

## ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 622.7.017

### ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ГОРНОМ ДЕЛЕ НА ПОСТЭКСПЛУАТАЦИОННОМ ЭТАПЕ

© 2018 г. Л. С. Рыбникова<sup>1,\*</sup>, П. А. Рыбников<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup>Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук,  
ул. Мамина-Сибиряка, 58, г. Екатеринбург, 620075 Россия

\*E-mail: luserib@mail.ru

\*\*E-mail: ribnikoff@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.01.2018 г.

Гидрогеологические исследования в горном деле традиционно направлены на решение задач безопасной отработки месторождений полезных ископаемых. Завершение отработки большого числа месторождений в последние годы (как в мире, так и в России) привело к необходимости решения проблем управления территориями, нарушенными многолетними горными работами, на постэксплуатационном этапе. Управление территориями отработанных месторождений, особенно старых и бесхозных рудников, потребовало разработки специальных законов, на их реабилитацию тратятся значительные средства. Возможность эксплуатации новых месторождений, особенно крупных, определяется гарантией обеспечения экологической безопасности не только на период освоения месторождения, но после его завершения. 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 формируется самый крупный поток сточных вод на земле. Закрытые (затопленные) рудники являются аномальными в гидрогеодинамическом и гидрогеохимическом аспекте территориями. Особенности постэксплуатационного этапа – 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). Гидрогеологический прогноз на постэксплуатационном этапе требует совместного учета геомеханических, гидродинамических и гидрохимических процессов.

**Ключевые слова:** затопленные рудники, техногенная трещиноватость, подтопление, кислые шахтные воды, вторичные минералы, зона аэрации, сульфиды, физико-химическое моделирование

DOI: 10.1134/S0869780318040105

#### ВВЕДЕНИЕ

Разработкой научно-методических основ горнопромышленной гидрогеологии занимались Д.И. Шеголев (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, В.Г. Румынин (1980, 1988, 1989, 1999) и др.

Гидрогеологические исследования в горном деле традиционно направлены на решение проблем,

которые возникают в процессе разведки месторождений полезных ископаемых и оценки экономической целесообразности их отработки; при проектировании и собственно эксплуатации месторождения [12]. Основные задачи горнопромышленной гидрогеологии – оценка влияния подземных вод на условия разработки месторождений; гидрогеологическое обоснование мер защиты горных выработок; прогнозные оценки водопритоков; охрана подземных вод в горнодобывающих районах.

Продолжительность работ, связанных с разведкой месторождения, проектированием его отработки и собственно эксплуатацией, обычно составляет несколько десятков лет. Постэксплуа-

тационный 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 нескольких 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. На этом этапе особенно значимой становится необходимость использования концепции контролируемого загрязнения, разработанной В.А. Мироненко [13], для обеспечения возможности управления территорией и предотвращения негативных последствий отработки месторождений полезных ископаемых. Повышается роль мониторинга как инструмента получения достаточной и надежной информации для создания адекватных моделей гидрогеоэкологических процессов [13, 25].

Приоритеты горного дела за последние десятилетия значительно изменились. Если раньше основным критерием целесообразности разработки месторождения была прибыль, то начиная с 1980-х годов, первоочередными становятся вопросы безопасности, значимую роль начинают играть проблемы охраны окружающей среды. В последние годы появились примеры того, что возможность отработки месторождений, особенно крупных, определяется именно гарантией обеспечения экологической безопасности. Например, по результатам экологического аудита проекта строительства Томинского ГОКа, выполненного по настоянию жителей Челябинской области, Русская медная компания пересмотрела технологию переработки руды Томинского медно-порфирикового 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 обогачивания и отправлять закладочный материал по пульпопроводу длиной в 14 км для рекультивации оработанного 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 руб. (общие инвестиции в проект строительства Томинского ГОКа оцениваются в 65.9 млрд руб.)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Медь на Томинском ГОКе будут добывать без серной кислоты. Газета.Ру. Опубликовано 20.07.2017. [Электронный ресурс]. <https://www.gazeta.ru/business/2017/07/18/10793492.shtml#page6> (дата обращения 10.10.2017).

К настоящему времени многие страны, ранее в течение столетий интенсивно развивавшие горную промышленность, исчерпали запасы полезных ископаемых и прекратили добычу либо значительно снизили горнодобывающую активность. 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 старых оработанных рудников, где горнодобывающая деятельность завершена достаточно давно. О значимости выполнения работ, направленных на организацию процесса затопления, его мониторинга и управления территориями оработанных месторождений и их реабилитации, 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” [23].

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 оработанные 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”, цель которого – финансовое обеспечение процедуры ликвидации промышленных объектов на оработанных месторождениях, ликвидации экологического ущерба, накопленного за годы разработки месторождений, рекультивации земель, консервации горнодобывающих объектов<sup>2</sup>. 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.

Создание специального фонда направлено на то, чтобы у компании были деньги на приведение оработанного месторождения в подобающий вид, причем, под процедуру банкротства эти

<sup>2</sup> Истощенные месторождения ликвидируют по гарантиям. Известия. Опубликовано 21.04.2014. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://iz.ru/news/569576> (дата обращения 21.09.2017).

деньги не попадают. Предлагалось, что сумма отчислений в спецфонды будет 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. До настоящего времени закон не принят.

Деятельность горного производства – одна из основных причин загрязнения окружающей среды. 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*”.

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

### ЭКОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПОСТЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ПЕРИОДА В ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ РАЙОНАХ

После прекращения добычи и закрытия горнодобывающего предприятия негативное воздействие на прилегающую территорию может продолжаться в течение длительного времени. Основные виды негативного 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 формируется самый крупный поток сточных вод на земле [38].

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 (около 240 тыс. км<sup>2</sup>) и являются долговременной угрозой существованию человека и окружающей среды на больших территориях [38]. Известно, что наибольшие проблемы, связанные с горнодобывающей деятельно-

стью, имеют Австралия, Великобритания, Канада, США, ЮАР, в меньшей степени – Ирландия, Швеция, Чили, Япония [30]. Однако и в остальных странах эти проблемы весьма актуальны. Так, детальное исследование 10 восточно-европейских стран (включая Болгарию, Польшу, Румынию, Чехию) выявило несколько тысяч потенциально опасных закрытых горных объектов [31].

После объединения Германии в восточной ее части ликвидирована большая часть горнодобывающих объектов, хотя до настоящего времени Германия остается ведущей страной по добыче бурого угля, каменных и калийных солей. В 2012 г. была прекращена добыча каменного угля на территории Саарланд (Saarland), насчитывающей двухсотлетнюю историю. К 2020 г. будет завершена отработка Рурского каменноугольного бассейна, где уголь добывался с XII в. [23]. Обеспечение безопасного процесса затопления подземных выработок в Рурском горнопромышленном регионе требует больших финансовых затрат. По оценкам, выполненным для территории Германии, затраты на проведение рекультивационных работ (в пересчете на единицу полезного ископаемого) зачастую превышают стоимость реализации самого продукта, добытого за всю историю эксплуатации горного объекта [4].

В США закрыто более 500 тыс. шахт, из них потенциальными рисками обладают около 30 тыс. объектов. В базе данных AMLIS (Abandoned Mine Land Inventory System) собрана информация примерно о 50 тыс. отработанных угольных шахтах, из них к первой категории опасности относится около 2,5 тыс. объектов. Геологическая служба США (USGS) ведет базу данных минеральных ресурсов (Mineral Resources Data System, MRDS), в которой охарактеризованы более 60 тыс. отработанных рудников.

Несколько крупных шахт в США, отработанных во второй половине XX в., 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 – самые крупные и дорогостоящие объекты, на которых EPA USA проводило многолетние работы за счет средств Суперфонда [29]. Так, на территории медного рудника Айрон Маунтен (Iron Mountain Mine) 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 EPA USA заявило, что достигнуто принципиальное улучшение состояния окружающей среды, а созданная система очистки удаляет до 99.7% 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.

