

УДК 622.012.2:556.3:51

**ПРОБЛЕМЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ ГИДРОСФЕРЫ ПРИ ОТРАБОТКЕ И  
ЛИКВИДАЦИИ РУДНИКОВ СРЕДНЕГО УРАЛА (на примере Левихинского  
рудника)**

© 2011 г. Л.С. Рыбникова<sup>1</sup>, А.Л. Фельдман<sup>2</sup>, П.А. Рыбников<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного  
использования и охраны водных ресурсов», г. Екатеринбург

<sup>2</sup> Научно-производственное и проектное предприятие «ПАНЭКС», г. Екатеринбург

<sup>3</sup> Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г.  
Екатеринбург

**Ключевые слова:** подземные воды, математическая модель, водоотлив,  
ликвидация рудника, загрязнение гидросферы.

Обоснование мер инженерной защиты гидросферы при отработке и ликвидации рудников базируется на результатах мониторинга и гидрогеомиграционного моделирования. Методы борьбы с загрязнением гидросферы после ликвидации рудников сводятся к локализации участков загрязнения и очистке загрязненных вод на участках их сосредоточенного выхода при обязательном проведении мониторинга. Для района гидродинамического влияния отработки Левихинского месторождения в Свердловской области разработана концептуальная математическая гидрогеологическая модель. В условиях дефицита информации параметрическое насыщение модели осуществлялось в ходе решения ряда обратных задач для характерных периодов изменения гидродинамической обстановки.

## **Введение**

На территории Свердловской области при осушении месторождений полезных ископаемых извлекается 280 млн м<sup>3</sup>/год подземных вод, зачастую сильно загрязненных, при этом объем добычи подземных вод для хозяйственно-питьевых нужд почти в 2 раза меньше [1]. Особенно это характерно для Большеуральской гидрогеологической складчатой области (ГСО), где расположена большая часть горнопромышленного комплекса Среднего Урала (рис. 1, табл. 1).

**Рис. 1.** Размещение объектов добычи подземных вод в Свердловской области.

**Таблица 1.** Структура извлечения и использования подземных вод в Свердловской области

Тип водоотбора	Извлечение и использование подземных вод			
	всего, тыс. м <sup>3</sup> /год		в том числе в пределах Большеуральской ГСО, тыс. м <sup>3</sup> /год	
	извлечение	сброс	извлечение	сброс
Водозаборы питьевых и технических подземных вод	458	3 (менее 1 %)	326	1 (менее 1 %)
Водоотлив дренажный и шахтный	772	707 (91 %)	722	667 (92 %)
Всего	1230	710 (58 %)	1048	668 (64 %)

Хозяйственное освоение территорий, прилегающих к горнодобывающим предприятиям, происходило в условиях работы дренажных систем при значительном и продолжительном понижении уровня подземных вод.

Изменение экономической конъюнктуры и истощение запасов обусловило массовое закрытие горнодобывающих предприятий и привело к затоплению горных выработок (так называемая «мокрая консервация»).

Это принципиально изменяет складывавшуюся до этого десятилетиями гидродинамическую и гидрохимическую обстановку в густонаселенных районах. Прекращение водоотлива, затопление карьеров и шахт приводит к развитию целого ряда негативных процессов, таких как:

- подтопление ранее освоенных прилегающих территорий;
- загрязнение подземных и поверхностных вод;
- формирование очагов сосредоточенной разгрузки кислых вод;
- образование техногенных водоемов, содержащих токсичные воды;
- латентное загрязнение поверхностных вод;
- деформация земной поверхности над горными выработками.

## Экологические и гидродинамические условия района Левихинского рудника

Наиболее опасными для Урала с экологической точки зрения являются медно-колчеданные месторождения – как обрабатываемые, так и законсервированные. Это связано с вещественным составом руд, способами обработки, складированием некондиционных руд и пустых пород [2, 3].

