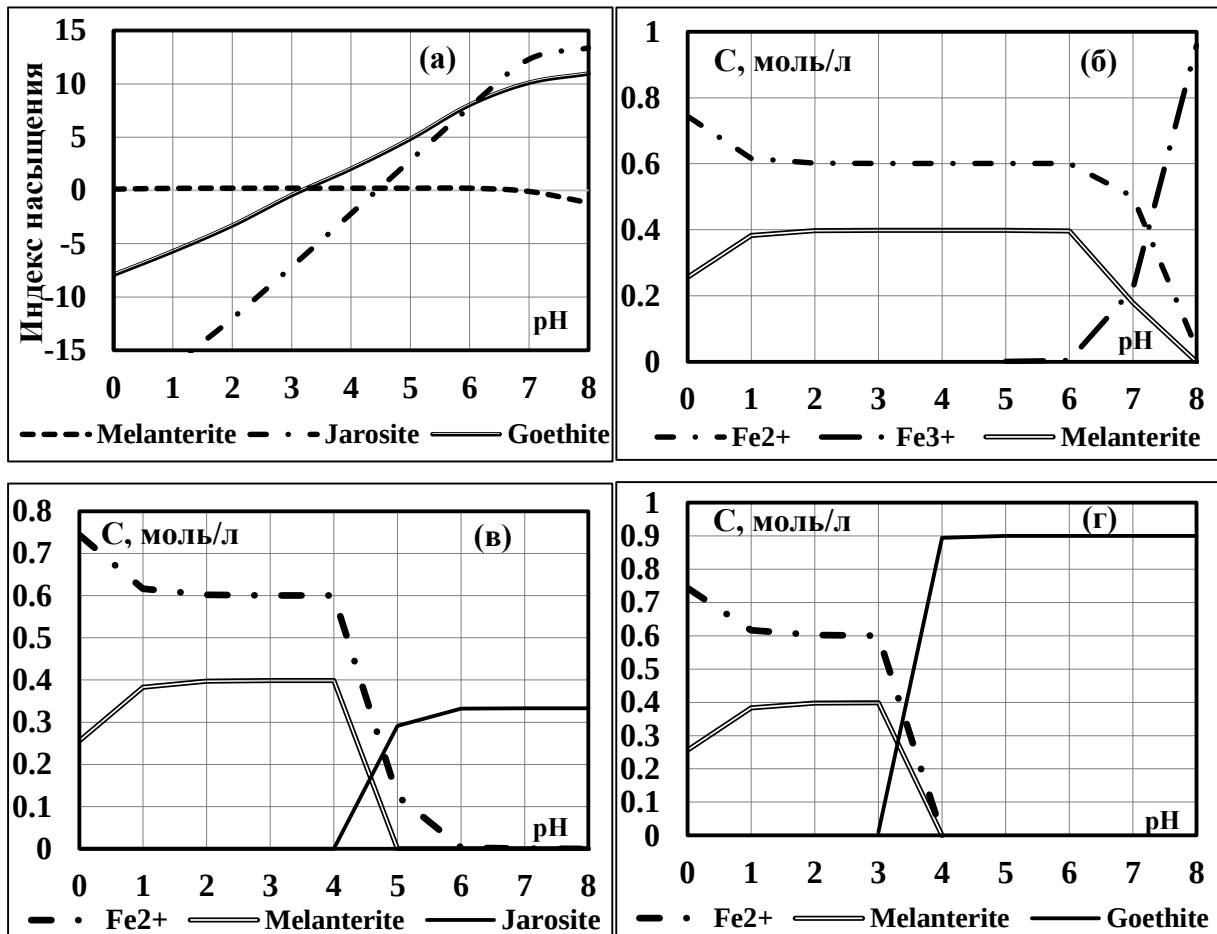


Рисунок 4.20 - Результаты физико-химического моделирования. Зависимость изменения показателей от окислительно-восстановительных условий: а - индексов насыщения мелантерита, ярозита и гетита; б - концентраций Fe^{2+} , Fe^{3+} и мелантерита; в - Fe^{2+} , мелантерита и ярозита; г - Fe^{2+} , мелантерита и гетита (моделирование выщелачивания 1 моль $\text{FeS}_2/\text{кг}$, использован программный код Visual MINTEQ)

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. Состав вмещающих пород для всех моделей идентичен – это хлорит, серицит, кальцит. Марганец обычно присутствует в рассеянном виде, источником марганца в модели является один из наиболее распространенных в коре выветривания минералов марганца - манганит [Юдович, Кетрис, 2014].

Таблица 4.15 - Результаты расчета массового баланса для шахтных вод Левихинского рудника через 90 мес. после затопления для различных моделей формирования состава (отрицательные значения – осаждение, положительные значения – растворение, ммоль/кг)

Минеральная фаза	Модель		
	Пр	Мл	Яр
Серпентин	10	10	10
Серицит	10	10	10
Кальцит	11	11	11
Пирит	50	0	0
Сфалерит	7	0	0
Халькопирит	0.3	0	0
Манганит	2	2	2
Мелантерит	0	100	0
Госларит	0	7	7
Халькантит	0	0.3	0.3
Ярозит	0	0	50
Кварц	-40	-40	-40
Гетит	-25	-75	-125

Формирование кислых шахтных вод может быть результатом окислительного выщелачивания 57,3 ммоль сульфидов/кг раствора (50 ммоль пирит + 7 ммоль сфалерит + 0,3 ммоль халькопирит). Такой же состав подземных вод может быть сформирован в процессе растворения кристаллогидратов сульфата 107,3 ммоль/кг H_2O (100 ммоль мелантерит + 7 ммоль госларит + 0,3 ммоль халькантит). В случае преобладания ярозита в зоне обрушения количество растворенных сульфатных минералов составит 57,3 ммоль/кг раствора, из них 50 ммоль приходится на ярозит. Кроме того, растворяются алюмосиликаты в количестве 31 ммоль, поставляющие в раствор ионы кальция, магния, алюминия. Источниками алюминия, магния, кальция, марганца являются серицит (10 ммоль/кг), хлорит (10 ммоль/кг), кальцит (11 ммоль/кг), манганит (2 ммоль/кг). Скорость растворения сульфатов в настоящее время составляет $(5-10) \cdot 10^3$ моль/час и сопоставима со скоростью растворения сульфидов при отработке [Rybnikova and Rybnikov, 2017]. Для сравнения - скорость окисления в шахте Айрон Маунтен (Iron Mountain), где зафиксированы отрицательные значения pH, на порядок выше [Nordstrom, 2011].

4.6 Гидрогеомиграционное моделирование

Полученные на Левихинском месторождении экспериментальные кинетические данные изменения состава подземных вод дают возможность рассмотреть общую модель выщелачивания и растворения минералов техногенной зоны гипергенеза и формирования подземных вод при фильтрации подземных вод, а также дать количественный прогноз нестационарного процесса формирования их состава.

Феномен роста значений компонентов в зоне разгрузки и их последующего снижения («first flush») можно объяснить, используя закономерности формирования потока подземных вод и его балансовые составляющие, которые получены в результате геофильтрационного моделирования в многопластовом потоке (использованы программные коды MODFLOW и PMPATH [Chiang and Kinzelbach, 2001]. Для численного решения использована программа MT3D [Zheng and Wang, 1999], которая является продолжением программы MODFLOW (предназначенной для решения задач фильтрации подземных вод в трехмерной постановке), представляя собой ее миграционное дополнение. Определенное на MODFLOW поле напоров, с учетом матриц параметров и временной разбивки, используется для построения поля скоростей фильтрации, которое является основой для решения задачи движения трассера

Принципиальная гидрогеохимическая и гидродинамическая двумерная модель потока выглядит следующим образом. Подземные воды фильтруются по оси x в потоке постоянной ширины, который ограничен слева водоразделом (граничное условие 2 рода, непроницаемая границей), слева – рекой (граничное условие 3 рода, связь расхода и напора). Зона обрушения, расположенная в центре водораздельного потока, нарушает и деформирует его структуру, поток, поступающий от водораздела, разгружается в провал (граничное условие 3 рода, связь расхода и уровня воды в техногенном водоеме) (Рисунок 4.21).

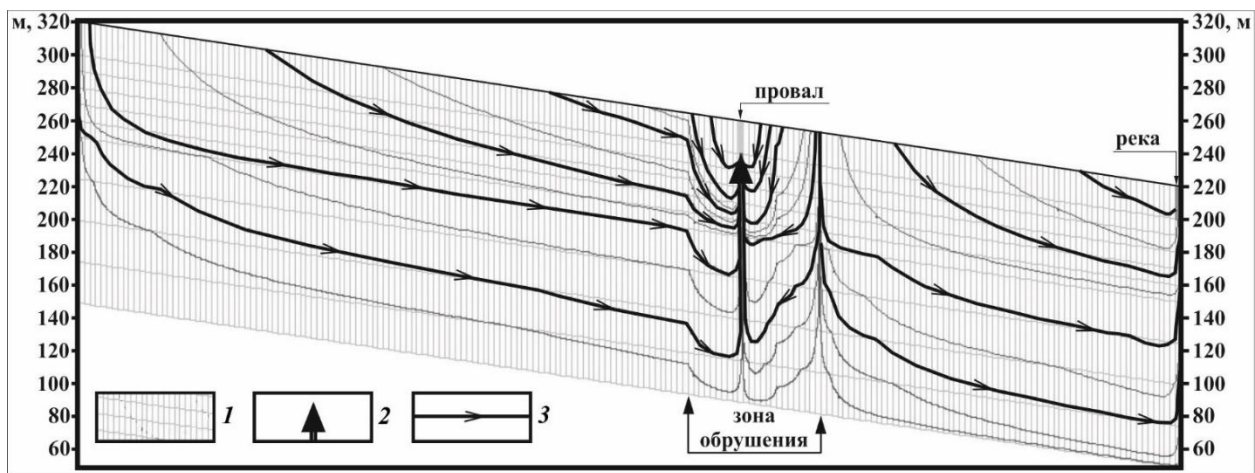


Рисунок 4.21 - Схема движения подземных вод после затопления (слева – водораздел, непроницаемая граница; размер блока по горизонтали – 50 м, количество пластов – 10; величины питания, фильтрационные и емкостные параметры показаны на Рисунке 3.18, использован программный код MODFLOW и RMPATH). 1 – сеточная разбивка; 2 – разгрузка подземных вод в провал; 3 – линии тока

Продолжительность затопления зоны обрушения составляет 3 года (Рисунок 3.18), в течение этого периода происходит растворение вторичных минералов, сформированных в сернокислотной коре выветривания, и насыщение раствора сульфатами, металлами и др. компонентами. После завершения заполнения депрессионной воронки начинается разгрузка подземных вод в провал. Поток подземных вод, разгружающийся в провал, в повышенных концентрациях содержит растворенные вещества, накопленные в растворе, заполняющем свободное пространство зоны обрушения. Именно этот процесс определяет чрезвычайно высокие значения компонентов в начальный период. В стационарных условиях в гидродинамическом балансе расхода воды, разгружающейся в провал, ведущее значение начинает приобретать латеральный приток, который поступает с прилегающих территорий. Его состав незначительно отличается от фонового, его значение проявляется в разбавлении раствора, содержащегося в зоне обрушения. Время движения подземных вод в зоне обрушения (от ее границы до дна провала) составляет около 5 лет, именно в течение такого периода наблюдаются чрезвычайно высокие значения концентраций практически всех показателей. В дальнейшем разбавление

подземных вод за счет латерального потока и питания, поступающего в пределах нарушенной зоны, начинает играть решающую роль и значение показателей снижается (Рисунок 4.22).

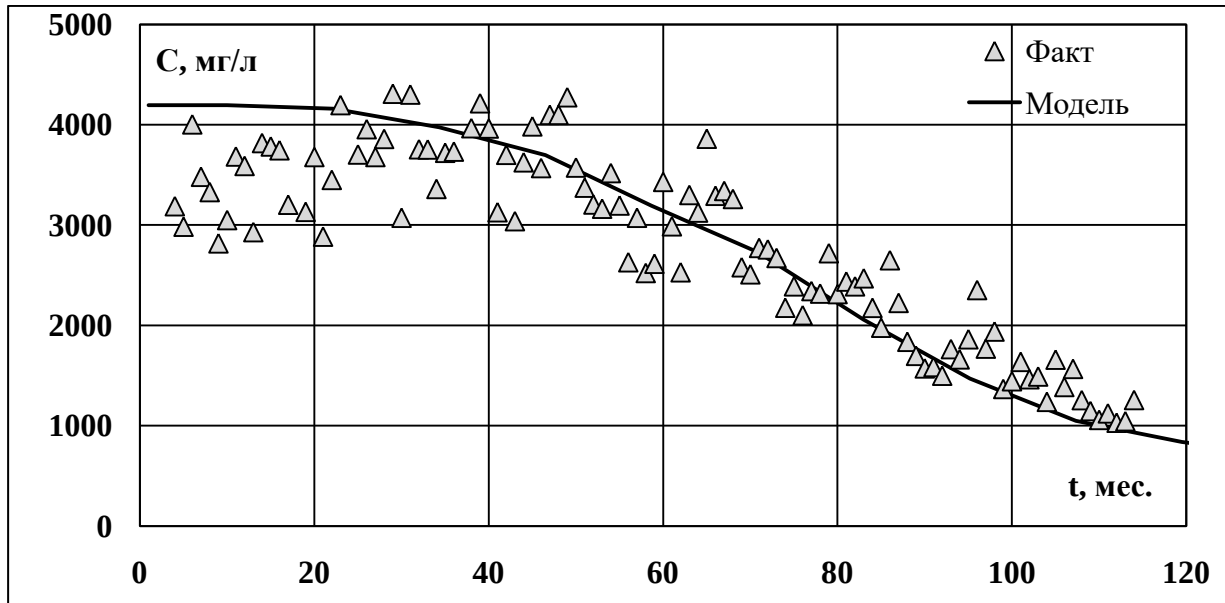


Рисунок 4.22 – Изменение содержания железа в шахтных водах зоны разгрузки в провал: фактические данные и результаты моделирования

Темп снижения со временем замедляется: в течение 10 лет происходит разбавление в 10 раз, в течение 50 лет – в 100 раз (Рисунок 4.23). Исходя из средних величин, зафиксированных в период максимальных значений на объекте, через 50 лет содержание сульфатов будет порядка 200 мг/л, железа около 34 мг/л, цинка 14 мг/л, марганца 4 мг/л, меди 0,4 мг/л.

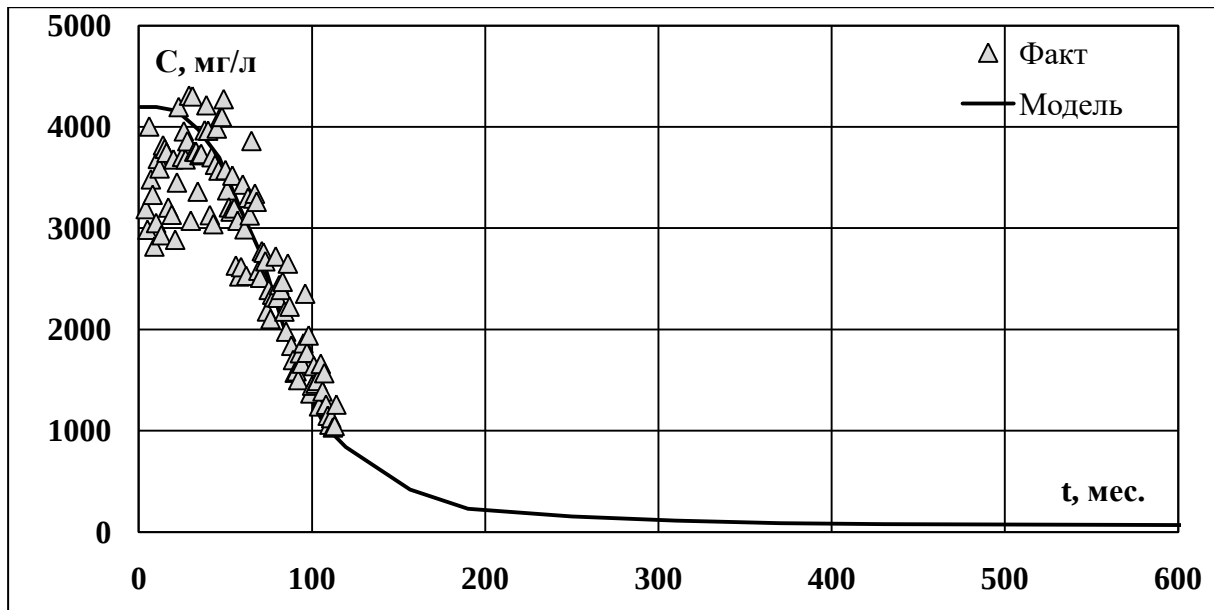


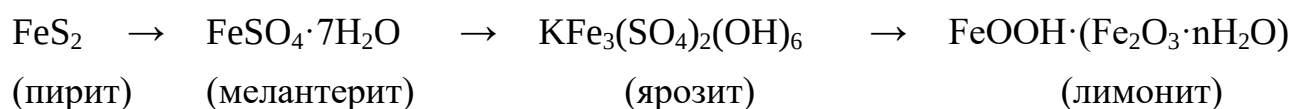
Рисунок 4.23 – Прогноз изменения содержания железа в шахтных водах зоны разгрузки

Выводы по разделу

Особенностью отработки медноколчеданных месторождений на Урале являются большие глубины (до 600 м) и применение систем обрушения выработанного пространства. Здесь происходит нарушение сплошности пород, их измельчение, увеличение поверхности взаимодействия. Для этой зоны характерно практически полное поглощение атмосферных осадков, обогащенных кислородом.

Зона аэрации, сформировавшаяся в результате многолетнего водоотлива, является техногенной гипергенной гидрогеохимической системой и характеризуется условиями интенсивного водообмена при обычных температурах и давлении. Процессы окисления сульфидов приводят к образованию сернокислотной коры выветривания, в ходе эволюции которой формируются различные минеральные новообразования (кристаллогидраты сульфатов, гидроксиды, гидроокислы). Система вода-порода-газ термодинамически равновесно-неравновесная, в ней происходят процессы рассеивания и концентрирования вещества [Геологическая ..., 2005].

Развитие сернокислотной коры выветривания происходит постепенно, в несколько стадий. 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. При этом в процессе выветривания главнейших породообразующих минералов образуется ряд промежуточных соединений, изменяется минеральный состав



При полном развитии профиля коры выветривания в ней выделяются подзоны окисления (железная шляпа), выщелачивания (кварц-баритовые, сульфидные, серные сыпучки) и вторичного сульфидного обогащения (цементации). Положение этих зон определяется характером водообмена: первая – это зона аэрации, в пределах второй происходят сезонные и многолетние колебания уровня подземных вод, третья – насыщенная зона (водоносный горизонт) [Смирнов, 1951; Белогуб, 2009].

Окисление сульфидов является источником образования вторичных сульфатов, их растворение при подъеме уровня подземных вод и заполнении депрессионной воронки может приводит к формированию кислых вод. Процесс формирования кристаллогидратов сульфатов определяется наличием геохимических барьеров, таких как окислительный, восстановительный, испарительный, криогенный и др.

Перераспределение химических элементов в процессе горнодобывающей деятельности и после ее завершения сопровождаются их дифференциацией в плане и в разрезе, что приводит к возникновению участков локального обогащения подземных вод многими компонентами. После заполнения депрессионной воронки эти зоны становятся практически неограниченным

поставщиком сульфатов, железа, цинка и других элементов в подземные воды в течение десятков лет.

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. Перечисленные процессы значительно осложняют прогноз качества шахтных вод после завершения отработки, выбор методов их очистки и стратегию реабилитации водных объектов территорий, нарушенных многолетней добычной деятельностью.

Предложена гипотеза развития гидрогеохимических процессов окисления сульфидных минералов в зоне обрушения медноколчеданного рудника. Обоснована схема перераспределения химических элементов в процессе горнодобывающей деятельности и после ее завершения, показано, что их дифференциация в плане и в разрезе приводит к возникновению участков локального обогащения многими компонентами. 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 сульфатов, железа, цинка и других элементов в подземные воды в течение десятков лет.

Рассмотрены поведение и формы миграции элементов в подземных водах в условиях генерации кислых шахтных вод на примере Левихинского медноколчеданного рудника. Установлены закономерности нестационарных гидрогеохимических процессов после затопления рудника: резкий (в 5-6 раз) рост содержания всех компонентов в течение 6 месяцев, сохранение повышенных значений в течение 3–5 лет, с последующим снижением.

Аномальным характером поведения отличаются медь и марганец, как по величинам максимальных значений коэффициентов концентрации по отношению к периоду отработки ($K_{3/0}=0.5$ и $K_{3/0}=21$, соответственно), так и по резкому спаду

во времени. Ранжированный ряд концентрирования основных макрокомпонентов по отношению к периоду отработки выглядит следующим образом: $K_{Mg} > K_{Mn} > K_{Fe} > K_{SO4} > K_{Al} > K_{Zn}$.

По данным физико-химического моделирования (использовался программный код Visual MINTEQ ver. 3.0/3.1) установлено, что по мере повышения pH воды изменяются индексы насыщения раствора: до значений $pH < 3$ степень насыщенности убывает в ряду мелантерит $\rightarrow$ гетит $\rightarrow$ ярозит; при $pH > 5$ ряд представлен последовательностью гетит $\rightarrow$ ярозит $\rightarrow$ мелантерит.

Перераспределение химических элементов в процессе горнодобывающей деятельности и после ее завершения сопровождается их дифференциацией, что приводит к возникновению участков локального обогащения многими минералами. Циклический процесс осаждения и растворения солей выветривания является важным источником кислых металлоносных вод в районах разработки месторождений и размещения отходов добычи. Растворение вторичных минералов является причиной формирования кислых шахтных вод после прекращения рудничного водоотлива и подъема уровня подземных вод.

5 ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ СТАРОПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ

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]. В их составе обнаруживается большое количество цветных, редких и редкоземельных элементов, что стимулирует переработку техногенных отходов. Так, например, Уральская горно-металлургическая компания производит из них около 80-90 т/год селена, в том числе 4-5 т/год - на Кыштымском медеплавильном комбинате [Романова, 2014].

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. В последние десятилетия, в связи с массовым закрытием горнодобывающих предприятий, под шахтными водами следует понимать не только те, которые извлекаются попутно при добыче полезного ископаемого и осушении шахт, но и образованные в результате 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 разных видах и разными способами в течение как минимум четырех тысячелетий [Nordstrom et al., 2017]. В последние годы из-за необходимости использования 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 [Чантурия и др., 2005; Черный, 2005; Шадрунова, Орехова, 2009; Никонов и др., 2014; Орехова, Шадрунова, 2015; Чупрова, 2016; Плюснин, 2017].

В Свердловской области в настоящее время при добыче полезных ископаемых осуществляется водоотведение в поверхностные водные объекты 219,4 млн м³/год загрязненных дренажных вод (23% от суммарного водоотведения). С шахтными и дренажными водами в поверхностные водотоки ежегодно поступает 116,4 тыс. т. загрязняющих веществ (24% от общего сброса). При этом значительное количество поллютантов (22,7 тыс. т при объеме сброса 7,95 млн м³/год) связано с рудниками, эксплуатация которых завершилась 10 и более лет назад [Государственный доклад, 2014].

Плата за негативное воздействие на окружающую среду несопоставима с затратам на природоохранные мероприятия. Так, в Свердловской области платежи за загрязнение в 2014 г. составили 944,5 млн руб. (в т.ч. на водные объекты - 239,8 млн руб.). При этом затраты на охрану окружающей среды в 2014 г. были на порядок больше и составили 11,23 млрд руб., из них на очистку различного вида сточных вод было направлено 5,6 млрд руб.

Поскольку в ближайшие годы планируется совершенствование порядка расчета и взимания платы за негативное воздействие на водные объекты [Мерзликина, Прохорова, 2013; Костылева и др., 2010], оценка безопасности освоения природных месторождений и техногенно-минеральных образований должна включать определение размера экологического ущерба (вреда), что позволит выбрать эффективные методы очистки сточных дренажных вод, разработать мероприятия для предотвращения попадания в водный объект вредных (загрязняющих) веществ и отходов с водосборной площади, простимулирует внедрение технологии извлечения ценных компонентов из сточных вод.

Одной из задач работы является сопоставление величины ущерба от загрязнения водных и объектов потенциальной ценности шахтных вод. Для этого необходимо проанализировать методы очистки шахтных вод, выполнить оценку и анализ составляющих величин ущерба, который наносится водным объектам вследствие сброса очищенных шахтных вод на этапе отработке рудника и после его ликвидации; выявить компоненты, концентрации которых в шахтных водах

превышают промышленные содержания и определить их потенциальную извлекаемую ценность; обосновать возможность и целесообразность использования шахтных вод в качестве источника гидроминерального сырья.

5.1 Методы очистки и обработки шахтных вод

Методы очистки кислых шахтных вод и извлечения из них ценных компонентов могут быть химическими и биологическими. Химические методы включают физико-химические и электрохимические технологии и их комбинацию, в том числе мембранные методы, обратного осмоса, гальванокоагуляционный, флотационный, сорбционный [Орехова, Шадрунова, 2015; Кондрашкин, Кузовков 2015; Nordstrom et al., 2017]. Биологические методы могут быть разделены на микробиологические и макробиологические, при этом только первый рассматривается как метод извлечения, последний обычно используется как метод пассивной формы очистки воды

Использование пассивных методов, основанных на процессах самоочистки, значительно дешевле, поэтому они активно развиваются в последние годы [Никонов и др.. 2014; Abandoned ..., 2008; Wolkersdorfer, 2008]. Для полноценного применения пассивных методов главной задачей является радикальное снижение объемов очищаемой воды, что не всегда может быть реализовано. Кроме того, если при использовании химических методов очистки можно проконтролировать расход воды, ее pH и в зависимости от этого рассчитывать необходимое количество химических реагентов, то проконтролировать микробиологическую деятельность, увеличить солнечную активность, уменьшить скорость движения воды практически невозможно.

Баромембранная технология (сочетание мембранных и традиционных технологий) - устоявшаяся зарубежная практика, широко применяемая для очистки рудничных вод в Европе, Ближнем Востоке, Китае. Достоинствами технологии являются отсутствие потребности в большом количестве реагентов, компактность основного оборудования, высокая степень очистки. Недостатками

метода являются высокие энергозатраты и проблемы утилизации жидких отходов. Использование метода требует проведения предварительной подготовки и очистки воды с помощью микрофльтрации (удаление взвешенных и коллоидных частиц), нанофльтрации (удаление органических веществ и снижение жёсткости), коагулирования (осветление для удаления основной массы взвешенных и коллоидных частиц) [Кондрашкин, Кузовков 2015].

В 1990-2000-е гг. в России большое распространение приобрели технологии ионного обмена. Однако эксплуатационные расходы на реализацию этого метода растут пропорционально минерализации обрабатываемой рудничной воды, кроме того, возникает проблема утилизации отработанных регенерационных растворов, высоки затраты на реагенты, технология достаточно сложная, требует специальных методов подготовки воды (снижение окисляемости, органических веществ) [Кондрашкин, Кузовков 2015].

Использование ионнообменных смол типа АМп, АМП, АМ-25, АВ-17-8 позволяет обеспечить селективность извлечения по большинству компонентов около 50% (для меди, железа, лантаноидов), для некоторых компонентов до 100% (цинк, серебро, кадмий, селен и др.) (Таблица 5.1).

В опытно-промышленном масштабе на Левихинском руднике проверена технология сорбционного извлечения металлов из шлама и шахтных вод, извлечение меди на амфолите АНКБ-35 и цинка на анионите АМП [Черный, 2005]. Для извлечения РЗЭ из шахтных вод предложена принципиальная технологическая схема, подтвержденная лабораторными испытаниями, для реализации технологии требуется предварительное осаждение и криогрануляция гидроксида трехвалентного железа. В промышленных масштабах эти схемы пока не реализованы. В конце 2014 г. в региональное правительство был представлен проект строительства предприятия по комплексной переработке шламов и шахтных вод, а также проект опытной установки. Ряд российских компаний также разработали аналогичные опытные установки, но промышленные образцы до настоящего времени отсутствуют. Перед реализацией представленного инвестиционного проекта необходимо оценить его экологическую безопасность,

определить достоверность выполненных оценок содержания меди и цинка в шламах и целесообразность извлечения меди и цинка из накопленных шламов и шахтных вод, эффективность предложенных методов нейтрализации шахтных вод, отсутствие дополнительного экологического ущерба окружающей среде, особенно водным ресурсам [Полезные..., 2014].

Таблица 5.1 - Эффективность извлечения металлов ионнообменными смолами из многокомпонентных продуктивных растворов [Радченко и др., 2009]

Элемент	Тип смолы	Степень сорбции, %
Селен	АМп, АМП, АМ-2Б, АВ-17-8	100
Теллур	АМ-2Б	95
Германий	АВ-17-8	85
Кадмий	АВ-17-8	100
Лантаноиды	АВ-17-8	>30
Золото	АМп, АМП, АМ-2Б, АВ-17-8	100
Платина	АМп, АМП, АМ-2Б, АВ-17-8	100
Палладий	АМп, АМП, АМ-2Б, АВ-17-8	100
Серебро	АМп, АМП	100
Железо	АМ-2Б	50
Кобальт	АМ-2Б	20
Медь	АМ-2Б	50
Цинк	АВ-17-8	100

Для Сафьяновского месторождения разработана экологически безопасная технология с использованием сорбционной доочистки карьерных и подотвальных вод на аппаратах колонного типа с попутным извлечением в состав первичного концентрата меди и цинка. Экономический эффект за дополнительно возвращенные в производство цветные металлы составил свыше 2,8 млн руб./год; эколого-экономический эффект – 3,3 млн руб./год за счет снижения степени

загрязнения окружающей среды токсикантами – тяжелыми металлами [Тимофеев, 2013].

В последние годы ряд компаний, таких как Raques в Нидерландах и BioteQ в Северной Америке, разработали установки для очистки шахтных вод, которые снижают содержание металлов путем реакции сероводорода с шахтной водой с образованием сульфидов металлов [Nordstrom et al., 2017]. Основным принципом этого процесса является получение сероводорода (H_2S) с помощью анаэробных бактерий. H_2S реагирует с раствором, содержащим металлы, которые осаждаются из раствора в виде нерастворимых сульфидов. В зависимости от химического состава раствора и содержания металлов может потребоваться регулировка pH раствора. В случае меди CuS образуется в широком диапазоне pH, поэтому для этого не требуется регулировка pH, хотя могут потребоваться дополнительные процессы для удаления конкурирующих ионов. Такие предприятия работают в нескольких местах по всему миру, включая установки BioteQ на рудниках Карибу (Caribou) и Раглан (Raglan) в Канаде, Маунт Веллингтон (Mount Wellington) в Колорадо, США и рудник Бисби (Bisbee) в Аризоне, США [Nodwell, Kratochvil, 2012]. Получаемый осадок может быть обработан обычными плавильными операциями, однако присутствие $Fe(II)$, которое также осаждается в виде сульфида металла и потребляет сульфид, снижает эффективность процесса и приводит к увеличению затрат. Оптимальный диапазон температур находится в пределах $20-35^{\circ}C$. В проекте Bisbee, на юге Аризоны, завод BioteQ имеет мощность $10\,900\, м^3/сут$ при концентрациях $Cu = 350\, мг/л$; $Fe(III) = 550\, мг/л$. Капитальные затраты проекта составили около 2,5 млн \$. США. Извлечение металла из шахтных вод представляет собой потенциальный источник дохода для компенсации расходов на водоочистку, а в некоторых случаях может даже быть экономически выгодным.

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. Таким образом формируются нерастворимые или плохо растворимые осадки, для их

осаждения используются различные конструкции осветлительных прудов, такие как пруд-отстойник, пластинчатый (чешуйчатый) отстойник, осветлитель с радиальным потоком. Полученный осадок высушивается и в зависимости от токсичности может размещаться в выработанном пространстве или на специальных полигонах [Iron Mountain ..., 2006; Wolkersdorfer, 2008]. Интенсификация процесса осветления может быть достигнута путём введения коагулянтов и флокулянтов.

Достоинствами такого метода очистки является простота технологии, доступность и дешевизна основных реагентов. Однако для его реализации требуется большое количество реагентов и выделение значительных площадей под размещение прудов-стабилизаторов. Кроме того, такая технология не обеспечивает снижения компонентов до показателей, соответствующих нормативным требованиям. Эффективность очистки существенно повышается при использовании ботанических площадок с высшими водными растениями. Это позволяет снизить концентрацию тяжёлых металлов и сульфатов до нормативов сброса в водоёмы хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения [Попов и др., 2009].

На Среднем Урале до середины 1950-х гг. кислые шахтные воды ($\text{pH}=2\div3$) отработываемых медноколчеданных рудников сбрасывались в близлежащие реки, ручьи или болота, выжигая растительность, которая во многих местах не восстановилась до сих пор (Рисунок 2.х). На отдельных 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 [Зотеев, Корнилков, 1995; Зотеев и др., 2009; Никонов и др., 2014]. Однако при таком способе очистки не снижается содержание цинка и других токсичных металлов, таких как кадмий, селен, теллур, мышьяк и др., содержание которых в шахтных водах на медноцинковых колчеданных месторождениях также весьма значительно.

Позднее для очистки кислых шахтных вод стал использоваться метод нейтрализации, основанный на обработке рудничных и подотвальных вод известковым молоком. Это приводит к осаждению тяжелых металлов, в первую очередь меди, цинка, кадмия, в виде их нерастворимых гидроксидов и основных карбонатов. Лучшее осаждение происходит при $\text{pH}=8-9$, при повышении pH может начаться растворение осадка. После отстаивания в специальных прудах нейтрализованная осветленная вода сбрасывалась в поверхностные водные объекты. Реализация этого метода обезвреживания стоков требует значительного количества извести, например, на действующем Учалинском ГОКе (Республика Башкортостан) используется около 30 т в сутки [Никонов и др., 2014]; столько же требуется сегодня для нейтрализации шахтных вод остановленного Левихинского рудника, при том, что при отработке рудника использовалось почти в 10 раз меньше извести [Козин и др., 1997]. В результате образуется несколько сот тысяч тонн в год шлама, что обуславливает необходимость устройства шламонакопителей большого объема.

