

ГЕОФИЛЬТРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В ОБЛАСТИ ВЛИЯНИЯ ОТРАБАТЫВАЕМЫХ И ЛИКВИДИРУЕМЫХ РУДНИКОВ ГОРНОСКЛАДЧАТОГО УРАЛА

© 2013 г. Л. С. Рыбникова, П. А. Рыбников

Институт горного дела УрО РАН
620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58
E-mail: luserib@mail.ru

Поступила в редакцию 19.03.2012 г.

Рассмотрены закономерности изменения фильтрационных свойств и условий питания подземных вод в области влияния отрабатываемых и ликвидируемых рудников горноскладчатого Урала в естественных и нарушенных условиях. С использованием гидрогеомеханического подхода выполнен анализ процессов формирования фильтрационной зональности массива горных пород в пределах горнопромышленной территории. Разработаны 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 обработки и после ее завершения.

Ключевые слова: *подземные воды, фильтрационные свойства, массив горных пород, геофильтрационная модель, отработка и затопление рудника, напряженно-деформированное состояние, зоны обрушения и сдвижения.*

ВВЕДЕНИЕ

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.

Целью работы является обоснование с использованием гидрогеомеханического подхода фильтраци-

онной зональности подработанного массива в пределах горнопромышленной территории, что 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 (рис. 1).

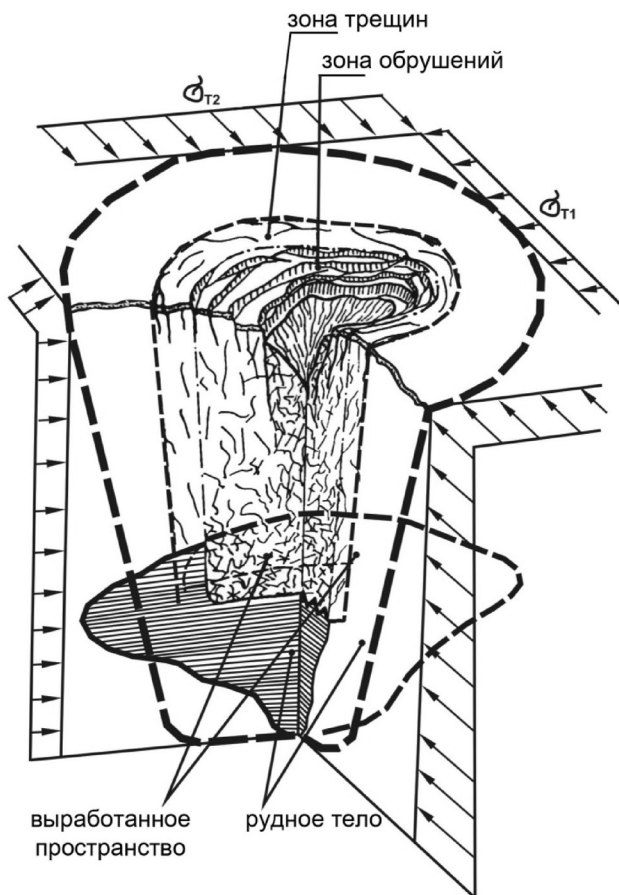


Рис. 1. Схематическая модель сдвижения [13].

В мульде сдвижения различают зоны [5, 6, 13]:

а) *обрушения* – часть мульды, где на земной поверхности происходит образование воронок, провалов, трещин и террас;

б) *трещин* – где происходит разрыв сплошности земной поверхности и образуются трещины (за ее внешнюю границу принимают контур крайних хорошо различимых трещин);

в) *плавных сдвижений* – где земная поверхность подверглась сдвижению без разрыва сплошности.

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 сдвижению, по размеру всегда превышает площадь отработанного пласта (рис. 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 до 15–35 м, зон обрушения и сдвижения площадью в десятки и сотни гектаров [5–7] (рис. 3).