Большинство медно-колчеданных месторождений Урала расположены в сходных геофильтрационных условиях. Основной водоносный горизонт или водоносный комплекс приурочен к зонам региональной трещиноватости, развитой до глубины 70–100 м [4, 5]. В естественных условиях закономерности изменения фильтрационных свойств основного водоносного горизонта, как правило, следующие: уменьшение проводимости в зависимости от расстояния до реки и абсолютных отметок, логнормальное распределение значений проводимости по площади, экспоненциальное убывание по вертикали. При геофильтрационной схематизации необходимо учитывать высокое влияние на фильтрационную неоднородность тектонических нарушений и литологических контактов, обеспечивающих притоки трещинно-жильных вод до глубины 120–200 м, реже 400 м. В нарушенных условиях в районах обработки месторождений формируются как техногенные зоны трещиноватости, так и техногенные экраны [3].

При решении инженерных задач в сложных гидрогеологических условиях целесообразно создание численной математической модели района гидродинамического влияния рудника для учета различных техногенных объектов [3].

Для района Левихинского медно-колчеданного месторождения в Свердловской области была создана постоянно действующая гидрогеомиграционная модель, на базе которой в течение ряда лет были решены следующие практические задачи [6, 7, 8]:

- обоснование размещения шламонакопителя обогатительной фабрики в отработанном карьере;
- оценка воздействия затопления Левихинского рудника на подземную и поверхностную гидросферу;
- прогноз осушения затопленного рудника;
- обоснование программы мониторинга состояния окружающей среды.

Левихинская рудоносная зона расположена в 70 км на север от г. Екатеринбурга,

Кировоградская рудный район Среднего Урала, бассейн р. Тагил. Почти все месторождения этой зоны отработаны (рис. 2), водоотлив прекращен, на некоторых участках фиксируется выход кислых подземных вод на поверхность.

**Рис. 2.** Схема расположения медно-колчеданных месторождений Кировоградского рудного района.

Левихинский рудник с 20-х годов XX в. обрабатывал группу компактно расположенных медно-колчеданных месторождений. Левихинское рудное поле протяженностью 6 км приурочено к западному крылу Тагильской синклинали и сложено вулканитами и метасоматитами кировоградской свиты, которые с запада ограничиваются плагиогранитами Тагильского интрузивного массива, а с востока перекрываются более молодыми отложениями шуралинской свиты. Рудоносная формация достигает видимой мощности около 2 км. Широкое развитие грубообломочных туфов, вулканических брекчий и субвулканических образований свидетельствует о первоначальном расположении рудного поля в пределах прижерловой части вулканической структуры, в дальнейшем деформированной и наклоненной на восток. Геохимический тип Левихинских месторождений медно-цинковый, по содержанию попутных компонентов руды являются комплексными, содержащими селен, теллур, индий, золото, серебро, кадмий, мышьяк и другие элементы [4, 9].

При отработке месторождения воздействие на окружающую среду в первую очередь было связано со складированием отвалов, содержащих сульфиды и тяжелые металлы, созданием водоемов-отстойников для шахтных и подотвальных вод. Гидродинамическую обстановку определяли техногенные объекты: отработанные карьеры, действующие и закрытые шахты, зоны обрушения и сдвижения, пруд-отстойник (рис. 3, табл. 2). Водоотлив составлял в среднем около 280 м<sup>3</sup>/ч.

**Рис. 3.** Схема расположения техногенных объектов, определяющих экологическую и гидродинамическую обстановку района Левихинского рудника.