Негативные, а иногда и катастрофические последствия завершённой отработки на постэксплуатационном этапе можно проиллюстрировать многими примерами. 5 августа 2015 г. за счет поступления подземных вод из штольни шахты Gold King (Колорадо, США, объект Суперфонда), отработанной более 40 лет назад, произошло загрязнение р. Анимас (Animas, приток р. Колорадо) тяжёлыми 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.) [36].

В 1994 г. началась реструктуризация угольной промышленности России, которая должна была завершиться к 2010 г. Было ликвидировано 203 угледобывающих предприятия (188 шахт и 15 разрезов). При Министерстве энергетики РФ 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 выполнить Минэнерго РФ до 2010 г., однако из-за недостаточного финансирования их выполнение не будет завершено ранее 2018 г.<sup>3</sup>

Вопреки ожидавшимся сценариям развития негативных последствий закрытия и затопления угольных шахт в различных угольных бассейнах России, многие из них оказались более длительными и нестабильными [8, 9, 11, 22]. После закрытия шахт Кизеловского бурогоугольного бассейна (Пермская обл.) 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 [11].

В последние десятилетия в пределах горноскладчатого Урала большое количество рудников было закрыто и затоплено, в том числе медноколчеданных (рис. 1). Отличительные особенности

остановленных горных объектов: большие глубины и огромные подработанные площади, часто сопряженные с селитебными зонами, что создает серьезные гидрогеоэкологические проблемы на постэксплуатационном этапе [1, 5]. На многих из затопленных рудников формируются кислые шахтные воды, в первую очередь, на медноколчеданных — наиболее опасных по степени экологического влияния.

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 [20]. Наиболее неблагоприятные объекты накопленного вреда окружающей среде в Свердловской обл. — затопленные в конце XX—начале XXI вв. медноколчеданные рудники, в частности, Дегтярский, Левихинский, Карпушихинский и др.

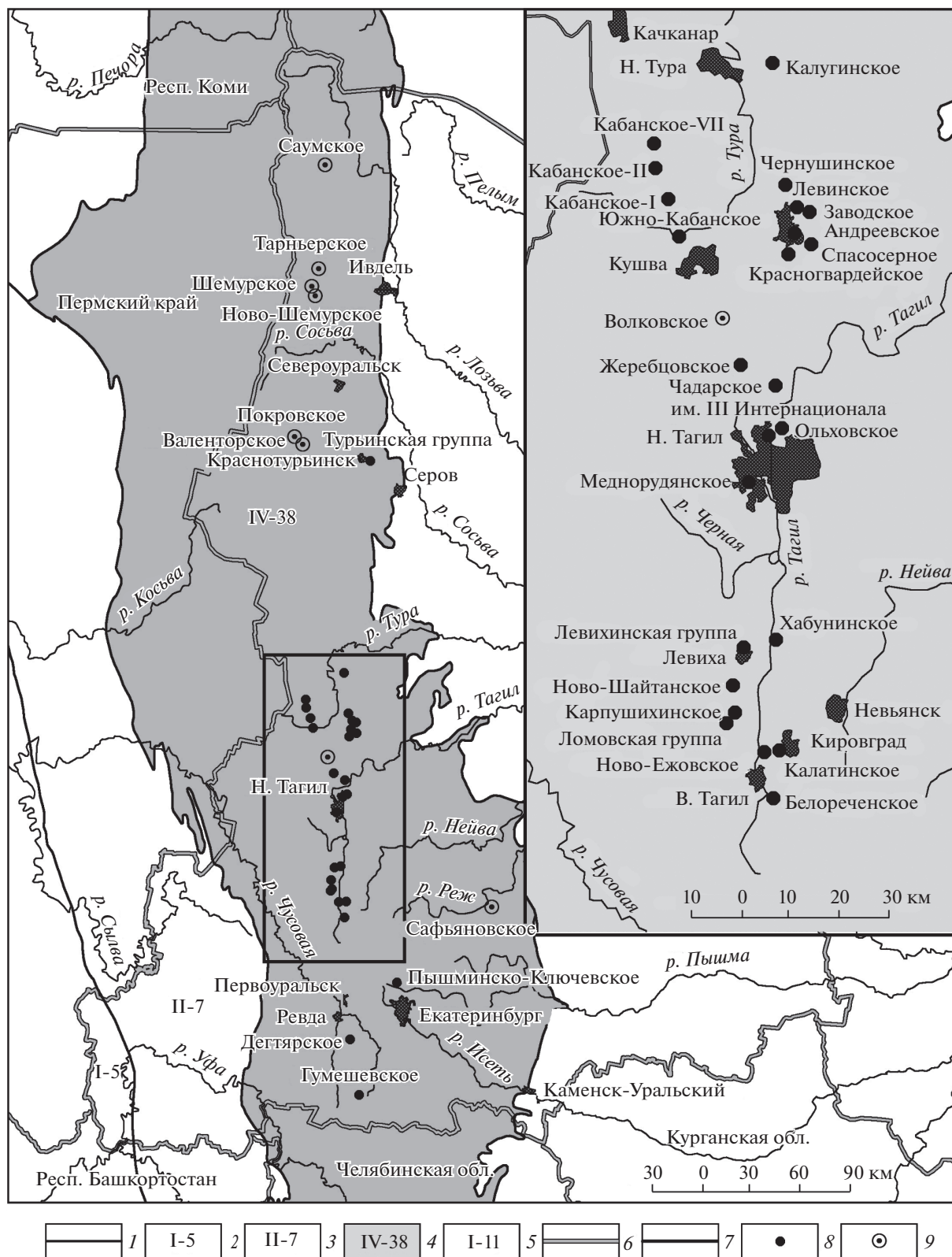
Разгрузка кислых шахтных вод приводит к загрязнению рек, которое прослеживается на многие километры в течение десятков лет. Например, в р. Тагил ниже сброса очищенных шахтных вод Левихинского рудного поля превышение ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения составляет десятки и сотни раз для цинка, меди, марганца, железа. В целом степень загрязнения вод р. Тагил тяжёлыми металлами после затопления Левихинского рудника увеличилась в несколько раз [20].

На территории Свердловской обл. одним из ведущих источников загрязнения гидросферы являются шахтные воды затопленных рудников: около 10% от общего объема загрязняющих веществ поступает в реки на водосборах, где расположены такие рудники. Затраты на их очистку (порядка 300 тыс. руб./сут) покрываются из областного бюджета по программе “Экология и природные ресурсы Свердловской области”<sup>4</sup>.

Основные гидрогеологические проблемы на этапе отработки рудника — увеличение масштабов естественной дренируемости (в десятки и сотни раз); образование обширных депрессионных воронок; формирование техногенной зоны аэрации большой мощности; изменение условий питания-разгрузки подземных вод; изменение направления движения подземных вод; увеличение скорости и расходов подземных вод; увеличение мощности зоны активного водообмена; изменение качества подземных вод; сброс дренажных вод в поверхностные водотоки.

<sup>3</sup> Долгосрочная программа развития угольной промышленности России на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 24 января 2012 г. N 14-р.

<sup>4</sup> Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2012 году”. Екатеринбург: ООО “Издательство УМЦ УПИ”, 2013. 350 с.



**Рис. 1.** Схема размещения обрабатываемых и законсервированных медноколчеданных месторождений Свердловской области и врезка на центральную часть (по данным [13, кн. 2] 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.