На Левихинском руднике в 1959 г. в низовьях р. Левихи (приток р. Тагил, бассейн р. Туры, Иртышский бассейновый округ) был создан осветлительный пруд, предназначенный для отстаивания выносимых с шахтными водами взвесей (Рисунок 2.7). В донных отложениях пруда содержится 1,0-1,3% меди, 1,8-2,3% цинка. В настоящее время площадь пруда 142 га, объем 2,85 млн м^3 (проектный объем 3,0 млн м^3). После затопления рудника начиная с 2007 г. по трубопроводу длиной около 2 км шахтные воды перекачиваются из техногенного водоема на станцию нейтрализации, расход перекачки изменяется от 30 до 150 $\text{м}^3/\text{час}$. На станцию нейтрализации также подаются подотвальные воды, которые собираются на рудном поле. После обработки известковым молоком эти воды поступают в осветлительный пруд, где в процессе отстаивания происходит выпадение гидроксидов тяжелых металлов. При перетекании в сбросной канал вода дополнительно нейтрализуется известью, а затем самотеком по старому руслу р. Левихи попадает в р. Тагил (долина р. Тагил находится в 4 км к востоку от рудника). При движении нейтрализованных вод к р. Тагил происходит частичное

осаждение образующейся при нейтрализации взвеси, русло р. Левихи размыто, а вода имеет мутно-бурую окраску. Качество воды не соответствует нормативным требованиям [Рыбникова и др., 2014]. Такая же схема очистки реализована на Дегтярском, Ломовском, Карпушихинском. Белореченском рудниках.

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. В 2001 г., когда принципиально решалась проблема нейтрализации сточных шахтных вод Левихинского рудника, проводились консультации со специалистами из Голландии, однако предложенные ими методы либо не подошли по климатическим условиям (например, с использованием бактерий), либо оказались слишком дорогостоящими.

5.2 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» [Методические ..., 1985].

Изучение количественного и качественного состава шахтного водоотлива отрабатываемых медноколчеданных рудников Урала в конце прошлого века позволило установить, что вариации содержания цветных и редкоземельных компонентов во времени в сочетании с изменением расходов дренажа приводили к разбросу суммарной величины выноса металлов в несколько раз. Тем не менее, шахтные воды могут рассматриваться как возобновляемый источник цветных металлов и редкоземельных элементов. Суммарный годовой вынос меди и цинка составлял 1,3 и 2,6 тыс. т., соответственно (Таблица 5.2).

Таблица 5.2 - Среднегодовые показатели количества и качества вод шахтного водоотлива рудников Минцветмета СССР (использованы данные [Зотеев, Корнилков, 1995; Табаксблат, 1995, 1997; Грязнов и др., 1997; Зотеев и др., 2009]).

Рудник	Объем воды, тыс. м ³	рН	Компоненты			Компоненты		
			Cu ²⁺	Zn ²⁺	Fe _{общ}	Cu ²⁺	Zn ²⁺	Fe _{общ}
			промышленное содержание, мг/л*					
			50	50	100	годовое количество выносимого металла, т		
			содержание в шахтных водах, мг/л					
Им. III Интернационала	1 267	4	35	45	50	44	57	63
Красногвардейский	613	2,5	50	100	1000	31	61	613
Левихинский	2 186	2,8	154	317	730	247	510	1 177
Ломовский, Н-Ежовский	949	2,9	86	141	559	82	134	530
Белореченский	712	2,8	10	30	50	7	21	36
Карпушинский	175	2,8	100	150	500	18	26	88
Ковеллиновый	124	2,8	100	150	500	12	19	62
Дегтярский	3 212	2,5	77	447	989	171	988	2 183
Гумешевский	1 898	6,2	50	50	100	95	95	190
Карабашкий	2 055	2,5	95	145	860	195	298	1 767
Блявинский	438	2,8	320	200	1250	140	88	548
Гайский	1 670	3,8	128	170	860	214	284	1 436
Бурибай, Октябрьский	610	3,5	18	53,3	37,5	11	33	23
Всего	15 909					1 267	2 614	8 716

Примечание. * [Методические ..., 1985]; жирным шрифтом выделены максимальные значения.

В настоящее время на затопленных Левихинском и Дегтярском рудниках суммарный вынос соединений металлов шахтными водами в зонах разгрузки по-прежнему продолжается на высоком уровне и составляет сотни (марганец, цинк) и даже тысячи тонн в год (железо) (Таблица 5.3, Рисунок 5.1). Вынос меди как на Левихинском, так и на Дегтярском руднике уменьшился более чем на порядок.

Таблица 5.3 - Величина суммарного выноса сульфатов, ионов металлов и редкоземельных элементов шахтными водами рудников (т/год) (использованы данные [Грязнов и др., 1997; Фельдман и др., 2004ф, 2008ф; Вишняк, Силина, 2005ф; Рыбникова и др., 2014])

Период	Компоненты								
	SO ₄ ²⁺	Cu ²⁺	Zn ²⁺	Fe _{общ}	Mn ²⁺	Ni ²⁺	Co ²⁺	Cd ²⁺	РЗЭ
Левихинский рудник									
Отработка	9 623	247	510	1 177	76	0,37	0,27	1,27	9,8
Затопление*	22 489	54	1 537	3 602	581	0,81	6,39	1,84	13,4
Затопление**	10 421	9	427	2 123	103	0,43	1,57	0,44	4,2
Дегтярский рудник									
Отработка	12 305	171	988	2 183	47	нс	нс	нс	2,0
Затопление**	7 593	12	142	1 575	72	нс	нс	0,2	нс

Примечания * начальный этап;** через 10 лет после остановки водоотлива; РЗЭ – сумма редкоземельных элементов.

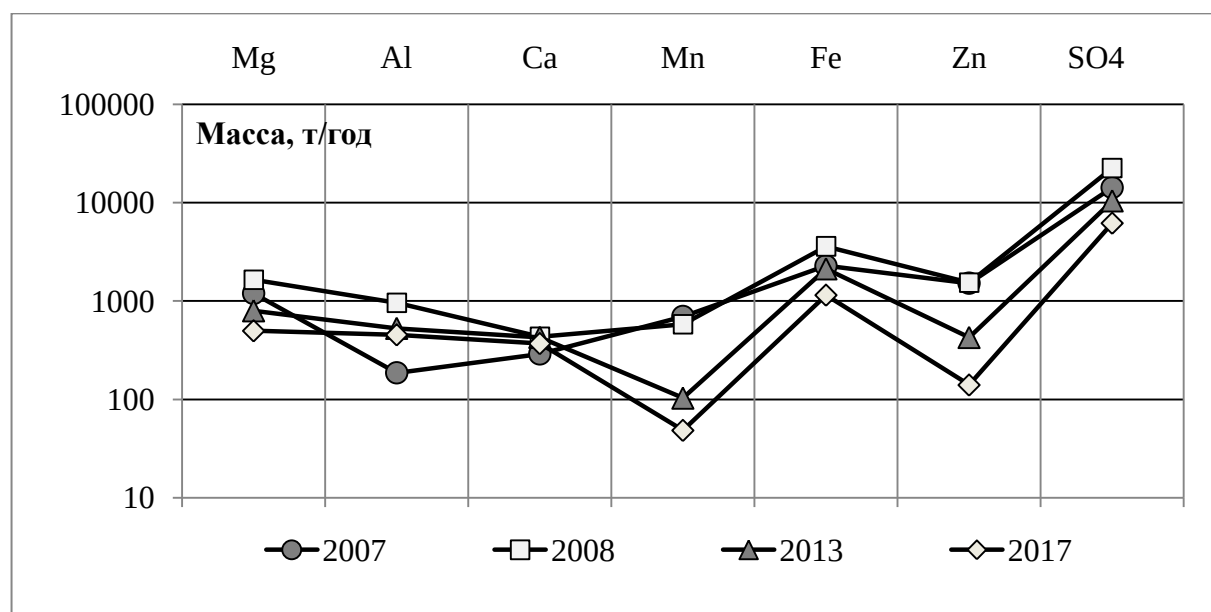


Рисунок 5.1 – Масса выноса компонентов с шахтными водами зоны разгрузки Левихинского рудника по годам

Как при отработке, так и после затопления (особенно в начальный период после выхода шахтных вод на поверхность) содержание многих компонентов в шахтных водах было значительно выше величин промышленного содержания: кобальта в 73 раза, марганца в 66 раз, железа в 41 раз, редкоземельных элементов

в 39 раз, алюминия в 11 раз (Таблица 5.4). Содержание меди в шахтных водах после затопления ниже, чем величина промышленного содержания.

Таблица 5.4 – Содержание компонентов и коэффициент концентрации по величине промышленного содержания компонентов ($K_{\text{пс}}$) в шахтных водах Лёвихинского и Дегтярского рудников при отработке и после затопления [Рыбникова, Рыбников, 2015].

Период	Показатель	Компоненты								
		Al ³⁺	Cu ²⁺	Zn ²⁺	Fe _{общ}	Mn ²⁺	Ni ²⁺	Co ²⁺	Cd ²⁺	РЗЭ
		Промышленное содержание, мг/л***								
		100	50	50	100	10	1	0,1	1	0,5
		Содержание в шахтных водах (мг/л) и коэффициент концентрации (K _{пс}) по компонентам								
Левихинский рудник										
Отработка	мг/л	375	154	317	730	47	0,23	0,17	0,79	6,1
	K _{пс}	3,8	3,1	6,3	7,3	4,7	0,2	1,7	0,8	12,2
Затопление*	мг/л	1092	62	1 755	4 112	663	0,93	7,3	2,1	15,3
	K _{пс}	10,9	1,2	35,1	41,1	66,3	0,9	73,0	2,1	38,8
Затопление**	мг/л	603	11	487	2 424	118	0,49	1,79	0,5	4,9
	K _{пс}	6,0	0,2	9,7	24,2	11,8	0,5	17,9	0,5	17,8
Дегтярский рудник										
Отработка	мг/л	нс	77	447	989	21	нс	нс	нс	0,9
	K _{пс}	нс	1,5	8,9	9,9	2,1	нс	нс	нс	1,8
Затопление**	мг/л	нс	10	116	995	40	нс	нс	0,12	нс
	K _{пс}	нс	0,2	2,3	10	4	нс	нс	0,1	нс

Примечания. * начальный этап; ** через 10 лет после остановки водоотлива; *** [Методические ..., 1985]; $K_{\text{пс}}$ – коэффициент концентрации по величине промышленного содержания компонента в шахтной воде, $K_{\text{пс}} = C / C_{\text{пс}}$, C – фактическое содержание компонента в шахтной воде, $C_{\text{пс}}$ – промышленное содержание компонента; нс – нет сведений.

РЗЭ по запасам сырья в земной коре и по суммарной распространенности значительно превосходят запасы ряда металлов: свинца - в 10 раз, молибдена — в 50 раз, вольфрама — в 165 раз, золота в 200 раз. По запасам редкоземельных элементов Россия занимает второе место в мире, при этом добыча не превышает 2% от мировой, а ведущая роль (97%) принадлежит Китаю [Романова, 2014]. К 2020 году Россия рассчитывает полностью отказаться от импорта редкоземельных металлов. В Свердловской области прогнозные ресурсы оксидов редкоземельных

элементов и иттрия на Сысертско-Тюбукской площади и Верхнемакаровском участке оцениваются величиной 54,8 тыс.т [Справка ..., 2009].

Концентрации РЗЭ в шахтных водах Левихинского рудника в десятки раз превышают промышленные содержания (Таблица 5.5, Рисунок 5.2).

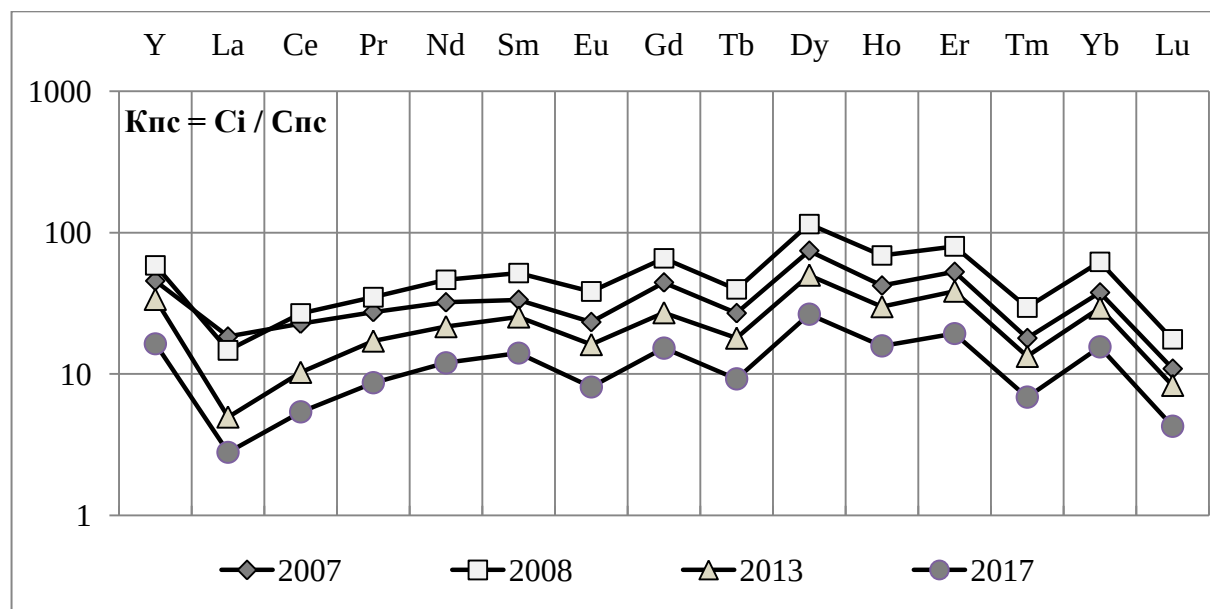


Рисунок 5.2 – Распределение коэффициентов концентрации по промышленному содержанию РЗЭ в шахтных водах зоны разгрузки Левихинского рудника по годам

Распределение РЗЭ во временном разрезе хорошо описывается экспоненциальной зависимостью (достоверность аппроксимации $R^2=0,79$), период полураспада 1890 сут. Продолжительность времени, в течение которого концентрации РЗЭ будут превышать значения величин промышленного содержания, составляет 20 лет после выхода шахтных вод на поверхность. Потенциальные ресурсы РЗЭ, оцененные по суммарной массе выноса за этот период, составляют около 120 т, за период с 2007 по 2017 год было вынесено на поверхность около 80 т РЗЭ.

Таблица 5.5 - Коэффициент концентрации по величине промышленного содержания редкоземельных элементов в шахтных водах Левихинского рудника после затопления

Элемент			Коэффициент концентрации	
Символ	Атомный номер	Имя	2008 г.	2013 г.
Y	39	Иттрий	58,6	33,7
La	57	Лантан	14,7	5,0
Ce	58	Церий	26,8	10,3
Pr	59	Празеодим	34,9	17,1
Nd	60	Неодим	46,4	21,6
Sm	61	Самарий	51,8	25,3
Eu	62	Европий	38,3	16,1
Gd	63	Гадолиний	65,7	27,1
Tb	64	Тербий	39,6	17,9
Dy	65	Диспрозий	115,0	50,0
Ho	66	Гольмий	68,9	29,9
Er	68	Эрбий	80,0	38,5
Tm	69	Тулий	29,5	13,3
Yb	70	Иттербий	62,2	29,2
Lu	71	Лютеций	17,6	8,3
Среднее			38,8	17,8

Примечание. Sc (скандий) находится в концентрациях ниже предела обнаружения.

Потенциальные ресурсы цветных металлов и железа, оцененные по суммарной массе выноса за период 20 лет, когда значения показателей будут выше величин промышленного содержания, составят около 36 тыс. т железа, 15,3 тыс. т цинка, 9,6 тыс. т алюминия, 5,8 тыс. т марганца, 60 т кобальта.

Суммарная извлекаемая ценность⁷ цветных металлов и РЗЭ из шахтных вод Левихинского рудника в начальный период после его затопления превышала 13 млн \$ США, в последующие годы сохраняется на уровне около 4-5 млн. долларов США (Таблица 5.6). За весь период, в течение которого концентрации компонентов будут выше, чем значения концентраций промышленного содержания (по меньшей мере 20 лет), извлекаемая ценность составит около 130 млн \$ США, в качестве среднегодового значения можно принять 6,0 млн \$ США, или около 500 млн руб./год.

⁷ Ценность запасов в недрах [А.В. Душин, 2014].

Таблица 5.6 - 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.
цветные металлы			Nd	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
РЗЭ			Er	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
Итого				13 172	5 152
В том числе РЗЭ				6 352	2 850
В том числе цветных металлов				6 820	2 302

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)

Потенциальная извлекаемая ценность компонентов, которые были депонированы в виде осадка в открытом карьере после обезвреживания кислых шахтных вод на месторождении Айрон Маунтен (Iron Mountain, США), оценивается суммой более 20 млн \$ США (без учета РЗЭ) за период с 1994 по 2002 год [Nordstrom et al., 2017]. Эти оценки показывают, что уровень выноса ценных компонентов на объектах завершённой добычи медных рудников очень высокий.

5.3 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 источников⁸ загрязнения поверхностной гидросферы является сброс из прудов-отстойников.

Состав шахтных вод (в среднемноголетнем разрезе) после затопления Левихинского рудника отличается от сформированного при водоотливе (Глава 4). Сточные воды, поступающие в р. Тагил, также стали более загрязненными: 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).

Степень очистки шахтных вод затопленного Левихинского рудника составляет от 85-90% (для сульфат-иона, марганца, цинка, меди) до 98% (для железа) (Рисунок 5.3).

Тем не менее, сточные воды, сбрасываемые в р. Тагил, имеют значительные превышения ПДК и более высокие содержания компонентов, чем в период отработки. Соответственно, степень загрязнения р. Тагил ниже сброса после затопления также увеличилась: по железу в 6,4 раза (от 0,7 до 4,3 мг/л), по цинку в 3 раза (от 0,65 до 1,97 мг/л) (Таблица 5.7).

Анализируя степень и характер загрязнения воды в р. Тагил по ее течению, можно отметить значительное ухудшение качества воды в р. Тагил после сброса сточных вод с Левихинского шламонакопителя (Рисунок 5.4). Содержание всех компонентов в воде реки Тагил (по сравнению со створом, расположенным выше по течению) увеличивается: концентрации сульфатов возрастают в 2,5 раза; марганца, меди, железа - в 5–8 раз; цинка – в 20 раз. Такое положение объясняется не только повышенными содержаниями этих компонентов в шахтных водах затопленного рудника. Немаловажное значение имеют такие факторы, как

⁸ И при этом единственным, по которому имеется задокументированный количественный учет по форме 2-ТП (ВОДХОЗ).

несовершенство очистки и вторичное загрязнение сточных вод осадками, накопленными в шламоотстойном пруду за десятилетия его эксплуатации.

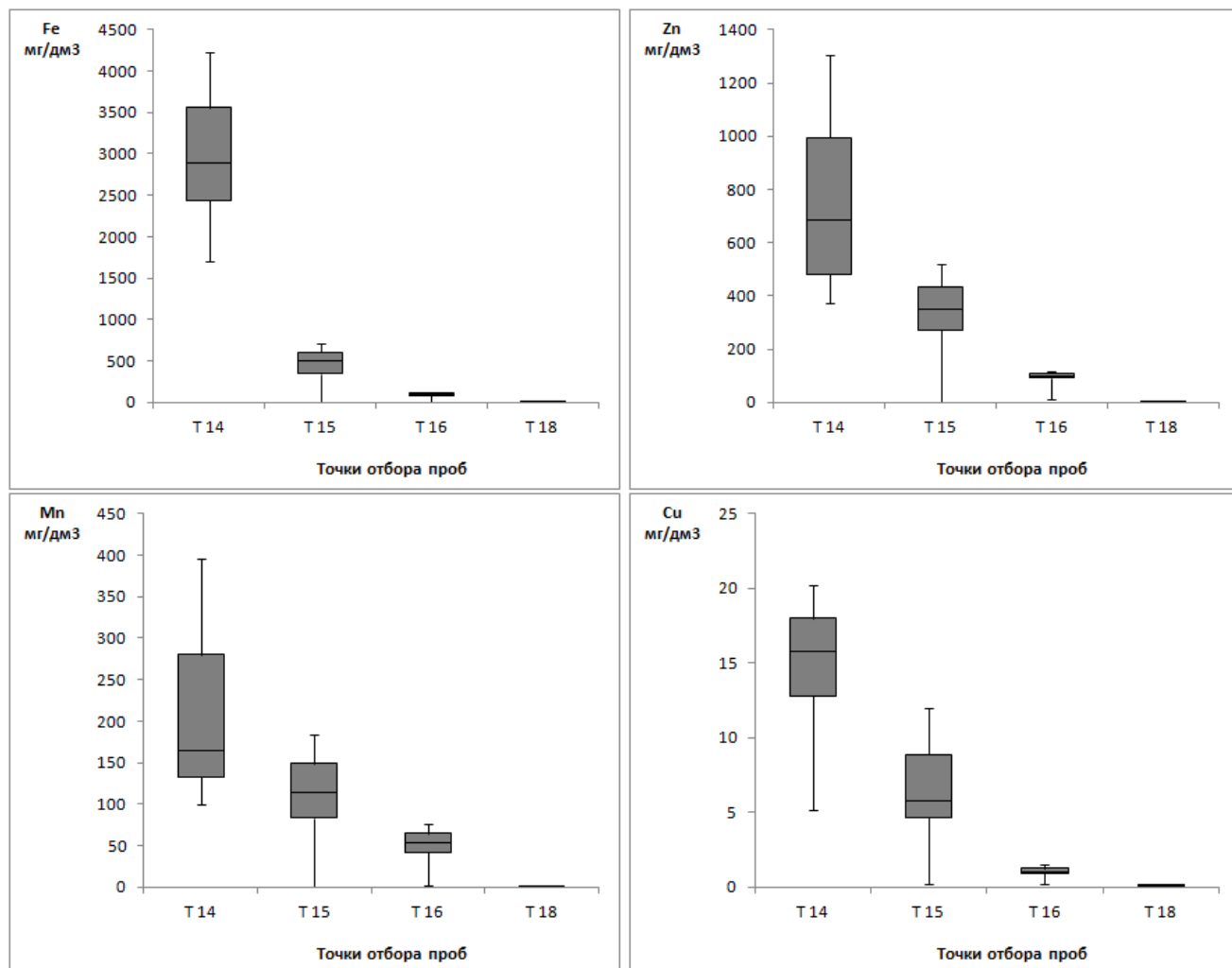


Рисунок 5.3 – Степень очистки шахтных вод затопленного Левихинского рудника. Точки отбора проб: T14 – зона разгрузки шахтных вод; T15 – пруд-осветлитель; T16 – сбросной канал; T18 - ниже сброса сточных вод из шламоотстойного пруда Левихинского рудника

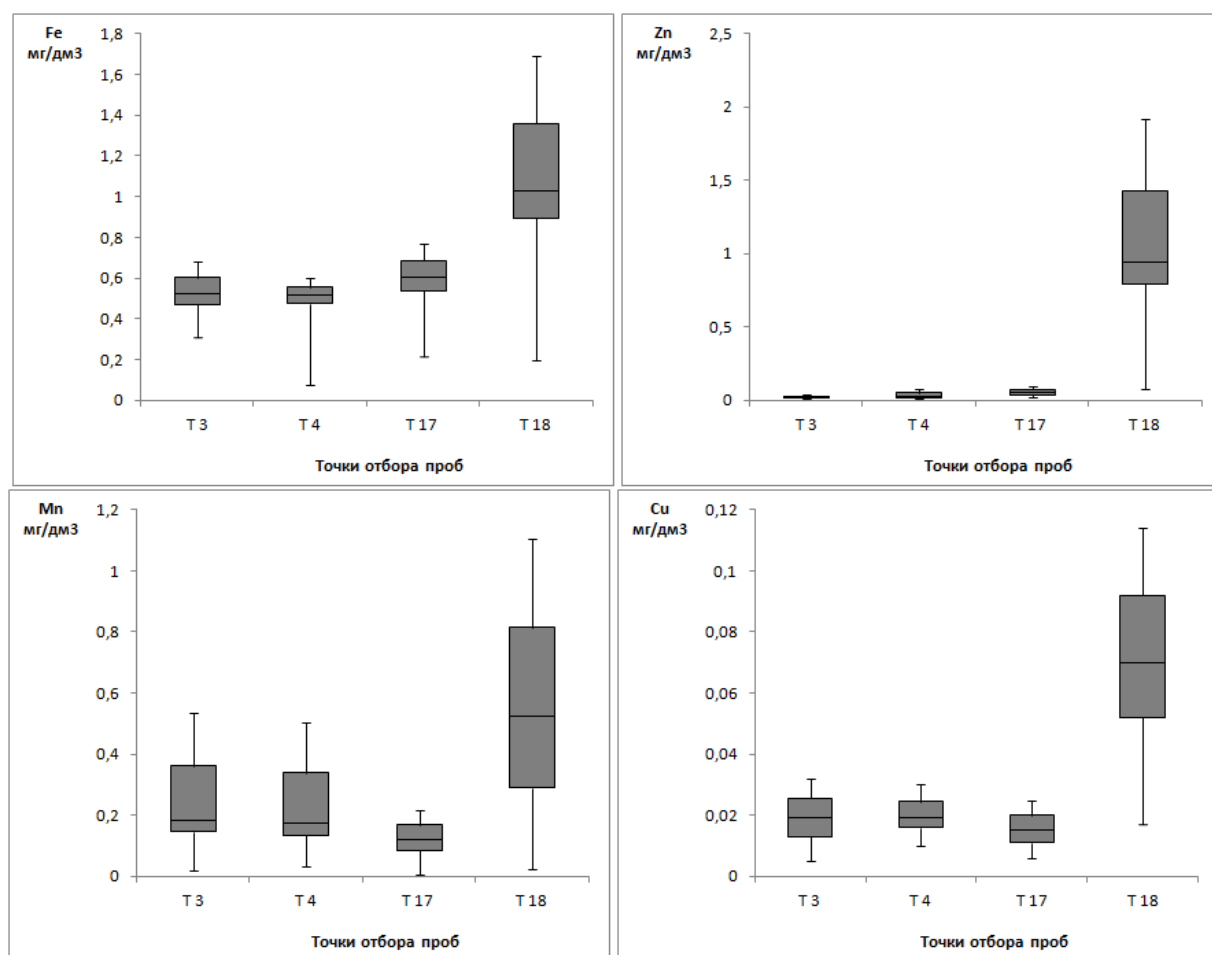


Рисунок 5.4 – Изменение содержания компонентов в воде р. Тагил по течению реки после затопления Левихинского рудника. Точки отбора проб: Т3, Т4- выше и ниже сброса сточных вод станции нейтрализации Ломовского рудника; Т17, Т18- выше и ниже сброса сточных вод из шламоотстойного пруда Левихинского рудника

После затопления Левихинского рудника наиболее существенное изменение превышений ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения в р.Тагил ниже сброса сточных вод по сравнению с периодом отработки отмечается для цинка (коэффициент концентрации по ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения $K_{\text{ПДК}}$ изменился от 65 до 355), железа (общ) ($K_{\text{ПДК}}$ от 7 до 43), сульфат-ионов ($K_{\text{ПДК}}$ от 0,7 до 1,4). При этом в связи с более низкими концентрациями меди в шахтных водах техногенного водоема (по сравнению с периодом отработки) концентрации её в водах р.Тагил ниже сброса водоотлива уменьшились почти в три раза ($K_{\text{ПДК}}$ от 370 до 130), но остаются очень высокими и являются одним из ведущих загрязняющих компонентов (Таблица 5.8) [Рыбникова и др., 2014].

Таблица 5.7 - Характеристика шахтных, сточных и поверхностных вод в районе Левихинского рудника в период отработки и после затопления (среднегодовые значения)

Компоненты	ПДК _{р/х} [*]	Фон ^{**}	Шахтные воды (техногенный водоем)		Сточные воды (сброс с пруда-отстойника)		Поверхностные воды р. Тагил			
							выше сброса		ниже сброса	
			отработка ***	затоплени е ****	отработка ***	затоплени е ****	отработка ***	затоплени е ****	отработка ***	затоплени е ****
рН	6,0–9,0	7,1	2,8	4,0	6,9	5,9	7,1	7,2	7,2	7,1
Сухой остаток, мг/л	1000	180	11600	32617	2336	5546	394	371	334	418
Сульфаты, мг/л	100	28,4	5 978	15955	1 200	2591	68	56	114	142
Хлор, мг/л	300	3,6	н.с.	0	29	23	31	25	29	24
Медь, мг/л	0,001	0,028	154	23	7,2	1,9	0,02	0,02	0,37	0,13
Цинк, мг/л	0,01	0,044	317	1015	17,1	104,8	0,07	0,07	0,65	1,97
Железо, мг/л	0,1	0,32	730	3273	7,10	77,9	0,55	0,53	0,67	4,28
Марганец, мг/л	0,01	0,074	47	298	3,8	46	0,42	0,19	0,85	1,02
Мышьяк, мг/л	0,05	0,0008	0,1	< по	0,05	0,004	0,04	0,001	0,04	0,001
Кадмий, мг/л	0,005	н.с.	0,8	0,5	нс	нс	нс	нс	нс	нс

Примечания. ^{*} ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения [Нормативы ..., 2011]; ^{**} р. Шайтанка выше разлива шахтных вод, левобережный приток р. Тагил, по данным ООО «Экология»; ^{***} по данным ОАО «Унипромедь», 1990 г.; ^{****} по данным ООО «Экология»; нс – нет сведений; < по – ниже погрешности определения.

В последние годы превышение предельно-допустимых концентраций для водоемов рыбохозяйственного значения ($ПДК_{рх}$) в р. Тагил ниже сброса сточных вод отмечается для цинка ($К_{ПДК}=197$), меди ($К_{ПДК}=130$), марганца ($К_{ПДК}=102$), железа ($К_{ПДК}=43$), сульфат-иона ($К_{ПДК}=1,4$). Необходимо отметить, что выше сброса вода в реке Тагил также (как и ранее) не соответствует $ПДК_{рх}$ по ряду показателей, в частности, по меди ($К_{ПДК}=20$), марганцу ($К_{ПДК}=19$), цинку ($К_{ПДК}=7$), железу ($К_{ПДК}=5$), (Таблица 5.8).

Это связано по меньшей мере с двумя причинами. Во-первых, для рассматриваемого района характерен повышенный природный фон, например, в пробах воды р. Шайтанка (левобережный приток р. Тагил, выше участков расположения объектов добычи) содержание меди 0,0028 мг/л ($К_{ПДК}=28$), марганца 0,074 мг/л ($К_{ПДК}=7,4$), цинка 0,044 мг/л ($К_{ПДК}=4,4$), железа 0,32 ($К_{ПДК}=3,2$). Кроме того, выше по течению р. Тагил расположено несколько отработанных медных рудников, на которых также происходит разгрузка шахтных вод на поверхность.

Таблица 5.8 - Кратность превышения ПДК для водных объектов рыбохозяйственного значения в шахтных, сточных и поверхностных водах в районе Левихинского рудника в период отработки и после затопления

Компоненты	Шахтные воды (техногенный водоем)		Сточные воды (сброс с пруда-отстойника)		Поверхностные воды р.Тагил			
					выше сброса		ниже сброса	
	отработ ка	затопле ние	отработ ка	затопле ние	отработ ка	затопле ние	отработ ка	затопле ние
Сухой остаток	12	33	4	6	0,4	0,4	0,3	0,4
Сульфаты	60	160	12	26	0,7	0,6	1,1	1,4
Медь	154 000	23 000	7 200	1 900	20	20	370	130
Цинк	31 700	101 500	1 710	10 480	7	7	65	197
Железо	7 300	32 730	71	779	5,5	5,3	7	43
Марганец	4 700	29 800	380	4600	42	19	85	102
Мышьяк	2	< по	1	0,08	0,8	0,02	0,8	0,02
Кадмий	160	100	нс.	нс.	нс.	нс.	нс.	нс.

Примечание: выделены компоненты с наиболее высокими показателями.

Если на этапе отработки после сброса очищенных дренажных вод основным загрязняющим компонентом в реке была медь, то в настоящее время степень загрязнения поверхностных вод медью уменьшилась почти в три раза: от 0,37 мг/л до 0,13 мг/л ($K_{\text{ПДК}}=130$), что объясняется существенным снижением содержания меди в шахтных (от 154 до 23 мг/л) и сточных (от 7,2 до 1,9 мг/л) водах (Таблица. 5.7).

При этом следует отметить, что как на этапе отработки, так и после затопления перечень основных загрязняющих веществ в р. Тагил представлен идентичными компонентами, однако изменяется их значимость в загрязнении поверхностных вод: при отработке это медь ($K_{\text{ПДК}}=370$), марганец ($K_{\text{ПДК}}=85$), цинк ($K_{\text{ПДК}}=65$), железо ($K_{\text{ПДК}}=7$); после затопления – цинк ($K_{\text{ПДК}}=197$), медь ($K_{\text{ПДК}}=130$), марганец ($K_{\text{ПДК}}=102$), железо ($K_{\text{ПД}} = 3$).

В целом степень загрязнения вод р. Тагил тяжелыми металлами в первые 10 лет после затопления Левихинского рудника увеличилась в 3,5 раза (Таблица 5.8).

Учитывая нестационарный характер формирования загрязняющих компонентов в шахтных водах и тенденцию к снижению их содержания (Глава 4), можно ожидать улучшения состояния поверхностных вод в районе Левихинского рудника. Однако даже после достижения предполагаемых предельных значений показателей химического состава шахтных вод их очистка без включения в существующую схему дополнительных элементов не будет оптимальной, а уровень загрязнения р. Тагил останется высоким.

Оценка ущерба окружающей среде, который наносится в результате загрязнения водной среды и водного фонда территорий, включает материальные и финансовые потери и убытки (прямые и косвенные) вследствие ухудшения потребительских свойств воды как природного ресурса, дополнительные затраты на ликвидацию последствий загрязнения вод и восстановление их качества [Временная ..., 1999; Методика ..., 2009].

Предотвращенный экологический ущерб от загрязнения окружающей природной среды представляет собой оценку в денежной форме возможных

отрицательных последствий, которых удалось избежать (предотвратить, не допустить) в результате природоохранной деятельности. Эколого-экономическая оценка ущерба водным ресурсам (так же, как и окружающей природной среде в целом) заключается в определении фактических и возможных материальных и финансовых потерь и убытков от изменения качественных и количественных параметров окружающей природной среды.

Для расчета вреда используется два подхода. Первый основан на компенсационном принципе его оценки, исходя из фактических затрат на восстановление нарушенного состояния водного объекта, с учетом понесенных убытков, в соответствии с проектами рекультивационных и иных восстановительных работ. Второй является расчетным и применяется независимо от того, проводятся мероприятия по устранению нарушения и его последствий непосредственно вслед за фактом нарушения или будут проводиться в дальнейшем в соответствии с программами по использованию, восстановлению и охране водных объектов, а также программами социально-экономического развития регионов [Временная ..., 1999; Методика ..., 2009].

Размер нанесенного и предотвращенного экологического ущерба (вреда), причиненного водному объекту сбросом загрязняющих веществ в составе сточных (в том числе шахтных, рудничных) вод, оценивается как

$$Y = K_{\text{эк}} * K_{\text{ин}} * \sum (M_i * H_i * K_{\text{зи}}),$$

где Y – ущерб (тыс.руб.); $K_{\text{эк}}$ – коэффициент, учитывающий экологическую ситуацию (для бассейна р.Оби $K_{\text{эк}} = 1,22$); $K_{\text{ин}}$ – инфляционный коэффициент; H_i – таксы для исчисления размера вреда от сброса i -го вредного вещества (тыс.руб./т), принимаются по [О нормативах, 2003]; $K_{\text{зи}}$ – коэффициент, учитывающий интенсивность негативного воздействия загрязняющих веществ на водный объект.