**Таблица 2.** Характеристика периодов обработки Левихинского рудника

<i>Период</i>	<i>Характеристика периода</i>
до 1928 г.	естественные условия
1928–1958 гг.	<ul style="list-style-type: none"> <li>— отработка карьерами (до 70 м) и шахтами (до 285 м)</li> <li>— сброс кислых дренажных вод в болото на северо-западе месторождения (расход 130 м<sup>3</sup>/ч)</li> <li>— создание пруда-отстойника (в 1959 г.) в русле р. Левихи в 2,5 км от р. Тагил (площадь 142 га, глубина 10 м, отметка уровня 240 м)</li> </ul>
1959–2002 гг.	<ul style="list-style-type: none"> <li>— рост величины водоотлива до 250–290 м<sup>3</sup>/ч</li> <li>— отработка шахтами (горизонт 405 м на юге месторождения, горизонт 618 м на севере месторождения)</li> <li>— по горизонту 285 м все горные выработки сбиты</li> <li>— формирование зоны сдвижения меридионального направления (2400 м × 300 м)</li> <li>— формирование 33 зон обрушения глубиной до 30 м</li> </ul>
2003 г. – настоящее время	<ul style="list-style-type: none"> <li>— остановка шахтного водоотлива (май 2003 г. – на южном фланге, декабрь 2003 г. – на северном)</li> <li>— затопление горных выработок до горизонта 285 м (май 2004 г.)</li> <li>— завершение затопления (декабрь 2006 г.)</li> <li>— образование техногенного водоема с отметкой 246,5 м в районе шахтного ствола Левиха II в зоне обрушения от горизонта 175 м</li> <li>— разгрузка кислых подземных вод (расход 30–150 м<sup>3</sup>/ч)</li> <li>— подъем уровня в затопленных карьерах на 15–20 м</li> <li>— объем воды в затопленном выработанном пространстве 5 млн м<sup>3</sup>, в карьерах 1,2 млн м<sup>3</sup></li> <li>— строительство станции перекачки в районе бывшей шахты Левиха II</li> <li>— сбор и нейтрализация кислых вод (подземных и подотвальных)</li> </ul>

В 2003 г. добыча была прекращена. Основные задачи на конец отработки были следующие:

- предотвращение возможного подтопления прилегающих территорий;
- перехват кислых шахтных вод;

– предотвращение миграции загрязненных подземных вод от затопленного Левихинского рудника к р. Тагил.

Отработка шахтами с подэтажным обрушением, образование зон обрушения и сдвижения привело к существенным изменениям фильтрационных характеристик и условий питания некоторых участков водоносного горизонта. Для количественной оценки этих показателей необходимо воспроизведение на математической модели всей гидродинамической истории отработки и последующей ликвидации месторождения. 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 [3, 9].

#### **Водно-балансовые составляющие в области гидродинамического влияния рудника**

В результате решения ряда обратных задач были определены фильтрационные параметры, а также водно-балансовые составляющие в области гидродинамического влияния рудника в различные моменты его освоения, установлены закономерности формирования гидродинамической обстановки в районе месторождения (рис. 4):

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

– после строительства пруда-отстойника водопритоки в шахту при отработке нижних горизонтов месторождения увеличились почти в два раза (до  $250\text{--}290 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) по следующим причинам: а) произошло увеличение площади зон обрушения и сдвижения; б) были вскрыты высокопроницаемые тектонические нарушения, определяющие зоны повышенной проводимости; в) увеличилась глубина техногенной трещиноватости; г) сформировался приток из пруда отстойника.

**Рис. 4.** Водно-балансовые составляющие ( $\text{м}^3/\text{сут.}$ ) в области гидродинамического влияния Левихинского рудника в различные моменты его освоения.

В целом, решение серии обратных задач позволило уточнить фильтрационные параметры исследуемой области, проверить физическую непротиворечивость модели, а также разработать концептуальную и математическую гидрогеологическую модель района Левихинского медно-колчеданного рудника (рис. 5).

**Рис. 5.** Гидрогеологическая модель района Левихинского медно-колчеданного рудника (вертикальная ось – абсолютные отметки, м).

### **Результаты решения прогнозных задач**

Решение прогнозных фильтрационных задач, имитирующих затопление Левихинского рудника, дало возможность определить зоны выхода шахтных вод на поверхность, скорость заполнения подземных выработок, области подтопления. Было установлено, что подземные выработки будут полностью затоплены за 3 года, наибольший расход шахтных вод ожидается в районе бывшей шахты Левиха XII – порядка  $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ , где формируется техногенный водоем, заполненный кислыми водами.