Прекращение водоотлива приводит к принципиальному изменению гидродинамической и гидрохимической обстановки горнопромышленных районов, сложившейся в течение десятилетий отработки. В процессе затопления происходит заполнение водой горных выработок и депрессионной воронки (обычно в течение 2–4 лет, заполнение карьеров имеет более продолжительный характер); формирование зон подтопления (в течение десятков лет). Эколого-гидрогеологическими последствиями затопления шахт и рудников на постэксплуатационном этапе являются: затопление горных выработок; заполнение депрессионной воронки; подтопление прилегающих территорий; формирование очагов сосредоточенной разгрузки кислых вод; образование техногенных родников и водоемов с токсичными водами; загрязнение подземных вод; скрытое (латентное) загрязнение поверхностных вод; угроза утраты питьевых водозаборов подземных вод.

Основные гидрогеологические задачи на постэксплуатационном этапе – определение времени заполнения воронки депрессии; прогноз подтопления и устойчивости территорий; прогноз качества шахтных вод; оценка ущерба гидросфере.

#### ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ ПОСЛЕ ПРЕКРАЩЕНИЯ ВОДООТЛИВА

Несмотря на наличие хорошо проработанных моделей, использующихся при гидрогеологических исследованиях в горном деле (аналитических, эмпирических и численных), для конкретного объекта достоверная оценка и прогноз заполнения депрессионных воронок в районе отработанных шахт всегда проблематичны 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.

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 рав-

новесия приводят к изменению фильтрационных, емкостных свойств и условий питания.

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.

Подземная разработка месторождений с обрушением кровли выработанного пространства приводит к перемещению и деформированию массива горных пород вследствие нарушения его естественного равновесия. При плавном оседании над месторождением возникает углубление в земной поверхности – мульда, в которой сдвиги распределяются неравномерно, и вследствие этого возникают вертикальные и горизонтальные деформации, формируется техногенная трещиноватость.

Трещинная пористость ( $n$ ) находится в линейной зависимости от раскрытия трещин ( $b$ ) и плотности трещин ( $\Gamma$ ) [2]

$$n = b\Gamma.$$

Для трещиноватых пород трещинная проницаемость ( $k$ ) имеет степенную зависимость от плотности трещин [2, 15, 16]

$$k = b^a\Gamma,$$

где  $a$  – эмпирический коэффициент,  $1 < a < 3$ ; при приблизительно равной вариации логарифмов плотности трещиноватости и раскрытия трещин показатель степени равен 2.0–2.5 [15]. Кроме того, появление дополнительной системы трещин увеличивает проницаемость на 30% [2].

На медноколчеданных рудниках Среднего Урала использование при подземной добыче полезного ископаемого технологии отработки с обрушением кровли выработанного пространства является причиной образования в пределах горного отвода провалов глубиной 15–35 м, зон обрушения и сдвига площадью в десятки и сотни гектаров [14]. Экспертная оценка возможного диапазона изменения геофильтрационных параметров и емкостных свойств массива горных пород в области влияния обрабатываемых рудников горноскладчатого Урала выполнена исходя из предпосылки об увеличении раскрытия трещин в нарушенной зоне примерно в 5–10 раз по сравнению с естественными условиями в соответствии с данными геолого-маркшейдерских работ. Здесь развивается техногенная трещиноватость, что приводит к росту проницаемости массива горных пород на один-два порядка, увеличению трещинной пористости и площадного питания в несколько раз [18].

Несмотря на многообразие литологических разностей пород, подземные воды в пределах гор-

носкладчатого Урала образуют систему небольших бассейнов гидравлически связанных потоков подземных вод, преимущественно безнапорных. 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. Основной водоносный горизонт (или комплекс) приурочен к зонам региональной трещиноватости, развитой до глубины 50–70 м, реже 100 м.

Поток подземных вод на участке водораздела река может быть схематизирован как линейный в плане водораздельный (полуограниченный) инфильтрационный поток с кусочно-постоянными значениями проводимости ( $T$ ) водоносного горизонта ( $T = km$ ,  $k$  – 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 могут быть составлены с использованием метода фрагментов для модели планового потока [24]. Водораздельный поток схематизируется в виде нескольких участков с постоянными в пределах фрагмента параметрами проводимости и питания: водораздельный ( $T_1, w_1$ ), центральный – обрабатываемый ( $T_2, w_2$  в естественных условиях и  $T_2^*, w_2^*$  после обработки), 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.

Масштаб и интенсивность подтопления ( $\Delta H = H^* - H$ ) зависят от размеров нарушенной горными работами территории ( $L_2$ ), интенсивности питания, поступающего в ее пределах после прекращения водоотлива ( $w_2^*$ ), фильтрационного сопротивления приречного участка ( $L_3/T_3$ ) [17]

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

где  $H, H^*$  – уровень подземных вод в естественных условиях и после прекращения водоотлива.

При этом расход потока подземных вод ( $q_p^*$ ), поступающего от водораздела и шахтного поля к дрене, по сравнению с естественными условиями ( $q_p$ ) возрастает пропорционально размерам нарушенной зоны и увеличению питания в ее пределах

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

Формирование гидродинамического режима горнопромышленной территории определяется геомеханическими процессами при деформировании массива горных пород на этапе отработки месторождения полезных ископаемых и степенью нарушенности территории после прекращения водоотлива.

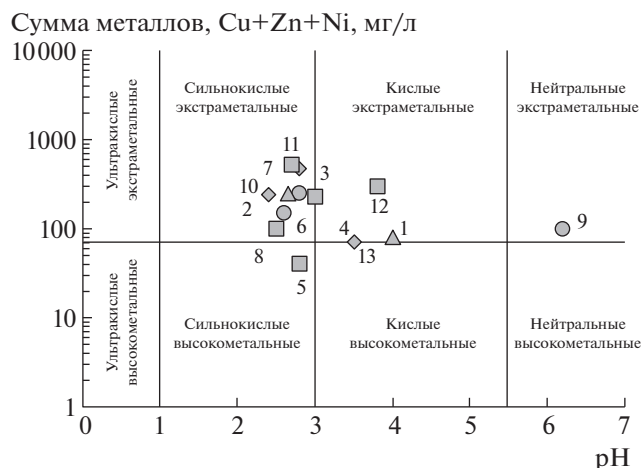
Для условий и параметров, характерных для Среднего Урала, с использованием разработанной концептуальной модели выполнена оценка последствий затопления отработанных рудников. В пределах ленты тока постоянной ширины в направлении от водораздела к дрене формирование зоны повышенного питания в зонах обрушения приводит к подъему уровня подземных вод после прекращения водоотлива на 1–5 м по сравнению с естественными условиями и является причиной подтопления прилегающих территорий после прекращения шахтного водоотлива. Эти данные хорошо согласуются с результатами численного геофильтрационного моделирования [19].

#### ФОРМИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ЗАТОПЛЕННЫХ РУДНИКАХ

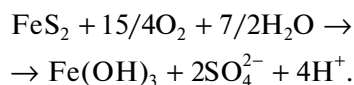
На большинстве медноколчеданных рудников Урала в период их отработки дренажные экстра- и высокометалльные сильнокислые и кислые воды, характеризуются низкими значениями рН и повышенными содержаниями металлов – до  $n \times 10^2 - n \times 10^3$  мг/л (рис. 2).

Формирование кислых шахтных вод связано с растворением сульфидных минералов, находящихся в зоне оруденения. При понижении уровня подземных вод на десятки и сотни метров при организации водоотлива на руднике формируется техногенная зона аэрации, кислород получает свободный доступ в осушенную часть пород, изменяются окислительно-восстановительные условия. Это приводит к активизации процессов окислительного выветривания пирита и других сульфидных минералов [6, 10, 21, 27]. Кроме кислорода важным окислителем является  $Fe^{3+}$  – основной окислитель для сульфидов с соотношением металл/сера, равным 1, типа сфалерита, халькопирита [32].