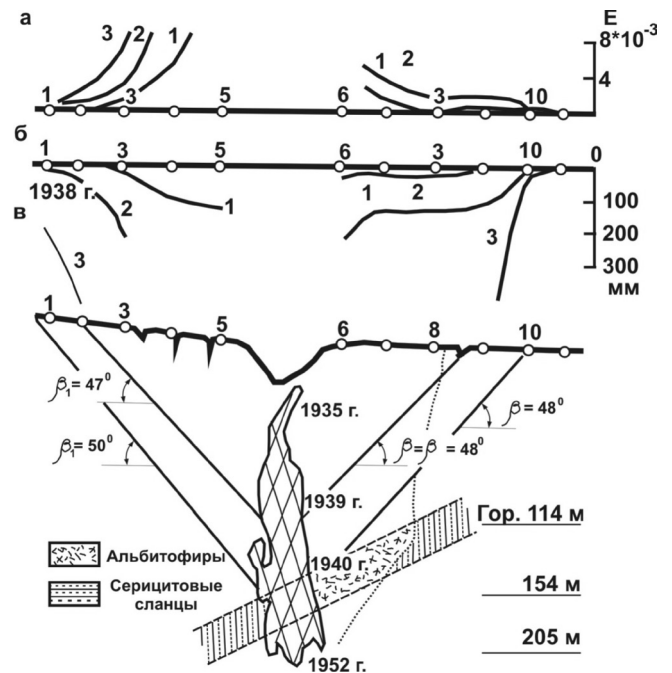


Рис. 2. Сдвиги земной поверхности по профилю линии № 3 Левихинского медноколчеданного месторождения.

а – горизонтальные деформации; б – вертикальные сдвиги; в – вертикальный разрез [6].

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, Тагил-Магнитогорский прогиб, Восточно-Уральское поднятие [4]. В процессе геологического развития территории осадочные породы подверглись интенсивному воздействию орогенных движений, были смяты в складчатые структуры, претерпели метаморфизм, изменены вулканической деятельностью.

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 вулканических пород. Закономерности развития этих зон имеют общие для всего Уральского региона черты: основным коллектором подземных вод является региональная зона трещиноватости коренных пород в верхней части земной коры; маломощный чехол элювиально-делювиальных образований, а также аллювиальные отложения самостоятельного значения не имеют.



Рис. 3. Формирование зон обрушения и сдвижения горных пород на Левихинском медноколчеданном руднике (по данным института УНИПРОМЕДЬ).

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 [2, 4].

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 определяются структурно-фациальными условиями, физическими свойствами и устойчивостью пород к выветриванию. Большое влияние на формирование фильтрационной неоднородности имеют тектонические нарушения и литологические контакты, обеспечивающие 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. Область формирования потока подземных вод определяется в первую очередь геоморфологическими условиями, поскольку, как правило, границы частного подземного водосбора совпадают с поверх-

ностным; 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 [1, 2, 4]. Литологический состав играет определяющую роль в водообильности пород трещинной зоны. Литологические комплексы пород, однотипные в гидрогеологическом отношении, слагают единую разновозрастную толщу – водоносный комплекс. Наиболее водообильны комплексы карбонатных пород.

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 (рис. 4).

Проницаемость массива горных пород в пределах горноскладчатого Урала определяется его трещиноватостью. Так, например, по данным разведочных работ на Левихинской группе медноколчеданных месторождений, массив является чрезвычайно