В случае бесконтрольного затопления рудника фронт загрязнения от затопленного Левихинского рудника достигает р. Тагил за 5 лет и будет характеризоваться следующими средними концентрациями на участке разгрузки загрязненных подземных вод по основным загрязняющим веществам: медь до  $50 \text{ мг}/\text{дм}^3$ , цинк до  $150 \text{ мг}/\text{дм}^3$ . Наиболее эффективными водоохранными мероприятиями в такой ситуации являются мероприятия, которые обеспечивают перехват загрязненных подземных вод к востоку от рудника для отвода их в существующий пруд-отстойник. В случае их реализации содержания меди и цинка на участке разгрузки подземных вод в р. Тагил составят, соответственно,  $0,7$  и  $2,0 \text{ мг}/\text{дм}^3$ .

Приведенный прогноз полностью подтвердился при затоплении рудника в 2003–2006 гг. Строительство станции перекачки в районе бывшей шахты Левиха II, где произошло формирование техногенного водоема, обеспечило возможность своевременного перехвата и последующей нейтрализации кислых вод, предотвратило поступление значительных объемов загрязненных вод в р. Тагил и фактически предотвратило экологическую катастрофу в этом районе. В настоящее время за счет средств областного бюджета предприятие «Экология» осуществляет сбор и обезвреживание загрязненных подземных вод.

Мероприятия, обеспечивающие минимизацию загрязнения гидросферы после ликвидации рудников, направлены на прогноз, выявление и локализацию очагов загрязнения, очистку загрязненных подземных вод на участках их сосредоточенного выхода при обязательном проведении мониторинга [10, 11, 12].

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.

Решение прогнозных задач, воспроизводящих процесс осушения рудника, позволило сделать следующие выводы:

- разгрузка кислых подземных вод прекратится через 1,5–2 месяца после начала осушения;
- депрессионная воронка при осушении рудника достигнет своих предельных размеров в течение 3–4 месяцев;
- осушение до горизонта 285 м займет порядка 2 лет;
- при снижении уровня подземных вод до глубины 100 м (зона интенсивной трещиноватости) водоприток будет формироваться как за счет сработки статических (емкостных) запасов (до 300 м<sup>3</sup>/ч), так и за счет естественных ресурсов (до 250 м<sup>3</sup>/ч);
- – при снижении уровня более чем на 100 м произойдет стабилизация водоотлива в диапазоне 250–300 м<sup>3</sup>/ч, далее при снижении уровня эта величина останется постоянной, т. е. гидродинамическая ситуация может рассматриваться как стационарная;
- общее время осушения от текущего положения уровня до горизонта 618 составит порядка 40 месяцев, причем для осушения до горизонта 285 потребуется 24 месяца.

До настоящего времени проект не реализован.



## Выводы

Для района гидродинамического влияния отработки Левихинского месторождения разработана концептуальная и математическая гидрогеологическая модель. В условиях дефицита информации параметрическое насыщение модели осуществлялось в ходе решения ряда обратных задач для характерных периодов с максимальным приближением к адекватному описанию процесса и раскрытием основных закономерностей формирования и изменения гидродинамической обстановки:

- до создания пруда-отстойника дренажный водоотлив формировался за счет естественных ресурсов (60 %) и питания в пределах зон обрушения (40 %);

- рост в 2 раза шахтного водоотлива, с начала с 60-х годов, вызван поступлением воды из пруда-отстойника и увеличением площади зон обрушения: в формировании водоотлива 25 % составляет питание в пределах зон обрушения, 20 % – привлечение из пруда-отстойника;

- величина питания в пределах зон обрушения соответствует практически полному поглощению осадков на этой площади (модуль питания 10–12 л/с·км<sup>2</sup> при величине регионального модуля 0,5 – 2,0 л/с·км<sup>2</sup>);

- коэффициенты фильтрации нарушенного массива составляют 3–5 м/сут. и на 1–2 порядка 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 2 порядка превышает емкость основного массива.