Эти реакции протекают достаточно быстро при низких рН по сравнению с реакцией окисления сульфида кислородом [27]. Тем не менее, именно кислород является необходимым окислителем, так как непосредственно участвует в окислении пирита либо опосредованно через производство  $Fe^{3+}$ . При повышении рН происходит осаждение гидроксида железа, поэтому результирующий процесс окисления пирита может быть представлен как



**Рис. 2.** Зависимость содержания металлов от pH (диаграмма Фиклина [35]) в дренажных водах медноколчеданных рудников Урала; использованы данные [3, 5–7, 20]. Рудники: 1 – им. III Интернационала, 2 – Красногвардейский, 3 – Левихинский, 4 – Ломовский, 5 – Белореченский, 6 – Карпушинский, 7 – Ковеллиновский, 8 – Дегтярский, 9 – Гумешевский, 10 – Карабашский, 11 – Блявинский, 12 – Гайский, 13 – Бурибайский.



pH шахтных вод может иметь отрицательные значения, если отсутствуют нейтрализующие породы [33]. В присутствии бактерий скорость сернокислотного выветривания возрастает в десятки и сотни раз [27].

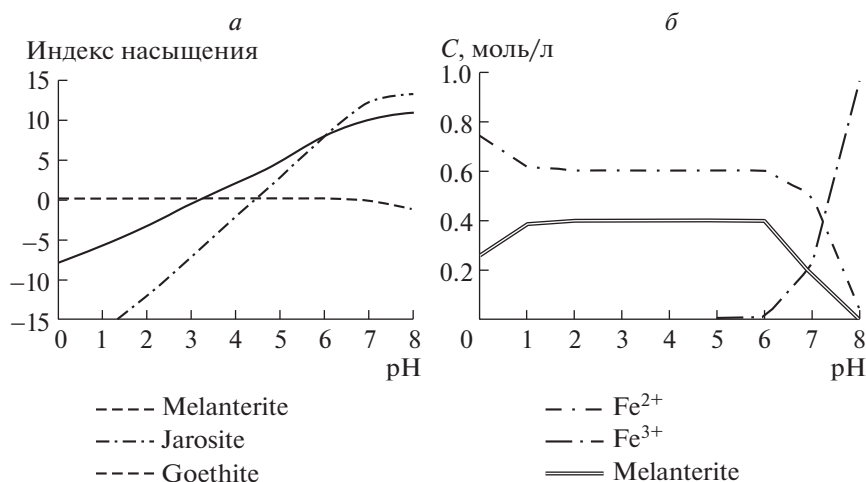
Процессы окисления, гидролиза и испарения приводят к формированию кристаллогидратов

сульфатных солей (сульфаты железа, алюминия, магния и др.) – продуктов выветривания сульфидов [6, 26, 32, 34]. В техногенной зоне аэрации (в открытых горных выработках, зонах обрушения, отвалах) активно протекают процессы гипергенеза, и образуется техногенная сернокислотная кора выветривания. При этом в процессе выветривания главных породообразующих минералов образуется ряд промежуточных соединений. Механизм формирования минерального состава зоны гипергенеза может быть исследован методами термодинамического физико-химического моделирования. Так, при смене окислительных условий на восстановительные с ростом pH изменяются индексы насыщения раствора (моделирование процесса окисления пирита выполнялось с использованием программного кода Visual MINTEQ): при  $\text{pH} < 3$  степень насыщенности убывает в ряду мелантерит → гетит → ярозит; при  $\text{pH} > 6$  ряд насыщенности представлен последовательностью ярозит → гетит → мелантерит (рис. 3а). При осаждении мелантарита  $\text{Fe}^{2+}$  расходуется на его образование, при этом в растворе в заметном количестве появляется  $\text{Fe}^{3+}$  (рис. 3б); выпадение в осадок гетита и ярозита полностью удаляет из раствора  $\text{Fe}^{3+}$ .

Гидрогеохимия шахтных вод и ее нестационарность могут быть детально рассмотрены на основе данных, полученных в результате многолетних наблюдений на затопленных рудниках Левихинской группы медноколчеданных месторождений (Свердловская обл., Средний Урал, Россия).

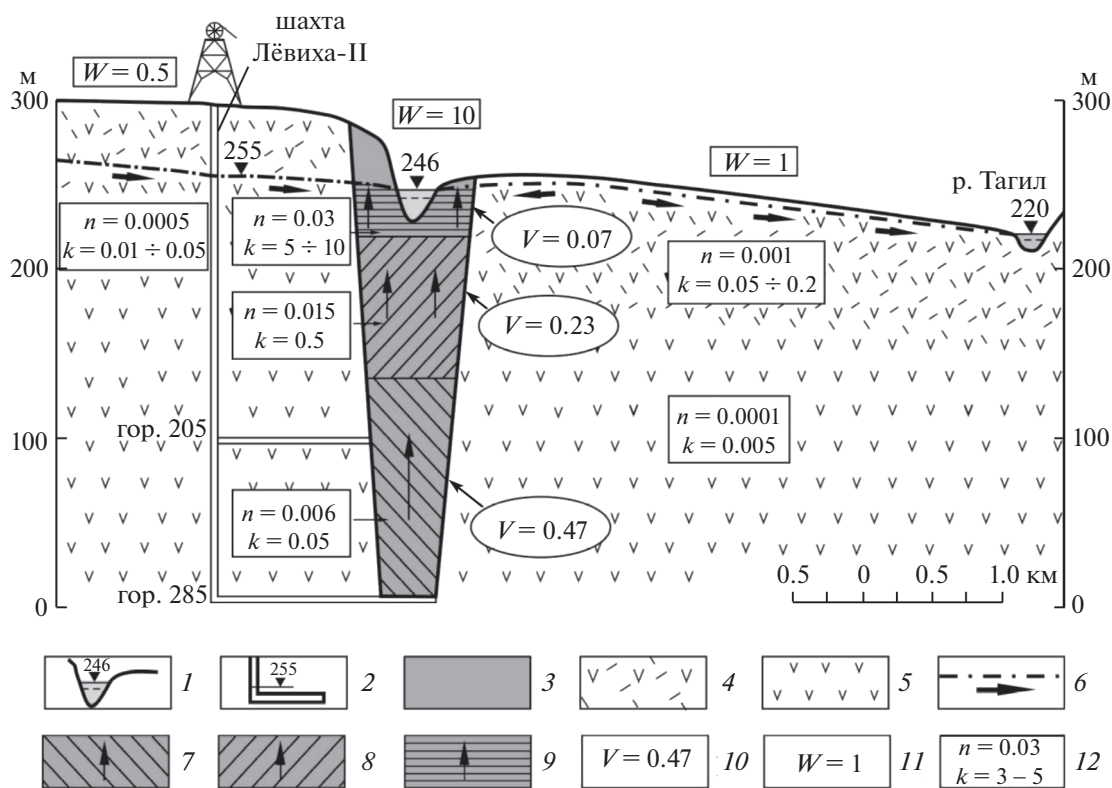
#### Характеристика объекта исследований

Левихинская группа медноколчеданных месторождений расположена в 120 км на север от



**Рис. 3.** Изменение индексов насыщения (а), концентраций железа, мелантерита (б) в зависимости от окислительно-восстановительных условий (моделирование кислотного выщелачивания 1 моль  $\text{FeS}_2/\text{кг}$ , использован программный код Visual MINTEQ).





**Рис. 4.** 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 (техногенная трещиноватость); 4, 5 – вулканогенно-осадочные породы (4 – зона развития региональной трещиноватости); 6 – уровень подземных вод и направление движения подземных вод после затопления; затопление зоны сдвижения и обрушения от горизонта 285 м: 7 – в течение первого года, 8 – второго, 9 – третьего; 10 – скорость подъема уровня, м/сут; 11 – инфильтрационное питание (л/(с км<sup>2</sup>)); 12 – параметры пласта ( $n$  – емкость,  $k$  – коэффициент фильтрации, м/сут).