Масса сброшенного i -го загрязняющего вещества (M_i , т) при оценке нанесенного ущерба определяется как

$$M_i = Q * (C_{\text{фи}} - C_{\text{ди}}) * T * 10^{-6}$$

при оценке предотвращенного ущерба как

$$M_i = Q * (C_{ni} - C_{fi}) * T * 10^{-6}$$

где Q - расход сточных вод с превышением содержания i -го загрязняющего вещества, m^3 ; C_{fi} - средняя фактическая за период сброса концентрация i -го загрязняющего вещества в сточных водах (мг/л); C_{di} - концентрация i -го загрязняющего вещества, исходя из которой установлен предельно допустимый или временно согласованный лимит сброса (мг/л); C_{ni} - средняя фактическая за период сброса концентрация i -го загрязняющего вещества в неочищенных сточных водах (мг/л); 10^{-6} - коэффициент пересчета массы загрязняющего вещества из мг/л в т/м³.

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) (Рисунок 5.4, Таблица 5.10). При этом величина предотвращенного экологического ущерба в десятки раз больше.

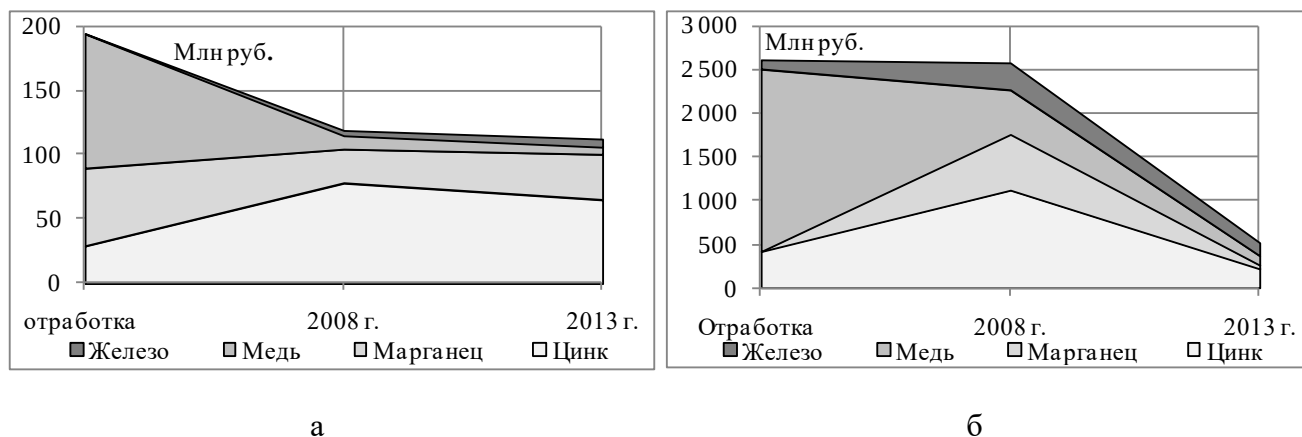


Рисунок 5.4 - Ущерб водным объектам при сбросе очищенных шахтных вод в районе Левихинского рудника в период отработки и после затопления: а – нанесенный, б - предотвращенный

Особенно значимо снижение экологического ущерба в результате очистки загрязненных шахтных вод при отработке рудника и в первые годы после его затопления: предотвращенный ущерб составил около 2,5 млрд руб. В последние годы в связи с некоторым снижением содержания большинства загрязняющих

веществ в шахтных водах предотвращенный ущерб также снизился, но по-прежнему составляет порядка 0,5 млрд руб. В зависимости от этапа освоения месторождения изменяется значимость компонентов, вносящих основной вклад в экологический ущерб: при отработке это медь (65%), после затопления - цинк (57%). Соответственно, основное внимание при планировании экологической деятельности должно быть направлено на снижение содержания цинка в сбрасываемых после очистки сточных водах. Предотвращенный ущерб также наиболее значим в результате очистки шахтных вод от цинка, железа (общ), марганца.

Таблица 5.10 - Ущерб водным объектам при сбросе очищенных шахтных вод в районе Левихинского рудника в период отработки и после затопления (нанесенный и предотвращенный)

Компоненты	Такса, тыс.руб/т*	Этап, год		
		отработка (в современных ценах)	затопление, 2008 г.	затопление, 2013 г.
Ущерб нанесенный, тыс.руб./год				
Сульфаты	0,014	124	169	218
Медь	1 377,4	105 930	11 413	6 561
Цинк	137,7	29 131	77 910	64 925
Железо	13,8	305	4 169	6 356
Марганец	137,7	59 799	25 970	34 854
Всего		195 289	119 632	112 915
Предотвращенный ущерб, тыс.руб./год				
Сульфаты	0,014	740	9	736
Медь	1 377,4	2 086 715	507 988	107 844
Цинк	137,7	422 211	1 121 492	224 162
Железо	13,8	103 640	307 493	148 655
Марганец	137,7	7 119	647 882	48 523
Всего		2 620 425	2 584 863	529 919

Примечание. * [О нормативах ..., 2003, 2014]; жирным шрифтом выделены максимальные значения.

Плата за негативное воздействие на окружающую среду несопоставима с затратам на природоохранные мероприятия. Так, в Свердловской области платежи за загрязнение в 2014 г. составили 944,5 млн руб. (в т.ч. на водные объекты - 239,8 млн руб.). При этом затраты на охрану окружающей среды в

2014 г. были на порядок больше и составили 11,23 млрд руб., из них на очистку сточных вод было направлено 5,6 млрд руб. [Государственный доклад , 2015].

5.4 Сопоставление потенциальной ценности шахтных вод и ущерба от загрязнения водных объектов

На очистку кислых шахтных вод затопленных рудников с начала 2000-х годов ежегодно выделяется около 100 млн руб. из областного бюджета [Областная ..., 2012], эти затраты по сравнению с оцененными величинами предотвращенного экологического ущерба (2,5 млрд руб. в 2008 г., 0,5 млрд руб. в 2008 г.) безусловно могут рассматриваться как обоснованные (Рисунок 5.5). Для снижения сложившегося в настоящее время уровня загрязнения гидросферы необходимо совершенствование существующей системы нейтрализации кислых шахтных вод.

Кроме того, поскольку продолжительность существования такого источника загрязнения исчисляется десятилетиями, целесообразно использовать шахтные вод в качестве источника гидроминерального сырья. Потенциальная извлекаемая ценность компонентов, содержащихся в шахтных водах, в среднем оценивается в 500 млн руб. в год. Это может не только компенсировать затраты на нейтрализацию кислых шахтных вод и принести дополнительный доход, но и ещё более значительно снизить содержание вредных веществ, сбрасываемых со сточными водами из шламонакопителя, и уменьшить загрязнение гидросферы.

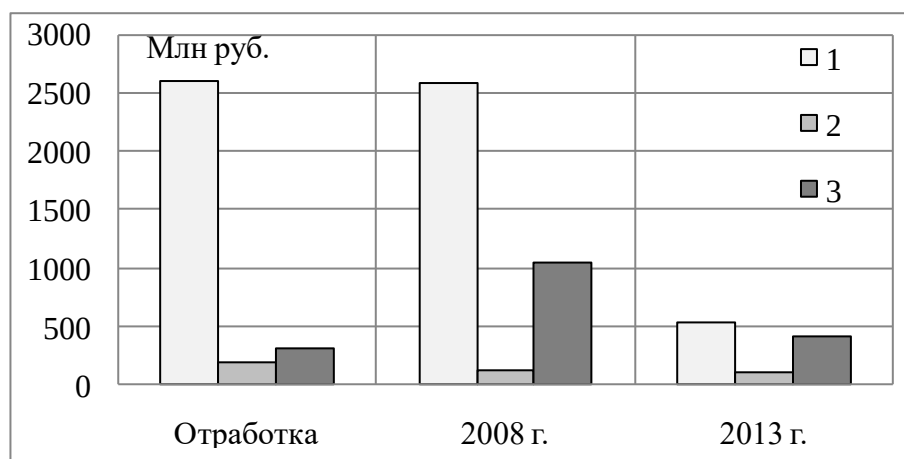


Рисунок 5.5 – Сопоставительный график ущерба водным объектам (1 – предотвращенного, 2 - нанесенного) и извлекаемой ценности компонентов из шахтных вод (3)

Выводы по разделу

Отработанные медноколчеданные рудники являются значимым источником загрязнения гидросферы. Выполнен анализ составляющих экологического ущерба, причиненного водным объектам вследствие сброса очищенных шахтных вод. Величина экологического ущерба водным объектам от сброса сточных вод Левихинского рудника как при отработке, так и после затопления составляет более 100 млн. руб. в год, величина предотвращенного экологического ущерба на порядок больше. Определен вклад отдельных компонентов: при отработке основным загрязняющим веществом являлась медь, после прекращения водоотлива - цинк. Установлено, что шахтные воды являются обеспеченным возобновляемым источником цветных металлов и редкоземельных элементов и могут рассматриваться как месторождения гидроминерального сырья. Оценено промышленное содержание цветных металлов и редкоземельных элементов в шахтных водах затопленных медноколчеданных рудников. Суммарная извлекаемая ценность цветных металлов и РЗЭ из шахтных вод Левихинского рудника превышает 500 млн руб. в год, около половины приходится на редкоземельные элементы. Показано, что потенциальная извлекаемая ценность компонентов превышает затраты на

обеспечение ежегодной нейтрализации кислых шахтных вод и величину экологического ущерба от сброса очищенных шахтных вод.

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.

Для снижения экологической нагрузки на гидросферу и предотвращения залповых поступлений неочищенных кислых вод в водотоки шахтные воды медноколчеданных рудников обрабатываются на станциях нейтрализации и отстаиваются в прудах-накопителях. Существующие методы очистки сточных вод недостаточно эффективны: после обработки и отстаивания значительное количество металлов осаждается, их содержание уменьшается, тем не менее, часть этих веществ попадает в поверхностные водные объекты в превышающих ПДК концентрациях.

Степень загрязнения вод р. Тагил тяжелыми металлами после затопления Левихинского рудника увеличилась в 3,5 раза. Несмотря на тенденцию к значительному снижению содержания загрязняющих веществ в шахтных водах, их очистка без реорганизации системы не будет эффективной, а уровень загрязнения р. Тагил останется достаточно высоким.

Заметного снижения содержания тяжелых металлов можно добиться при устройстве, например, каскада осветлительных прудов [Wolkersdorfer, 2008], поэтому целесообразно создание ниже существующих еще одного пруда-отстойника, в котором после нейтрализации будет происходить доосаждение тяжелых металлов и улучшение качественного состава сточных вод.

Шахтные воды затопленных медноколчеданных рудников могут рассматриваться как возобновляемые месторождения гидроминерального сырья. Однако до настоящего времени извлечение из них полезных компонентов не организовано, методы очистки сточных вод неэффективны,

соответственно, экологическая нагрузка на гидросферу в старопромышленных горнодобывающих районах Среднего Урала после прекращения добычи не снижается.

Извлекаемая потенциальная ценность цветных металлов и редкоземельных элементов, присутствующих в шахтных водах затопленных медноколчеданных рудников, превосходит затраты на обеспечение ежегодной нейтрализации кислых шахтных вод, поступающих в бассейны рек Тагил и Чусовая из шламонакопителей недействующих рудников на территории Кировградского городского округа и городского округа Дегтярск, и больше, чем величина 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.

6 ФОРМИРОВАНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПИТЬЕВЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ДОБЫЧЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ НА ГОРНОСКЛАДЧАТОМ УРАЛЕ

6.1 Опыт использования подземных вод для питьевого водоснабжения при отработке и консервации МТПИ

Дренажные подземные воды 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 (МППВ), запасы которых первоначально утверждались в схеме водоотлива горнорудного предприятия как попутное полезное ископаемое (Рисунок 6.1, Таблица. 6.1).

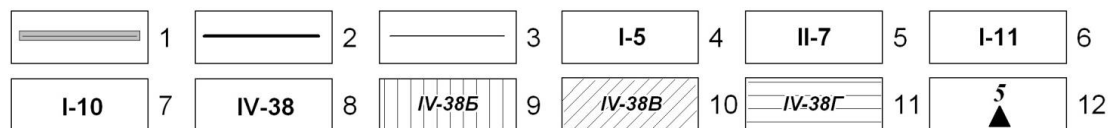
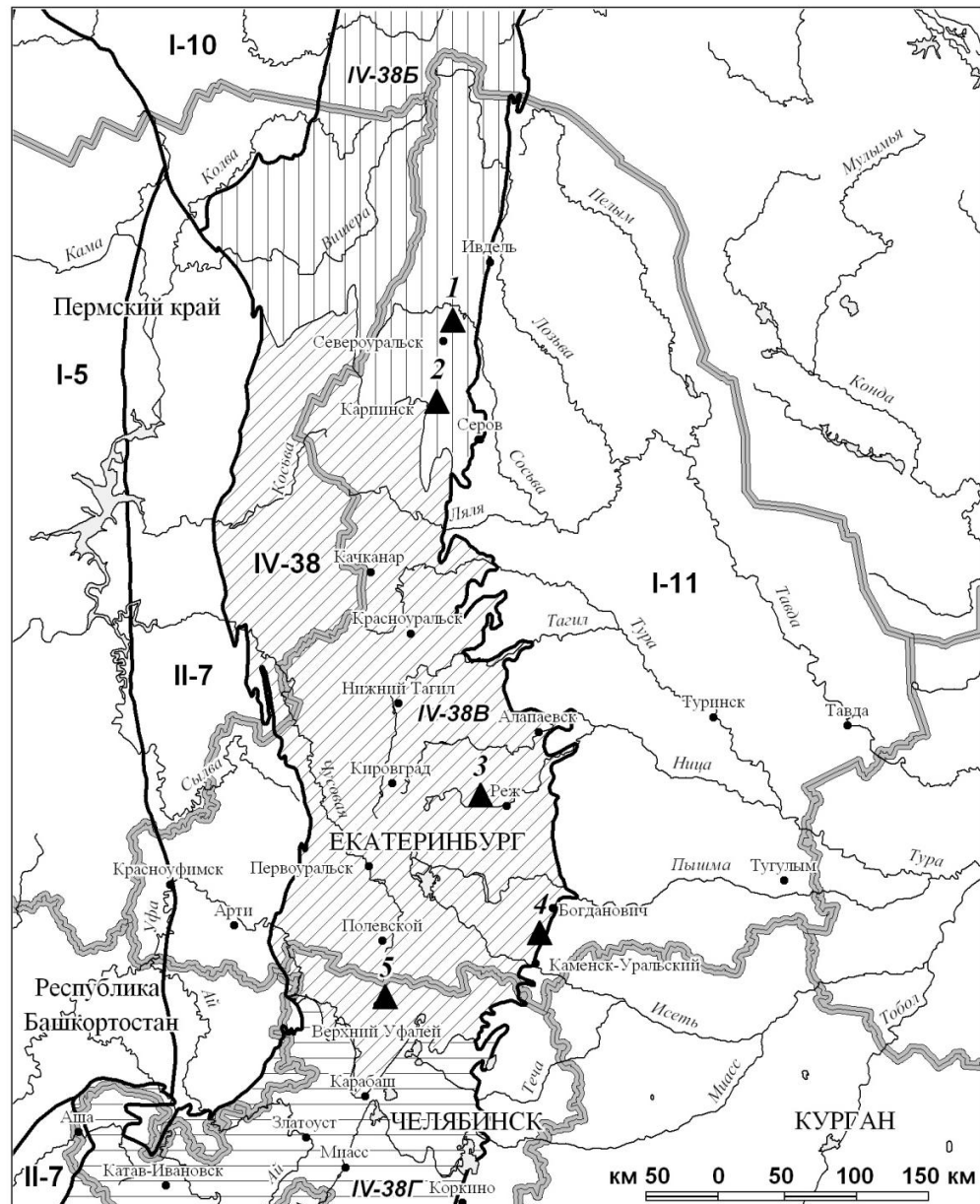


Рисунок 6.1 – Схема размещения месторождений питьевых подземных вод, запасы которых первоначально утверждались как попутное полезное ископаемое. Условные обозначения: 1 – границы субъектов РФ; 2-3 – границы бассейнов подземных вод (2 – первого, 3 – второго порядка); 4-8 – бассейны подземных вод первого порядка и их индексы (4 – Восточно-Русский артезианский бассейн (АБ), 5 – Предуральский предгорный АБ, 6 – Западно-Сибирский АБ, 7 – Тимано-Печерский АБ, 8 – Большеуральская гидрогеологическая складчатая область); 9-11 – бассейны подземных вод второго порядка и их индексы (гидрогеологические складчатые области: 9 – Северо-Уральская, 10 – Среднеуральская, 11 – Южно-Уральская); 12 – месторождение (номер в соответствии с таблицей 6.1)

Таблица 6.1 - Месторождения питьевых подземных вод, запасы которых первоначально утверждались как попутное полезное ископаемое

№ на карте	Наименование МППВ	Наименование МТПИ	Запасы			Фактическое использование для ХПВ****, тыс.м ³ /сут	Примечание
			количество, тыс.м ³ /сут	категория	инстанция и дата утверждения (в скобках – срок утверждения)		
1	Кальинское	Северо-Уральские бокситовые	50,0	A	ТКЗ* 20.11.2001	36,2	
2	Карпинское	Богословское бурогольное	11,0	A	НТС*** 17.12.1962	4,8	
3	Липовское	Липовское никелевое	13,8	A	ТКЗ 11.03.2002	9,3	ранее утверждены ГКЗ** 15.09.78
4	Полдневское	Троицко-Байновское огнеупорных глин	12,6	A	ТКЗ 12.11.2002 (12 лет)	11,3	ранее утверждены ГКЗ 18.02.1971
5	Черемшанское	Черемшанское никелевое	8,2	A	НТС 1977	9,3	

Примечания. * ТКЗ - территориальная комиссия по запасам; ** ГКЗ – государственная комиссия по запасам, *** НТС - научно-технический совет; **** ХПВ - хозяйственно-питьевое водоснабжение

6.2 Закономерности формирования ресурсов и качества месторождений подземных вод в районе ведения горных работ

Кальинское месторождение подземных вод расположено в пределах Североуральской карстовой области, сложенной карбонатными и терригенно-карбонатными породами силурийской и девонской систем нижнего палеозоя, и характеризуется высокой закарстованностью карбонатных разностей пород (Рисунок 6.2). Северо-Уральские бокситовые месторождения (Красная Шапочка, Кальинское, Ново-Кальинское, Черемуховское) отрабатываются с 1934 г., глубина отработки достигает 1 км, депрессионная воронка площадью около 350 км² вытянута в меридиональном направлении на 70 км от р. Вагран на юге до р. Шегультан на севере (Рисунок 6.2).

Северо-восточный дренажный узел защищает Северо-Уральский бокситовый рудник (СУБР) с северо-востока. Суммарный водоотлив на СУБРе составляет 353 тыс.м³/сут, в том числе 111 тыс.м³/сут на Кальинском месторождении, из них 36,2 тыс.м³/сут используется для питьевых нужд г.Североуральска с населением около 50 тыс.человек. Область формирования ресурсов подземных вод, каптируемых дренажными скважинами, находится в естественных условиях (за пределами зоны ведения горнодобывающих работ), характеризуется благоприятными санитарно-экологическими условиями, добыча ведется подземным способом, полезное ископаемое и вмещающие породы инертны. Качество воды стабильно хорошее, общая минерализация подземных вод составляет 0,2-0,3 г/л, жёсткость воды не превышает 3-4 ммоль/л, перманганатная окисляемость менее 1 мгО₂/л, содержание неорганических веществ – меньше ПДК по всему перечню СанПиН 2.1.4.1074-01, вода здоровая в санитарно-микробиологическом отношении и безопасная по радиологическим показателям.

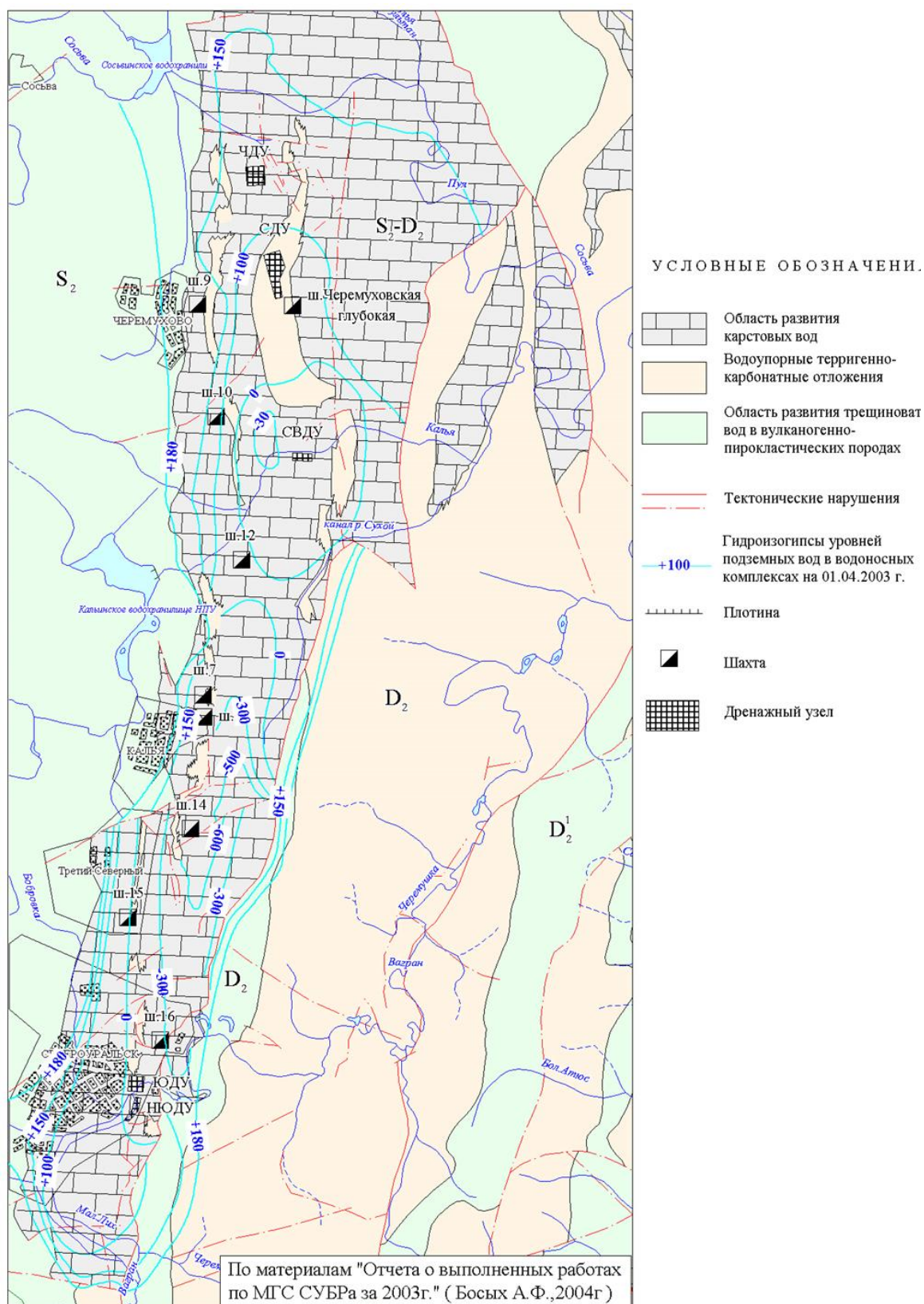


Рисунок 6.2 – Схематическая гидрогеологическая карта Североуральских бокситовых месторождений [Иванова, 2007ф]. Масштаб 1:150 000

Ресурсный потенциал Сосьвинско-Шегультанского бассейна трещинно-карстовых подземных вод, в котором расположено Кальинское месторождение подземных вод, оценивается величиной 600 тыс.м³/сут, этого количества достаточно для обеспечения водой высокого качества крупных городов Свердловской области, включая Екатеринбург, Нижний Тагил [Палкин и др., 2011].

Карпинское месторождение дренажных подземных вод (Северо-Восточный дренажный узел) Карпинское месторождение подземных вод приурочено к трещинно-карстовой зоне карбонатного массива, вмещающего Богословское бурогольное месторождение. Породы массива характеризуются интенсивной, но неравномерной закарстованностью, содержат значительные запасы подземных вод. В вертикальном разрезе максимальное проявление трещиноватости и закарстованности отмечается до глубин 200 м. С начала 60-х годов прошлого века Северо-Восточный дренажный узел защищал восточный борт Богословского карьера (разрез “Южный” глубиной 101,5 м) и использовался (совместно с Лапчинским и Северо-Лапчинским участками) для хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Карпинска (население 30 тыс.чел.) (Рисунок 6.3). Производительность дренажного узла составляя в среднем 7,9 тыс.м³/сут. Отработка Богословского бурогольного месторождения велась открытым способом с 1911 по 2001 год.

Первоначально подземные воды имели гидрокарбонатный натриево-кальциевый состав с минерализацией 150-200 мг/л. Постепенно на площади, прилегающей к Богословскому карьеру, произошла смена состава воды на сульфатно-гидрокарбонатный кальциевый с минерализацией от 400 до 550 мг/л и концентрацией сульфатов до 90-100 мг/л. Общая жёсткость воды изменилась от 2-3 до 6-7,5 ммоль/л.

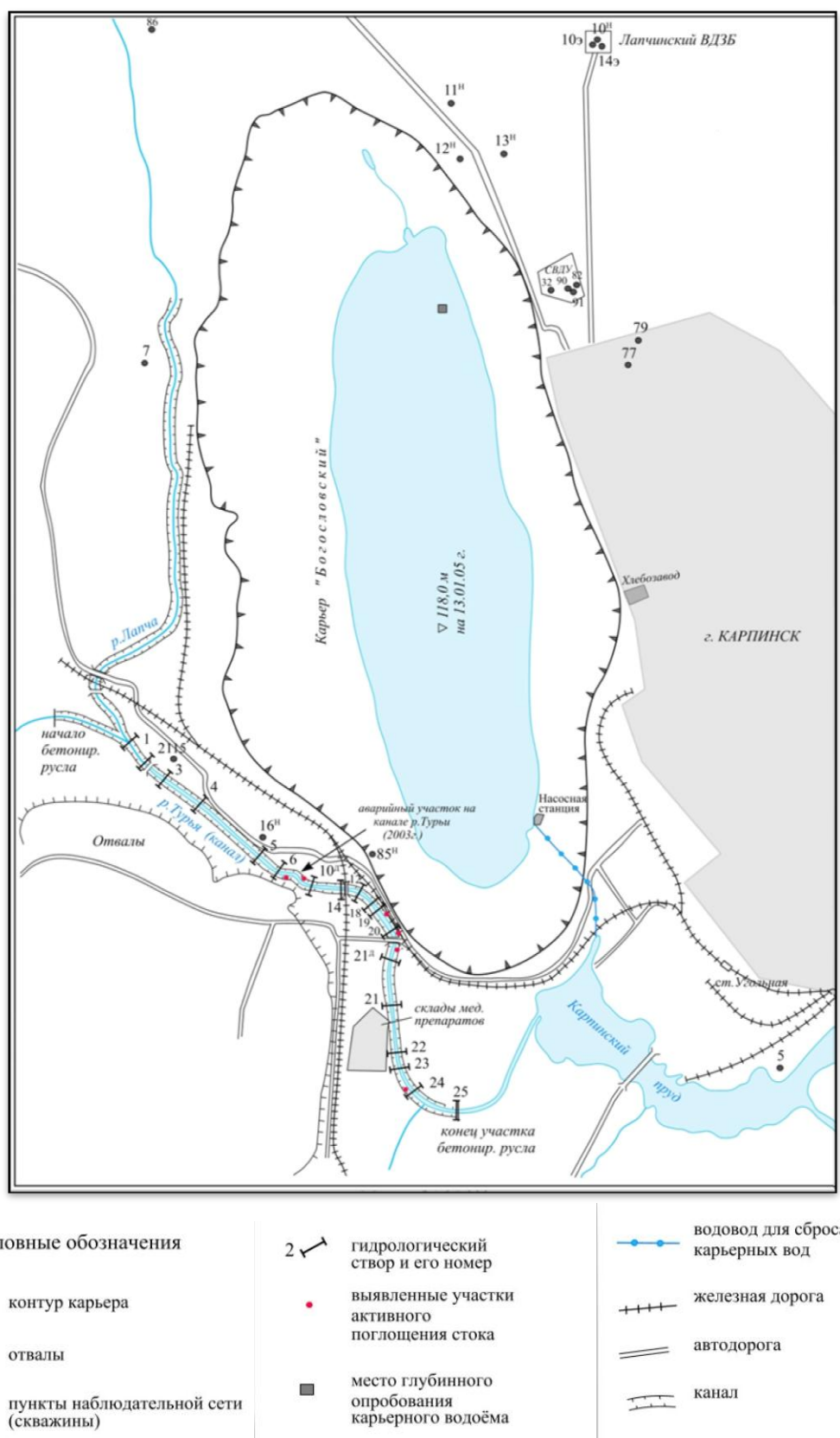


Рисунок 6.3 - Ситуационная схема Южного разреза Богословского бурого угольного месторождения [Соколкин, 2005ф]. Масштаб 1:50000

Остановка карьерного водоотлива в 2000-2001 гг. привела к образованию техногенного водоема в пределах всей карьерной выемки. Качество воды в водоёме по величине общей жёсткости (до 15-18 ммоль/л) и сухому остатку (до 1100 мг/л) превышает нормируемые показатели для питьевых целей. Концентрация сульфатов в водах водоёма достигает 400-500 мг/л, что 5-7 раз превышает содержание сульфатов в воде СВДУ. Кроме этого, в карьерных водах обнаружены железо, марганец, селен, висмут, ниобий, вольфрам в концентрациях, превышающих ПДК для питьевых целей.

Ухудшение качества подземных вод наблюдалось в течение всего периода эксплуатации водозабора, после затопления карьера ситуация усугубилась, вода не удовлетворяет санитарным нормам, необходимо проведение водоподготовки. [Соколкин, 2005ф, 2006ф].

Липовское месторождение подземных вод. Начиная с 1961 года и до конца 80-х годов законтурный дренаж Липовского никелевого карьера обеспечивал безопасность добычных работ. Здесь были созданы два дренажных водозаборных узла (на западном борту куст Л-4-5, на восточном - куст Верхний) из 3–5 скважин, глубиной 200 метров. С 1989 года Липовский водозабор стал основным источником водоснабжения г. Режа (население 50 тыс. человек), для чего был построен водовод длиной около 20 км.

Наиболее обводнёнными являются карбонатные породы - известняки и мрамора. К 1991 году, когда была прекращена добыча полезного ископаемого, понижение достигло 127 м от статического (абс. отм. +93 м) при среднегодовом расходе 250 л/с (21,6 тыс. м³/сут), при этом общая площадь питания оценивается величиной около 100 км² при площади активной части воронки депрессии 30 км². Выработанное пространство составило 51 млн. м³. Горно-эксплуатационные работы сопровождалась засыпкой карьера породами вскрыши и некондиционных руд.

После завершения отработки МТПИ произошло снижение водоотбора в два раза (до 8 тыс.м³/сут), что привело к частичному восстановлению уровня подземных вод и формированию карьерного озера глубиной 120 м на месте

залежи 4-5. Озеро расположено в границах зоны санитарной охраны второго пояса Липовского водозабора (Рисунок 6.4).

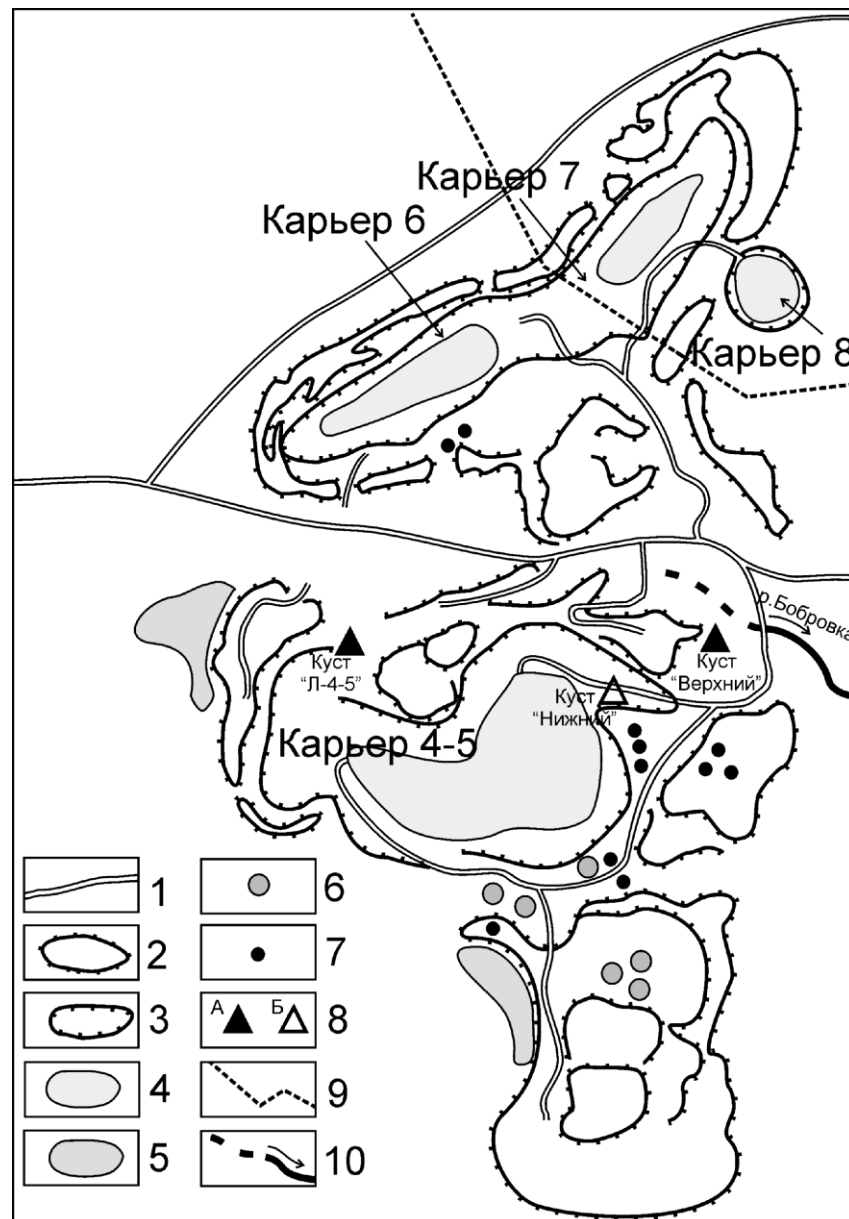


Рисунок 6.4 - Ситуационный план Липовской геотехногенной системы [Бизяев, 2012]: 1 – автодороги; 2 – внешние отвалы; 3 – карьерные выемки; 4 – карьерные озёра; 5 – приотвальные озёра; 6 – трансаккумулятивные озёра; 7 – автоморфные озёра; 8 – кусты водозаборных скважин, эксплуатируемых (А) и выведенных из работы (Б); 9 – водораздел поверхностных вод; 10 – источник р. Бобровка

В естественных условиях подземные воды гидрокарбонатные кальциевые и кальциево-магниевые с минерализацией до 0,2 г/л, содержанием сульфатов и хлоридов не более 10-15 и 5–7 мг/л, соответственно. Металлогенические особенности района, проявляющиеся прежде всего в широком развитии ультрабазитов и никеленосных кор выветривания, обуславливают наличие в подземных водах определённой группы металлов, таких как никель, кобальт, бериллий, мышьяк, медь, цинк, кадмий, хром, однако их содержания существенно ниже нормативных для питьевых вод (в частности, природно-фоновое значение никеля менее 0,02 мг/л)⁹. Характерным является наличие сульфидов в виде рассеянной минерализации в зонах гидротермального оруденения и в карстовых полостях (в виде пирита, пирротина, марказита).