При обосновании проектных решений по осушению рудника недоучет емкости зон обрушения и затопленных карьеров приводит к ошибке при оценке продолжительности осушения верхних горизонтов в 1,5–2 раза.

Некондиционные подземные воды на участках ликвидированных рудников являются источником скрытого (латентного) загрязнения поверхностной гидросферы. Разработка мероприятий, нивелирующих негативное воздействие, базируется на результатах мониторинга и гидрогеомиграционного моделирования. Методы борьбы с загрязнением гидросферы после ликвидации рудников сводятся к локализации очагов загрязнения и очистке загрязненных подземных вод на участках их сосредоточенного выхода при обязательном проведении мониторинга.

Использование постоянно-действующей гидрогеомиграционной модели позволяет своевременно оценивать экологические и гидрогеологические последствия развития ситуации и обосновывать мероприятия по обеспечению безопасности отработки, снижению риска загрязнения подземных и поверхностных вод, выбору мер инженерной защиты при отработке и ликвидации рудников.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды и влиянии факторов среды обитания на здоровье населения Свердловской области в 2009 году. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2009. 378 с.
2. 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 г. Т. 2. С. 490–496.
3. Мироненко В.А. Румынин В.Г. Проблемы гидрогеоэкологии. Монография в 3-х томах. М.: Издательство МГГУ, 1999. 312 с.
4. Гидрогеология СССР. Том XIV. Урал. Уральское территориальное геологическое управление / под ред. В.Ф. Прейс. М.: Недра., 1972. 648 с.
5. 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-Петерб. гос. ун-т, 2010. С. 140–148.
6. Рыбникова Л.С., Фельдман А.Л., Рыбников П.А. Геоэкологические и экономические аспекты защиты гидросферы в районах ликвидируемых рудников Урала // Дальний Восток-2: сб. статей. Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). 2009. № ОВ5. С. 316–329.
7. Фельдман А.Л., Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Оптимизация защиты подземных и поверхностных вод в районах ликвидируемых горнодобывающих предприятий Урала: геоэкологические и экономические аспекты: тезисы докл. шестого международного конгресса «Вода: экология и технология» / «Экватэк-2004» (Москва, 1–4 июня 2004 г.). М.: «Фирма СИБИКО Интрэнэшнл», 2004. С. 221–222.

8. 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 Б.И. Куделина. М.: МАКС Пресс, 2010. С. 200–205.
9. Медноколчеданные месторождения Урала: Геологические условия размещения / В.А. Прокин, В.М. Нечеухин, П.Ф. Сопко и др. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1985. 288 с.
10. Шестаков В.М. Принципы геофизико-экологического мониторинга // Геоэкология. 1999, № 4. С. 362–365.
11. Рыбникова Л.С., Фельдман А.Л., Рыбников П.А. Мониторинг состояния недр в Уральском федеральном округе. Разведка и охрана недр. № 7. 2007. С. 91–94.
12. Фельдман А.Л., Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Мониторинг подземных и поверхностных вод в горнодобывающих районах (на примере Урала) // Будущее гидрогеологии: современные тенденции и перспективы. СПб.: СПбГУ, ВВМ, 2008. С. 298–307.

**Сведения об авторах:**

Рыбникова Людмила Сергеевна, к. г.-м. н., старший научный сотрудник, заведующая сектором гидрогеологических исследований, ФГУП «Российский научно-исследовательский институт комплексного использования и охраны водных ресурсов», г. Екатеринбург, 620049, ул. Мира, 23; e-mail: luserib@mail.ru

Фельдман Андрей Львович, к. г.-м. н., доцент, директор НПиПП «ПАНЭКС», г. Екатеринбург, 620146, ул. Вайнера, 55; e-mail: feldand@yandex.ru

Рыбников Петр Андреевич, к. г.-м. н., научный сотрудник, Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, 620055, ул. Мамина-Сибиряка, 58; e-mail: ribnikoff@yandex.ru