г. Екатеринбург (см. рис. 1). Геохимический тип Левихинских месторождений – медно-цинковый. Минералогический состав руд: пирит, халькопирит, сфалерит, борнит, блеклые руды, пирротин, магнетит, галенит, халькозин, ковеллин, самородное золото. Содержание меди в сульфидных рудах колеблется в значительных пределах, от почти безмедистых серных руд до руд с содержанием меди 10–12%. Содержание меди во вкрапленных рудах не превышает 1.5%. Основные типы рудовмещающих пород – диабазы (5%), альбитофиры (10%), порфириды (10%), кварц-серицитовые и кварц-хлоритовые сланцы (75%). Породообразующие минералы представлены плагиоклазом, альбитом, хлоритом, серицитом, кварцем [14].

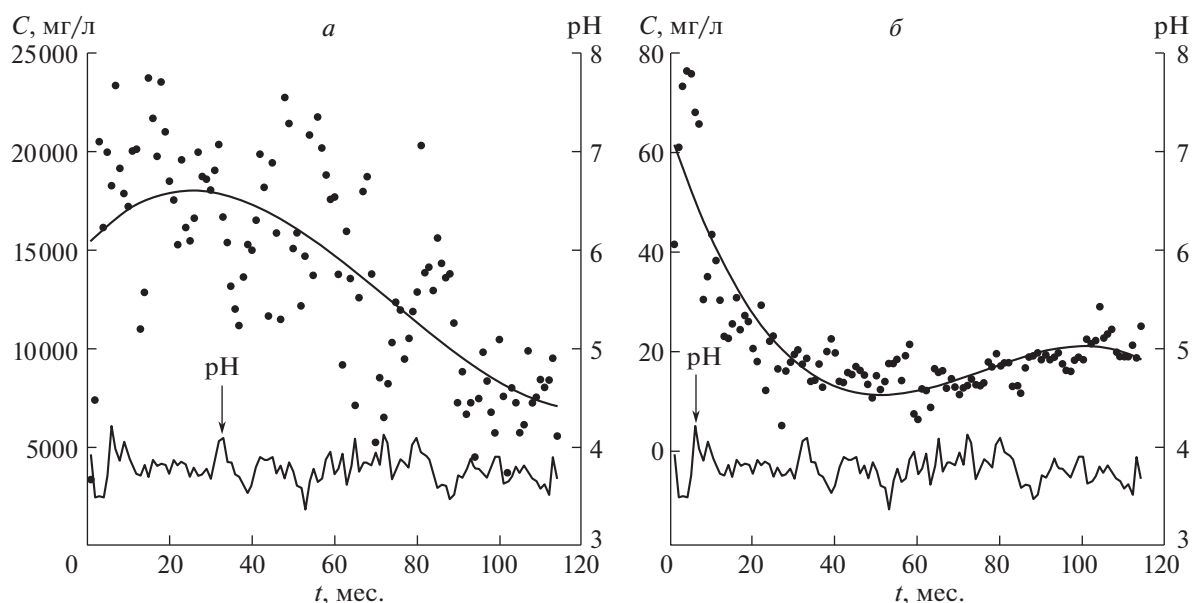
Горные работы велись с 1927 по 2003 г. карьерами (до глубины 70 м) и шахтами (до глубины 618 м) с обрушением налегающей толщи пород (высота этажа 30–80 м). В пределах шахтного поля образовались обширные зоны сдвижения и обрушения пород с воронкообразными провалами глубиной до 30 м. Зоны вытянуты в меридиональ-

ном направлении и имеют общую протяженность около 4 км при ширине 200–500 м. Длина подземных горных выработок составляет около 100 км.

Водоотлив был остановлен в декабре 2003 г. (в период отработки составлял 55 л/с). Начиная с апреля 2007 г. шахтная вода разгружается на поверхность в самой низкой точке зоны обрушения в районе шахты Левиха-II (рис. 4). Здесь в провале (зоне обрушения) сформировался техногенный водоем глубиной порядка 20 м. Для предотвращения разгрузки в поверхностные воды из него ведется откачка шахтных вод с расходом от 15 л/с в межень до 30 л/с в паводок (среднегодовое значение около 25 л/с, что в 2 раза меньше величины шахтного водоотлива при отработке) [17].

*Гидрохимический режим шахтных вод после затопления*

Качество подземных вод характеризуется существенно нестационарным гидрохимическим режимом: резкий (в 5–6 раз) рост содержания всех компонентов в течение 4–6 месяцев после



**Рис. 5.** Изменение содержания сульфат-иона, меди и pH в подземных водах зоны сосредоточенной разгрузки (точки – фактические данные, сплошная линия – полиномиальная аппроксимация 3-й степени): а – сульфат-ион ( $R^2 = 0.52$ ), б – медь ( $R^2 = 0.86$ ).

выхода шахтных вод на поверхность, сохранение повышенных значений в течение 3–5 лет, с последующим снижением, которое может продолжаться десятки лет и более. До настоящего времени показатели химического состава вод на Левихинском руднике выше, чем при отработке. Состав подземных вод в зоне разгрузки сульфатный, гидрокарбонат-ион отсутствует, хлор на уровне фона 25–53 мг/л; среди катионов преобладают алюминий, железо, магний. Температура подземных вод  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $Eh = 266$  мВ, содержание  $\text{Fe}^{2+} = 1209$  мг/л,  $\text{Fe}^{3+} = 53$  мг/л (опробование 29.11.2016 г.).

Закономерности изменения содержания компонентов в шахтных водах различаются как по абсолютным величинам, так и по скорости роста и уменьшения (рис. 5). Содержание некоторых компонентов (например, медь и марганец) аномально, как по величинам максимальных значений коэффициентов концентрации по отношению к периоду отработки (0.5 и 21, соответственно), так и по резкому спаду во времени (менее 1 года). Ранжированный ряд по степени концентрации по отношению к периоду отработки выглядит следующим образом:  $K_{\text{Mg}} > K_{\text{Mn}} > K_{\text{Fe}} > K_{\text{Zn}} > K_{\text{Al}} > K_{\text{SO}_4}$ . Период полураспада (уменьшения концентраций компонентов в 2 раза) составляет 1–2 тыс. сут.

#### *Моделирование формирования состава подземных вод в зоне разгрузки*

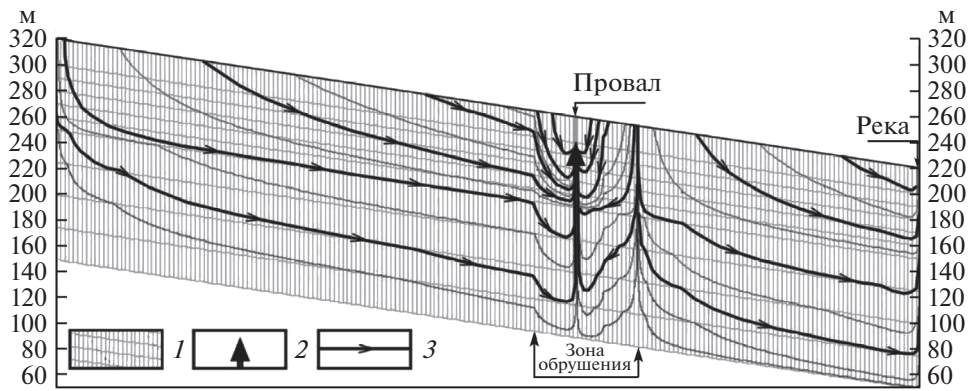
Результаты расчета насыщенности подземных вод в зоне разгрузки показывают, что они: пере-

сыщены по отношению к гематиту, магнетиту, гетиту, лепидокрокиту, ярозиту; находятся в равновесии с гипсом, ангидритом, ферригидритом; недонасыщены по отношению к эпсомиту, халькантиту, мелантериту и др. (использовался программный код Visual MINTEQ). Высокие концентрации сульфатной серы определяют форму миграции металлов в виде сульфатных комплексов:  $\text{Al}^{3+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  практически полностью; двухзарядные катионы в количестве около 50%; однозарядные катионы не более 10%.