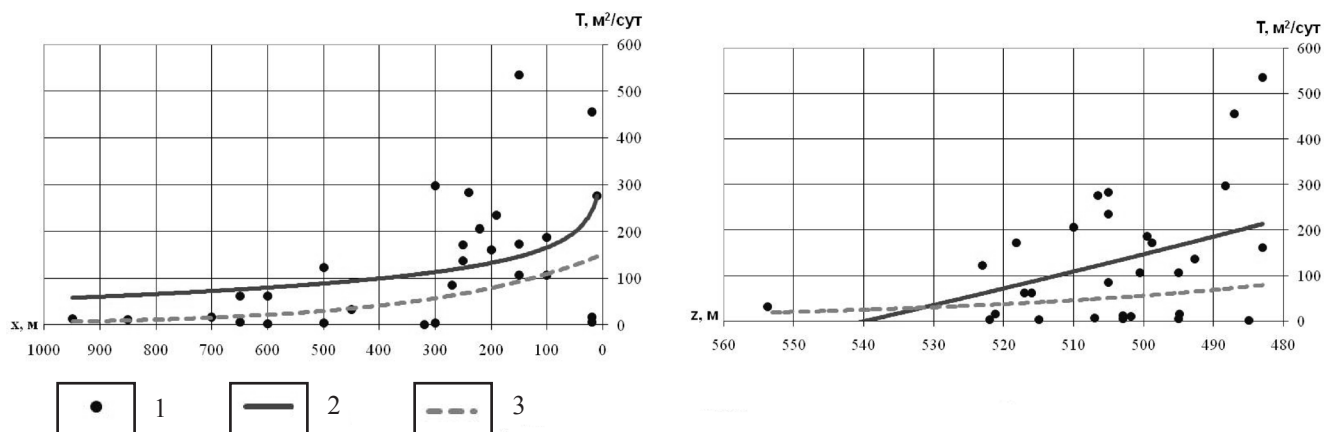


Рис. 4. Зависимость проводимости от расстояния до реки (а) и абсолютной отметки устья скважины (б) (Узельгинское медно-цинковое месторождение) [11].

1 – значения водопроводимости по данным опытно-фильтрационных работ, 2 – логарифмический тренд, 3 – экспоненциальный тренд.

трещиноватом (мелкоблочном). Мелкая трещиноватость образует сетку в виде параллелепипедов и развита в пределах всего массива, трещины имеют длину от 0.5 до 5 м и раскрытие до 1–5 мм. Расчетное раскрытие трещин по Ново-Шемурскому медноколчеданному месторождению (Северный Урал) составляет около 0.1 мм [15]. 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 появляются новые и расширяются естественные нормально-секущие трещины и трещины 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 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 связанных плито-блочных структур с нали-

чием 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. 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 и 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 [8]. 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 эксплуа-

тации 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) [8] зафиксировано значение эксплуатационного модуля 4–6.5 л/(с·км²) (130–205 мм/год) в процессе отработки Гороблагодатского, Высокогорского железорудных месторождений [2, 14], Левихинского медноколчеданного [16]. 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 [3, 16].

Анализ и сопоставление балансовых составляющих в пределах Левихинского рудника (результаты численного моделирования [12, 16]) на моменты отработки (1958 и 2002 гг.) и после прекращения водоотлива (2007 г.) показывают, 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 (табл. 1). 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.

ГЕОФИЛЬТРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

Геофильтрационная схематизация условий формирования потока подземных вод в области влияния отрабатываемых рудников Среднего Урала осуществляется с учетом того, что его пространственная структура и параметры пласта 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 толщи пород (рис. 5): в твердых скальных породах развитие зон деформации затрагивает всю толщу пород [5, 6, 13]; 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 [3].

Трещинная пористость (n) находится в линейной зависимости от раскрытия трещин (b) и плотности трещин (Γ) [1]:

$$n = b\Gamma.$$

Для чисто трещиноватых пород трещинная проницаемость (k) имеет степенную зависимость от трещиноватости [1, 9, 10]:

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

где a – эмпирический коэффициент, $1 < a < 3$; при приблизительно равной вариации логарифмов плотности трещиноватости и раскрытия трещин показатель степени равен 2.0–2.5 [9].

Кроме того, появление дополнительной системы трещин увеличивает проницаемость на 30% [1]. В зоне обрушения проницаемость практически неограниченная [3].

