

# ОБОСНОВАНИЕ ГИДРОГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОТРАБОТКИ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Л.С. Рыбникова<sup>1</sup>, П.А. Рыбников<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт горного дела Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия,  
e-mail: luserib@mail.ru.

**Аннотация:** Разработка месторождений полезных ископаемых приводит к изменению гидрогеологических условий и необходимости оценки балансовых составляющих горнопромышленных территорий. Использование методов кучного выщелачивания цианидными растворами повышает требования к доказательству экологической безопасности как самой отработки, так и ее последствий. Для обоснования регламента отработки золоторудного месторождения на Среднем Урале, определения направления, скорости и расходов подземных вод, оценки вероятности загрязнения гидросферы, в том числе на постэксплуатационном этапе, использовано гидрогеомиграционное моделирование. Для обоснования параметров двухпластовой модели были проведены кустовая и одиночные откачки. При отработке карьерного поля происходит перераспределение потоков подземных вод в бассейне стока. На начальных этапах водоотлива величина его будет достигать почти 4 тыс. м<sup>3</sup>/сут, постепенно снижаясь в 2 раза через 10 лет. В структуре водоотлива ведущее значение на первых этапах играет сработка емкости (80%), к концу отработки возрастает доля привлекаемых ресурсов из заболоченной долины реки (60%). После завершения отработки происходит перестройка структуры фильтрационного потока и соответственно изменяется направление движения языка загрязнения. Показано, что даже при реализации наиболее неблагоприятных аварийных сценариев утечек на площадке кучного выщелачивания загрязнение сосредоточено под площадкой и не достигнет карьера при его отработке с водоотливом. На постэксплуатационном этапе происходит разбавление загрязнения в десятки миллионов раз. С использованием численного моделирования обосновано, что отработка месторождения является экологически безопасной.

**Ключевые слова:** кора выветривания, карьер, кучное выщелачивание, месторождение золота, отработка, постэксплуатационный этап, балансовые составляющие, аварийные ситуации, гидрогеомиграционное моделирование.

**Благодарность:** Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ 20-45-660014.

**Для цитирования:** Рыбникова Л. С., Рыбников П. А. Обоснование гидрогеоэкологической безопасности отработки золоторудных месторождений кор выветривания с применением метода кучного выщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 5. – С. 25–38. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_5\_0\_25.

---

## Hydro-geo-ecological safety of gold extraction from residuum by heap leaching

L.S. Rybnikova<sup>1</sup>, P.A. Rybnikov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Mining, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia,  
e-mail: luserib@mail.ru

---

**Abstract:** Mineral mining alters conditions of hydrogeology and leads to the need of reappraisal of proven reserves in the mining areas. The use of the cyanide heap leaching methods call for the exclusive validation standards of ecological safety both of the recovery and its aftereffects. For the purpose of the gold mining procedure justification in the Middle Urals, determination of groundwater flow direction velocity and rates, as well as the estimate of probability of the hydrosphere pollution, including the post-operation phase, the hydro-geo-migration modeling has been implemented. The parameters of the two-layer model are justified based on the actual data of cluster-well and single-well pumping. During open pit mining, groundwater flows undergo redistribution in the basin of a discharge. First, the drainage flow rate will reach 4 thousand cubic meter per day, and it will gradually decrease by 2 times in 10 years. In the structure of water drainage, the dominant part is taken by drawdown firstly (80%), and the percentage of the resources from the waterlogged river valley grows later on (60%). After mining completion, the flow structure changes and the direction of the pollution finger progression changes accordingly. It is shown that even in case of the worst scenarios connected with accidental leakages at the heap leaching sites, pollution concentrates under the site and never reaches the open pit mine when it is mined with water drainage. In the post-operation phase, pollution gets diluted by tens millions of times. Thus, the numerical modeling has validated the ecological safety of mining.

**Key words:** residuum, open pit mine, heap leaching, gold ore deposit, mining, post-operation phase, proven reserves components, accident, hydro-geo-migration modeling.

**Acknowledgements:** The studies were supported by the Russian Foundation for Basic Research, Grant No. 20-45-660014.

**For citation:** Rybnikova L. S., Rybnikov P. A. Hydro-geo-ecological safety of gold extraction from residuum by heap leaching. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(5):25-38. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_5\_0\_25.

---

### Введение

Добыча полезных ископаемых сопровождается осушением водовмещающих пород, формированием депрессионных воронок в районах обрабатываемых объектов, перемещением больших масс горных пород, образованием провалов над выработанным пространством [1, 2]. Эти процессы приводят к существенным изменениям фильтрационных характеристик водоносных горизонтов по сравнению с естественными условиями

[3]. Необходимая точность прогноза при оценке балансовых составляющих вод, участвующих в формировании потоков подземных вод как в естественных условиях, так и на разных этапах жизненного цикла горнодобывающего предприятия, может быть достигнута путем воспроизведения методами математического (гидрогеомиграционного) моделирования истории обработки месторождений [4, 5]. Формирование поверхностных и подземных вод в районах,

нарушенных горнодобывающей деятельностью, определяется множеством процессов природного и техногенного характера: это конвективный и диффузионный перенос, растворение, окисление, сорбция, осаждение, концентрирование (в результате испарения, вымораживания, капиллярного поднятия). Превалирующее влияние техногенных процессов возникает с момента образования отвалов пустых пород и некондиционных руд, шламонакопителей, рудных штабелей при кучном выщелачивании [6, 7]. Остановка водоотлива является причиной перестройки гидродинамического баланса горнопромышленной территории, изменения окислительно-восстановительных условий, инициирует развитие новых гидрогеохимических процессов [8].