Решение обратных задач путем расчета массового баланса позволяет при наличии достаточного объема достоверных данных о компонентах подземных вод определить породы, в результате растворения-осаждения которых сформировался конкретный состав воды [34]. Для условий Левихинского рудника были решены обратные задачи для 3-х моделей, имитирующих вероятные геохимические сценарии формирования подземных вод в зоне разгрузки.

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

Скорость растворения сульфатов в настоящее время составляет  $(5-10) \cdot 10^3$  моль/час и сопоставима со скоростью растворения сульфидов при отработке в период 1990–2000 гг. [37]. Для срав-



**Рис. 6.** Схема движения подземных вод после затопления (слева — водораздел, непроницаемая граница; размер блока по горизонтали — 50 м, количество пластов — 10; величина питания, фильтрационные и емкостные параметры показаны на рис. 4; использован программный код MODFLOW и PMPATH). 1 — сеточная разбивка; 2 — разгрузка подземных вод в провал; 3 — направление движения подземных вод.

нения — скорость окисления в шахте Горы Железной (Iron Mountain), где зафиксированы отрицательные значения pH, на порядок выше [34].

Феномен роста значений компонентов в зоне разгрузки и их последующего снижения (“first flush” по принятой в англоязычной литературе терминологии [38, 39]) 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 [28]). Продолжительность затопления зоны обрушения (подъема уровня воды от горизонта 285 м до начала разгрузки в провал) составляет 3 года. В течение этого периода вторичные минералы, сформированные в сернокислотной коре выветривания, растворяются; раствор в трещинах и порах насыщается сульфатами, металла-

ми и др. компонентами. Подземные воды, разгружающиеся в провал, в повышенных концентрациях содержат растворенные вещества, которые находятся в воде, заполняющей свободное пространство зоны обрушения. Расход разгрузки в провале состоит из потока, формирующегося в зоне обрушения, и латерального потока, поступающего с прилегающих территорий (40% и 60%, соответственно) (рис. 6).

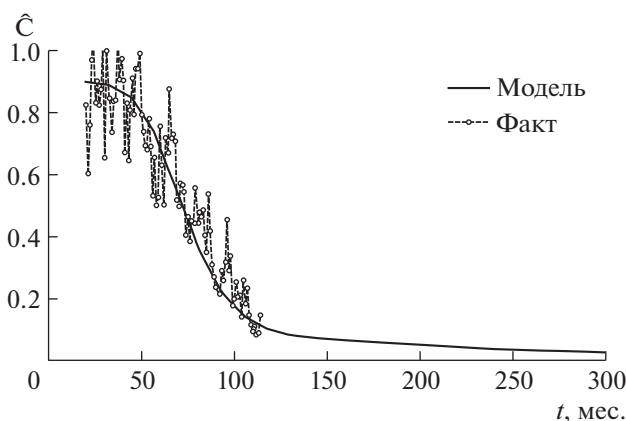
Анализ результатов физико-химического и геофильтрационного моделирования позволяет высказать следующую гипотезу формирования качества подземных вод.

Время движения потока подземных вод в зоне обрушения (от ее границы до места разгрузки) составляет 6–8 лет, это тот период, когда наблюдаются чрезвычайно высокие значения практически всех показателей в техногенном водоеме. Повышенные значения компонентов в начальный период затопления обеспечиваются поступлением раствора из зоны обрушения. Со временем латеральный поток, поступающий с прилегающих территорий, начинает разбавлять раствор в зоне обрушения, что приводит к снижению концентраций веществ в зоне разгрузки (рис. 7). Однако формирование кислых шахтных вод в зоне разгрузки будет продолжаться не менее 100 лет.

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

### ВЫВОДЫ

Закрытые (затопленные) рудники являются аномальными в гидрогеодинамическом и гидрогеохимическом аспекте территориями. Известно,



**Рис. 7.** Изменение содержания железа в зоне разгрузки (относительная концентрация, фактические данные и результаты моделирования).

что проблемы возникают не на всех объектах (их не более 10% от общего числа), но последствия отработки месторождений полезных ископаемых и закрытие горнодобывающего предприятия 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.

При отсутствии нормальной системы очистки деградация водосбора, начавшаяся при отработке, после ее завершения и затопления рудника может происходить стремительно. Особую значимость последствий отработки имеют для горноскладчатых районов (например, для Среднего Урала), где очищающая способность водосборов малых рек невысока. Реабилитация таких объектов оказывается невозможна в принципе при любых затратах, для самовосстановления подобных горнопромышленных территорий может потребоваться несколько сотен (или даже тысяч) лет.

Гидрогеоэкологический прогноз на постэксплуатационном этапе требует совместного учета геомеханических, гидродинамических и гидрохимических процессов. Формирование 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 площади питания в несколько раз. Емкость выработанного пространства составляет не более 20%, остальная емкость определяется техногенной трещиноватостью и сосредоточена в зонах обрушения и сдвижения (в том числе в провалах). Именно здесь при водоотливе и понижении уровня подземных вод на сотни метров формируется техногенная сернокислотная кора выветривания, обогащенная продуктами растворения сульфидных минералов (вторичными минералами). Их растворение при затоплении рудника обеспечивает резко нестационарное загрязнение подземных вод, продолжительность которого составляет десятки лет.

Массовое закрытие горнодобывающих предприятий в мире и в России требует от специалистов исследования проблем горнопромышленной гидрогеологии на постэксплуатационном этапе, которые заключаются в продолжительности (как правило, на порядок больше эксплуатационного этапа), формировании новых очагов разгрузки подземных вод (обусловленных характером техногенных изменений рельефа), подтоплении прилегающих территорий (вследствие подъема уровня подземных вод до отметок, превышающих его положение в естественных ненарушенных

условиях), развитии непредсказуемых гидрогеохимических процессов (взрывной характер изменения качества подземных вод, никак или слабо проявлявшийся при отработке месторождений полезных ископаемых).

Исследования выполнены в рамках фундаментальных научных исследований по программам РАН “Теоретические основы стратегии комплексного освоения месторождений и технологий их разработки с учетом особенностей переходных процессов в динамике развития горнотехнических систем (№ 0405-2018-0015)” и “Разработка методов накопления, актуализации и обработки геоинформационных данных, обеспечивающей процесс оценки ресурсов и геосистем при сопровождении ГИС горного предприятия (№ 0405-2015-0011)”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонинова Н.Ю., Шубина Л.А. Актуальные проблемы сохранения и восстановления земельных ресурсов Уральского федерального округа // Известия Самарского научного центра Российской Академии Наук. 2012. № 14 (1–8). С. 2032–2035.
2. Боровский Б.В., Хордикийнен М.А., Язвин Л.С. Разведка и оценка эксплуатационных запасов месторождений подземных вод в трещинно-карстовых пластах. М.: Недра, 1976. 247 с.
3. 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. 56–66.
4. Дребенштедт К. Современная эколого-экономическая концепция горной промышленности // Экономика региона. 2013. № 1. С. 105–114.
5. Елохина С.Н. Техногенез затопленных рудников Урала: автореферат дис. ... докт. геол.-мин. наук. Екатеринбург, УГГУ, 2014. 43 с.
6. Емлин Э.Ф. Техногенез колчеданных месторождений Урала. Свердловск: Изд-во УрГУ, 1991. 256 с.
7. 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.
8. Жукова И.А., Лобунец В.С. Экологические последствия реструктуризации угольной промышленности Ростовской области // Journal of Economic Regulation (Вопросы регулирования экономики). 2016. № 7 (4). С. 87–94.
9. Лангольф Э.Л., Лудзиш В.С., Лазаревич Т.И., Поляков А.Н. Актуальные проблемы освоения площадей горных отвалов после затопления шахт Кузбасса // Маркшейдерский вестник. 2007. № 4. С. 45–48.
10. Лехов А.В. Физико-химическая гидрогеодинамика: учебник. М.: КДУ, 2010. 500 с.