В процессе работы водоотлива (за 30 лет до 1991 года) качество подземных вод изменилось – содержание большинства показателей выросли в 1,5–2 раза по сравнению с естественными условиями (Рисунок 6.5, Таблица 6.2). В последующие годы эта тенденция усилилась: произошел рост содержания сульфатов до 60–80 мг/л на западном борту (куст Л-4-5) и до 140 – 160 мг/л на восточном борту (куст Верхний).

После затопления карьера качество подземных вод на западном и восточном бортах карьера стало отличаться принципиально: если на западном борту сохранился примерно такой же тренд, какой сформировался ранее, то на восточном начался ускоренный рост содержания ряда показателей: минерализации, сульфат-иона, никеля. Это явление нельзя объяснить просто привлечением ресурсов карьерного озера, поскольку содержание сульфатов в нем гораздо ниже (около 80 мг/л по сравнению с 120 – 160 мг/л в восточном узле).

⁹ В соответствии с ГН 2.1.5.1315-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно бытового водопользования» [ГН 2.1.5.1315-03] никель компонент 2-го класса опасности (высоко опасный); ПДК для никеля составляет 0,02 мг/дм³.

Таблица 6.2 - Характеристика водных объектов района Липовского месторождения подземных вод (Липовского никелевого месторождения) (использованы материалы [Кецко, 1996; Петров, 2002ф; Бизяев, 2012])

Этап (период опробования)	Объект (скважина, карьер, река), его местоположение и назначение	Сульфат-ион, мг/л (в скобках K_c^*)	Никель, мг/дм ³ (в скобках $K_{ПДК}^{**}$)	Формула Курлова
Начало эксплуатации, до прекращения водоотлива (1980-1988 гг.)	Река Липовка	5	н.с.***	$M_{0.2} \frac{HCO_3 \ 91 \ SO_4 \ 5}{Ca \ 65 \ Mg \ 26 \ Na \ 9}$
	Река Мостовка	7	н.с.	$M_{0.2} \frac{HCO_3 \ 84 \ SO_4 \ 8 \ Cl \ 8}{Ca \ 68 \ Mg \ 22 \ Na \ 10}$
	Скв. №19н (наблюдательная)	14 (1)	0,008	$M_{0.2} \frac{HCO_3 \ 85 \ SO_4 \ 10 \ Cl \ 5}{Mg \ 51 \ Ca \ 40 \ Na \ 9}$
	Западный узел (скв.№3)	16 (2)	0,002	$M_{0.2} \frac{HCO_3 \ 89 \ SO_4 \ 9}{Ca \ 67 \ Mg \ 25 \ Na \ 8}$
	Восточный узел (скв.№4)	22 (2)	0,004	$M_{0.3} \frac{HCO_3 \ 87 \ SO_4 \ 10}{Ca \ 62 \ Mg \ 26 \ Na \ 12}$
Прекращение водоотлива, затопление карьеров. Затопленный карьер залежи 4-5, опробование по глубине (2000 г.)	10 м	79 (8)	0,19 (9,5)	$M_{0.3} \frac{HCO_3 \ 68 \ SO_4 \ 30}{Ca \ 65 \ Mg \ 31}$
	20 м	78 (8)	0,20 (10,0)	$M_{0.3} \frac{HCO_3 \ 69 \ SO_4 \ 29}{Ca \ 65 \ Mg \ 32}$
	30 м	85 (9)	0,20 (10,0)	$M_{0.3} \frac{HCO_3 \ 66 \ SO_4 \ 30}{Ca \ 65 \ Mg \ 31}$
	40 м	85 (9)	0,21 (10,5)	$M_{0.3} \frac{HCO_3 \ 67 \ SO_4 \ 31}{Ca \ 65 \ Mg \ 31}$
	50 м	83 (6)	0,20 (10,0)	$M_{0.3} \frac{HCO_3 \ 68 \ SO_4 \ 31}{Ca \ 65 \ Mg \ 31}$
	60 м	86 (9)	0,22 (11,0)	$M_{0.3} \frac{HCO_3 \ 67 \ SO_4 \ 32}{Ca \ 65 \ Mg \ 31}$
	70 м	85 (9)	0,23 (11,5)	$M_{0.3} \frac{HCO_3 \ 70 \ SO_4 \ 26}{Ca \ 70 \ Mg \ 25 \ Na \ 5}$
Настоящее время (2003 – 2012 гг.)	Западный узел (скв.№3)	62 (6)	0,03 (1,5)	$M_{0.3} \frac{HCO_3 \ 70 \ SO_4 \ 27}{Ca \ 68 \ Mg \ 27}$
	Восточный узел (скв.№4)	138 (14)	0,10 (5)	$M_{0.5} \frac{HCO_3 \ 60 \ SO_4 \ 35}{Ca \ 75 \ Mg \ 22}$

Примечания: * K_c - коэффициент концентрации, отношение текущего содержания компонента (С) к его фоновому значению ($C_{фон}$), $K_c = C/C_{фон}$, $C_{фон}=10$ мг/л; ** $K_{ПДК}$ - кратность ПДК, отношение содержания элемента в исследуемом объекте (С) к величине его предельно допустимой концентрации ($C_{ПДК}$), $K_{ПДК} = C/C_{ПДК}$, $C_{ПДК}=0,02$ мг/л [ГН 2.1.5.1315-03]; *** н.с. – нет сведений; воды техногенного озера слабо щелочные, $pH=7,7\div7,9$; подземные воды, извлекаемые Западным узлом, имеют $pH=7,3\div7,9$; Восточным водозаборным узлом $pH=6,8\div7,8$; $Eh=239\div310$ мВ.

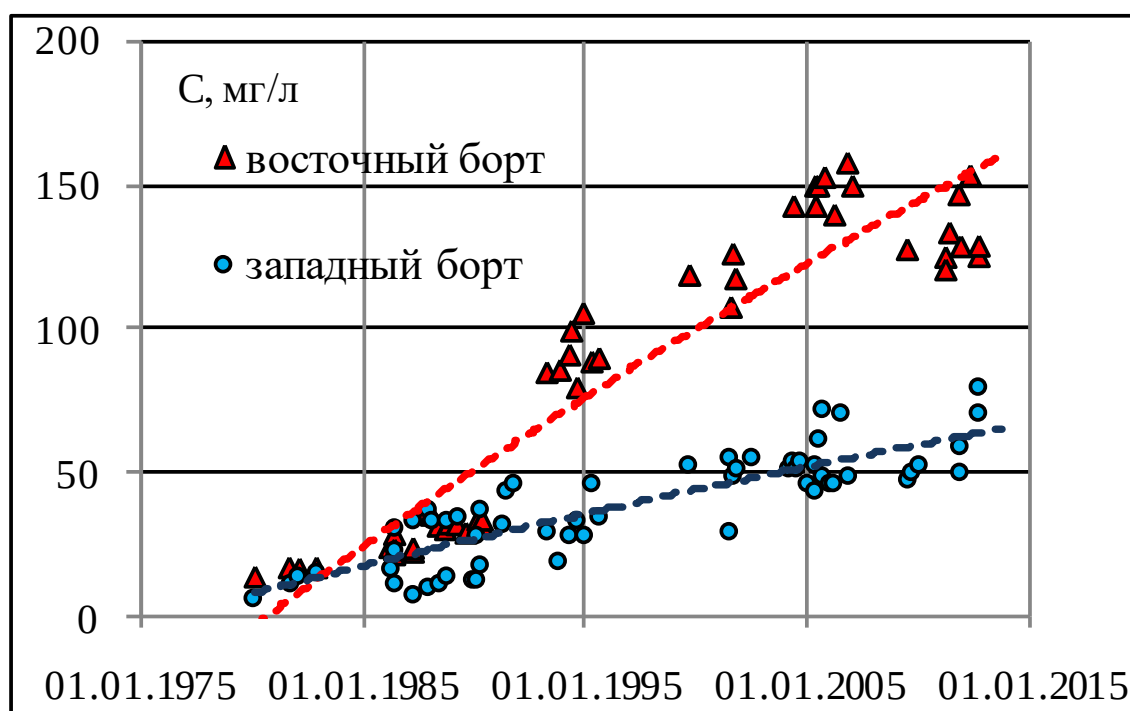


Рисунок 6.5 - График изменения содержания сульфат-иона в скважинах восточного и западного бортов Липовского месторождения пресных подземных вод. Используются данные [Петров, 2002; Бизяев, 2012]

Принципиальная геомиграционная оценка процесса формирования данного типа загрязнения может быть выполнена на основе ориентировочного балансового расчета массовых потоков содержания сульфат-иона как основного маркера (индикатора) изменения состояния подземных вод. Доля привлекаемых из карьерного озера ресурсов ($Q_{\text{пр}}/Q_{\text{вз}}$) может быть оценена с использованием балансового уравнения вида

$$Q_{\text{вз}} * C_{\text{вз}} = Q_{\text{пр}} * C_{\text{пр}} + Q_{\text{ер}} * C_{\text{ер}},$$

где $Q_{\text{вз}}$, $Q_{\text{пр}}$, $Q_{\text{ер}}$ – расход водоотбора западного узла, привлекаемые из озера и естественные ресурсы, с соответствующими концентрациями $C_{\text{вз}}$, $C_{\text{пр}}$, $C_{\text{ер}}$ – в водозаборе, карьерном озере и водоносном горизонте в области формирования ресурсов. Тогда $Q_{\text{пр}}/Q_{\text{вз}} \sim 2/3$ при $C_{\text{вз}}=60$, $C_{\text{пр}}=80$ и $C_{\text{ер}}=10$ мг/дм³ (Таблица 6.3)¹⁰.

¹⁰ Авторы работы [Палкин, Палкин, 2003] принимали $C_{\text{ер}}=5$ мг/л, что скорее характерно для поверхностных вод, однако это не приводит к заметному изменению результата.

Если предположить, что расход водоотбора восточного узла $Q_{\text{вв}}$ также формируется за счет привлечения вод карьерного озера (не менее чем на половину $Q_{\text{оз}}=Q_{\text{ср}}=0.5Q_{\text{вв}}$), то в этом случае

$$Q_{\text{вв}} * C_{\text{вв}} = Q_{\text{пр}} * C_{\text{пр}} + Q_{\text{ср}} * C_{\text{ср}}; C_{\text{вв}} = 0.5C_{\text{пр}} + 0.5C_{\text{ср}}; C_{\text{пр}} = 2C_{\text{вв}} - C_{\text{ср}}$$

и при $C_{\text{вв}}=140$; $C_{\text{ср}}=10$ содержание сульфата в воде, поступающей со стороны карьерного озера, составит порядка 260 мг/дм^3 ($K_c=26$), что в 3,5 раза выше, чем формируется в самом карьерном озере.

Скважины Восточного узла расположены на борту карьера №1, который был засыпан породами вскрыши и некондиционных руд с рассеянной сульфидной минерализацией еще при отработке основной залежи (Рисунок 6.6). На месторождении отмечаются процессы современного минералообразования: на выветрелых серпентинитах образуются водорастворимые сульфаты – эпсомит, в том числе никельсодержащий, мелантерит [Кецко, 1996].

Уменьшение водоотбора после 1991 года привело к заполнению депрессионной воронки, затоплению карьера, подъему уровня воды в карьерном озере и как следствие - к формированию единого водоносного горизонта между карьерным озером и восточным узлом, в том числе техногенного водоносного горизонта в пределах засыпанной части карьера. Подъем уровня подземных вод в техногенном водоносном горизонте от отметки +150 м и выше (после 1994 г.) в условиях свободного доступа кислорода приводит к активному геохимическому выветриванию сульфидсодержащих минералов и растворению вторичных сульфатов, что обеспечивает поступление в повышенных концентрациях сульфатов, никеля и других компонентов в водозабор на восточном борту карьера. Техногенный водоносный горизонт стал “генератором” сульфатных солей [Палкин, Палкин, 2003].

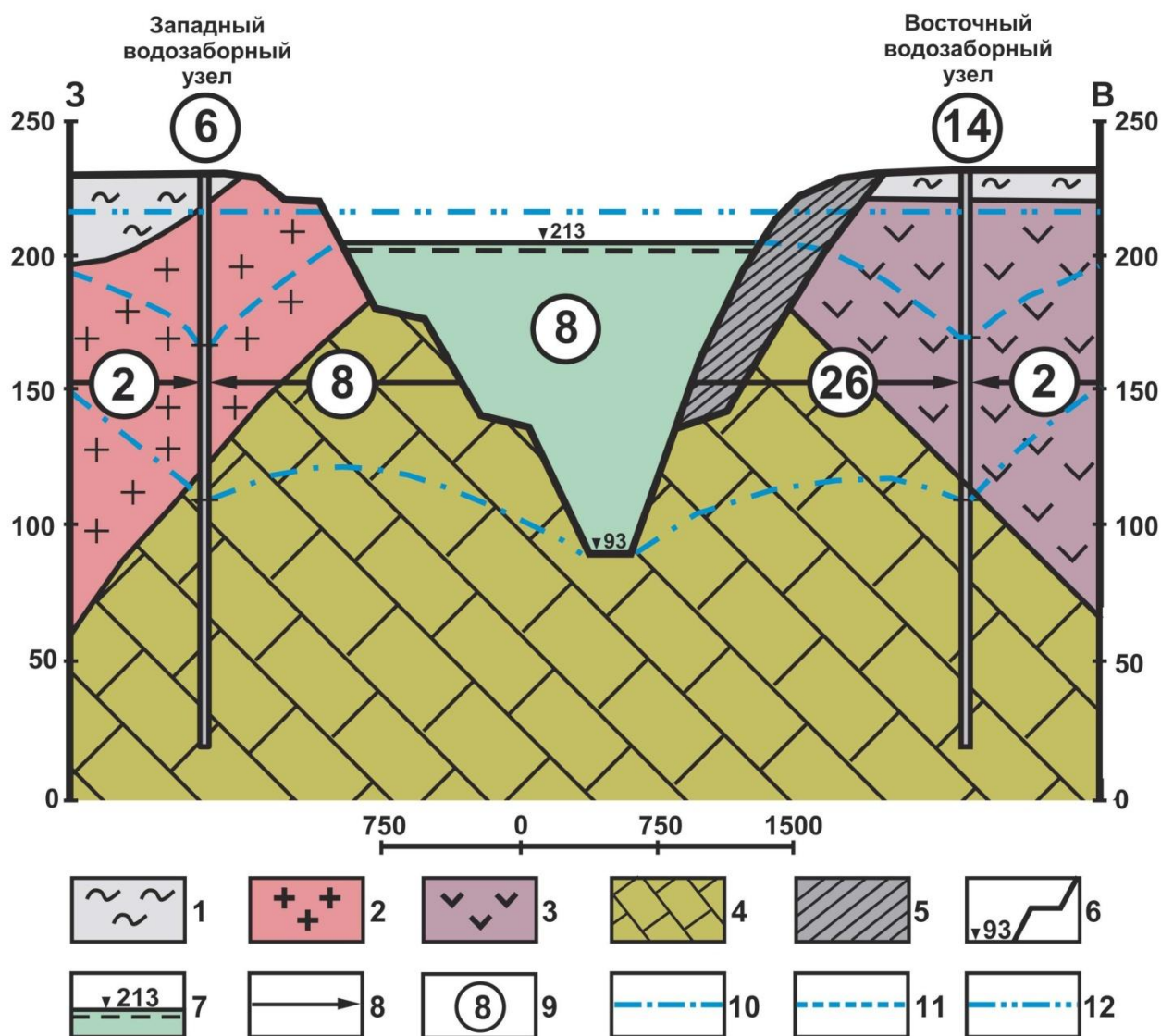


Рисунок 6.6 – Гидрогеохимическая модель формирования качества подземных вод Липовского месторождения (Геологическая основа взята из [Палкин, Палкин, 2003]). Условные обозначения: 1 – глинистая кора выветривания; 2 – водоносная зона интрузивных пород (граниты); 3 – водоносная зона рифейско-палеозойских метаморфических пород (сланцы, серпентиниты, кремнистые породы); 4 – водоносная зона палеозойских карбонатных пород (мрамора, известняки); 5 – внутренний отвал вскрышных пород и некондиционных руд; 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

Таким образом, в настоящее время принципиально изменились источники формирования эксплуатационного водоотбора Липовского водозабора. Так, для

Западного узла это на 2/3 привлекаемые ресурсы открытого техногенного водоёма с коэффициентом концентрации сульфат-иона $K_c=8$. В процессе формирования качества воды Восточного узла привлекаемые ресурсы карьерного озера обогащаются при фильтрации через техногенный водоносный горизонт до значений коэффициента концентрации сульфат-иона $K_c=26$. Основным процессом обогащения воды сульфатами, никелем и др. веществами является химическое выветривание сульфидных минералов, оставшихся в невыбранной руде в карьере и в породах вскрыши и некондиционных руд, которые использовались для засыпки восточной части карьера.

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.

Не отрицая значимости гидрогеохимической активности коры выветривания (особенно в карстовых воронках) в формировании состава подземных вод [Бизяев, 2012], следует отметить, что этот фактор, по-видимому, играл основную роль в тот период, пока действовал водоотлив, формировалась техногенная зона аэрации, активизировались процессы окисления в условиях доступа кислорода. Образование карьерного озера и формирование техногенного водоносного горизонта в рекультивированной части затопленного карьера стали более мощными источниками перераспределения химических элементов после 1991 года для работающего водозабора. Хотя ряд исследователей считает, что к настоящему времени основные процессы гидрогеохимической трансформации Липовской геотехногенной системы завершились [Палкин, Палкин, 2003; Бизяев, 2012], гидрогеохимическая обстановка далека от стабильной, что подтверждается графиками изменения содержания сульфат-иона в скважинах восточного и западного бортов (Рисунок 6.6).

В 2002 г. в период переоценки эксплуатационных запасов подземных вод Липовского месторождения был сделан вывод о предпочтительности мокрой

консервации карьеров вблизи действующих водозаборов по сравнению с засыпкой породами вскрыши и некондиционных руд [Палкин, Палкин, 2003]. Анализ трансформации химического состава подземных вод в районе Липовского карьера в постэксплуатационный период подтверждает этот вывод и свидетельствует о том, что даже частичная рекультивация карьера становится ведущим фактором загрязнения при затоплении, т.е. для предотвращения формирования техногенного водоносного горизонта должна осуществляться либо полная рекультивация осушенного пространства, либо затопление карьера. «Мокрая рекультивация» является наиболее неблагоприятным вариантом и приводит к дестабилизации гидрогеохимических процессов.

Черемшанское месторождение подземных вод расположено в верховьях реки Полдневая-Чусовая, это бассейн р. Чусовой, на которой ниже по течению организовано питьевое водоснабжения г. Екатеринбурга (Рисунок 6.7). Законтурный скважинный дренаж Черемшанского карьера с 1976 года являлся единственным источником водоснабжения г. Верхний Уфалей (Челябинская область) с населением 32 тыс.чел.

Отработка открытым способом Черемшанского месторождения силикатно-никелевых руд началась в 30-х годах прошлого века, отработка Старо-Черемшанской залежи закончена в 1983 году, Ново-Черемшанской в 1990-х годах, Чусовской в 2005 г. С середины 70-х годов отрабатывается карьер флюсовых мраморов, расположенный в пределах контура Черемшанского карьера. Наибольший водоотлив наблюдался в 1970-1975 годах и составлял 13,0-13,7 тыс.м³/сут.

Организация зоны санитарной охраны Черемшанского участка подземных вод невозможна, так как скважины располагаются в забойной части карьера (Рисунок 6.8). Водозабор в течение 40 лет рассматривается контролирующими органами как временный источник водоснабжения.



Рисунок 6.7 - Схематическая гидрогеологическая карта района Черемшанских месторождений силикатного никеля [Фельдман и др., 2007ф]. Масштаб 1:50000. Условные обозначения: 1 - водоносный комплекс четвертичных отложений; 2 - водоносный комплекс зон трещиноватости вулканогенных, вулканогенно-осадочных и осадочных пород нижнего и среднего палеозоя; 3 - водоносный комплекс зон трещиноватости карбонатных пород палеозоя; 4 - водоносный комплекс зон трещиноватости интрузивных пород кислого состава; 5 - водоносный комплекс зон трещиноватости интрузивных пород основного и ультраосновного состава и продуктов их метаморфизма; 6 - водоносный комплекс зон трещиноватости кварцитовых сланцев среднего ордовика; 7 - тектонические нарушения: а) достоверные; б) предполагаемые; 8 - водообильные зоны по результатам геофизических и опытно-фильтрационных работ; 9 - границы подразделений; 10 - линия разреза; 11 - скважина наблюдательная; 12 - скважина водопонизительная; 13 - контур площади водосбора; 14 - контур депрессионной воронки; 15 - контур карьеров месторождений силикатного никеля; 16 - контур карьера флюсовых мраморов; 17 - фильтрационный барьер

Сложившаяся в последние годы гидрогеологическая обстановка будет претерпевать значительные изменения не только в связи с затоплением (мокрой консервацией) Черемшанского никелевого карьера. Одновременно планируется увеличение глубины отработки карьера флюсовых мраморов, расположенного в единой депрессионной воронке, что приведет к изменению водно-балансовых составляющих, уровня и гидрохимического режима подземных и поверхностных вод.

В связи с этим была выполнена оценка экологических и гидрогеологических последствий затопления Черемшанского никелевого карьера и углубления карьера флюсовых мраморов, разработка рекомендаций по минимизации негативного влияния на подземную и поверхностную гидросферу, изучение возможного влияния затопления карьера на химический состав подземных вод, оценка возможности дальнейшего использования дренажных вод для водоснабжения и т.д. [Фельдман и др., 2007ф]. В результате решения серии обратных задач было установлено, что Старо-Черемшанский и Черемшанский карьеры разделены слабопроницаемым барьером – тектоническим нарушением широтного простирания (Рисунок 6.7, 6.8), которое расположено между карьерами; гидравлически карьеры практически не связаны – об этом свидетельствует как поднятие уровня воды в Старо-Черемшанском карьере в 1984-2006 годах, так и стабильность водопритока к Черемшанскому карьере до и после 1983 года (порядка $10\,000\text{ м}^3/\text{сут}$ – $400\text{-}450\text{ м}^3/\text{час}$).

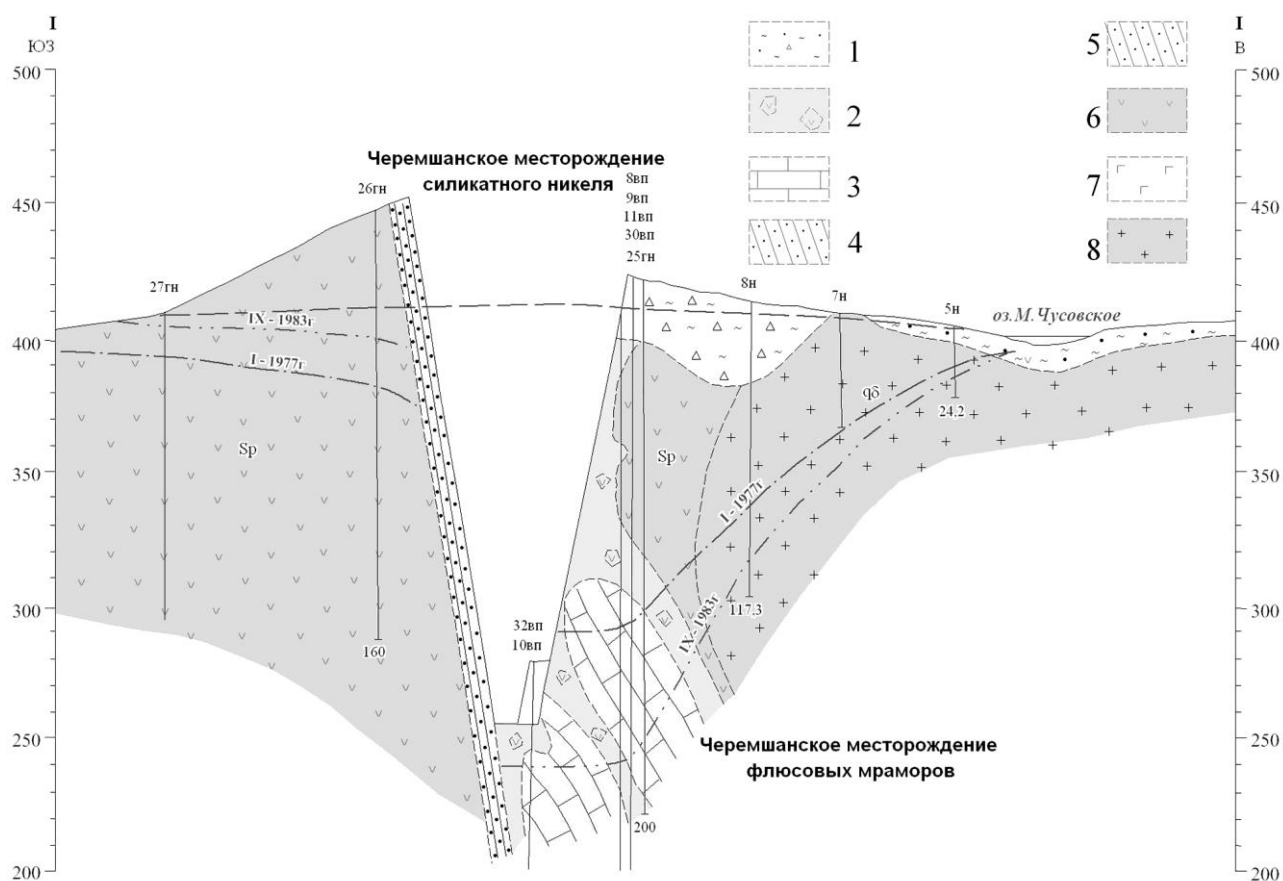


Рисунок 6.8 - Схематический гидрогеологический разрез района Черемшанского месторождения. 1 - песчано-глинистые отложения; 2 - кора выветривания; 3 - мрамора; 4 - сланцы кварцево-сланцевые, кварцево-хлоритовые; 5 - сланцы углисто-кремнистые, углисто-глинистые кварцево-серицитовые, хлорито-серицитовые; 6 - серпентиниты; 7 - габбро; 8 - кварцевые диориты

Химический состав дренажных вод, используемых для водоснабжения, изменился по сравнению с 60-ми годами прошлого века: произошел рост минерализации в два раза (до 500 мг/л), жесткости в 1,7 раза (до 7,5 мг-экв/л), железа в 1,5 раза (до 0,15 мг/л), сульфатов в 3 раза (до 160 мг/л); концентрации никеля в дренажных водах (по скважине 32) выросли в 20 раз – с 0,0015 до 0,03 мг/л (Таблица 6.3).

Таблица 6.3 - Характеристика водных объектов района Черемшанского месторождения подземных вод (Уфалейских никелевых месторождений)

Этап (период опробования)	Объект (скважина, карьер, река), его местоположение и назначение	Сульфат-ион, мг/л (в скобках К _с *)	Никель, мг/л (в скобках К _{ПДК} **)	Формула Курлова
Прекращение водоотлива, затопление карьеров (2006 г.)	Скв. №32 (эксплуатационная)	159 (16)	0,03 (1,5)	$M_{0.5} \frac{HCO_3 \ 56 \ SO_4 \ 41}{Ca \ 74 \ Mg \ 20 \ Na \ 6}$
	Черемшанский карьер, затопленный	153 (15)	0,10 (5,0)	$M_{0.4} \frac{HCO_3 \ 63 \ SO_4 \ 34}{Mg \ 82 \ Ca \ 14}$
	Старочеремшанский карьер, затопленный	278 (28)	3,31 (165,5)	$M_{0.5} \frac{SO_4 \ 89 \ HCO_3 \ 8}{Ca \ 58 \ Mg \ 29 \ Na \ 13}$

Примечания: * К_с - коэффициент концентрации, отношение текущего содержания компонента (С) к его фоновому значению (С_{фон}), К_с = С/С_{фон} [Емлин, 1991; Сает и др., 1990], С_{фон}=10 мг/л; ** К_{ПДК} – кратность ПДК, отношение содержания элемента в исследуемом объекте (С) к величине его предельно допустимой концентрации (С_{пдк}), К_{ПДК} = С/С_{пдк}, С_{пдк} = 0,02 мг/л [ГН 2.1.5.1315-03, 2003].

В непосредственной близости от Черемшанского водозабора и одноименного карьера расположено несколько отработанных никелевых карьеров, которые были затоплены после прекращения отработки и превратились в карьерные озера (Рисунок 6.9, Таблица 6.4). Анализ данных по химическому составу вод карьерных озер показывает, что на большинстве из них качество воды не претерпело значительных изменений: содержание сульфат-иона от 14–76 мг/л (К_с<8), никеля от 0,04 до 0,08 мг/л (К_{ПДК}=2÷4). Исключение составляет карьерное озеро в затопленной Старо-Черемшанской залежи: воды здесь относятся к гидрокарбонатно-сульфатному магниевое-кальциевому типу с минерализацией 0,2-0,4 г/л и характеризуются повышенными содержаниями марганца – до 1,2 мг/л (К_{ПДК}=12), железа общего – до 0,56 мг/л (К_{ПДК}=2); кобальта – до 0,16 мг/л (К_{ПДК}=1,5); никеля – до 3,3 мг/л (К_{ПДК}=33); кадмия – до 0,045 мг/л (К_{ПДК}=45).

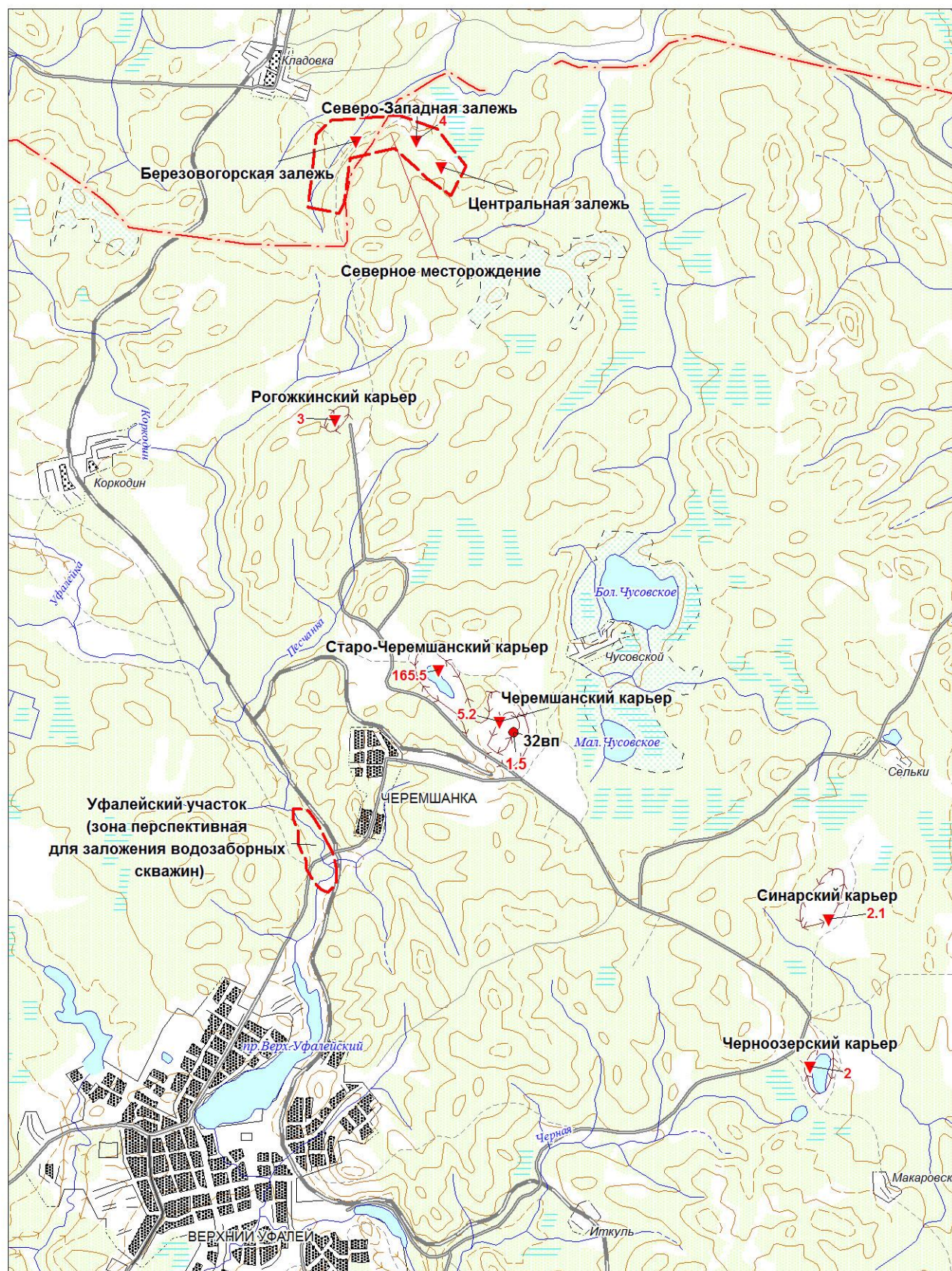


Рисунок 6.9 – Схема расположения отработанных карьеров Уфалейских никелевых месторождений. Цифра у знака – $K_{\text{ПДК}}$ по никелю [Фельдман и др., 2007ф]

Таблица 6.4 – Характеристика микрокомпонентного состава водных объектов района Черемшанского месторождения подземных вод (Уфалейских никелевых месторождений)

Объект (скважина, карьер, река), его местоположение и назначение	Сульфат-ион, мг/л (в скобках К _с)	Микрокомпоненты (в скобках К _{ПДК} [СанПиН 2.1.4.1074-01, ГН 2.1.5.1315-03])							
		Алюминий, мг/дм ³	Марганец, мг/дм ³	Железо, мг/дм ³	Кобальт, мкг/дм ³	Никель, мг/дм ³	Кадмий, мкг/дм ³	Цинк, мкг/дм ³	Медь, мкг/дм ³
	С _{фон}	С _{ПДК} [СанПиН 2.1.4.1074-01, 2002; ГН 2.1.5.1315-03, 2003]							
	10	0,5	0,1	0,3	10	0,02	1	1000	1000
	С _{ПДК} [Нормативы ..., 2010]								
	100	0,04	0,01	0,1	10	0,01	5	10	1
Скв. №32 (эксплуатационная)	<u>159</u> (16)	0,023	<u>0,044</u>	2,28 (7,6)	0	0,03 (1,5)	0	<u>21</u>	<u>9</u>
Черемшанский карьер, затопленный	<u>153</u> (15)	0,029	<u>0,015</u>	0,07	2	<u>0,10</u> (5)	0,2	<u>14</u>	<u>5</u>
Старочеремшанский карьер, затопленный	<u>278</u> (28)	<u>0,194</u>	<u>1,238</u> (12)	<u>0,56</u> (1,8)	<u>159</u> (15,9)	<u>3,31</u> (115)	<u>45</u> (9)	<u>742</u>	<u>822</u>
Рогожкинский карьер, затопленный	28 (3)	<u>0,052</u>	<u>0,053</u> (5,3)	<u>0,23</u>	3	<u>0,061</u> (3)	0,06	<u>20</u>	<u>8</u>
Северный карьер, затопленный	14 (1)	<u>0,088</u>	<u>0,021</u> (2,1)	<u>0,17</u>	0	<u>0,081</u> (4,2)	0	<u>11</u>	<u>4</u>
Синарский карьер, затопленный	49 (5)	<u>0,046</u>	<u>0,022</u> (2,2)	<u>0,21</u>	2	<u>0,043</u> (2,2)	0,05	8	<u>6</u>
Черноозерский карьер, затопленный	76 (8)	0,031	<u>0,014</u> (1,4)	0,09	1	<u>0,041</u> (2,1)	0,18	10	<u>7</u>

Примечания. Подчеркнуты значения, превышающие нормативы ПДК вредных веществ в водах водных объектах рыбохозяйственного значения [Нормативы ..., 2010]

Аномальный характер таких показателей может иметь следующее объяснение: прекращение отработки Старо-Черемшанской залежи произошло после формирования в карьере оползня в корях выветривания. Последующее затопление привело к активизации процессов сернокислотного выщелачивания продуктивной толщи при неполной выемке полезного ископаемого, т.е. самопроизвольная «мокрая рекультивация» карьера при его затоплении способствовала образованию техногенного водоносного горизонта, являющегося источником загрязнения гидросферы.