Таблица 1. Изменение составляющих водоотлива (дренажа) на разных этапах развития Левихинского рудника

Год – этап отработки/ликвидации рудника	Расход водоотлива, дренажа (м ³ /сут)	Составляющие водоотлива/дренажа (м ³ /сут)		Модуль подземного стока** л/(с·км ²)
		увеличение инфильтрационного питания	сокращение разгрузки в реки	
1958 – 1-й этап отработки	–3189	2439 (1183)*	740	3.0
2002 – завершающий этап отработки	–6789	3703 (1665)*	3089	5.1
2007 – ликвидация (мокрая консервация)	–2391	2372 (1665)*	0	2.0

Примечание. * – в скобках – в пределах зон обрушения; ** в естественных условиях – 0.88 л/(с·км²).

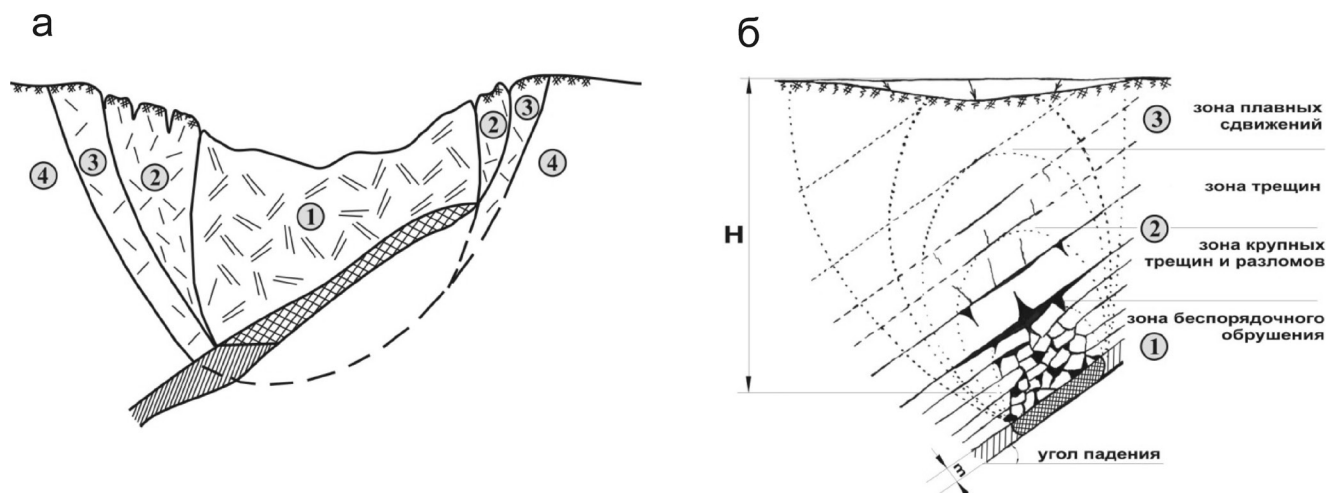


Рис. 5. Модель массива горных пород в области влияния отрабатываемых и ликвидируемых рудников.

а – при неслоистом строении пород; б – при слоистом строении пород.

Таблица 2. Геофильтрационные параметры массива горных пород в области влияния отрабатываемых рудников

№ зоны*	Наименование зоны	Характер трещиноватости	Процесс формирования трещиноватости	Параметры**		
				k_f , м/сут	n , д.ед.	w , мм/год
1	зона обрушения	сквозные каналы и крупные трещины разрыва	появление новых, расширение естественных трещин	$>m \cdot 10^3$	$>p \cdot 10^{-1}$	100–500
2	зона трещин	трещины разрыва и асслоения	увеличение раскрытия трещин; соединение взаимно перпендикулярных систем трещин	$>m \cdot 10^1$	$p \cdot 10^{-1} - p \cdot 10^{-2}$	
3	зона плавных сдвижений	наведенная трещиноватость	раскрытие отдельных трещин	$\geq m$	$\geq p \cdot 10^{-3}$	
4	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

Примечание. * – номер зоны в соответствии с рис. 5; ** – k_f – коэффициент фильтрации; n – пористость (трещиноватость); w – инфильтрационное питание; m, p – значения от 1 до 9.