11. Максимович Н.Г., Черемных Н.В., Хайрулина Е.А. Экологические последствия ликвидации Кизеловского угольного бассейна // Географический вестник. 2006. № 2. С. 128–134.
12. Мироненко В.А., Мольский Е.В., Румынин В.Г. Горнопромышленная гидрогеология. Учебник для вузов. М.: Недра, 1989. 287 с.
13. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Проблемы гидрогеоэкологии. Монография в 3-х томах. Т. 3. Прикладные исследования. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 1999. Кн. 1. 311 с.; Кн. 2. 504 с.
14. Мормил 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: НИИ-Природа, ДПР по Уральскому региону, ВНИИЗАРУБЕЖ-ГЕОЛОГИЯ, 2002. 206 с.
15. Поздняков С.П. Стохастическое моделирование гидрогеодинамических процессов: автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М.: МГУ, 1996. 44 с.
16. Румынин В.Г. Геомиграционные модели в гидрогеологии. СПб.: Наука, 2011. 1158 с.
17. Рыбникова Л.С., Фельдман А.Л., Рыбников П.А. Последствия затопления медноколчеданных рудников Среднего Урала: формирование гидрогеологических условий // Проблемы недропользования: Сб. статей. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). М.: Горная книга, 2011. № 0В11. С. 459–470.
18. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Геофильтрационная модель массива горных пород в области влияния отработываемых и ликвидируемых рудников горноскладчатого Урала // Литосфера. 2013. № 3. С. 130–136.
19. Рыбникова Л.С., Фельдман А.Л., Рыбников П.А. Инженерная защита гидросферы при отработке и ликвидации рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: Горная книга, 2012. № 10. С. 301–306.
20. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Эколого-экономическая оценка шахтных вод на примере затопленных медноколчеданных рудников Урала // Водное хозяйство России. 2016. № 1. С. 52–65.
21. Смирнов С.С. Зона окисления сульфидных месторождений. М.: АН СССР, 1951. 334 с.
22. 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.
23. Тюленев М.А., Мельхерс К., Кречман Ю., Герке-Малетт П., Кляйнеберг К. Элементы и аспекты пост-эксплуатационного периода горных предприятий // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015. № 6 (112). С. 3–13.
24. Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. М.: Изд-во МГУ, 1995. 368 с.
25. Шестаков В.М. Принципы геофизико-экологического мониторинга // Геоэкология. 1999. №4. С. 362–365.
26. Яхонтова Л.К., Зверева В.П. Минералы зоны гипергенеза. Владивосток: Дальнаука, 2007. 164 с.
27. Appelo C.A.J., Postma D. Geochemistry, groundwater and pollution. 2-nd edition. Rotterdam, Balkema, 2005. 635 p.
28. Chiang W.H. and Kinzelbach W. 3D-Groundwater Modeling with PMWIN. First edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2001. 346 p.
29. Fifth Five-Year Review for Iron Mountain Mine Superfund Site Redding, California. US EPA. San Francisco. 2013. 252 p.
30. Mining for the Future. Appendix C: Abandoned Mines. Working Paper. Mining, Minerals and Sustainable Development. The International Institute for Environment and Development. London, 2002. 20 p.
31. Mining, mining waste and related environmental issues: problems and solutions in Central and Eastern European Candidate Countries / Jordan G., D'Alessandro M., Hamor T., Liedekerke M.V., Panagos P., Puura E., Sommer S., Vijdea A.-M. Ispra (Joint Research Centre of the European Commission). 2004. 207 p.
32. Hammarstrom J.M., Seal R.R. II, Meier A.L., 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. V. 215. P. 407–431.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. 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.
37. 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. Proceedings. 63. V. 1. P. 753–760.
38. Wolkersdorfer C. Water management at abandoned flooded underground mines. Fundamentals. Tracer tests. Modelling. Water treatment. Springer, 2008. 465 p.
39. 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.

## HYDROGEOLOGICAL INVESTIGATIONS IN MINING AT THE POST-OPERATIONAL STAGE

L. S. Rybnikova<sup>a,\*</sup> and P. A. Rybnikov<sup>a,\*\*</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Mining, Ural branch of the Russian Academy of Sciences,  
ul. Mamina-Sibiryaka 58, Yekaterinburg, 620075 Russia*

<sup>\*</sup>*E-mail: luserib@mail.ru*

<sup>\*\*</sup>*E-mail: ribnikoff@yandex.ru*

Hydrogeological investigations in mining have traditionally focused primarily on solving the problem of safe mining of mineral deposits. In recent years (both in the world and in Russia), the exploitation of a large number of mineral deposits has been completed. Problems arose in the management at the post-operational stage in the territories that had been disturbed for many years by mining. Managing the territories of worked out deposits, especially old ownerless sites, required the development of special laws, and considerable funds are spent on their rehabilitation. The possibility of development of new deposits, especially large ones, is determined by the guarantee of environmental security not only for the period of the mine life, but after its completion. After cessation of production and closure of mines, hazards and harmful effects on the adjacent area may occur for a long time. The main types of negative influence are practically identical in different countries and do not depend on the type of mineral: this is a change in the state of groundwater and surface water, instability of the earth's surface, escape of toxic gases or hazardous substances into the environment. It is believed that due to contaminated mine water, the largest flow of waste water on the earth surface is formed. Closed (flooded) mines are the areas that are abnormal in hydrogeodynamic and hydrogeochemical behavior. The specifics of the post-operational stage are: 1) the duration (usually an order of magnitude greater than the operational one), 2) unpredictable hydrogeochemical processes (the explosive nature of the change in the quality of groundwater, which did not manifest itself at all or was poorly manifested during the mining of mineral deposits), 3) the formation of new groundwater discharge points (caused by the nature of the technogenic changes in the relief), 4) flooding of adjacent territories (due to the rise of the groundwater level to values exceeding its value in natural undisturbed conditions). The hydrogeological investigations and forecast at the post-operational stage require a joint study of the processes of geomechanics, hydrodynamics and hydrochemistry in a rock massif disturbed by mining.

**Key words:** *flooded mines, technogenic fracturing, flooding, acid mine water, secondary minerals, zone of aeration, sulfides, physico-chemical modeling*