В сложившейся в настоящее время обстановке и в перспективе эксплуатация Черемшанского водозабора для хозяйственно-питьевого водоснабжения г. Верхний Уфалей нецелесообразна, поскольку качество подземных вод не соответствует нормативным требованиям и не может быть обеспечено при затоплении карьера. Для обеспечения населения г. Верхний Уфалей необходимо освоение разведанного Уфалейского участка подземных вод (с утвержденными запасами $8\,640\text{ м}^3/\text{сут}$), что позволит полностью восполнить потерю Черемшанского водозабора.

Полдневское месторождение подземных вод. Законтурный дренаж Полдневской залежи Троицко-Байновского месторождения огенупорных глин (наряду с другими средствами водоотлива) обеспечивает осушение продуктивной толщи глин и с 1971 года является одним из основных источников водоснабжения г. Богданович (с населением 30 тыс.чел.). Месторождение расположено в пределах Восточноуральской карстовой области, здесь развит трещинно-карстовый водоносный комплекс, который представлен известняками нижнего карбона и верхнего девона, перекрытый мощной толщей мезо-кайнозойских пород (до 35–40 м).

В Восточноуральской карстовой области разведано и эксплуатируется 6 месторождений (в том числе Полдневское) пресных подземных вод с запасами $75,5\text{ тыс.м}^3/\text{сут}$ для водоснабжения городов Каменск-Уральский, Богданович, Сухой Лог (Рисунок 6.10).

Полдневской рудник отрабатывался с 1944 г. рядом карьеров глубиной до 30–40 м, большая часть из которых к настоящему времени рекультивирована (Рисунок 6.11, 6.12). В частности, Северный карьер, затопленный в период проведения разведки подземных вод в 1970 г. (до отметки 144 м), в дальнейшем в соответствии с рекомендациям ГКЗ СССР был осушен и засыпан породами вскрыши. Депрессионная воронка имеет выположенную форму с незначительными уклонами в меридиональном направлении и локализована в пределах восточного блока карбонатных пород, ограниченного на западе, востоке и юге слабопроницаемыми терригенными отложениями, вытянута в

меридиональном направлении на 20 км до р. Калиновка на севере. Положение уровня подземных вод в центре депрессионной воронки составляет порядка 132 м (понижение уровня около 30 м).

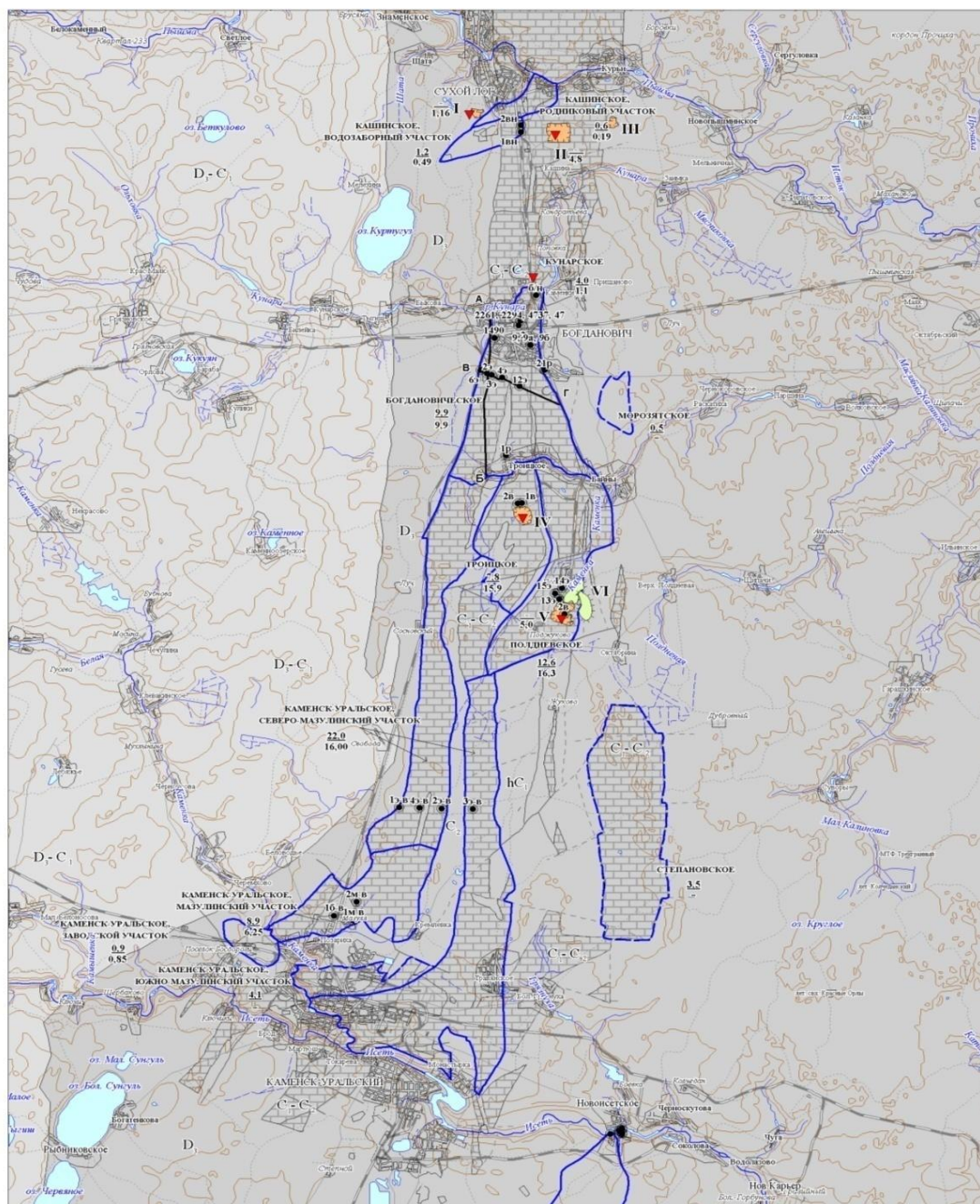


Рисунок 6.10 – Схема размещения месторождений подземных вод в Восточноуральской карстовой области [Иванова, 2007ф].

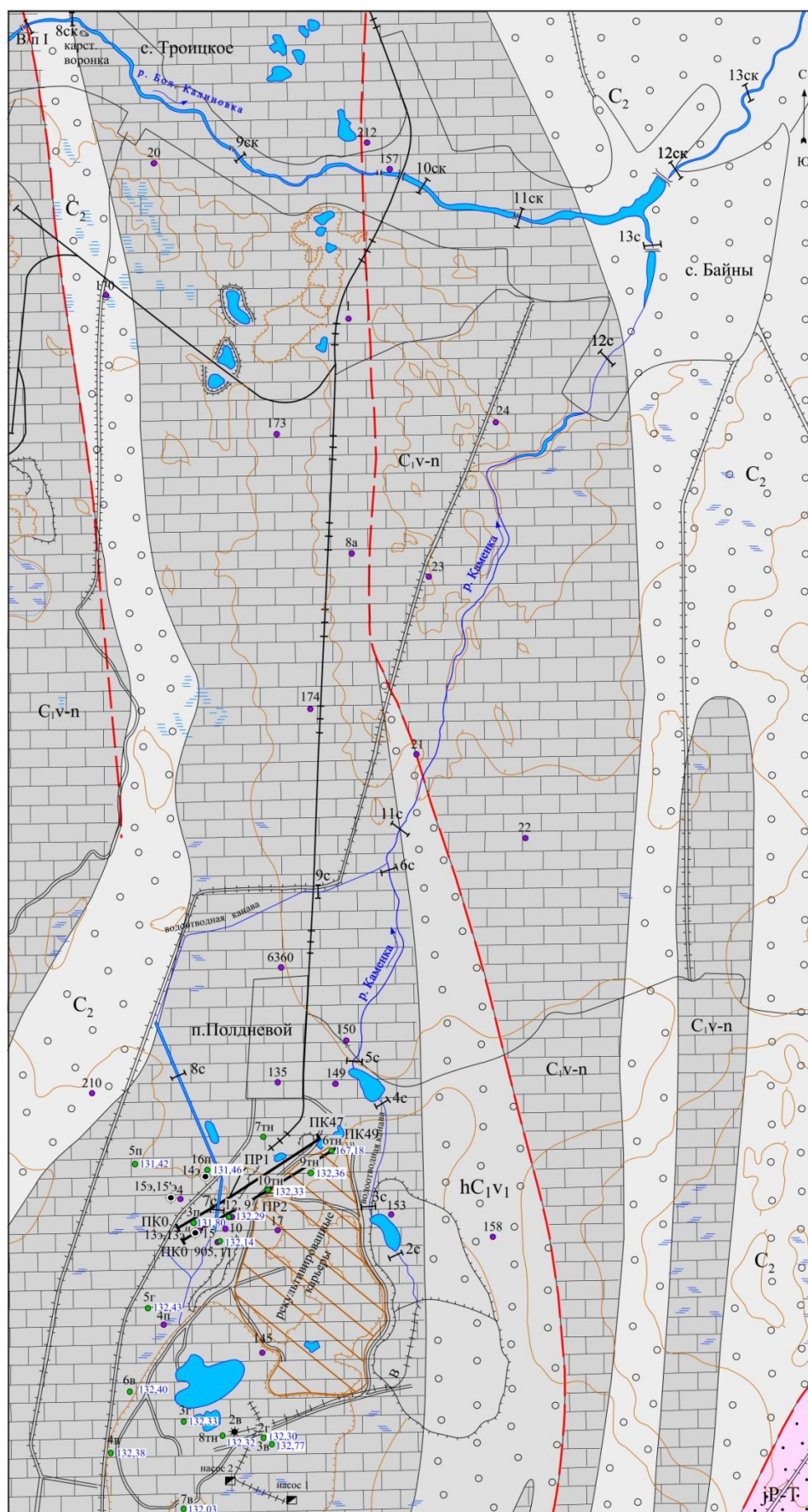


Рисунок 6.11 – Схематическая гидрогеологическая карта района Полдневского месторождения [Вострокнутов, 2006ф]. Масштаб 1:25000.

Условные обозначения к рисунку 6.11

1. Гидрогеологические подразделения

	- Водоносная зона среднекаменноугольных терригенных пород (сланцы глинистые с прослоями известняков)
	- Водоносная зона нижнекаменноугольных терригенных пород (песчаники, конгломераты, глинистые сланцы)
	- Водоносная зона нижнекаменноугольных карбонатных пород (известняки закарстованные)

2. Гидрогеологические скважины

153, 15'3 	- Действующая водозаборная скважина. Цифра сверху - номер по первоисточнику.
2в 	- Водопонижительная скважина и её номер.
153 	- Ранее пройденные скважины разного назначения, их номер (Антипин, 1970г.).
3п 	- Наблюдательная скважина. Цифра сверху - номер скважины. Справа - абсолютная отметка уровня подземных вод на 20.07.2005г., м.

3. Прочие знаки

насос 1 	- Зумпфы (насос 1 и насос 2).
3с 	- серийный гидрометрический створ и его номер
	- водоотводная канава
	- водовод
	- изолинии рельефа поверхности
	- контур действующего карьера
	- рекультивированные площади карьеров
	- отвалы вскрышных пород и некондиционных глин
	- литолого-стратиграфическая граница
	- линия тектонического нарушения
ПК0 ПР1 ПК47 	- линия геофизического профиля

При утверждении эксплуатационных запасов подземных вод Полдневского месторождения основным требованием к гидродинамическому режиму его эксплуатации было выполнение условия сохранения подземного водораздела между обрабатываемым карьером и водозаборными скважинами. Очевидно, что это условие может быть выполнено только в том случае, когда дренажный водоотлив равен или больше, чем водоотбор на питьевые цели – это условие практически никогда не выполнялось.

В настоящее время суммарный среднегодовой водоотбор на Полдневском руднике составляет около 15 тыс.м³/сут, из них 10 тыс.м³/сут используется для питьевых нужд г. Богдановича. Одна из эксплуатационных скважин (13э) работает как барражная, защищая питьевой водозабор от загрязнения, при этом вода сбрасывается в поверхностные водотоки без очистки [Вострокнутов, 2006ф].

Подземные воды в естественных условиях и в первые годы эксплуатации имели гидрокарбонатный магниевый-кальциевый состав, сухой остаток 0,3-0,4 мг/л, жёсткость менее 7 ммоль/л, сульфаты до 10 мг/л. С конца 70-х годов прошлого века отмечается активный рост отдельных компонентов и показателей химического состава (общая жёсткость, сульфаты, сухой остаток) подземных вод, каптируемых скважинами Полдневского водозабора (Таблица 6.5, Рисунок 6.12).

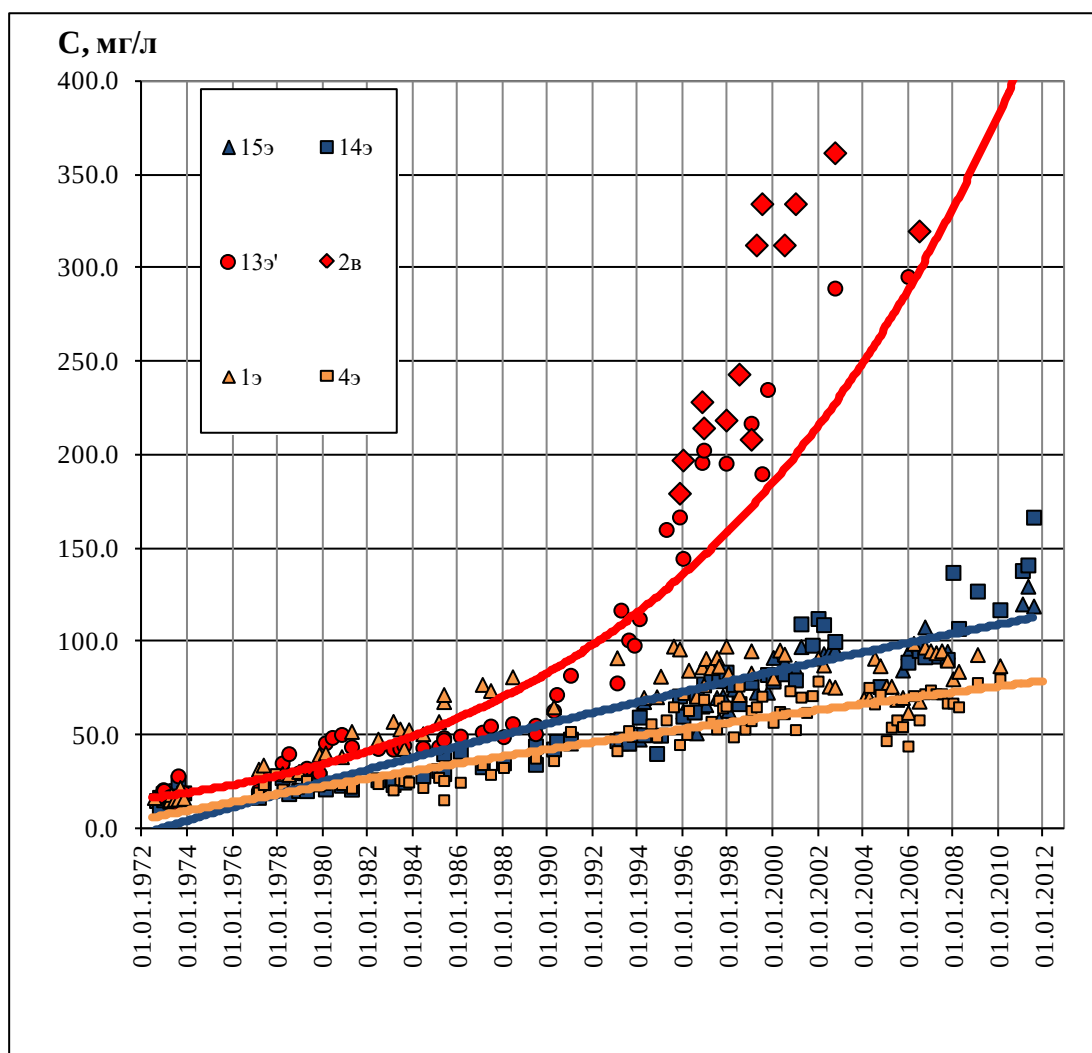


Рисунок 6.12 - График изменения содержания сульфат-иона в скважинах Полдневского и Каменск-Уральского месторождения пресных подземных вод. Скважины: 14э, 15э – эксплуатационные Полдневского водозабора; 13э' – барражная, 2в – дренажная; 1э, 4э – эксплуатационные Северо-Мазулинского водозабора

Таблица 6.5 - Характеристика водных объектов района Полдневского и Каменск-Уральского месторождения подземных вод (использованы материалы [Вишняк, 2002ф; Вострокнутов, 2006ф; Цветов, 2010ф])

Этап (период опробования)	Объект (скважина, карьер, река), его местоположение и назначение	Сульфат-ион, мг/дм ³ (в скобках К _с *)	Жесткость, мг-экв/дм ³ (в скобках К _{пдк} **)	Формула Курлова
Полдневское месторождение подземных вод (объект расположен в области, нарушенной горными работами)				
Начальный этап эксплуатации (1968 г.)	Скв.11 (наблюдательная, возле скв. 13э)	11 (1)	4,7	$M_{0.3} \frac{HCO_3 \ 92 \ SO_4 \ 4}{Ca \ 68 \ Mg \ 29}$

Продолжение Таблицы 6.5

Этап (период опробования)	Объект (скважина, карьер, река), его местоположение и назначение	Сульфат-ион, мг/дм ³ (в скобках К _с *)	Жесткость, мг-экв/дм ³ (в скобках К _{пдк} **)	Формула Курлова
Начальный этап эксплуатации (1976 г.)	Скв. №13э (эксплуатационная)	17 (2)	6,9 (1,0)	$M_{0.4} \frac{HCO_3 \ 92 \ SO_4 \ 5}{Ca \ 63 \ Mg \ 33}$
Настоящее время (2003–2012 гг.)	Скв. №14э (эксплуатационная)	95 (10)	9,4 (1,3)	$M_{0.7} \frac{HCO_3 \ 77 \ SO_4 \ 19}{Ca \ 65 \ Mg \ 31}$
	Скв. №15э (эксплуатационная)	108 (11)	9,4 (1,3)	$M_{0.6} \frac{HCO_3 \ 75 \ SO_4 \ 22}{Ca \ 68 \ Mg \ 28}$
	Скв. №12 (наблюдательная)	105 (11)	9,1 (1,3)	$M_{0.7} \frac{HCO_3 \ 73 \ SO_4 \ 23}{Ca \ 68 \ Mg \ 31}$
	Скв. №10тн (под рекультивированным карьером)	102 (10)	9,5 (1,4)	$M_{0.8} \frac{HCO_3^{2-} \ 75 \ SO_4^{2-} \ 21}{Ca^{2+} \ 68 \ Mg^{2+} \ 31}$
	Скв. №9тн (под рекультивированным карьером)	175 (18)	10,0 (1,4)	$M_{0.8} \frac{HCO_3 \ 63 \ SO_4 \ 34}{Ca \ 70 \ Mg \ 29}$
	Скв. №13э (барражная, ранее эксплуатационная)	296 (30)	12,4 (1,8)	$M_{1.0} \frac{HCO_3 \ 51 \ SO_4 \ 46}{Ca \ 65 \ Mg \ 33}$
	Скв. №2в (дренажная)	362 (36)	12,8 (1,8)	$M_{1.0} \frac{SO_4 \ 54 \ HCO_3 \ 45}{Ca \ 70 \ Mg \ 26}$
	Скв. №6тн (рекультивированный карьер, техногенный водоносный горизонт)	1111 (111)	23,6 (3,4)	$M_{1.9} \frac{SO_4 \ 100}{Ca \ 70 \ Mg \ 28}$
	Затопленная часть отработанного карьера	1459 (146)	25,1 (3,6)	$M_{1.6} \frac{SO_4 \ 93}{Ca \ 65 \ Mg \ 35}$
Каменск-Уральское месторождение подземных вод, Северо-Мазулинский водозабор (объект расположен вне зон техногенной нагрузки)				
Начало эксплуатации (1972 г.)	Скв. 1э (эксплуатационная)	10 (1)	6,3 (0,9)	$M_{0.2} \frac{HCO_3 \ 92 \ SO_4 \ 5}{Ca \ 63 \ Mg \ 33}$
Настоящее время (2003–2012 гг.)	Скв. 1э (эксплуатационная)	93 (9)	8,8 (1,3)	$M_{0.5} \frac{HCO_3 \ 72 \ SO_4 \ 25}{Ca \ 61 \ Mg \ 34}$

Примечания: *К_с - коэффициент концентрации, отношение текущего содержания компонента (С) к его фоновому значению С_{фон}, К_с = С/С_{фон}, С_{фон}=10 мг/л; ** К_{пдк} - кратность ПДК, отношение содержания элемента в исследуемом объекте (С) к величине его предельно допустимой концентрации С_{пдк}, К_{пдк} = С/С_{пдк}, **С_{пдк} = 7 ммоль/л [СанПиН 2.1.4.1074-01].

Особенности формирования месторождений подземных вод в Восточноуральской карстовой области обусловлены значительным снижением напоров в процессе эксплуатации подземных вод: в первые годы происходит сработка емкостных запасов песчано-глинистых отложений мезо-кайнозойских отложений, возрастает инфильтрационное питание. Поскольку в толще мезо-кайнозойских отложений содержится достаточно большое количество пирита и других сульфидов, в техногенной зоне аэрации происходит смена восстановительных условий на окислительные, окисление сульфидов и ухудшение качества подземных вод, которое проявляется в увеличении концентрации сульфат-иона, росте минерализации, жесткости и других показателей по сравнению с фоновыми [Вишняк, 2002ф, 2005; Вострокнутов, 2006ф]. Этот механизм достаточно хорошо изучен [Appelo, Postma, 2005]. Тем не менее, при отсутствии значимой техногенной нагрузки качество воды удовлетворяет санитарным требованиям, а отмеченный рост показателей продолжается только до определенных значений (для сульфат-иона коэффициент концентрации $K_c < 10$) и постепенно стабилизируется: такие условия наблюдаются на расположенном южнее Северо-Мазулинском месторождении подземных вод (Рисунок 6.12, Таблица 6.5).

Область формирования эксплуатационных ресурсов Полдневского водозабора характеризуется высокой техногенной нагрузкой горнодобывающего профиля: здесь расположены не только действующий (частично затопленный) карьер глубиной 30–40 м, но и рекультивированные карьеры, заполненные вскрышными сульфидсодержащими породами, и отвалы некондиционных руд, в которых образуются техногенные водоносные горизонты минерализованных кислых вод (Рисунок 6.13).

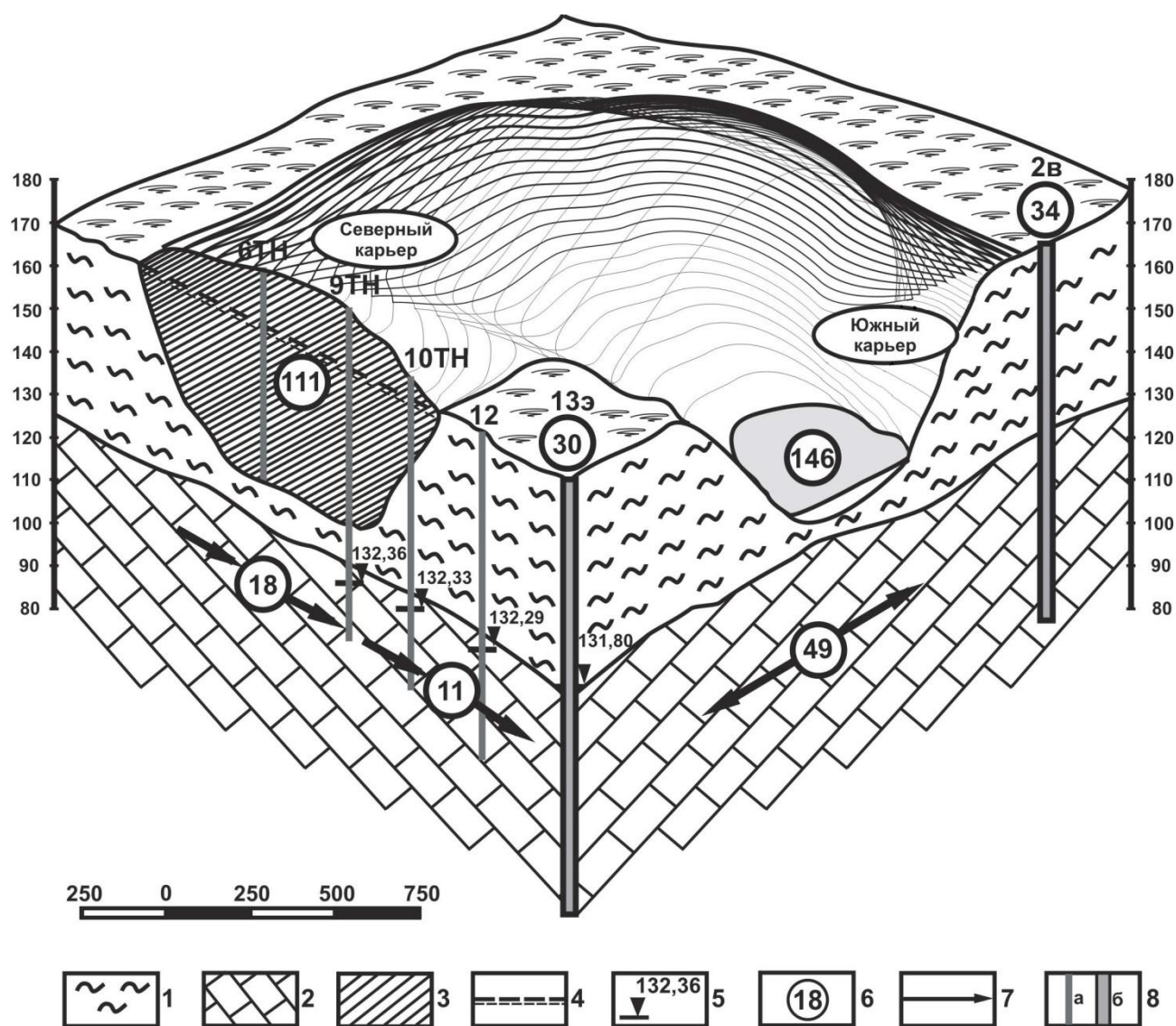


Рисунок 6.13 – Гидрогеохимическая модель формирования качества подземных вод Полдневского месторождения подземных вод. Геологическая основа принята по материалам [Вострокнутов, 2006ф]. Условные обозначения: 1 – водопроницаемый локально-водоносный комплекс пород верхнего и нижнего мела (огнеупорные глины, глинистые и глауконитовые пески); 2 – водоносная зона нижнекаменноугольных карбонатных пород (известняки закарстованные); 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

Соответственно, степень изменения качества подземных вод в пределах Полдневского месторождения в каждой конкретной скважине определяется соотношением балансовых составляющих, формирующих эксплуатационный

водоотбор. Так, расход скважины 13э (Q_{13}), которая в настоящее время работает как барражная, складывается из двух потоков (примерно одинаковых): один ($Q_{кс}$) формируется под северным карьером (рекультивированным в начале 70-х годов прошлого века), второй ($Q_{кю}$) – под южным, частично рекультивированным и затопленным. Содержание сульфат-иона в скважине 13э составляет $C_{13} = 296$ мг/л и характеризуется коэффициентом концентрации $K_c = 30$ (т.е. в 30 раз превышает фоновые показатели, Таблица 6.5). Со стороны северного карьера поступает вода с коэффициентом концентрации $K_c < 18$: в подземных водах известняков нижнекаменноугольного возраста непосредственно под карьером содержание сульфат-иона $C_{кс}$ составляет 102 г/л в скв. 10тн и 175 г/л в скв. 9тн. При этом техногенный водоносный горизонт в теле рекультивированного северного карьера характеризуется содержанием сульфат-иона с коэффициентом концентрации $K_c > 110$. Снижение водоотлива из южного карьера, отключение в 2008 г. дренажной скважины 2в на юго-западе карьера привело к формированию в пределах его рекультивированной площади техногенного водоносного горизонта (содержание сульфат-иона в затопленной части карьера достигает 1,5 г/л, $K_c = 150$). В области питания водозаборной скважины 13э полностью оказался участок южного карьера, в районе которого в соответствии с балансовыми расчетами

$$Q_{13}C_{13} = Q_{кс}C_{кс} + Q_{кю}C_{кю} \quad C_{кю} = (C_{13} - 0,5C_{кс})/0,5 \quad (C_{13} = 296, C_{кс} = 102 \div 175)$$

содержание сульфат-иона в карбонатном водоносном горизонте достигает $C_{кю} = 420 \div 490$ мг/л.

Таким образом, процесс осушения покровных отложений в области формирования ресурсов приводит к формированию вод с коэффициентом концентрации $K_c < 10$ (по содержанию сульфат-иона как индикатора процесса), влияние рекультивированного осушенного карьера характеризуется коэффициентом концентрации $K_c < 20$. Затопление карьера при его частичной рекультивации («мокрая рекультивация») обеспечивает поступление в водоносный горизонт вод с коэффициентом концентрации $K_c = 50$.

Эксплуатация питьевого водозабора возможна только под защитой барражных скважин с расходом, который должен быть сопоставим с водоотбором на питьевые нужды: об этом свидетельствует рост содержания сульфатов в эксплуатационных скважинах до значений коэффициента концентрации $K_c > 10$ после снижения величины дренажного защитного водоотлива в последние годы (Рисунок 6.12). При этом необходимость очистки сбрасываемых подземных вод до нормативов, предъявляемых к качеству воды в водоемах рыбохозяйственного назначения, и возможный отказ предприятия-недропользователя от затрат на такую очистку, могут привести к прекращению эксплуатации питьевого водозабора и образованию на месте месторождения пресных подземных вод участка загрязнения.

Выводы по разделу

Основными источниками формирования эксплуатационных запасов подземных вод в районе ведения горных работ на Среднем Урале являются: сокращение разгрузки в поверхностные дрены, осушение пород, увеличение инфильтрационного питания, поверхностный сток. Формирование 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.

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 по сульфат-иону не более 15.

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. Техногенный горизонт в массиве вскрышных пород и некондиционных руд рекультивированного карьера является локальным маломощным, хотя и имеет очень высокий коэффициент концентрации по сульфат-иону (до 110).

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. Это вызвано формированием техногенного водоносного горизонта мощностью, равной глубине карьера, который, находясь в непосредственном контакте с насыщенной кислородом водой, является источником постоянного поступления продуктов сернокислотного выщелачивания.

Формирование месторождений питьевых подземных вод в зоне, нарушенной горными работами, определяется несколькими факторами, в том числе типом полезного ископаемого, способом рекультивации нарушенной территории, конструкцией водозабора. Закономерности изменения химического состава подземных вод и эколого-геохимическое состояние подземных вод здесь зависят от направленности гидродинамических и гидрогеохимических процессов на разных этапах освоения территории (Таблица 6.6).

Таблица 6.6. 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	слабо выраженное
			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 в рекультивированном карьере (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 [Сает и др., 1990; Гуляева, 2002]; *** степень влияния на качество подземных вод техногенных факторов [СП 2.1.5.1059-01].

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 $Q_{ер}$

$$Q = Q_{гр} + Q_{ер}.$$

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

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

где k, m, μ – 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

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

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 поступающих с остальной части воронки депрессии $M_{ер}$

$$M = M_{гр} + M_{ер}.$$

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

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

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

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

В случае, если массовый расход потока, который формируется в зоне, нарушенной горными работами, превышает расход, поступающий за счет естественных ресурсов, эксплуатации МППВ на постэксплуатационном этапе становится проблематичной, требуются упреждающие меры по изысканию и введению в эксплуатацию новых источников водоснабжения или организация специальных систем защиты водозабора (Таблица 6.7).

Месторождения твердых полезных ископаемых являются аномальными в геолого-геохимическом отношении зонами. Формирование качества подземных вод в зоне ведения горных работ в значительной мере зависит от типа полезного ископаемого и степени его геохимической активности.