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 отрабатываемых рудников гор-

носкладчатого Урала выполнена, исходя из предположки (в соответствии с данными Р.Ф. Крушатина, 2000 г.) об увеличении раскрытия трещин во второй зоне примерно в 5–10 раз (табл. 2).

ВЫВОДЫ

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 геоморфо-

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

Статья подготовлена по результатам исследований по конкурсному проекту 12-М-23456-2041 УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Буданов Н.Д. Гидрогеология Урала. М.: Наука, 1964. 304 с.
3. Гидрогеологические исследования в горном деле / Под ред. В.А. Мироненко. М.: Недра, 1976. 352 с.
4. Гидрогеология СССР. Т. XIV. Урал / Ред. В.Ф. Прейс. М.: Недра, 1972. 648 с.
5. Еловских В.М., Крушати́н Р.Ф., Семенов Г.П., Пыхте́ева Н.Ф. Районирование подработанных площадей Дегтярского рудника // Известия вузов. Горный журнал. 1994. № 9–10. С. 118–121.
6. Кузнецов М.А., Акимов А.Г., Кузьмин В.И. Сдвигение горных пород на рудных месторождениях. М.: Недра, 1971. 224 с.
7. Мормиль С.И., Сальников В.И., Амосов Л.А. и др. 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.
8. Оценка обеспеченности эксплуатационными запасами и ресурсами подземных вод населения Свердловской области (II этап), кн. II. М.: ГИДЭК, 2000. 150 с.
9. Поздняков С.П. Стохастическое моделирование гидрогеодинамических процессов. Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. М.: МГУ, 1996. 44 с.
10. Румынин В.Г. Гидрогеомиграционные модели в гидрогеологии. СПб.: Наука, 2011. 1158 с.
11. Рыбников П.А. Методы гидродинамического обоснования водоохранных мероприятий в районе ликвидируемых горнодобывающих предприятий (на примере Межозерного рудника Южного Урала). Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГТУ, 2004. 16 с.
12. 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. 2011. № 2. С. 58–71.
13. Сашурин А.Д. Сдвигение горных пород на рудниках черной металлургии. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 1999. 268 с.
14. Семячков А.И. Фильтрационная неоднородность трещиноватых пород. М.: Горная книга, 2009. 151 с.
15. Тагильцев С.Н. Основы гидрогеомеханического анализа фильтрационной структуры скальных массивов. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург: УГГГА, 2001. 42 с.
16. 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: мат-лы междунар. науч. конф.: К 100-летию со дня рождения Бориса Ивановича Куделина. М.: МАКС Пресс, 2010. С. 200–205.

Рецензент С.Н. Тагильцев

Geofiltration model of the rock mass in the field of influence of developed and liquidated mines in the Urals

L. Rybnikova, P. Rybnikov

Institute of Mining, Urals Branch of RAS

Regularities of filtrational properties changes and conditions of ground waters supply in the field of influence of working and abandoned mines of the Middle Urals under natural and the violated conditions are considered. Processes of formation of filtrational zonality of the rocks massif are analysed within the mining territory with use of a hydrogeomechanical approach. Principles of a geofiltrational schematization of conditions of formation of a stream of underground waters in the field of influence of exploited and abandoned mines of the Middle Urals are developed. They provide the accounting of variability of spatial structure and layer parameters under natural conditions, at a stage of working off and after its end.

Key words: *underground waters, filtrational properties, the massif of rocks, geofiltration model, working off and the flooding of the mine, strained and the deformed condition, roof fall and displacement zones.*