### REFERENCES

- Antoninova, N.Yu., Shubina, L.A. Actual problems of preservation and restoration of land resources of the Urals Federal District. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2012, no 14 (1-8), pp. 2032–2035. (in Russian).
- Borevskii, B.V., Hordikainen, M.A., Yazvin, L.S. *Razvedka i otsenka ekspluatatsionnykh zapasov mestorozhdenii podzemnykh vod v treshchinno-karstovykh plastakh* [Exploration and evaluation of operational reserves of groundwater deposits in fissured-karst formations]. Moscow, Nedra Publ., 1976, 247 p. (in Russian).
- Gryaznov, O.N., Palkin, S.V., Novikov, V.P., Kataev, A.M. Drainage waters as a source of technogenic hydromineral raw materials in the Urals. *Izv.VUZov. Gornyi Zhurnal*, 1997, no 11–12, pp. 56–66. (in Russian).
- Drebenshtedt, K. Modern ecological and economic concept of the mining industry. *Ekonomika regiona*, 2013, no 1, pp. 105–114. (in Russian).
- Elokhina, S.N. *Tekhnogenez zatoplennykh rudnikov Urala* [Technogenesis of the flooded mines of the Urals]. Extended Abstract of Doctoral (Geol.-Min.) Dissertation. Yekaterinburg, 2014, 43 p. (in Russian).
- Emlin, E.F. *Tekhnogenez kolchedannykh mestorozhdenii Urala* [Technogenesis of pyrite deposits in the Urals]. Sverdlovsk, Ural St. Univ. Publ., 1991, 256 p. (in Russian).
- Zoteev, V.G., Zoteev, O.V., Kornilkov, S.V. Perspective of the extraction of non-ferrous metals brought to the surface by mine water at waste deposits. *Kombinirovannaya geotekhnologiya. Razvitie fiziko-khimicheskikh sposobov dobychi: trudy po materialam mezhdunar. conf.* [Combined geotechnology: Development of physical and chemical methods of extraction: proceedings of the international conference.] Magnitogorsk, MSTU, 2009, pp. 76–81. (in Russian).
- Zhukova, I.A., Lobunets, V.S. Environmental consequences of the restructuring of the coal industry in the Rostov region. *Journal of Economic Regulation – Voprosy regulirovaniya ekonomiki*, 2016, no 7 (4), pp. 87–94. (in Russian).
- Langolf, E.L., Ludzish, V.S., Lazarevich, T.I. Actual problems of development of the mining bend areas after flooding of Kuzbass mines. *Marksheiderskii vestnik*, 2007, no 4, pp. 45–48. (in Russian).
- Lekhov, A.V. *Fiziko-khimicheskaya gidrogeodinamika* [Physico-chemical hydrogeodynamics]. Moscow, KDU Publ., 2010, 500 p. (in Russian).
- Maksimovich, N.G., Cheremnykh, N.V., Khairulina, E.A. Ecological consequences of the liquidation of the Kizelovsky coal basin. *Geograficheskii vestnik*, 2006, no 2, pp. 128–134. (in Russian).
- Mironenko, V.A., Mol'skii, E.V., Rumynin, V.G. *Gornopromyshlennaya gidrogeologiya*. [Mining industrial hydrogeology]. Moscow, Nedra Publ., 1989, 287 p. (in Russian).

13. Mironenko, V.A., Rumynin, V.G. *Problemy gidrogeologii. Monografiya v 3 tomakh. Tom 3. Prikladnye issledovaniya* [Problems of hydrogeology. Monograph in 3 volumes. Vol. 3. Applied research]. Moscow, Moscow State Mining University Publ., 1999, book 1, 311 p., book 2, 504 p. (in Russian).
14. Mormil, S.I., Sal'nikov, V.I., Amosov, L.A., Khasanova, G.G., Semyachkov, A.I., Zobnin, B.B., Burmistrenko, A.V. *Tekhnogennyye mestorozhdeniya Urala i otsenka ikh vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu* [Technogenic deposits of the Urals and assessment of their impact on the environment]. Borovkov, Yu.A., Ed., Yekaterinburg, NIA-Priroda, DPR for the Ural region, VNIIZARUBEZHGEOLOGIYA Publ., 2002, 206 p. (in Russian).
15. Pozdnyakov, S.P. *Stokhasticheskoe modelirovanie gidrogeodinamicheskikh protsessov* [Stochastic modeling of hydrogeodynamic processes]. Extended Abstract of Doctoral (Geol.-Min.) Dissertation. Moscow, Moscow state univ., 1996, 44 p. (in Russian).
16. Rumynin, V.G. *Geomigratsionnye modeli v gidrogeologii* [Geomigration models in hydrogeology]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2011, 1158 p. (in Russian).
17. Rybnikova, L.S., Fel'dman, A.L., Rybnikov, P.A. Consequences of flooding of copper-pyrite mines in the Middle Urals: formation of hydrogeological conditions. *Problemy nedropol'zovaniya. Sbornik statei. Otdelnyi vypusk Gornogo informatsionno-analiticheskogo byulletenya (nauchno-tehnicheskogo zhurnala)* [Subsoil use problems: Collection of articles. A separate issue of the Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2011, no. OB11, pp. 459–470. (in Russian).
18. Rybnikova, L.S., Rybnikov, P.A. Geofiltration model of the rock massif in the field of influence of mined and liquidated mines in the Urals mountains. *Litosfera*, 2013, no. 3, pp. 130–136. (in Russian).
19. Rybnikova, L.S., Rybnikov, P.A. Influence of the ecological damage accumulated from mining activity on the hydrosphere state in the Middle Urals. *Vodnoe khozyaistvo Rossii*, 2013, no. 6, pp. 110–118. (in Russian).
20. Rybnikova, L.S., Rybnikov, P.A. Ecological and economic assessment of mine waters by the example of flooded copper-pyrite mines in the Urals. *Vodnoe khozyaistvo Rossii*, 2016, no. 1, pp. 52–65. (in Russian).
21. Smirnov, S.S. *Zona okisleniya sulfidnykh mestorozhdenii* [Zone of oxidation of sulfide deposits]. Moscow, the USSR Acad. Sci. Publ., 1951, 334 p. (in Russian).
22. Tarasenko, I.A. *Geokhimicheskie osobennosti sostava i zakonmernosti formirovaniya podzemnykh vod v prirodno-tekhnogennykh gidrogeologicheskikh strukturakh raionov likvidirovannykh ugol'nykh shakht* [Geochemical features of composition and regularities of groundwater formation in natural-technogenic hydrogeological structures in the areas of the liquidated coal mines]. Extended Abstract of Doctoral (Geol.-Min.) Dissertation. Vladivostok, 2014, 45 p. (in Russian).
23. Tyulenev, M.A., Melchers, K., Krechman, Yu., Gerke-Malet, P., Kleineberg, K. Elements and aspects of the post-exploitation period of mining enterprises. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 6 (112), pp. 3–13. (in Russian).
24. Shestakov, V.M. *Gidrogeodinamika* [Hydrogeodynamics]. Moscow, Moscow State Univ. Publ., 1995, 368 p. (in Russian).
25. Shestakov, V.M. Principles of geophysical ecological monitoring. *Geokologiya*, 1999, no. 4, pp. 362–365. (in Russian).
26. Yakhontova, L.K., Zvereva, V.P. *Mineraly zony gipergeneza* [Minerals of the hypergenesis zone]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2007, 164 p. (in Russian).
27. Appelo, C.A.J., Postma D. *Geochemistry, groundwater and pollution*. 2-nd edition. Rotterdam, Balkema, 2005, 635 p.
28. Chiang, W.H. and Kinzelbach, W. *3D-Groundwater Modeling with PMWIN*. First edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2001. 346 p.
29. *Fifth Five-Year Review for Iron Mountain Mine Superfund Site Redding, California*. US EPA. San Francisco, 2013, 252 p.
30. *Mining for the Future. Appendix C: Abandoned Mines. Working Paper. Mining, Minerals and Sustainable Development*. The International Institute for Environment and Development. London, 2002, 20 p.
31. *Mining, mining waste and related environmental issues: problems and solutions in Central and Eastern European Candidate Countries*. Jordan G., D'Alessandro M., Hamor T., Liedekerke M.V., Panagos P., Puura E., Sommer S., Vjidea A.-M. Ispra (Joint Research Centre of the European Commission). 2004, 207 p.
32. Hammarstrom, J.M., Seal, R.R. II, Meier, A.L., 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, vol. 215, pp. 407–431.
33. 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, pp. 3455–3462.
34. 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, no. 26, pp. 1777–1791.
35. 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, no. 6, pp. 373–432.
36. *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. Oct. 2015. 132 p.
37. 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. Wolkersdorfer, C., Sartz, L., Sillanpää, M., Häkkinen, A. Eds. Proceedings. 63. Volume 1. P. 753–760.
38. Wolkersdorfer, C. *Water management at abandoned flooded underground mines. Fundamentals. Tracer tests. Modelling. Water treatment*. Springer, 2008. 465 p.
39. Younger, P.L. The longevity of mine water pollution: a basis for decision-making. *Science of the Total Environment*. 1997, no. 194/195, pp. 457–466.