Хорошее качество дренажных вод в начальный период их отработки не может гарантировать возможность использования подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения на длительную перспективу. После завершения отработки месторождения, отключения карьерных (или шахтных) водоотливов, при наличии в пределах депрессионной воронки отработанных, затопленных и рекультивированных карьеров, питьевые водозаборы могут быть утрачены. На этих объектах может происходить неконтролируемое загрязнение подземных вод.

При оценке возможности использования дренажных вод для питьевого водоснабжения на постэксплуатационном этапе необходимо учитывать вид полезного ископаемого, его геохимическую активность, срок и технологию отработки МТПИ, конструкцию дренажной системы. В случае, если массовый расход потока, который формируется в зоне, нарушенной горными работами, превышает расход, поступающий за счет естественных ресурсов, требуются упреждающие меры по изысканию и введению в эксплуатацию новых источников водоснабжения или организация специальных систем защиты водозабора (Таблица 6.7).

Таблица 6.7 - Оценка возможности использования подземных вод после прекращения горнодобывающей деятельности

Показатель	Возможность использования подземных вод		
	можно	проблематично	нельзя
Водовмещающие породы	известняки, 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 $M_{ер}$ и $M_{гр}$)*	$M_{ер} >> M_{гр}$	$M_{ер} \sim M_{гр}$	$M_{ер} << M_{гр}$
Примеры месторождений	Кальинское	Карпское; Липовское, западный узел	Липовское, восточный узел; Полдневское; Черемшанское

Примечание. * $M_{ер} = C_{ер} \cdot Q_{ер}$ - массовый расход, поступающий за счет естественных ресурсов; $M_{гр} = C_{гр} \cdot Q_{гр}$ - массовый расход, поступающий за счет ресурсов, формирующихся в зоне, нарушенной горными работами.

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. Деградация 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-балансовых 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

сдвигения (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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Опубликованная

1. Абрамов В.Ю. Формирование химического состава подземных вод в экстремальных термодинамических условиях: автореферат дис. ... докт. геол.-мин. наук. М. : Рос. гос. геологоразведоч. ун-т им. С. Орджоникидзе (РГГРУ), 2015. 47 с.
6. Абрамов С.К., Скиргелло О.Б. Осушение шахтных и карьерных полей. Способы, системы и расчеты осушения шахтных и карьерных полей. М : Недра, 1968. 254 с.
7. Абдрахманов Р.Ф. Гидрогеоэкология Башкортостана. Уфа : Информреклама, 2005. 344 с.
8. Абдрахманов Р.Ф., Попов В.Г. Формирование подземных вод Башкирского Предуралья в условиях техногенного влияния. Уфа : БНЦ УрО АН СССР, 1990. 120 с.
9. Абдрахманов Р.Ф., Попов В.Г. Геохимия и формирование подземных вод Южного Урала. Уфа : АН РБ, Гилем. 2010. 429 с.
10. Агапов А.Е. Эколого-экономический мониторинг ликвидации последствий закрытия особо убыточных угольных шахт (разрезов) // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2008. Т. 16. № 1. С. 18-31.
11. Агапов А.Е. Итоги работы Государственного учреждения «ГУРШ» по реализации программы ликвидации особо убыточных шахт и разрезов в 2007 году // Уголь. 2008. №3. С. 3-6.
12. Агрикола Г. О горном деле и металлургии в двенадцати книгах (главах). Под. ред. С.В. Шухардина. 2-е изд. М. : Недра, 1986. 294 с.
13. Акинфиев Н.Н., Баронецкая Л.Д., Осмоловский И.С., Швец В.М. Физико-химическая модель формирования состава отвалов горнодобывающих предприятий // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2001. № 5. С. 411-419.
14. Алексеева Л.П. Геохимия подземных льдов, солёных вод и рассолов Западной Якутии: автореферат дис. ... докт. геол.-мин. наук. Томск, 2016. 43 с.
15. 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. С. 44-47).
16. 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. Geoeological estimation of land and water use in the Ural natural and

technogeneous mineral resource exploration areas. Journal of Mining Science. 2012. V. 48. № 2. P. 398-404).

17. Ахмедьянов И.Х., Зотеев О.В., Калмыков В.Н., Гоготин А.А. Анализ возможных сценариев возникновения и развития нештатных ситуаций при рекультивации Учалинского карьера сгущенными хвостами обогащения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2014. № S1-1. С. 22-32.

18. Бабич М.Е. Накопленный вред окружающей среде: что нас ждет в 2017 году? // Справочник эколога. 2016. № 11. С. 39-50.

19. Бабушкин В. Д., Пересунько Д. И., Прохоров С. П., Скворцов Г. Г. Изучение гидрогеологических и инженерно-геологических условий месторождений полезных ископаемых. Методическое руководство / Редакторы Бабушкин В.Д., Плотников Н.И. М. : Недра, 1969. 408 с.

20. Банникова, О. А., Бычкова Е.Н. К вопросу об установлении региональных нормативов качества воды // Водное хозяйство России. 2011. № 6. С. 54-68.

21. Балашов Ю.А. Геохимия редкоземельных элементов. М. : Наука, 1976. 267 с.

22. Бачурин Б.А. Экологические проблемы горнопромышленных районов Пермского края // Экология и промышленность России. 2006. № 4. С. 32-35.

23. Бачурин Б.А., Бабошко А.А. Техногенно-минеральные образования горного производства как источники эмиссии тяжелых металлов // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти А.А. Чирвинского. 2008. № 11. С. 322-326.

24. Бачурин Б.А., Бабошко А.Ю. О характере трансформации состава техногенно-минеральных образований горного производства в условиях гипергенеза // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 7 . С. 336-342.

25. Белан Л.Н., Никонов В.Н. Освоение техногенных месторождений как способ воспроизводства минерально-сырьевой базы старых горнорудных районов (на примере Башкирского Урала) // Башкирский экологический вестник. 2013. № 1 (34). С. 52-55.

26. Белогуб Е.В. Гипергенез сульфидных месторождений Южного Урала: автореферат дис. ... докт. геол.-мин. наук. Санкт-Петербург. Санкт-Петербургский государственный университет, 2009. 40 с.

27. Белогуб Е.В., Щербакова Е.П., Никандрова Н.К. Сульфаты Урала: распространенность, кристаллохимия, генезис. Ин-т минералогии УрО РАН. М.: Наука, 2007. 160 с.

28. Белоусова А. П., Гавич И. К., Лисенков А. Б., Попов Е. В. Экологическая гидрогеология. Учебник для вузов. М. : ИКЦ «Академкнига», 2006. 397 с.

29. Беляев С.Д. Методологические основы разработки водоохраной стратегии для крупных речных бассейнов (на примере Верхней и Средней Оби): автореферат диссдокт. геогр. наук. Барнаул: ФГБУН Институт водных и

экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, 2018. 50 с.

30. Бизяев Н.А. Гидрогеохимическая трансформация Липовской геотехногенной системы: автореферат дис. ... канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург: УГГУ, 2012. 18 с.

31. Блинков О. Г. Защита водных объектов от загрязнения стоком с отвалов молибденовых рудников (на примере Жирекенского месторождения): автореферат дис. ... канд. геол.-мин. наук. СПб: Санкт-Петербургский государственный университет, 2016. 23 с.

32. Блинов И. А. Гипергенные минералы цинка на сульфидных месторождениях Южного Урала: автореферат дис. ... канд. техн. наук.

33. Бондаренко С.С., Лубенский Л.А., Куликов Г.В. Геолого-экономическая оценка месторождений подземных промышленных вод. М. : «Недра», 1988. 203 с.

34. Боровский Б.В., Дробноход Н.И., Язвин Л.С. Оценка запасов подземных вод. Киев : Вища школа, 1989. 407 с.

35. Боровский Б.В., Боровский Л.В., Язвин А.Л. Принципы определения границ месторождений подземных вод // Разведка и охрана недр. 2010. № 10. С. 10-18.

36. Боровский Б.В., Хордикайнен М.А., Язвин Л.С. Разведка и оценка эксплуатационных запасов месторождений подземных вод в трещинно-карстовых пластах. М.: Недра, 1976. 247 с.

37. Борисов М.В., Шваров Ю.В. Термодинамика геохимических процессов. М.: Изд-во МГУ, 1992. 256 с.

38. Бортникова С.Б. Геохимия тяжелых металлов в техногенных системах (вопросы формирования, развития и взаимодействия с компонентами экосферы): автореферат дис. ... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2001. 40 с.

39. Бортникова С.Б. Гаськова О.Л., Бессонова Е.П. Геохимия техногенных систем / отв. ред. Г.Н. Аношин; Ин-т геологии и минералогии СО РАН. Новосибирск : Академическое изд-во "Гео", 2006. 169 с.

40. Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Присекина Н.А. Геохимическая оценка потенциальной опасности отвальных пород Ведугинского месторождения // Геохимия. 2010. № 3. С. 295-310.

41. Буданов Н.Д. Гидрогеология Урала. М.: Наука, 1964. 304 с.

42. Букаты М.Б. Рекламно-техническое описание программного комплекса HydroGeo. М. : ВНТИЦ, 1999. 5 с. Номер гос. регистрации алгоритмов и программ во Всероссийском научно-техническом информационном центре (ВНТИЦ) №50980000051 ПК.

43. Букаты М.Б. Разработка программного обеспечения для решения гидрогеологических задач // Изв. Томского политехн. ун-та. 2002. Т. 305, вып. 6. С. 348-365.

44. В 2017 г. Минприроды России начнет формировать реестр объектов накопленного вреда. 26 июня 2017 г. URL: <http://www.vniiecolology.ru/index.php/8-news/297-2017>.

45. Вах Е. А. Редкоземельные элементы в природных и техногенных водах Дальнего Востока России: автореферат дис. ... канд. геол.-мин. наук. Владивосток, 2012. 22с.

46. Веселов А.А. Рудничный водоотлив. Свердловск: Государственное научно-техническое изд-во литературы по черной и цветной металлургии, 1956. 532 с.

47. Вишняк А.И. Изменение химического состава подземных вод в ограниченных карбонатных структурах при окислении пирита покровных отложений (на примере Полдневского месторождения Егоршинско-Каменской синклинали Восточно-Уральского прогиба): автореферат дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 2005. 19 с.

48. Владимиров Ю.И. Прогнозная оценка эксплуатационных ресурсов подземных вод по графикам сокращения речного стока // Разведка и охрана недр. 1985, № 8. С. 47-51.

49. Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 августа 2009 года N 1235-р.

50. Водный кодекс Российской Федерации от 3 июня 2006 г. № 74-ФЗ (в редакции, актуальной с 29.07.2017 г.).

51. Водяницкий Ю.Н. Состояние и поведение природных и техногенных форм As, Sb, Se, Te в рудных отвалах и загрязненных почвах (по зарубежным публикациям) // Почвоведение. 2010. № 1. С. 1–10

52. Вострокнутов Г.А. Формирование и геохимические особенности рудных и ореольных вод сульфидных месторождений Урала // Формирование химического состава и запасов подземных вод Урала. Свердловск : изд-во УФАН АН СССР, 1969. С. 87–102.

53. Вострокнутов Г.А. Временное методическое руководство по проведению геохимических исследований при геоэкологических работах. Екатеринбург : Уралгеология, 1991. 137 с.

54. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба. Утв. Председателем Государственного комитета Российской Федерации по охране окружающей среды В.И. Даниловым-Данильяном 9 марта 1999 г.

55. Временные методические рекомендации по гидрогеохимическому опробованию и химико-аналитическим исследованиям подземных вод (применительно к СанПиН 2.1.4.1074-01) / В.П. Закутин, Л.В. Боровский Редактор М.В. Кочетков. Рассмотрены и одобрены Управлением ресурсов подземных вод, геоэкологии и мониторинга геологической среды МПР России. М.: МПР России, 2002. 63 с.

56. ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно бытового водопользования (зарегистрированы Министерством юстиции Российской Федерации 19 мая 2003 г., регистрационный № 4550). М. : Министерство здравоохранения Российской Федерации, 2003. 94 с.

57. ГОСТ 17.1.3.07-82. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков. Приказом Минприроды России от 16 апреля 1992 г. N 60 снято ограничение срока действия.

58. ГОСТ Р 54003-2010 Экологический менеджмент. Оценка прошлого, накопленного в местах дислокации организаций, экологического ущерба. Общие положения. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 ноября 2010 г. N 594-ст.

59. ГОСТ Р 55100-2012 Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии обращения с отходами в горнодобывающей промышленности. Аспекты эффективного применения. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 ноября 2012 г. N 801-ст.

60. Гаев А.Я. Гидрогеохимия Урала и вопросы охраны подземных вод. Свердловск : Изд-во Уральского ун-та, 1989. 368 с.

61. Галицкая И.В. Геохимическая опасность и риск на урбанизированных территориях: автореферат дис. ... докт. геол.-мин. наук. Москва. Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН (ИГЭ РАН), 2010. 56 с.

62. Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л. Растворы, минералы, равновесия. М.: Мир, 1968. 368 с.

63. Гаськова О.Л. Геохимические особенности и физико-химические параметры гипергенных процессов в зонах техногенеза: автореферат дис. ... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2005. 41 с.

64. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода: в 5 томах. Т. 1: Система вода-порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование / В.А. Алексеев и др.; отв. редактор тома С.Л. Шварцев. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2005. 244 с.

65. Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода: в 5 томах. Т. 2: Система вода-порода в условиях гипергенеза / С.Л. Шварцев и др.; отв. редактор тома Б.Н. Рыженко. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2007. 389 с.

66. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Саэт, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. М. : Недра, 1990. 335 с.

67. Гидрогеология СССР. Том XIV. Урал. Уральское территориальное геологическое управление. Редактор В.Ф.Прейс. М. : Недра, 1972. 648 с.

68. Гидрогеологические исследования в горном деле / Под общ. ред. докт. геол.-минер. наук В.А. Мироненко. Авт. В.А. Мироненко, Ю.А. Норватов, Л.И. Сердюков и др. М. : Недра, 1976. 352 с.

69. Гидрогеология и охрана окружающей среды горнорудных районов Северного Казахстана / Веселов В.В., Махмутов Т.Т., Едигенов М.Б. и др. М. : Недра, 1992. 270 с.

70. Государственная программа "Охрана окружающей среды" на 2012-2020 годы (утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. № 326).

71. Гинзбург И. А., Рукавишниква И. А. Минералы древней коры выветривания Урала. М. : Издательство АН СССР, 1951. 716 с.

72. Голева Г. А. Гидрогеохимия рудных элементов. М. : Недра, 1977. 216 с.
73. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2012 году». Екатеринбург : ООО «Издательство УМЦ УПИ», 2013. 350 с.
74. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2014 году». ООО «Издательство УМЦ УПИ», 2015. 335 с.
75. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2015 году». Екатеринбург : ООО «Типография Для Вас», 2016. 312 с.
76. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2016 году». Екатеринбург : ООО «Типография Для Вас», 2017. 330 с.
77. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2015 году» [дата опубликования 28.12.2016 г.] // Официальный сайт Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации. URL: <http://www.mnr.gov.ru>.
78. Грязнов О. Н., Елохина С. Н. Геоэкологические проблемы горнопромышленного техногенеза на Урале // Известия Уральского государственного горного университета. 2017. № 2 (46). С. 28-33.
79. Грязнов О.Н., Новиков В.П., Фельдман А.Л. Гидрогеологические и геоэкологические аспекты разработки рудных месторождений горно-складчатого Урала // Известия вузов. Горный журнал. Уральское горное обозрение. 1995. № 5. С. 95-101.
80. Грязнов О.Н., Палкин С.В., Новиков В.П., Вострокнутов А.Г., Катаев А.М. Дренажные воды - источник техногенного гидроминерального сырья на Урале // Изв. вузов. Горный журнал. 1997. № 11/12. С. 58-65.
81. Гуляева Н.Г. Методические рекомендации по эколого-геохимической оценке территорий при проведении многоцелевого геохимического картирования масштабов 1:1000000 и 1:200000. М.: ИМГРЭ, 2002. 70 с.
82. Гуман О.М., Грязнов О.Н., Антонова И.А., Захаров А.В. Эколого-геологические условия и мониторинг окружающей среды полигонов твердых бытовых отходов Среднего Урала. Екатеринбург : ООО «УИПЦ», 2013. 237 с.
83. Гуман О.М., О.А., Макаров А.Б., Антонова И.А. Геоэкологическая оценка природно-технологических систем на регрессивной стадии техногенеза (на примере месторождения Яман-Касы) // Вестник ОГУ. №6 (155). 2013. С. 99-102.
84. Гуман О.М., Макаров А.Б., Антонова И.А. Геоэкологическая оценка состояния ПТС месторождений меди Урала. Lap Lambert Academic Publishing. 2014. 53 с.
85. Далатказин Т.Ш., Харисов Т.Ф. Прогнозные исследования последствий затопления Турьинского медного рудника // Проблемы недропользования. 2017. № 3 (14). С. 67-75.
86. Данилов-Данильян В.И., Джамалов Р.Г. Водноресурсные и геоэкологические аспекты разработки медно-никелевых месторождений Воронежской области // Недропользование-XXI век. 2013. № 4 (41). С. 82-85.

87. Дергачев А.Л. Эволюция вулканогенного колчеданообразования в истории Земли: автореферат дис. ... докт. геол.-мин. наук. М : МГУ, 2010. 45 с.
88. Джамалов Р.Г., Медовар Ю.А., Юшманов И.О. Негативное влияние разработок медно-никелевых месторождений на водные ресурсы Прихоперья // 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. 176-182.
89. Долгосрочная программа развития угольной промышленности России на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 24 января 2012 г. N 14-р.
90. Долматов Г.Н. Медь Урала //Известия вузов. Горный журнал. 1994. № 5. С. 13-24.
91. Докукин А.В. Водоотлив на шахтах с кислотной водой. Москва: Углетехиздат, 1947. 267 с.
92. Докукин А.В., Докукина Л.С. Возникновение кислотных рудничных вод и борьба с ними. Москва-Ленинград: Углетехиздат, 1950. 352 с.
93. Дребенштедт К. Современная эколого-экономическая концепция горной промышленности // Экономика региона. 2013. № 1. С. 105-114.
94. Дребенштедт К. Рекультивация земель после добычи полезных ископаемых. Лекция, прочитанная в НИТУ МИСиС (МГГУ), 29.09.2014. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=YgXUnYclJXw>.
95. Дребенштедт К. Закрытие горных предприятий в Германии. Лекция, прочитанная в НИТУ МИСиС (МГГУ), 29.09.2014.URL: <http://www.coolreferat.com/видео/view484425>.
96. Драйвер Дж. Геохимия природных вод. М.: Мир, 1985. 440 с.
97. Дубинин А.В. Геохимия редкоземельных элементов в океане. М.: Наука, 2006. 359 с.
98. Душин А.В. Теоретико-методологические основы государственного регулирования воспроизводства минерально-сырьевой базы: автореферат дис. докт. геол.-мин. наук. Екатеринбург : ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2014. 46 с.
99. Еловских В.М., Крушати́н Р.Ф., Семенов Г.П., Пыхтеева Н.Ф. Районирование подработанных площадей Дегтярского рудника // Известия вузов. Горный журнал. 1994. № 9-10. С. 118-121.
100. Елохина С.Н. Прогноз гидродинамических последствий затопления подземных горных выработок в условиях недостаточности гидрогеологической информации // Сергеевские чтения. Вып. 4: мат-лы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. М. : Изд. «ГЕОС», 2002. С. 361-364.
101. Елохина С.Н. Некоторые моменты методики прогноза излива шахтных вод на поверхность земли при самозатоплении шахтных полей // Известия Уральской государственной горно-геологической академии. Вып. 15. Серия: Геология и геофизика. Екатеринбург. 2003. С. 216-219.

102. Елохина С.Н. Исследование геоэкологических последствий самозатопления шахтных полей // Геоэкология. 2004. № 5. С. 405-414.
103. Елохина С.Н. Техноприродные опасности на затопленных рудниках Урала // Известия вузов. Горный журнал. 2005. № 3. С. 120-127.
104. Елохина С.Н. Горнорудный техногенез постэксплуатационной стадии на территории Урала // Литосфера. 2013. № 5. С.170-183.
105. Елохина С.Н. Геоэкологические проблемы затопленных рудников Урала / Под ред. О.Н. Грязнова. Екатеринбург : ООО «УИПЦ», 2013. 187 с.
106. Елохина С.Н. Техногенез затопленных рудников Урала: автореферат дис. . докт. геол.-мин. наук. Екатеринбург, 2014. 43 с.
107. Елохина С.Н., Елохин В.А. Оценка влияния горнорудного производства на поверхностные и подземные воды // Известия ВУЗов: «Горный журнал». 2014. № 1. С. 93-98.
108. Елохина С.Н., Рыженко Б.Н. Вторичное минералообразование в природно-техногенных гидрогеологических системах колчеданных месторождений. Моделирование фазы $(\text{Fe,Mg})\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ при окислении сульфидов Дегтярского медноколчеданного месторождения // Геохимия. 2014. № 2. С. 178–192.
109. Елпатьевский П.В. Геохимия миграционных потоков в природных и природно-техногенных геосистемах. М. : Наука, 1992. 263 с.
110. Емлин Э.Ф. Техногенез колчеданных месторождений Урала. Свердловск : Изд-во УрГУ, 1991. 256 с.
111. Ермаков В.Н., Семенов А.П., Улицкий О.А., Котелевец Е.П., Тарахкало А.В. Развитие процессов подтопления земной поверхности под влиянием закрывающихся шахт // Уголь Украины. 2001. № 6. С. 12-13.
112. 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.
113. Жукова И.А., Лобунец В.С. Экологические последствия реструктуризации угольной промышленности Ростовской области // Journal of Economic Regulation (Вопросы регулирования экономики). 2016. vol. 7, issue 4, P. 87-94. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/ekologicheskie-posledstviya-restrukturizatsii-ugolnoy-promyshlennosti-rostovskoy-oblasti>.
114. Жуковская Е.П. Методика оперативной оценки экологической опасности отходов при разработке медно-цинковых месторождений Урала и перспективные способы их нейтрализации: автореферат дис. ... канд. геол.-мин. Наук. Екатеринбург : РосНИИВХ, 2003. 20 с.
115. Закон РФ "О недрах" от 21.02.1992 N 2395-1 (ред. от 30.09.2017).
116. Зверев В.П. Энергетика гидрогеохимических процессов седиментогенеза. М.: Наука, 1983. 136 с.
117. Зверев В.П. Вода в земле. М. : Научный мир, 2009. 251 с.
118. Зверева В.П. Роль подземных вод в миграции химических элементов. М. : Недра, 1982. 181 с.

119. Зверева В.П., Фролов К.Р., Лысенко А.И., Пятаков А.Д. Эколого-химическая оценка воздействия гипрегенных процессов, протекающих в сульфидсодержащих отходах горнопромышленных техногенных систем Дальнего Востока, на гидросферу методом физико-химического моделирования. Владивосток : Дальневосточный федеральный университет, 2016. 288 с.

120. Зотеев В.Г. Состояние окружающей среды техногенных провинций Уральского региона и пути их реабилитации // Инженерно-геологические проблемы урбанизированных территорий. Материалы международного симпозиума в 2 томах. Екатеринбург : Изд-во "Аква-пресс". 2001. Т. 2. С. 490-496.

121. Зотеев О.В., Корнилков С.В. Перспектива извлечения цветных металлов, выносимых на поверхность рудничными водами на отработанных месторождениях // Изв. ВУЗов: «Горный журнал». Уральское горное обозрение. 1995. № 5. С. 111-125.

122. Зотеев В.Г., Зотеев О.В., Корнилков С.В. Перспектива извлечения цветных металлов, выносимых на поверхность рудничными водами на отработанных месторождениях // Комбинированная геотехнология: Развитие физико-химических способов добычи: труды по материалам междунар. конф, Магнитогорск: МГТУ. 2009. С. 76–81.

123. ИТС 16-2016 «Горнодобывающая промышленность. Общие процессы и методы». Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Москва: Бюро НДТ. 106. 220 с.

124. Иванов В.В. Технологическое пространство и экология технологий // Вестник РАН. 2011. №5. С. 414–418.

125. Иванов В.В., Малинецкий Г.Г. Россия: XXI век. Стратегия прорыва: Технологии. Образование. Наука. М.: ЛЕНАНД, 2016. 304 с.

126. Игнатьева М.Н., Семячков А.И., Литвинова А.А. Прогнозирование последствий воздействия горнопромышленных комплексов на окружающую среду и методические подходы к их экономической оценке: научное издание. Екатеринбург : Институт экономики УрО РАН, 2009. 66 с.

127. Имайкин А.К. Оценка и прогноз гидрогеологических условий территории Кизеловского угольного бассейна после закрытия шахт: автореферат дис. ... канд. геол.-мин. наук. Пермь. 2005. 20 с.

128. Имайкин А.К., Имайкин К.К. Гидрогеологические условия Кизеловского угольного бассейна во время и после окончания его эксплуатации, прогноз их изменений. Пермь : Перм. гос. нац. иссл. ун-т., 2013. 112 с.

129. Инструкция о порядке ведения работ по ликвидации и консервации опасных производственных объектов, связанных с пользованием недрами. РД 07-291-99. Утверждена Постановлением Госгортехнадзора России N 33 от 2 июня 1999 г. Зарегистрировано в Минюсте РФ 25 июня 1999 г. N 1816. 16 с.

130. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений. Утверждено Госгортехнадзором СССР 3 июля 1986 г. 76 с.

131. Информационный бюллетень о состоянии недр на территории на территории Российской Федерации в 2010 г. Выпуск 34. М. : ООО Геоинформмарк, 2011. 208 с.
132. Истощенные месторождения ликвидируют по гарантиям. Известия. 21 апреля 2014. URL: <https://iz.ru/news/569576>.
133. Казикаев Д.М. Геомеханика подземной разработки руд. М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2005. 542 с.
134. Каменский Г.Н., Климентов П.П., Овчинников А.Н. Гидрогеология месторождений полезных ископаемых. М. : Госгеолиздат, 1953. 354 с.
135. Карпов И.К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии. Новосибирск : Наука, 1981. 247 с.
136. Касимов Н.С., Перельман А.И. Геохимия ландшафта. М. : Издательство Московского государственного университета, 1999. 610 с.
137. Кашик С.А., Карпов И.К. Физико-химическая теория образования зональности в коре выветривания. Новосибирск : Наука, 1978. 152с.
138. Кецко О. Г. Техногенез Липовского месторождения силикатного никеля (Средний Урал): автореферат дис. ... канд геол.-мин. наук. Екатеринбург, 1996. 25 с.
139. Кецко О.Г., Волков С.Н., Кайнов В.И. Оптимизация ресурсопользования на регрессивной стадии техногенеза Липовского месторождения // Известия Уральского государственного горного университета. 1996. С. 158-162.
140. Кирюхин В.А., Коротков А.И., Шварцев С.Л. Гидрогеохимия. М.: Недра, 1993. 384 с.
141. Климентов П.П., Овчинников А.М. Гидрогеология месторождений твердых полезных ископаемых. 1 т. Ч. 1. М. : Недра, 1966. 200 с.
142. Климентов П.П., Овчинников А.М. Гидрогеология месторождений твердых полезных ископаемых. 1 т. Ч. 2. М. : Недра, 1966. 379 с.
143. Козин В.З., Колтунов А.В., Морозов Ю.П., Осинцев В.А., Русский В.В., Перестронин И.Н., Тюрина Г.Л. Совершенствование технологии нейтрализации шахтных вод Левихинского рудника // Изв. ВУЗов. Горный журнал. 1997. № 11–12. С. 211–214.
144. Комин А.В. Защита водных объектов от загрязнения стоком с отвалов медно-цинковых руд (на примере Левихинского рудника): автореферат дис.... канд. техн. наук. Екатеринбург: РосНИИВХ, 2000. 18 с.
145. Кондрашкин А.В., Кузовков С.В. Рудник и родник. Технологические подходы к очистке карьерных и подотвальных вод при добыче руд цветных металлов // Инженерная защита. 2015. №7. С. 58-63.
146. Коносавский П.К., Соловейчик К. А. Математическое моделирование геофильтрационных процессов : Учеб. Пособие. СПб. : Изд-во СПбГТУ, 2001. 96 с.
147. Контарь Е.С. Геолого-промышленные типы месторождений меди, цинка, свинца на Урале (геологические условия размещения, история

формирования, перспективы. Департамент по недропользованию по Уральскому федеральному округу (Уралнедра). Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2013. 199 с.

148. Корнеева Т.В., Юркевич Н.В., Аминов П.Г. Геохимические особенности миграционных потоков в зоне влияния горнопромышленного техногенеза (г. Медногорск) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 2. С. 85–94.

149. Корнилов С.В. О прикладных аспектах развития геоинформационных систем горнодобывающих предприятий // Проблемы недропользования. 2016. № 4 (11). С. 131-140.

150. Корнилов 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.

151. Костылева Н.В., Микишева В.И., Сорокина Т.В. Экологический ущерб: вопросы, вопросы... // Географический вестник. 2010. № 1. URL. <http://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskiy-uscherb-voprosy-voprosy#ixzz3Wc8NbrJO>.

152. Кочетков М.В., Кашковский Г.Н. и др. Эколога-геологические последствия массового затопления ликвидированных угольных шахт Восточного Донбасса // Разведка и охрана недр. 2001. №5. С. 33-38.

153. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. М. : Наука, 2004. 677 с.

154. Крутиков А.В., Менгель Д.А. Применение метода «реперные линии - фотоупругие датчики» для оперативного прогноза геомеханических явлений // Геомеханика в горном деле: доклады Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 4-5 июня 2014 г. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2104. С. 229-236.

155. Кузнецов М.А., Акимов А.Г., Кузьмин В.И. Сдвигение горных пород на рудных месторождениях. М.: Недра, 1971. 224 с.

156. Курдюмов В. Р., Тимофеев К. Л., Лебедь А. Б., Мальцев Г. И. Технология комплексной очистки шахтной воды с попутным извлечением цветных металлов // Цветные металлы. 2017. №12.

157. Лангольф Э.Л., Лудзиш В.С., Лазаревич Т.И., Поляков А.Н. Актуальные проблемы освоения площадей горных отводов после затопления шахт Кузбасса // Маркшейдерский вестник. 2007. № 4. С. 45-48.

158. Лепихин А.П., Мирошниченко С.А. Особенности задания «фоновой» концентрации в естественных водотоках // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2002. Т. 6. № 3. С. 247-262.

159. Лехов А.В., Вишняк А.И. Модель окисления дисперсного пирита песчано-глинистых отложений при водопонижении // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2005. № 6. С. 505-516.

160. Лехов А.В., Шваров Ю.В. Рост минерализации эксплуатируемых подземных вод при наличии пирита в покровных отложениях // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2002. № 4. С. 316-325.

161. Лехов А.В. Физико-химическая гидрогеодинамика: учебник. М. : КДУ, 2010. 500 с.
162. Лиманцева О.А., Лисенков А.Б. Насыщенность подземных вод относительно минералов водовмещающих пород // Геохимия. 2008. № 8. С. 734-747.
163. Лиманцева О.А., Рыженко Б.Н., Черкасова Е.В. Прогноз влияния кислотного дренажа на изменение гидрогеохимической обстановки в районах сульфидсодержащих месторождений // Геохимия. 2015. № 10. С. 945-960.
164. Ломакин Е.А., Мироненко В.А., Шестаков В.М. Численное моделирование геофильтрации. М.: Недра, 1988. 228 с.
165. Лудзиш В.С. Реализация программы ликвидации особо убыточных шахт, разрезов и состояние экологической и промышленной безопасности на территории горных оводов ликвидированных шахт в Кузнецком бассейне // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2012. № 2. С. 96-99.
166. Любич К.А., Бауман А.В. Особенности применения реагентов для интенсификации процессов очистки шахтных, карьерных и оборотных вод обогатительных фабрик / Иновационные технологии обогащения минерального и техногенного сырья: материалы научно-технической конференции, проводимой в рамках V Уральского горнопромышленного форума, 1-3 октября 2013 г., г. Екатеринбург / под ред. Е. Ф. Цыпина. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2013. С. 196-203.
167. Магда Я. Эколого-геологические последствия массового закрытия шахт Донбасса / Энергетическая политика Украины / 16 февраля 2005 г. URL: <http://www.geonews.com.ua/index.cgi?a=3372>
168. Мазухина С.И. Формирование химического состава природных и антропогенно измененных вод Кольского полуострова: автореферат дис. ... докт. техн. наук. СПб: Российский государственный гидрометеорологический университет. 2016. 41 с.
169. Макаров А.Б. Главные типы техногенно-минеральных месторождений Урала. Екатеринбург : УГГУ, 2006. 206 с.
170. Макаров А.Б. Техногенно-минеральные месторождения Урала. Екатеринбург : автореферат дис. ... докт. геол.-мин. наук. Екатеринбург: УГГУ, 2007. 41 с.
171. Макаров Д.В. Теоретическое и экспериментальное обоснование химических превращений сульфидов в техногенных отходах и изучение влияния продуктов окисления минералов на их технологические свойства и окружающую среду: автореферат дис. ... докт. техн. наук. М. : КНЦ РАН, 2006. 40 с.
172. Максимович Н.Г., Черемных Н.В., Хайрулина Е.А. Экологические последствия ликвидации Кизеловского угольного бассейна // Географический вестник. 2006. N 2. С.128-134.
173. Малые реки России: Использование, регулирование, охрана, методы водохозяйственных расчетов. Свердловск : Сред.-Урал. кн. изд-во, 1988. 316 с.

174. Медь на Томинском ГОКе будут добывать без серной кислоты. Газета.Ru. Опубликовано 20.07.2017. URL: <https://www.gazeta.ru/business/2017/07/18/10793492.shtml#page6>.
175. Медноколчеданные месторождения Урала. Геологические условия размещения / В. А. Прокин, В. М. Нечеухин, П. Ф. Сопко и др. Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1985. 288 с.
176. Медноколчеданные месторождения Урала. Геологическое строение / В. А. Прокин, Ф. П. Буслаев, М. И. Исмагилов и др. Свердловск: Изд-во УрО АН СССР, 1988. 241 с.
177. Медноколчеданные месторождения Урала. Условия формирования / В. А. Прокин, И. Б. Серавкин, Ф. П. Буслаев и др. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1992. 307 с.
178. Мерзликина Ю.Б., Прохорова Н.Б. Платежи за сброс загрязняющих веществ как инструмент регулирования деятельности по охране водных объектов от негативного воздействия производственно-хозяйственных комплексов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2013. № 6. С.74-86.
179. Методика исчисления размера вреда, причиненного водным объектам вследствие нарушения водного законодательства. М.: Министерство природных ресурсов, 2009. Утв. приказом Минприроды России от 13 апреля 2009 г. N 87. Зарегистрировано в Минюсте РФ 25 мая 2009 г., регистрационный N 13989.
180. Методические рекомендации по изучению и оценке попутных вод месторождений полезных ископаемых в целях их использования в качестве гидроминерального сырья. М.: ВСЕГИНГЕО, 1985. 97 с.
181. Методические рекомендации по оценке эксплуатационных запасов подземных дренажных вод месторождений твердых полезных ископаемых. М.: ВСЕГИНГЕО, 1992. 67 с.
182. Методические рекомендации по организации мониторинга подземных вод на мелких групповых водозаборах и одиночных эксплуатационных скважинах / С.Л. Пугач, В.А. Лыготин, Л.С. Рыбникова, С.В. Перепадя. Утверждены Первым заместителем Министра природных ресурсов Российской Федерации В.А.Паком 25 июля 2000 года. М. : Государственный центр мониторинга геологической среды МПР России, 2000. 27 с.
183. Методические рекомендации по проведению инвентаризации объектов накопленного экологического ущерба (Приказ Росприроднадзора от 25.04.2012 № 193).
184. Методы геохимического моделирования и прогнозирования в гидрогеологии / Крайнов С.Р., Шваров Ю.В., Гричук Д.В., Добровольский Е.В., Соломин Г.А., Борисов М.В., Рыженко Б.Н., Матвеева Л.И., Лялько В.И., Швец В.М. Москва : Недра, 1988. 254 с.
185. Министр природных ресурсов и экологии РФ Сергей Донской в статье, опубликованной в «Российской газете», рассказал о законопроекте, обязывающем компании создавать ликвидационные фонды. 4 октября 2013. URL: <http://www.mnr.gov.ru/mnr/minister/statement/detail.php?ID=131524>. Минприроды РФ оставит уральских промышленников без прибыли. 28.04.2014. URL:

<http://pravdaurfo.ru/articles/minprirody-rf-ostavit-uralskih-promyshlennikov-bez-pribyli>.

186. Мироненко В.А. Динамика подземных вод: Учебник. Изд. 3-е. М.: МГГУ, 2001. 519 с.

187. Мироненко В.А., Румынин В.Г., Учаев В.К. Охрана подземных вод в горнодобывающих районах (опыт гидрогеологических исследований). Л. : Недра, 1980. 320 с.

188. Мироненко В.А., Мольский Е.В., Румынин В.Г. Горнопромышленная гидрогеология. Учебник для вузов. М. : Недра, 1989. 287 с.

189. Мироненко В. А. Гидрогеология – экологически ориентированная научная дисциплина // Вестник Российской академии наук. 1996. Том 66. № 10. С. 875-879.

190. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Проблемы гидрогеоэкологии. В 3 т. Т. 3 (книга 1). Прикладные исследования. М. : Издательство Московского государственного горного университета, 1999. 313 с.

191. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Проблемы гидрогеоэкологии. В 3-х томах. Том 3 (книга 2). Прикладные исследования. М. : Издательство Московского государственного горного университета, 1999. 504 с.

192. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Основы гидромеханики. М. : Недра, 1974. 296 с.

193. Мирошниченко С.А. Источники формирования железа в поверхностных водах реки Камы в пределах Пермского края // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2011. № 6. С. 69-82.

194. Михайлов С.А. Диффузное загрязнение водных экосистем. Методы оценки и математические модели: Аналит. обзор / СО РАН. ГПНТБ, Ин-т водных и экологич. проблем. Барнаул: День, 2000. 130 с. (Сер. Экология. Вып. 56).

195. Михайлов А.Г., Вашлаев И.И., Харитонов М.Ю. Математическое моделирование фильтрационного массопереноса цветных металлов в техногенном массиве // Успехи современного естествознания. 2016. №: 12-1. С. 188-193.

196. Мормилъ С.И., Сальников В.И., Амосов Л.А., Хасанова Г.Г., Семячков А.И, Зобнин Б.Б., Бурмистренко А.В. Техногенные месторождения Урала и оценка их воздействия на окружающую среду / Под ред. Ю.А.Боровкова. Екатеринбург : НИА-Природа, ДПР по Уральскому региону, ВНИИЗАРУБЕЖГЕОЛОГИЯ, 2002. 206 с.

197. Моисеенков А.В. Результаты работы ФГБУ «ГУРШ» в 2011 г. Проблемы и перспективы при реализации мероприятий по ликвидации особо убыточных шахт и разрезов // Уголь. 2012. № 3. С. 20-21.

198. Моисеенков А.В. Результаты работы ФГБУ «ГУРШ» в 2014 году и ближайшие планы работы // Уголь. 2015. № 3. С. 72-75.

199. Мониторинг месторождений и участков водозаборов питьевых подземных вод. Методические рекомендации / Б.В. Боровский, Л.С. Язвин, В.П. Закутин. Утверждены Минприроды РФ, 1997 г. М.: АОЗТ ГИДЭК, 1998. 80 с.

200. Мохов А. В. Трансформация гидродинамических характеристик горного массива на участках освоения каменноугольных залежей подземным способом: автореферат дис. ... докт. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2015. 40 с.

201. Накопленному экоущербу пишут программу. Ее приоритеты Минприроды определил на ощупь. Коммерсантъ. 30.05.2013. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/2200193>.

202. Никонов В.Н., Белан Л.Н., Яруллина И.Н. Промышленные стоки горно-обогатительных комбинатов Башкирского Зауралья как экологическая проблема и гидроминеральное сырье цветных металлов // 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. 35–37.

203. Новиков В.П. Закономерности формирования эксплуатационных запасов подземных вод в трещиноватых и закарстованных породах Восточного склона Среднего Урала (на примере Тагило-Исетского. сложного бассейна местного стока): автореферат дисс. ... канд. геол.-минер. наук. ВНИИ гидрогеологии и инж. геологии. Москва, 1989. 18 с.

204. Норватов Ю.А. Изучение и прогноз техногенного режима подземных вод (при освоении месторождений полезных ископаемых). Л. : Недра, 1988. 261 с.

205. Норватов Ю.А. Петрова И.Б. Численное моделирование геофильтрации при планировании мероприятий по обеспечению эффективности и безопасности горных работ // Проблемы геодинамической безопасности / СПб: ВНИМИ. 1997. С.35-38.

206. Норватов Ю.А., Петрова И.Б. Методическое руководство по прогнозу гидрогеологических условий ликвидации угольных шахт и обоснованию мероприятий, обеспечивающих предотвращение негативных экологических последствий. СПб. : ВНИМИ, 2008. 79с.

207. Норватова О.И. Методика прогноза гидрогеологических условий затопления угольных шахт на базе численного моделирования геофильтрационных процессов: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2005. 23 с.

208. Нормативы качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектах рыбохозяйственного значения (утв. приказом Федерального агентства по рыболовству от 18 января 2010 г. № 20). Зарегистрировано в Минюсте РФ 9 февраля 2010 г. Регистрационный № 16326. М.: Федеральное агентство по рыболовству

209. О Концепции водной безопасности Свердловской области на период до 2020 года. Постановление Правительства Свердловской области от 5 августа 2011 года N 1029-ПП.

210. О нормативах платы за выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ стационарными и передвижными источниками, сбросы загрязняющих веществ в поверхностные и подземные водные объекты, размещение отходов

производства и потребления. Постановление Правительства РФ от 12 июня 2003 г. № 344 (с изменениями на 24 декабря 2014 года).

211. О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года. Указ Президента Российской Федерации № 176 от 20 апреля 2017 г.

212. ОК 032-2002 Общероссийский классификатор полезных ископаемых и подземных вод (ОКПИИПВ) (с изменениями N 1-4). Принят и введен в действие постановлением Госстандарта России от 25 декабря 2002 года N 503-ст.

213. Об экологических последствиях выполнения комплекса мероприятий по завершению реструктуризации угольной промышленности Восточного Донбасса на 2006-2010 годы. URL: <http://www.donland.ru/Default.aspx?pageid=88038>.

214. Областная целевая программа «Экология и природные ресурсы Свердловской области» на 2009-2015 годы (в ред. Постановления Правительства Свердловской области от 15.06.2012 N 667-ПП).

215. Оздоровление Восточного Донбасса продолжится? Вестник. Строительство. Архитектура. Инфраструктура. 2009. № 7 (72). URL: <http://www.вестник-строительства.рф/archive/articles/2308.html>.

216. Орехова Н.Н., Шадрунова И.В. Образование и комплексная переработка природно-техногенных вод при эксплуатации медно-цинковоколчеданных месторождений. Магнитогорск : Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2015. 185 с.

217. Основы гидрогеологии. Гидрогеохимия / Шварцев С.Л., Пиннекер Е.В., Перельман А.И. и др. Новосибирск : Наука, 1982. 286 с.

218. Павлюк А.В., Сергеев А.П., Бувечич А.Г., Шичкин А.В., Подкорытов Н.А., Бухаров А.Н., Заузолков И.В. Экспериментальная оценка эффективной емкости пруда-отстойника на примере Ельчевского водохранилища // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т.13. № 1-8. С. 2073-2077.

219. Палкин С.В., Палкин С.С. Разведка и эксплуатация Липовского водозабора при его взаимодействии с выведенным из разработки карьером никелевых руд // Разведка и охрана недр. 2003. № 10. С. 19-25.

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

221. 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.

222. Панюков П.Н. Инженерная геология. Издание 2. М. : Недра, 1978. 296 с.

223. Пахальчак Г. Ю. Совершенствование экономических механизмов ликвидации ранее накопленного экологического ущерба / Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов. Труды V Международной научно-практической конференции. 20 апреля 2017 / Отв.

редактор Семячков А.И. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет; Институт экономики УрО РАН, 2017. С. 151-158.

224. Пашкевич М.А. Техногенные массивы и их воздействие на окружающую среду. СПб. : СППГИ (ТУ), 2000. 230 с.

225. Певзнер М.Е. Горная экология. Учебное пособие. М. : Издательство Московского государственного горного университета, 2003. 395 с.

226. Перельман А.И. Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра, 1972. 288 с.

227. Перельман А.И. Геохимия. М. : Высшая Школа, 1979 423 с.

228. Пирмагомедов Д.А. Защита водных объектов от загрязнения отвалами забалансовых медных руд (на примере Кальмакырского рудника): автореферат дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург : РосНИИВХ, 1996. 20 с.

229. Питаленко Е.И., Артеменко П.Г., Педченко С.В., Ягмур А.Б. Время затопления шахт: прогноз и факт // Наукові праці УкрНДМІ НАН України, Transactions of UkrNDMI NAN Ukraine. 2007. № 1 . С. 165-172.

230. Питьева К.Е. Гидрогеохимические аспекты охраны геологической среды. М. : Наука, 1984. 221 с.

231. Плотников Н.И. Гидрогеологические исследования на месторождениях твердых полезных ископаемых. Основы гидрогеологии. Методы гидрогеологических исследований. Новосибирск : Наука, 1984. 213 с.

232. Плотников Н. И. Техногенные изменения гидрогеологических условий. М.: Недра, 1989. 268 с.

233. Плотников Н.И., Сыроватко М.В., Щеголев Д.И. Подземные воды рудных месторождений. М.: Металлургиздат. 1957. 614 с.

234. Плотников Н. И., Рогинец И. И. Гидрогеология рудных месторождений. М. : Недра, 1987. 288 с.

235. Плугина Т.А. Анализ изменения балансовых составляющих водоотбора при эксплуатации месторождений подземных вод // Разведка и охрана недр. 2003. № 10. С. 27-36.

236. Плюснин А.М. Геохимия подземных вод зоны активного водообмена горноскладчатых областей (на примере Забайкалья): автореферат дис. ... докт. геол.-мин. наук. Томск, 2001. 49 с.

237. Плюснин А.М., Гунин В.И. Самоорганизация зоны окисления сульфидных месторождений (компьютерная модель). ДАН. 1998. Т. 361, №5. С. 675-678.

238. Плюснин А.М., Гунин В.И. Природные гидрогеологические системы, формирование химического состава и реакция на техногенное воздействие (на примере Забайкалья). Улан-Удэ : изд-во БНЦ СО РАН, 2001. 137 с.

239. Плюснин А.М. Основы геоэкологической безопасности при разработке рудных месторождений // 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. 2017. С. 261-266.

240. Пиннекер Е.В. Экологические проблемы гидрогеологии. Новосибирск : Наука, 1999. 128 с.

241. Поздняков С.П. Стохастическое моделирование гидрогеодинамических процессов: автореферат дис. ... докт. геол.-мин. наук. М. : МГУ, 1996. 44 с.

242. Полезные отходы. Денис Паслер поддержал проект переработки шламов Левихинского рудника. 17.12.2014. URL: <http://eburg.mk.ru/articles/2014/12/17/poleznye-otkhody.html>.

243. Попов А.Н., Почечун В.А., Семячков А.И. Инновационные технологии защиты водных объектов в горнопромышленных районах / под редакцией профессора А.И. Семячкова. Екатеринбург : Институт экономики УрО РАН, 2009. 128 с.

244. Постановление Правительства Свердловской области №736-ПП «Об утверждении областной государственной программы «Экология и природные ресурсы Свердловской области» на 2009-2011 гг.».

245. Прогноз водопритоков в горные выработки и водозаборы подземных вод в трещиноватых и закарстованных породах // Бабушкин В. Д., Лебедянская З. П., Леви Л. З., Кашковский Г. Н., Боровский Б. В., Плотников И. И. М. : Недра, 1972. 196 с.

246. Прогноз негативных экологических последствий ликвидации шахт Восточного Донбасса. 2001. URL: <http://www.geolink-consulting.ru/projects/donbas.html>.

247. Проект Федерального закона "О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части установления обязанности недропользователей по созданию ликвидационных фондов" (подготовлен Минприроды России) (не внесен в ГД ФС РФ, текст по состоянию на 22.01.2014).

248. Программная система гидрогеологического моделирования ModTech 3.14. Руководство пользователя. М. : Геолинк Консалтинг, 2009. 346 с.

249. Прохоров С.П., Качугин Е.Г. Гидрогеологические исследования при разведке месторождений. М. : Госгеолиздат, 1955. 232 с.

250. РД 52.24.643-2002 Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. М. : Росгидромет. Утвержден и введен в действие 03.12.2002.

251. Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник: Справ. изд. / Под ред. А.А. Ефимова и А.И. Ефимова. 3-е изд., перераб. и доп. Л. : Химия, 1991. 432 с.

252. Радченко Д.Н., Матюшенко Г.А., Илимбетов А.Ф. Исследование технологии извлечения ионов металлов из многокомпонентных продуктивных растворов выщелачивания отходов обогащения медноколчеданных руд // Комбинированная геотехнология: Развитие физико-химических способов добычи: труды по материалам международной конференции г. Сибай 18 - 21 июня 2007 г. Магнитогорск : МГТУ. 2009. С. 108–116.

253. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 11. Средний Урал и Приуралье. Л. : Гидрометеиздат, 1973. 848 с.

254. Романова О.А. "Ресурсный национализм" в условиях реиндустриализации отечественной экономики / Труды Конгресса с международным участием и элементами школы молодых ученых "Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований". Екатеринбург : УрО РАН, 2014. С.124-128.

255. Романова О.А., Пономарева А.О. Формирование экологически дружественного технологического пространства в контексте обеспечения экономической безопасности / Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов. Труды V Международной научно-практической конференции. 20 апреля 2017 / Отв. редактор Семячков А.И. Екатеринбург : Уральский государственный горный университет; Институт экономики УрО РАН, 2017. С. 168-176.

256. Ромм Е.С. Структурные модели порового пространства горных пород. Л. :, Недра, 1985. 240 с.

257. Рошаль А.А. Оценка запасов и использование дренажных подземных вод при разработке месторождений твёрдых полезных ископаемых. URL: <http://www.geolink-consulting.ru/company/publications/drenazh.html>.

258. Румынин В.Г. Геомиграционные модели в гидрогеологии. СПб. : Наука, 2011. 1158 с.

259. Румынин В.Г., Никуленков А.М., Владимиров К.В. Модели иммиграции радионуклидов в трещиноватых и трещиновато-пористых породах. С. 77-97 / 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. Познякова. М.: МГУ, 2018. 206 с.

260. Рыбаков Ю.С. Охрана и предотвращение загрязнения водных объектов от стока с техногенных образований: автореферат дис. ... докт. техн.наук. Екатеринбург: РосНИИВХ, 1998. 40 с.

261. Рыбников П.А. Методы гидродинамического обоснования водоохраных мероприятий в районе ликвидируемых горнодобывающих предприятий (на примере Межозерного рудника Южного Урала): автореферат дис. ... канд. геол.-мин. наук. М. : МГГРУ, 2004. 16 с.

262. 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 2013г.: 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.

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

264. Рыбникова Л.С., Лехов А.В. Моделирование массопереноса в карбонатном водоносном горизонте // Водные ресурсы. 1986. №1. С. 55-64.

265. Рыбникова Л.С., Прохорова Н.Б., Поздина Е.А., Палкин С.В. Перспективы использования подземных вод для водоснабжения г. Екатеринбурга // Питьевые воды. Изучение, использование и информационные технологии. Материалы Международной научно-практической конференции (18-22 апреля 2011 г.). Ч. 2. Московская область, г. Балашиха : ФГУ ВНИИПО МЧС России. С.60-74.

266. 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. 11-15.

267. 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.

268. 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.

269. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Использование подземных вод для питьевого водоснабжения при отработке и консервации месторождений полезных ископаемых / Сб. матер. XII Междунар. научно-практ. симп. и выставки «Чистая вода России». 14-16 мая 2013 года, г. Екатеринбург. Екатеринбург: РосНИИВХ, 2013. С. 360-367.

270. 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.

271. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Обоснование подземной разработки Сарбайского железорудного месторождения методами математического моделирования // Математическое моделирование, геоинформационные системы и базы данных в гидрогеологии. Материалы всероссийской научно-практической конференции (25–27 сентября 2013 г.) / Отв. ред. В. Г. Румынин. М.: АНО УКЦ «Изыскатель», 2013. С. 70-72.

272. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Формирование гидросферы Среднего Урала на этапе постмайнинга / Комплексные проблемы гидрогеологии. Тезисы докладов научной конференции. К 125-летию со дня рождения профессора Б.Л. Личкова. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургского университета. 2013С. 129-132.

273. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Оценка накопленного экологического вреда водным объектам в районе медноколчеданных рудников Среднего Урала / Технологическая платформа «Твердые полезные ископаемые: Технологические и

экологические проблемы отработки природных и техногенных месторождений»: доклады научно-практической конференции 1-2 октября 2013 г. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2013. С. 127-131.

274. 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, 2013. С. 143–147.

275. 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.

276. 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.

277. 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.

278. 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.

279. 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.

280. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Оценка экологического ущерба водным объектам в районах обрабатываемых и затопленных медноколчеданных рудников Среднего Урала // Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли – формирование нового мировоззрения в освоении природных ресурсов: сб докладов Всеросс. научн.-техн. конф. с участием иностранных специалистов, 13-15 октября 2014 г.: В 2 т. / Российская академия наук, Горный институт Кольского научного центра РАН. - Т. 1. Апатиты; СПб. : «Реноме», 2014. С. 378-383.

281. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Эколого-экономическая оценка ущерба гидросфере в районах обрабатываемых и затопленных медноколчеданных рудников // Проблемы недропользования. Сетевое периодическое издание. Рецензируемый выпуск научных статей. Выпуск 3. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2014. С.206-210.

282. 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. Издательство: Федеральное государственное унитарное предприятие «Издательство Дальнаука» (Владивосток). С.503-507.

283. 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.

284. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Эколого-экономические проблемы отработки гидроминерального сырья затопленных медноколчеданных рудников Урала. В сборнике: Экологическая безопасность горнопромышленных регионов. Труды III Международной научно-практической конференции. Отв. редакторы А.И. Семячков, М.Н. Игнатьева. Екатеринбург, 2015. С. 81-88.

285. 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.

286. 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).

287. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Обоснование экологической безопасности захоронения отходов в выработанном пространстве (на примере Восточного карьера Магнитогорского металлургического комбината, Челябинская область) // В сборнике: Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов, труды IV Международной научно-практической конференции. Свердловское областное отделение общественной организации международной академия наук экологии, безопасности человека и природы; Министерство образования и науки РФ, ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет»; Институт экономики УрО РАН. 2016. С. 322-329.

288. 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.

289. 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.

290. 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-Put Open Pit Area Use in the Ural. Journal of Mining Science January 2017, Volume 53, Issue 1. P. 181–190. DOI 10.1134/S1062739117012006).

291. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Особенности формирования гидрогеологических систем в горнопромышленных районах Среднего Урала / Экологическая и техносферная безопасность горнопромышленных регионов. Труды V Международной научно-практической конференции. 20 апреля 2017 / Отв. редактор Семячков А.И. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет; Институт экономики УрО РАН, 2017. С. 188-196.

292. 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.

293. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Управление качеством питьевых подземных вод на водосборах, нарушенных горнодобывающей деятельностью / Материалы XIV междунар. симпозиума Чистая вода России, 18–20 апреля 2017 г., Екатеринбург. [Электронный ресурс] Екатеринбург : ФГБУ РосНИИВХ, 2017. С. 315-320.

294. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Гидрогеологические исследования в горнопромышленных районах на постэксплуатационном этапе / Подземные воды Востока России: материалы Всеросс. 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.

295. 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.

296. 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, экологи криологии СО РАН. Чита : ЗабГУ, 2018. С. 167-172.

297. 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. Познякова. М.: МГУ, 2018. 206 с.

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

299. 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.

300. 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. Геоэкологические проблемы мониторинга подземных и поверхностных вод в горнодобывающих районах Урала // 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.

301. 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.

302. 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.

303. 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.

304. Рыбникова Л.С., Фельдман А.Л., Рыбников П.А. Инженерная защита гидросферы при отработке и ликвидации рудников // Горный информационно-

аналитический бюллетень. Mining informational and analytical bulletin. М.: Горная книга. 2012. №10. С. 301-306.

305. Рыженко Б.Н., Белова Т.П., Рябенко А.Е., Черкасова Е.В. Оценка кислотного дренажа на рудных месторождениях // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. 2015. № 5. С. 415-424.

306. Рюмин А.Н. Подтопление шахтных полей ликвидированных шахт / Вопросы гидрогеологии и гидрогеомеханики горного производства. Сборник научных трудов. СПб.: ВНИМИ. 1998. С. 8–20.

307. СП 2.1.5.1059–01 Гигиенические требования к охране подземных вод от загрязнения. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России. Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача РФ 25 июля 2001 г.

308. Савельев Д.И. Гидрогеологическое обеспечение мероприятий по предотвращению негативных последствий затопления угольных шахт: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург. 2015. 20 с.

309. Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.

310. Самообрушение руды при подземной добыче: Учебное пособие. М. : Издательство Московского государственного горного университета, 2006. 283 с.

311. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества (зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 31 октября 2001 г., регистрационный номер 3011). М.: Министерство здравоохранения Российской Федерации, 2002. 62 с.

312. СанПиН 2.1.4.1110-02. Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов питьевого назначения (зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации 24 апреля 2002 г., регистрационный номер 3399). М.: Министерство здравоохранения Российской Федерации, 2003. 18 с.

313. Сашурин А.Д. Сдвигение горных пород на рудниках черной металлургии. Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 1999. 268 с.

314. Свешников Г. Б. Электрохимические процессы на сульфидных месторождениях. Л.: ЛГУ, 1967. 160 с.

315. Семячков А.И. Металлы в окружающей среде горнометаллургических комплексов Урала. Екатеринбург : Изд-во УГГГА. 2001. 320 с.

316. Семячков А.И. Теория и практика ведения локального экологического мониторинга окружающей среды меднорудного горно-металлургического комплекса / А.И. Семячков [и др.]. Екатеринбург : Институт экономики УрО РАН. 2008. 225 с.

317. Семячков А.И. Фильтрационная неоднородность трещиноватых пород. М. : Горная книга, 2009. 151 с.

318. Семячков А.И., Балащенко В.В., Косолапов О.В. Эколого-экономическая оценка техногенно-минеральных образований. Екатеринбург : Институт экономики УрО РАН, 2009. 196 с.

319. Семячков А.И., Парфенова Л.П., Хархордин И.Л., Копенкина О.А. Численное моделирование миграции тяжелых металлов на участке подземного выщелачивания медных руд в связи с оценкой геоэкологической ситуации // В.И. Осипов (ответственный редактор). Сергеевские чтения. Моделирование при решении геоэкологических задач. Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, 2009. С. 412-417.
320. Семячков А.И., Тагильцев С.Н., Рудакова Л.В. Экономико-гидрогеологическая оценка чрезвычайных ситуаций в горно-промышленных районах: препринт. Екатеринбург : Институт экономики УрО РАН, 2009. 120 с.
321. Семячков А.И., Славиковская Ю.О., Дребенштедт К. Эколого-экономические аспекты деятельности предприятий горной промышленности. Екатеринбург : Институт экономики УрО РАН, 2013. 252 с.
322. Семячков А.И., Тагильцев С.Н., Рудакова Л.В., Балашенко В.В., Мельников А.В., Масленников В.В. Экономико-гидрогеологическая оценка чрезвычайных ситуаций в горнопромышленных районах. Екатеринбург : Институт экономики УрО РАН, 2009. 120 с.
323. Славиковская Ю.О., Рудакова Л.В., Рудаков Р.Б. Оценка последствий техногенного воздействия предприятий горнопромышленного комплекса на окружающую среду // Журнал экономической теории. 2016. № 4. С. 124-137.
324. Смирнов В.И. Геология полезных ископаемых. М. : Недра, 1982. 669 с.
325. Смирнов С.С. Зона окисления сульфидных месторождений. М. : Издательство Академии наук СССР, 1951. 324 с.
326. Смирнова О.К., Плюснин А.М., Хажеева З.И. Современное минералообразование в местах складирования отходов горнорудной промышленности // Отечественная геология. 2013. № 3. С. 104-111.
327. Соловьянов А.А. Прошлый (накопленный) экологический ущерб: проблемы и решения. 2. Опыт США // Экологический вестник России. 2015. № 4. С. 36-43.
328. Соловьянов А.А. Прошлый (накопленный) экологический ущерб: проблемы и решения. 3. Опыт стран Западной Европы // Экологический вестник России. 2015. № 5. С. 18-27.
329. Справка о состоянии и использовании минерально-сырьевой базы Свердловской области (по состоянию на 01.01.2009 г.). URL: vsegei.ru/ru/info/gisatlas/ufo/sverdlovskaya_obl/f_44_spravka.
330. Старицына И.А., Старицына Н.А. Затопленные рудники Среднего Урала: проблемы и перспективы // 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. 2017. С. 111-115.

331. Сунгатуллин Р.Х. Моделирование природных и техногенных систем промышленно-урбанизированных регионов: автореферат дис. ... докт. геол.-мин. наук. Екатеринбург : УГГУ, 2010. 38 с.
332. Сунгатуллин Р.Х. Влияние техногенеза на формирование современных кор выветривания и водоносных ареалов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2010. № 6. С. 494–502.
333. Табаксблат Л.С. Техногенное накопление металлов в ландшафтах рудных и угольных месторождений Урала // Изв. РАН. Сер. геогр. 1993. № 3.
334. Табаксблат Л.С. Микроэлементная «нагрузка» рудничных вод колчеданных месторождений // Известия вузов. Горный журнал. 1995. № 5. С. 130-140.
335. Табаксблат Л.С. Техногенные попутные воды месторождений Урала // Известия вузов. Горный журнал. 1997. № 11-12. С. 66-76.
336. Тагильцев С.Н. Основы гидрогеомеханического анализа фильтрационной структуры скальных массивов: автореферат дис. ... докт. технич. наук. Екатеринбург : УГГГА, 2001. 42 с.
337. Тагильцев С.Н., Лукьянов А.Е. Гидрогеологическое расслоение скального массива в условиях современного напряженного состояния // Литосфера. 2010. №2. С. 122-129.
338. Таразанов И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за 2007 год // Уголь. 2008. № 3. С. 39-46.
339. Таразанов И.Г. Итоги работы угольной промышленности России за январь-июнь 2010 г. // Уголь. 2010. № 9. С. 24-32.
340. Тарасенко И. А. Геохимические особенности состава и закономерности формирования подземных вод в природно-техногенных гидрогеологических структурах районов ликвидированных угольных шахт: автореферат дис. ... докт. геол.-мин. наук. Владивосток, 2014. 45 с.
341. Тимофеев К.Л. Сорбция тяжелых металлов из стоков горно-металлургических предприятий: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург : Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2013. 23 с.
342. Трансформация экологических функций литосферы в эпоху техногенеза / Под ред. В. Т. Трофимова. М. : Изд-во «Ноосфера», 2006 720 с.
343. Требования к мониторингу месторождений твердых полезных ископаемых / Б.В. Боровский, Г.Н. Кашковский, В.П. Новиков, Л.С. Язвин. Утверждены МПР России, 2000 г. Согласованы Госгортехнадзором РФ. М.: МПР России, 2000. 30 с.
344. Троянский С.В., Белицкий А.С., Чекин А.И. Общая и горнорудная гидрогеология. М. : Госгортехиздат, 1960. 391 с.
345. Трубецкой К.Н., Чантурия В.А., Каплунов Д.Р., Рыльникова М.Р. Комплексное освоение месторождений и глубокая переработка минерального сырья. Ин-т проблем комплексного освоения недр РАН. М.: Наука. 2010. 437 с.
346. Тюленев М.А., Мельхерс К., Кречман Ю., Герке-Малетт П., Кляйнеберг К. Элементы и аспекты постэксплуатационного периода горных

предприятий // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015. № 6 (112). С. 3-13.

347. Тютюнова Ф.И. Гидрогеохимия техногенеза. М. : Наука, 1987. 335 с.

348. Удачин В.Н. Экогеохимия горнопромышленного техногенеза Южного Урала: автореферат дис. ... докт. геол.-мин. наук. Томск : Томский политехнический университет, 2012. 44 с.

349. Федеральная целевая программа «Ликвидация накопленного экологического ущерба» на 2014–2025 годы. 2013. URL: <http://pandia.ru/text/77/498/10830.php>. (Дата обращения 15.11.2017).

350. Федорова Е.В. Охрана водных объектов от загрязнения диффузным стоком путем воздействия на аккумулирующую емкость водосбора (на примере южнотаежной подзоны Среднего Урала): автореферат дис. ... канд. геогр. наук. Екатеринбург, 1999. 23 с.

351. Фельдман А.Л., Вишняк А.И., Рыбникова Л.С. Закономерности изменения химического состава подземных вод в ограниченных карбонатных структурах Среднего Урала в результате эксплуатации водозаборов // Гидрогеология на рубеже веков. Новочеркасск : Набла, 2001.

352. Фельдман А.Л., Вишняк А.И., Рыбникова Л.С. Природно-техногенное загрязнение подземных вод при эксплуатации водозаборов и дренажей на Среднем Урале // Современные проблемы гидрогеологии и гидрогеомеханики. СПб., 2002. С. 161-169.

353. Фельдман А.Л., Вишняк А.И., Рыбникова Л.С. Закономерности изменения качества подземных вод в ограниченных карбонатных структурах Среднего Урала // Сергеевские чтения. Материалы годичной сессии Научного Совета РАН по Проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. М., ГЕОС, 2002. С. 416-420.

354. 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. Коносовского, Р.А. Филина. СПб: С-Петербург. гос.ун-т, 2010. С. 140-148.

355. 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.

356. 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. Материалы Международной научно-практической конференции (18-22 апреля 2011 г.). Московская область, г. Балашиха : ФГУ ВНИИПО МЧС России. Ч. 4. С.88-98.

357. 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. Mining informational and analytical bulletin. М.: Горная книга. 2012. №1. С. 36-41.

358. Филенко Р.А., Смирнова О.К., Юргенсон Г.А. Новые данные о гипергенных минералах Бом-Горхонского месторождения // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Рациональное природопользование. Современное минералообразование. Труды VI Всероссийского симпозиума с международным участием и XIII Всероссийских чтений памяти академика А.Е. Ферсмана. Ответственный редактор Г.А. Юргенсон. 2016. С. 303-313.

359. Фирсов В.Я., Мартынов В.Н. Медь Урала. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1995. 296 с.

360. Халезов Б.Д. Исследования и разработка технологии кучного выщелачивания медных и медноцинковых руд: автореферат дис. ... докт. техн. наук. Екатеринбург: Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН. 2009. 53 с.

361. Харитонов Н.А. Углекислые минеральные воды северо-востока Азии: происхождение и эволюция: автореферат дис. ... докт. геол.-минер. наук. Томск, 2013. 46 с.

362. Хохряков А. В., Фадеичев А. Ф., Цейтлин Е. М. Динамика изменения воздействия ведущих горных предприятий Урала на окружающую среду // Изв. вузов. Горный журнал. 2011. № 8. С. 44-52.

363. Харитонов Н.А., Вах Е.А., Челноков Г.А., Чудаев О.В., Александров И.А., Брагин И.В. Геохимия редкоземельных элементов в подземных водах Сихотэ-Алинской складчатой области (Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология. 2016. Т. 35. № 2. С. 68–83.

364. Чантурия В.А., Макаров В.Н., Макаров Д.В. Классификация горнопромышленных отходов по типу минеральных ассоциаций и характеру процессов окисления сульфидов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2000. № 2. С. 136- 143.

365. Чантурия В.А., Макаров В.Н., Макаров Д.В. Экологические и технологические проблемы переработки техногенного сульфидсодержащего сырья. Апатиты: КНЦ, 2005. 227 с.

366. Черепанский М.М. Региональные гидрогеологические прогнозы влияния отбора подземных вод на речной сток: автореферат дис. ... докт. геол.-мин. наук. Москва, 2007. 51 с.

367. Черный М.Л. Сорбционное извлечение редкоземельных и цветных металлов из шахтных вод и пульп: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург : «Уральский государственный технический университет - УПИ», 2005. 24 с.

368. Черняев А.М. Управление водными ресурсами Урала. Л. : Гидрометеиздат, 1987. 247 с.

369. Чижов Е.А. Охрана гидросферы от загрязненного стока из законсервированных горных выработок методами химической рекультивации (на

примере Карабашского рудника): автореферат дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург : РосНИИВХ, 2000. 20 с.

370. Чудненко К.В. Теория и программное обеспечение метода минимизации термодинамических потенциалов для решения геохимических задач: автореферат дисс. ... докт. геол.-мин. наук. Иркутск : ИрГТУ. 2007. 54 с.

371. Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения /отв. ред. В.Н. Шарапов. Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т геохимии им. А.П. Виноградова. Новосибирск : Академическое изд-во "Гео", 2010. 287 с.

372. Чупрова Л.В. Актуальность вопроса переработки гидротехногенных месторождений горных предприятий // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 11-5. С. 943-945.

373. Шадрунова И.В., Орехова Н.Н. Извлечение цветных металлов из гидроминеральных ресурсов: теория и практика. М. : Изд-во ИПКОН РАН, 2009. 215 с.

374. Шваров Ю.В. Алгоритмизация численного равновесного моделирования динамических геохимических процессов // Геохимия, 1999, № 6, с. 646-652.

375. Шваров Ю.В. HCh: новые возможности термодинамического моделирования геохимических систем, предоставляемое Windows // Геохимия. 2008. № 8. С. 890–897.

376. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. 2-е изд., исправл. и доп. М.: Недра, 1998. 366 с.

377. Шварцев С.Л. Фундаментальные механизмы взаимодействия в системе вода–горная порода и её внутренняя геологическая эволюция // Литосфера. 2008. № 6. С. 3–24

378. Шварцев С.Л. Прогрессивно самоорганизующиеся abiогенные диссипативные структуры в геологической истории Земли // Литосфера. 2007. № 1. С. 65–89.

379. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. М.: Изд-во МГУ, 1995. 368 с.

380. Шестаков В.М. Принципы геофизико-экологического мониторинга // Геоэкология. 1999. № 4. С. 362–365.

381. Шубин А.А. Задачи постмайнинга в период активизации техногенных процессов // Горный информационно-аналитический бюллетень. Mining informational and analytical bulletin. М. : Горная книга. 2006. №1. С. 115-117.

382. Щеголев Д.И. Рудничные воды. М. : Углетехиздат, 1948. 144 с.

383. Юдович Я.Э., Кетрис М. П. Геохимия марганца. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2014. 540 с.

384. Юмаев М.М. Налоговое стимулирование инвестиций в разработку техногенных месторождений минерального сырья // Финансы. 2014. № 8. С. 33-37.

385. Юргенсон Г.А. Новые данные о современном минералообразовании в геотехногенных ландшафтах исторических горнопромышленных районов. // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Рациональное

природопользование. Современное минералообразование. Труды VI Всероссийского симпозиума с международным участием и XIII Всероссийских чтений памяти академика А.Е. Ферсмана. Ответственный редактор Г.А. Юргенсон. 2016. С. 320-332.

386. Юргенсон Г.А., Русаль О.С., Филенко Р.А. Новые данные о современном минералообразовании в отходах разработки сульфидных месторождений Забайкалья // Минералогия техногенеза. 2017. № 18. С. 60-71.

387. Ягунова О.А. Исследование гидро-, газо-, геохимических процессов в техногенном массиве и выработанном пространстве ликвидируемых шахт Кузбасса: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2010. 20 с.

388. Язвин А.Л. Научное обоснование информационного обеспечения системы геологического изучения ресурсного потенциала пресных подземных вод: автореферат дисс. докт. геол.-мин. наук. М. : Рос. гос. геологоразведоч. ун-т им. С. Орджоникидзе (РГГРУ), 2015. 48 с.

389. Яковлев В.Л., Бурыкин С.И., Стахеев Н.Л. Основы стратегии освоения минеральных ресурсов Урала. Екатеринбург : ИГД УрО РАН, 1999. 279 с.

390. Яковлев Д.В., Лазаревич Т.И., Вашалева Н.Ю., Поляков А.Н., Лудзиш В.С. // Актуальные проблемы освоения площадей горных отводов после затопления шахт Кузбасса // Сборник научных трудов ВНИМИ. Посвящен 100-летию юбилею выдающегося горного инженера Б.Ф. Братченко. Санкт-Петербург, 2012. С. 177-185.

391. Янин Е.П. Экологическая геохимия горнопромышленных территорий. М. : МГП Геоинформмарк, 1993. 50 с.

392. Янин Е.П. Источники и особенности загрязнения речных систем в горнорудных районах // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. Вып. 1. Москва, 2005. С. 1-33.

393. Яхонтова Л. К., Груднев А. П. Зона гипергенеза рудных месторождений. М. : Изд-во МГУ, 1978. 229 с.

394. Яхонтова Л.К., Зверева В.П. Минералы зоны гипергенеза. Владивосток : Дальнаука, 2007. 164 с.

395. Abandoned mines and the water environment. Science Report. Environment Agency, Bristol. URL www.environment-agency.gov.uk. 2008. 40 p.

396. Adams R. A review of mine water rebound predictions from the VSS-NET model // Mine Water and the Environment. 2014. № 33(4). P. 384-388.

397. Adams R., Younger P.L. A strategy for modelling ground water rebound in abandoned deep mine systems. Ground Water. 2001. №39 (2). P. 249-261.

398. Adams R., Younger P.L. A physically-based model of rebound in South Crofty tin mine, Cornwall. In: Robins N.S., Younger P.L. (eds). Mine Water Hydrogeology and Geochemistry, Special Publ 198, Geological Soc, London, UK, 2002. P 89-97.

399. Allison J.D., Brown D.S., Novo-Gradac, K.J. MINTEQA2/PRODEFA2, a geochemical assessment model for environmental systems: version 3.0 user's manual: U.S. Environmental Protection Agency Report EPA/600/3-91/021, 1991.106 p.

400. Alpers C.N., Nordstrom D.K. Geochemical evolution of extremely acid mine waters at Iron Mountain, California - Are there any lower limits to pH? Proceedings, 2nd International Conference on the Abatement of Acidic Drainage: MEND (Mine Environment Neutral Drainage), Ottawa, Canada. 1991. V. 2. P. 321–342.
401. Alpers C.N., Nordstrom D.K., Burchard J.M., Compilation and Interpretation of Water Quality and Discharge Data for Acid Mine Waters at Iron Mountain, Shasta County, California, 1940-91. US Geol. Surv. Water-Resour. Invest. Rep. 1992. 91-4160.
402. Amos R.T., Blowes D.W., Bailey B.L., Sego D.C., Smith L., Ritchie A.I.M. Waste-rock hydrogeology and geochemistry. Applied Geochemistry. 2015. № 57. P. 140–156.
403. Appelo C.A.J., Postma D. Geochemistry, groundwater and pollution. 2-nd edition. Rotterdam, Balkema. 2005. 635 p.
404. Ayora C, Macías F. Torres E., Nieto J.M. Rare Earth Elements in Acid Mine Drainage. XXXV Reunión de la Sociedad Española de Mineralogía Huelva 30 de junio al 3 de julio de 2015. P. S3-1- S3-22.
405. Banks D., Younger P.L., Arnesen R.T., Iversen E.R., Banks S.B. Mine-water chemistry: the good, the bad and the ugly. 1997. № 32. P. 157–174.
406. Blowes D.W., Ptacek C.J., Jambor J.L., Weisener C.G. The Geochemistry of Acid Mine Drainage. Treatise on Geochemistry. Volume 9: Environmental Geochemistry. Oxford, Elsevier, 2003. P. 149–204.
407. Chiang W.H., Kinzelbach W. 3D-Groundwater Modeling with PMWIN. First edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2001. 346 p.
408. Coulton R., Bullen C., Williams K., Dey, M., Jarvis A. Active treatment of high salinity mine water. – In: Jarvis A.P. Dudgeon B.A. & Younger P.L. Mine water 2004 – Proceedings International Mine Water Association Symposium. Newcastle upon Tyne (University of Newcastle). 2004. P. 119–124.
409. Didier C., Leloup J. The french experience of post mining management. First Seminar on Mine Closure. 13-15 September, 2006. Perth, Australia.
410. Didier C. Mining risk prevention plan: the french prevention procedure to manage post-mining hazards. Second Seminar on Mine Closure. 16-19 October, 2007. Santiago, Chile.
411. EPA Administrator Scott Pruitt Suspends Withdrawal of Proposed Determination in Bristol Bay Watershed, Will Solicit Additional Comments. 01/26/2018. URL: <https://www.epa.gov/newsreleases/epa-administrator-scott-pruitt-suspends-withdrawal-proposed-determination-bristol-bay>.
412. Environment Agency. Abandoned mines and the water environment. Environment Agency Science Report SC030136/SR41. Bristol, UK. 2008.
413. INAP 2009. The GARDGuide. The Global Acid Rock Drainage Guide. The International Network for Acid Prevention (INAP). [Электронный ресурс]. <http://www.gardguide.com/>. Дата обращения 05.10.2015 г.

414. International Institute for Environment and Development: Mining for the Future – Appendix C: Abandoned Mines Working Paper. Mining, Minerals and Sustainable Development. London, 2002.
415. Iron Mountain Mine. Success through planning, partnership, and perseverance. Abandoned mine lands case study. US EPA. March 07, 2006. 17 p.
416. Garrels, R.M., Thompson, M.E. Oxidation of pyrite by iron sulfate solutions. *Am. J. Sci.* 1960. 258A. P. 57–67.
417. Glynn, P.D., Plummer, L.N. Geochemistry and the understanding of groundwater systems. *Hydrogeol. J.* 2005. № 13. P. 263–287.
418. Gromet L.P., Dymek R.F., Haskin L.A., Korotev R.L. The North American shale composite: its compilation, major and trace element characteristics // *Geochim et cosmochim acta*. 1984. Vol. 48. N 12. P. 2469-2482.
419. Groundwater Geochemistry: A Practical Guide to Modeling of Natural and Contaminated Aquatic Systems. Merkel B.J., Planer-Friedrich B., Nordstrom D.K. (Ed.) Springer, 2005. 200 p.
420. Jambor J.L. Mine-Waste Mineralogy and Mineralogical Perspectives of Acid-Base Accounting. In: J.L. Jambor, D.W. Blowes and A.I.M. Ritchie (Eds.), *Environmental Aspects of Mine Wastes*, Short Course Series, Vol. 31, Mineralogical Association of Canada, 2003. P. 117-146.
421. Jarvis A.P., Mayes W.M. Prioritisation of abandoned non-coal mine impacts on the environment. XII. Future management of abandoned non-coal mine water discharges. Report for Defra and Environment Agency SC030136/R14. 2012. 61 p.
422. Jennings S.R., Neuman D.R., Blicher P.S. Acid Mine Drainage and Effects on Fish Health and Ecology: A Review. Reclamation Research Group Publication, Bozeman, MT. 2008. 29 p.
423. Jones A. Rogerson M., Greenway G., Potter H.A.B., Mayes W.M. Mine water geochemistry and metal flux in a major historic Pb-Zn-F orefield, the Yorkshire Pennines, UK. *Environmental Science and Pollution Research*. 2013. DOI: 10.1007/s11356-013-1513-4.
424. Ficklin W.H., Plumlee G.S., Smith K.S., and McHugh, J.B. Geochemical classification of mine drainages and natural drainages in mineralized areas: Proceedings, 7th Internal Water-Rock Interaction Conference, Park City, Utah, 1992. P. 381–384.
425. Fifth Five-Year Review for Iron Mountain Mine Superfund Site Redding, California. US EPA. San Francisco. 2013. 252 p.
426. Frau F. The formation–dissolution–precipitation cycle of melanterite at the abandoned pyrite mine of Genna Luas in Sardinia, Italy: environmental implications. *Mineralogical Magazine*. 2000. № 64. P. 995-1006.
427. Hallberg K. B., Johnson D. B. Mine Water Microbiology. *Mine Water Env.*, 2005. № 24 (1). P. 28–32.
428. Hammarstrom J.M., Seal R.R. II, Meier A.L. and Kornfeld J.M. Secondary sulfate minerals associated with acid drainage in the eastern US: recycling of metals and acidity in surficial environments// *Chemical Geology*. 2005. № 215. P. 407– 431.

429. Harbaugh A.W., McDonald M.G. Programmer's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model . Open-File Report 96-486. U.S. Geological Survey. 1996
430. LeBlanc M., Morales J.A., Borrego J., Elbaz-Poulichet F. 4500-year old mining pollution in Southwestern Spain: longterm implications for modern mining pollution. *Econ Geol.* 2000. № 95. P. 655–662.
431. Liquid Assets 2000: Americans Pay for Dirty Water. URL: <https://web.archive.org/web/20080515191140/http://www.epa.gov/water/liquidassets/dirtywater.html>.
432. Lottermoser B.G. *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Springer: New York, 2012. 400 p.
433. Maest A.S., Kuipers J.R., Travers C.L., Atkins D.A. *Predicting Water Quality at Hardrock Mines: Methods and Models, Uncertainties, and State-of-the-Art*. Boulder (Colorado): Kuipers & Associates and Buka Environmental, 2005. 90 p.
434. Mayes W.M., Johnston D., Potter H.A.B., Jarvis, A.P. A national strategy for identification, prioritisation and management of pollution from abandoned non-coal mine sites in England and Wales. I. Methodology development and initial results. *Science of the Total Environment*. 2009. № 407. P. 5435-5447.
435. McDonald M.G., Harbaugh A.W. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, *Techniques of Water-Resources Investigations*, Book 6, Chap. A1. 1988 586 p.
436. McKibben M.A. *Kinetics of Aqueous Pyrite Oxidation by Ferric Iron, Oxygen, and Hydrogen Peroxide from pH 1-4 and 20-40 C*. Ph. D. Thesis, Pennsylvania State Univ. 1984.
437. McKibben, M.A., Barnes, H.L. Oxidation of pyrite in low temperature acidic solutions: rate laws and surface textures. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1986. №50. P. 1509–1520.
438. Mentz J.W, Warg J.B. Up-dip versus down-dip mining – an evaluation. *Environmental protection technology series*, EPA-670/2-75-047:74. Cincinnati. 1975.
439. Merkel B.J., Planer-Friedrich B., Nordstrom D.K. (Ed.) *Groundwater Geochemistry: A Practical Guide to Modeling of Natural and Contaminated Aquatic Systems*. Springer, 2005. 200 p.
440. Mills C. *An Introduction to Acid Rock Drainage*, 2012. URL: <http://technology.infomine.com/enviromine/ard/Introduction/ARD.HTM>.
441. *Mine closure and post-mining management*. International state-the-art 2008. International Commission on Mine Closure. International Society for Rock Mechanics. ISRM, 2008. 164 p.
442. *Mine Water Hydrogeology and Geochemistry*. Edited by Younger P.L., Robins N.S. Geological Society, London, Special Publications № 198. Published by The Geological Society, 2002. 405 p.
443. Moncur M.C., Ptacek C.J., Blowes D.W., Jambo, J.L. Release, transport and attenuation of metals from an old tailings impoundment. *Appl. Geochem.* 2005. № 20. P. 639-659.

444. Moncur M. C. Hydrogeochemical, Mineralogical and Microbial Processes Occurring in Old Sulfide-Rich Tailings: A thesis ... for the degree of Doctor of Philosophy in Earth Sciences. Waterloo, Ontario, Canada, 2015. 276 p.
445. Nordstrom D.K. 5.02 – Modeling Low-Temperature Geochemical Processes. Treatise on Geochemistry. 2007. Volume 5. P. 1–38.
446. Nordstrom D.K. Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters // *Applied Geochemistry*. 2011. № 26. P. 1777–1791.
447. Nordstrom D.K. Models, validation, and applied geochemistry: Issues in science, communication, and philosophy. *Applied Geochemistry*. 2012 № 27. P. 1899-1919.
448. Nordstrom D.K. Baseline and premining geochemical characterization of mined sites. *Applied Geochemistry*. 2015. №57. P. 17–34.
449. Nordstrom D.K., Alpers C.N. Negative pH, efflorescent mineralogy, and consequences for environmental restoration at the Iron Mountain Superfund site, California. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 96. 1999. P. 3455–3462.
450. Nordstrom D.K., Alpers C.N., Ptacek C.J. , Blowes D.W. Negative pH and Extremely Acidic Mine Waters from Iron Mountain, California. *Environ. Sci. Technol.* 2000. № 34, P. 254-258.
451. Nordstrom D.K., Bowell R.J., Campbell K.M., Alpers C.N. Challenges in Recovering Resources from Acid Mine Drainage // *Mine Water and Circular Economy*. IMWA 2017. Wolkersdorfer C., Sartz L, Sillanpää M., Häkkinen A. (Editors). Lappeenranta, Finland. 2017. P. 595-602.
452. Nodwell M., Kratochvil D. Sulphide precipitation and ion exchange technologies to treat acid mine drainage. ICARD 2012. 9 International Conference on Acid Rock Drainage, Ottawa, ON. 2012.
453. Olías M., Cánovas C.R., Nieto J.M., Sarmiento A.M. Evaluation of the dissolved contaminant load transported by the Tinto and Odiel rivers Basin (South West Spain). *Appl. Geochem.* 2006. № 21. P. 1733-1749.
454. Olías M., Nieto J. M. Background Conditions and Mining Pollution throughout History in the Río Tinto (SW Spain). *Environments*. 2015. № 2(3). P. 295-316.
455. Olson, G.J. Rate of bioleaching by *Thiobacillus ferrooxidans*: results of an interlaboratory comparison. *Appl. Environ. Microbiol.* 1991. № 57. P. 642–644.
456. Parkhurst D.L., Appelo C.A.J. Description of input and examples for PHREEQC version 3. A computer program for speciation, batchreaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43. 2013. 497 p. Available at: <http://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/>
457. Parkhurst and Plummer,; Parkhurst, D.L., Plummer, L.N. Geochemical models. In: Alley, W.M. (Ed.), *Regional Ground-Water Quality*. Van Nostrand Reinhold, New York. 1993. P. 199–225.
458. Parque Minero de Riotinto. URL. <http://parquemineroderiotinto.es/?lang=en>.

459. Pearce S., Barteaux M. Gas Flux Rates and the Linkage with Predicting AMD Loads in Waste Rock Dumps, and Designing Practical Engineering Solutions – Field Based Case Studies in Three Distinct Climates // *Mine Water and Circular Economy*. IMWA 2017. Wolkersdorfer C, Sartz L, Sillanpää M, Häkkinen A (Editors). Lappeenranta, Finland. 2017. P. 595-602.
460. Piper D.Z., Bau M. Normalized Rare Earth Elements in Water, Sediments, and Wine: Identifying Sources and Environmental Redox Conditions. *American Journal of Analytical Chemistry*. 2013. № 4. P. 69-83.
461. Plumlee G.S., Smith K.S., Ficklin W.H., Briggs, P.H. Geological and geochemical controls on the composition of mine drainages and natural drainages in mineralized areas: Proceedings, 7th Internatl. Water-Rock Interaction Conference, Park City, Utah, July 1992, 1992. P. 419-422.
462. Plumlee G.S., Smith K.S., Montour M.R., Ficklin W.H., Mosier E.L. Geologic controls on the composition of natural waters and mine waters draining diverse mineral-deposit types // *The environmental geochemistry of mineral deposits, Reviews in Economic Geology*. 1999. № 6. P. 373-432.
463. Plummer L.N., Parkhurst, D.L., Thorstenson, D.C. Development of reaction models for ground-water systems. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1983. № 47. P. 665–686.
464. Robie R.A., Hemmingway B. S. *Thermodynamic Properties of Minerals and Related Substances at 298.15 K and 1 Bar. (105 Pascals) Pressure and at Higher Temperatures*. U.S. Geological Survey Bulletin. 1995. 2131.
465. Rumynin V.G. *Subsurface Solute Transport Models and Case Histories With Applications to Radionuclide Migration*. 1st Edition. 2011, XXVII, 860 p.
466. Rushton K.R. *Groundwater hydrology. Conceptual and computational models*. Chichester (Wiley & Sons). 2003. 416 p.
467. Rybnikov P.A., Rybnikova L.S. Formation of waste-rock drainage water on massive sulfide deposits of the Urals (Russia). 15th water-rock interaction international symposium, WRI-15. *Procedia Earth and Planetary Science* 17. 2017. P. 857 – 860.
468. 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.
469. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Hydrogeochemistry of the abandoned sulfide mines of the Middle Urals (Russia). 15th water-rock interaction international symposium, WRI-15. *Procedia Earth and Planetary Science* 17. 2017. P. 849–852.
470. 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.
471. Sarmientoa A.M., Nietoa J.M., Olías M., Cánovas C.R. Hydrochemical characteristics and seasonal influence on the pollution by acid mine drainage in the

Odiel river Basin (SW Spain) // *Applied Geochemistry*. 2009. Volume 24. Issue 4. P. 697-714.

472. Sarmiento A.M., Nieto J.M., Olías M., Cánovas C.R. Hydrochemical characteristics and seasonal influence on the pollution by acid mine drainage in the Odiel river Basin (SW Spain) // *Applied Geochemistry*. 2009. № 24 (4). P. 697-714.

473. Soltani N., Moore F., Keshavarzi B., Sharifi R. Geochemistry of Trace Metals and Rare Earth Elements in Stream Water, Stream Sediments and Acid Mine Drainage from Darrehzar Copper Mine, Kerman, Iran // *Water Quality, Exposure and Health*. 2014. V. 6. № 3. P. 97–114.

474. Stumm W., Morgan J.J. *Aquatic Chemistry*. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, 1981. 780 p.

475. Sulfate Minerals - Crystallography, Geochemistry, and Environmental Significance. / Alpers C.N., Jambor J.L., Nordstrom D.K. (Eds.). *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2000. Vol. 40. 608 p.

476. Technical Evaluation of the Gold King Mine Incident San Juan County, Colorado. Peer reviewed by: U.S. Geological Survey, U.S. Army Corps of Engineers U.S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation. Technical Service Center. Denver, Colorado. October 2015. 132 p.

477. Wels C., Mackie D., Scibek J. Guidelines for Groundwater Modelling to Assess Impacts of Proposed Natural Resource Development Activities. REPORT NO. 194001. Robertson GeoConsultants Inc. & SRK Consulting (Canada) Inc., 2012. 385 p.

478. Wildland waters. Forest Service. United States Department of Agriculture. Issue 4. Winter 2005. 20 p.

479. Williamson M.A., Rimstidt J.D. The kinetics and electrochemical rate-determining step of aqueous pyrite oxidation. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1994. № 58. P. 5443–5454.

480. Wobus C., Maest A., Prucha B., Albert D. Potential Hydrologic and Water Quality Alteration from Large Scale Mining of the Pebble Deposit in Bristol Bay, Alaska: Results from an Integrated Hydrologic Model of a Preliminary Mine Design. Review Draft. Prepared for The Nature Conservancy, Anchorage, AK. 2012. 86 p.

481. Wolkersdorfer C. Water management at abandoned flooded underground mines. Fundamentals. Tracer tests. Modelling. Water treatment. Springer, 2008. 465 p.

482. Wolkersdorfer C., Bowell R. Contemporary Reviews of Mine Water Studies in Europe, part 1. Mine Water and the Environment. 2004. Volume 23. Issue 4. P. 162–182.

483. Wolkersdorfer C., Bowell R. Contemporary reviews of mine water studies in Europe, part 2 // *Mine Water and the Environment*. 2005. Vol. 24, No. 1. P. 2–37.

484. Younger P.L. Possible Environmental Impact of the Closure of two Collieries in County Durham. London. *Water Environ. Management*. 1993. № 7 (5). P. 521–531.

485. Younger P.L. The longevity of mine water pollution: a basis for decision-making. *Science of the Total Environment*. 1997. №194/195. P. 457-466.

486. Younger, P.L. A simple, low-cost approach to predicting the hydrogeological consequences of coalfield closure as a basis for best practice in long-term management. *International Journal of Coal Geology*. 2016. № 164, P. 25-34.
487. Younger P.L., Adams R. *Predicting Mine Water Rebound*. Bristol (Environment Agency), 1999. 109 p.
488. Younger P.L., Banwart S.A. and Hedi, R.S. *Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation*. Kluwer Academic, The Netherlands, 2002. 442 p.
489. Younger P.L., Jenkins D.A., Rees B., Robinson J., Jarvis A.P., Ralph J., Johnston D.N., Coulton R.H. *Mine waters in Wales: pollution, risk management and remediation. Urban geology in Wales. National Museums and Galleries of Wales Geological Series*. 2004. №23. P. 138-154.
490. Zhang J., Nozaki Y. Rare earth elements and yttrium in seawater: ICP-MS determinations in the East Caroline, Coral Sea, and South Fiji basins of the western South Pacific Ocean. *Ibid.* 1996. № 60 (23). P. 4631-4634.
491. Zheng C., Wang P.P. *MT3DMS: A Modular Three-Dimensional MultiSpecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide*, Report No.: SERDP-99-1, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. 1999.

Фондовая

492. Босых А.Ф. Отчет о выполненных работах по мониторингу геологической среды СУБРа за 2003 год (По условиям недропользования за счет собственных средств ОАО "СУБР"). Екатеринбург : Уралгеолфонд, 2000.
493. Вишняк А.И. Мониторинг геологической среды на Троицко-Байновском месторождении огнеупорных глин (Полдневская залежь) за 1997-1999 гг. Екатеринбург : Уралгеолфонд, 2000.
494. Вишняк А.И. Отчет по мониторингу геологической среды на Троицко-Байновском месторождении огнеупорных глин (Полдневская залежь) за 2000-2001 гг. Екатеринбург : Уралгеолфонд, 2002.
495. Вишняк А.И., Кадук О.М. Мониторинг геологической среды Высокогорского железорудного месторождения в 2001-2003 гг. Екатеринбург : Уралгеолфонд, 2004.
496. Вишняк А.И. Отчет по мониторингу геологической среды Левихинской группы месторождений (за 2004-2005 гг.). Екатеринбург : Уралгеолфонд, 2005(а).
497. Вишняк А.И. Отчет по мониторингу геологической среды Буланашского месторождения каменного угля (за 2004-2005 гг.). Екатеринбург : Уралгеолфонд, 2005(б).
498. Вишняк А.И., Силина О.А. Отчет по мониторингу геологической среды Дегтярского медноколчеданного месторождения (за 2003-2004 гг.). Екатеринбург : Уралгеолфонд, 2005. 217 с.

499. Владимиров Ю.И. Отчет по оценке изменения речного стока в горноскладчатой части Урала в условиях интенсивного водоотбора подземных вод. Свердловск : Уралгеолфонд, 1983. 293 с.

500. Вострокнутов А.Г., Поисковые работы на промышленные ценные компоненты в дренажных водах на месторождениях Кировградского рудного района за 1986-1988 гг. Свердловск : Уралгеолфонд, 1988.

501. Вострокнутов А.Г. Предварительная разведка подземных вод, каптированных горными выработками Дегтярского рудника, для технического водоснабжения предприятий в г. Дегтярске Свердловской области. Отчет Уральской гидрогеологической и инженерно-геологической партии за 1987-1989 гг. в 2-х книгах. Свердловск : Уралгеолфонд. 1989.

502. Вострокнутов А.Г. Мониторинг подземных вод Полдневского месторождения. Екатеринбург: Уралгеолфонд, 2006. 160 с.

503. Вострокнутов А.Г., Соколокин С.Б. Мониторинг геологической среды на Сафьяновском медноколчеданном месторождении за 2011-2012 гг. Екатеринбург: Уралгеолфонд, 2012.

504. Глазырина Н.С. Составление геолого-экологической карты масштаба 1:500 000 (Свердловская и Курганская области). Екатеринбург : Уралгеолфонд, 1998.

505. Деркач Н.С. Гидрогеологические условия Левихинской группы медноколчеданных месторождений (отчет по работам 1953-57гг). Свердловск : Уралгеолфонд, 1957. 74с.

506. Елохина С.Н. Обобщение опыта ликвидации (консервации) горных выработок, их влияние на подтопление застроенных территорий. Екатеринбург : Уралгеолфонд, 2001. 58 с.

507. Елохина С.Н. Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Свердловской области за 2009 год. Выпуск 13. Екатеринбург, : Уралгеолфонд, 2010. 300 с.

508. Елохина С.Н. Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Свердловской области за 2011 год. Выпуск 15. Екатеринбург : Уралгеолфонд, 2012.

509. Елохина С.Н. Техногенез затопленных рудников Урала: дис. . докт. геол.-мин. наук. Екатеринбург, 2014. 352 с.

510. Иванова Л.С. Государственный мониторинг геологической среды. Информационный бюллетень о состоянии геологической среды на территории Свердловской области за 2000 год. Выпуск 5. Екатеринбург : Уралгеолфонд, 2001. 175 с.

511. Иванова Л.С. Государственный мониторинг геологической среды. Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Свердловской области за 2006 г. Вып. 6. Екатеринбург : Уралгеолфонд, 2007. 197 с.

512. Новиков В.П., Герасименко Б.Н. Оценка обеспеченности эксплуатационными запасами и ресурсами подземных вод населения Свердловской области. Книга 1. Екатеринбург-Москва : ГИДЭК. Екатеринбург: Уралгеолфонд, 2000. 147 с.

513. Носаль А.П. Геоэкологические проблемы управления качеством вод и их решение на основе системы регионального нормирования воздействия на водные объекты: дис. ... докт. геогр. наук. Екатеринбург, 2004. 204 с.

514. Парфенова Л.П. Мониторинг геологической среды Волковского месторождения (Лаврово-Николаевский участок). Екатеринбург : Уралгеофонд, 2002.

515. Парфенова Л.П. Мониторинг подземных и поверхностных вод на участке подземного выщелачивания на Гумешевском месторождении меди за 2008 год. Екатеринбург : Уралгеолфонд, 2009.

516. Палкин С.В., Рыбникова Л.С. Охрана подземных вод на территории Свердловской области (к проекту областной программы "Охрана окружающей среды Свердловской области"). Екатеринбург : Комитет природных ресурсов по Свердловской области, 1999. 23 с.

517. Петров С.М. Оценка эксплуатационных запасов действующих водозаборов г. Реж (отчёт о результатах работ АОЗТ ГИДЭК на Липовском месторождении ПВ с оценкой запасов по состоянию на 01.01.02 г. в 1 книге). Екатеринбург: Уралгеолфонд, 2002. 144 с.

518. Попов А.Н. Прогноз и регулирование качества поверхностных вод (на примере региона Урала): дис. ... докт. техн. наук. Екатеринбург, 1995. 262 с.

519. Попов А.Н. Отчет о научно-исследовательской работе к муниципальному контракту № 14/16 от 25 апреля 2016 г. на оказание услуги «Проведение работ по комплексному исследованию источников загрязнения Северского водохранилища и оценке вреда, нанесенного природной среде в результате хозяйственной деятельности существующих и ликвидированных промышленных предприятий на территории Полевского городского округа». Книга 1. Екатеринбург : ФГБУ РосНИИВХ, 2017. 357 с.

520. Рыбаков Ю.С. Охрана и предотвращение загрязнения водных объектов от стока с техногенных образований: дис. ... докт. техн. наук. Екатеринбург, 1998. 302 с.

521. Рыбникова Л.С., Иванова Л.С. Информационный отчет о ведении государственного мониторинга геологической среды на территории Свердловской области за 2000-2001 гг. Екатеринбург: Уралгеолфонд, 2001.

522. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Проведение исследований и разработка технологического регламента «Осушение месторождения» для проекта «Строительство Сарбайского рудника. Вскрытие и отработка подкарьерных запасов Сарбайского месторождения железных руд». Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012. 74 с.

523. Сергеева А.С. Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Свердловской области за 2014 год. Екатеринбург: Уралгеолфонд, 2015. 228 с.

524. Соболев А.Е. Кинетика растворения пирита и сфалерита в присутствии окислителей: дис. ... канд. хим. наук. Тверь, 2004. 280 с.

525. Соколкин С.Б. Мониторинг геологической среды на Южном разрезе Богословского бурогольного месторождения. Отчет о результатах работ ФГУП "Уралгидроэкспедиция" за 2002-2004 гг. Екатеринбург: Уралгелфонд, 2005.

526. Соколкин С.Б. Мониторинг геологической среды на Южном разрезе Богословского бурогольного месторождения. Отчет о результатах работ ФГУП "Уралгидроэкспедиция" за 2005 год. Екатеринбург: Уралгеолфонд, 2006.

527. Соколкин С.Б. Оценка гидрогеологической изученности и подготовка геологического обоснования работ по созданию государственной гидрогеологической карты масштаба 1:1 000 000 листа О-41 (Екатеринбург). . Екатеринбург: Уралгеолфонд, 2012.

528. Соколкин С.Б. Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Свердловской области за 2015 год. Выпуск 19. Государственное задание Федерального агентства по недропользованию от 11.03.2016 г. № 049-00028-16. Екатеринбург : Уралгеолфонд, 2016. 199 с.

529. Табаксбалт Л.С., Рапопорт А.М. Ревизионно-поисковые гидрогеохимические работы с целью региональной оценки качества и ресурсов подземных вод Урала как комплексного гидроминерального сырья на литий, цезий, рубидий, бром, йод, бор, стронций и другие промышленно-ценные компоненты. Отчет о научно-исследовательской работе Свердловского горного института за 1982-1985 гг. Свердловск : Уралгеолфонд, 1985. 426 с.

530. Четверкин И.А. Мониторинг геологической среды на отработанном Пышминско-Ключевском медно-кобальтовом месторождении. Екатеринбург : Уралгеолфонд, 2003.

531. Четверкин И.А., Вишняк А.И. Мониторинг геологической среды Березовского золоторудного месторождения в 2002-2004 гг. Екатеринбург : Уралгеолфонд, 2005.

532. Фельдман А.Л., Рыбников П.А., Филюшкина Ю.Г. Оценка воздействия на подземную и поверхностную гидросферу шламонакопителей обогатительной фабрики Левихинского месторождения медно-колчеданных руд. Екатеринбург : ОАО «Унипромедь», 2003.

533. Фельдман А.Л., Рыбников П.А., Рыбникова Л.С. Оценка воздействия затопления Левихинского рудника на подземную и поверхностную гидросферу, прилегающую территорию. Екатеринбург : ОАО «Унипромедь», 2004.

534. Фельдман А.Л., Рыбников П.А., Рыбникова Л.С. Мониторинг геологической среды в районе ликвидируемого Черемшанского никелевого карьера и отрабатываемого карьера флюсовых мраморов. Екатеринбург, Верхний Уфалей : ОАО «Уфалейникель», 2007. 167 с.

535. Фельдман А.Л., Рыбников П.А., Рыбникова Л.С. Гидрогеологическое обоснование осушения затопленного Левихинского рудника. Екатеринбург : ОАО «Унипромедь», 2008. 105 с.

536. Фельдман А.Л., Рыбников П.А., Рыбникова Л.С. Программа мониторинга состояния окружающей среды (атмосфера, недра, водные объекты, почва, биоресурсы) Левихинского рудника на территории Кировградского ГО. Екатеринбург : ОАО «Унипромедь», 2008. 99 с.

537. Фельдман А.Л., Рыбников П.А., Рыбникова Л.С. Гидрогеологическое обоснование водоохраных мероприятий в области гидродинамического влияния Узельгинского рудника. Учалы, ОАО Учалинский ГОК, 2000. Ч. 1. 141 с. Ч. 2. 133 с.

538. Филюшкин Г.А. Гидротехническая система сбора и водоотведения на действующую станцию нейтрализации загрязненных вод с территории санитарно-промышленной зоны Левихинского рудника. Реконструкция станции нейтрализации шахтных вод остановленного Левихинского рудника. Проект. Общая пояснительная записка Кировград : УНИПРОМЕДЬ, 2004. 184 с.

539. Цветов Н.В. Отчет о результатах работ по переоценке запасов подземных вод Северо-Мазулинского участка Каменск-Уральского месторождения, эксплуатируемого для водоснабжения г. Каменск-Уральский. Екатеринбург : Уралгеолфонд, 2010.

540. Халитов Т.М. Никифорова Н.Ю. Мониторинг геологической среды СУБРа за 2002 год. Екатеринбург : Уралгеолфонд, 2003. 112 с.