Целью работы является гидрогеологическое обоснование регламента отработки золоторудного месторождения на Среднем Урале и экологической безопасности использования методов кучного выщелачивания как на активной стадии при работающем водоотливе, так и после завершения добычи на постэксплуатационном этапе.

### **Задачи работы**

Определение балансовых составляющих, направления, скорости и расходов потоков подземных вод в естественных условиях, при работающем водоотливе, на постэксплуатационном этапе; оценка степени загрязнения гидросферы цианидами на всех этапах жизненного цикла горнодобывающего предприятия, в том числе на постэксплуатационном этапе.

### **Материалы и методы**

Гидрогеомиграционное моделирование позволяет получить балансовые характеристики локальных бассейнов подземного стока, в пределах которых рас-

положены горные объекты на разных этапах жизненного цикла горнопромышленного предприятия. На этапе отработки это формирование депрессионной воронки под действием шахтного и/или карьерного водоотлива; на постэксплуатационном этапе это заполнение депрессионной воронки после прекращения водоотлива, затопление карьеров и шахт, формирование участков подтопления, очагов разгрузки загрязненных подземных вод.

Исходными данными для гидрогеомиграционного моделирования являются следующие виды информации: геоморфологическая; гидрологическая; гидрометеорологическая; геологическая; гидрогеологическая; горно-технологическая; постэксплуатационная (табл. 1).

Процесс моделирования состоит в том, что решается система уравнений в частных производных методом конечных разностей. Для этого используются специализированные программные продукты, такие как ModelMuse (разработка Геологической службы США, USGS), который представляет собой пре- и постграфический процессор для программных кодов ModFlow, MT3D, MODPath и т.д. [9, 10]. Эти программные коды являются общепризнанными высокоэффективными средствами моделирования как в мире, так и в России [11, 12].

Результаты геофильтрационного моделирования представляются в виде балансовых таблиц и карт напоров, расходов, концентраций подземных вод на определенные периоды (естественные условия, отработка, настоящее время, реализация инженерных мероприятий) на всю площадь модели конкретного бассейна подземного стока. При необходимости детального анализа распределения уровней и концентраций подземных вод, балансовых составляющих готовится врезка на эту область. Оценка эф-

Таблица 1

**Принципиальные составляющие гидрогеомиграционного моделирования**  
**Basic components of hydro-geo-migration modeling**

№ пп	Вид информации	Показатели	Гидрогеомиграционная схематизация	Вид задачи
1	Геоморфологическая	Модель рельефа, абсолютные отметки поверхности земли, водотоков, водоемов	Внешние границы Внутренние границы Сеточная разбивка	Естественные условия Отработка Современные условия Прогноз Реализация инженерных мероприятий
2	Гидрологическая	Уровни, расходы, качество рек, родников, модуль поверхностного стока	Параметризация модели	
3	Гидрометеорологическая	Осадки, температура, коэффициент питания	Параметризация модели	
4	Геологическая	Геологическое строение, структурно-тектоническое положение, характер, мощность, глубина залегания полезного ископаемого, состав вмещающих пород и рудных тел	Геометризация по вертикали	
5	Гидрогеологическая	Водоносные горизонты, разделяющие толщи, мощность, глубина залегания, уровни, напоры, коэффициент фильтрации, параметр перетекания, трещиноватость, эффективная пористость, емкость, состав подземных вод	Внешние границы Внутренние границы Сеточная разбивка Параметризация модели Геометризация по вертикали	
6	Горно-технологическая	Глубина, этапы, продолжительность, способ отработки (открытый, подземный, с обрушением, закладкой)	Параметризация модели Геометризация по вертикали Внутренние границы	Отработка Современные условия Прогноз
7	Пост-эксплуатационная	Скорость затопления Дата и место выхода шахтных вод на поверхность Расход разгрузки Состав подземных вод Сезонность		Прогноз Реализация инженерных мероприятий

эффективности реализации инженерных мероприятий осуществляется путем анализа изменения балансовых составляющих вод, участвующих в формировании состава подземных вод в настоящее время и при осуществлении мероприятий.

Изложенная методика гидрогеомиграционного моделирования была реализована для обоснования экологической безопасности отработки золоторудного месторождения кор выветривания с при-

менением метода кучного выщелачивания (рис. 1, см. Приложение, с. 37).

Проектируемый карьер расположен практически в центре частного водосбора р. К., в верховьях лога. На севере водосборной площади на приводораздельном пространстве находится болото Л., заболоченность развита и в долине р. К. (рис. 1).

Для оценки водопритоков в проектируемый карьер, формирующихся за

счет подземных вод, площади депрессионной воронки, определения необходимого и достаточного объема водоотлива, обеспечивающего безопасную добычу полезного ископаемого, необходимо оценить балансовые составляющие водосборной площади, в пределах которой расположен проектируемый карьер.

Для схематизации гидрогеологических условий была построена цифровая модель рельефа района масштаба 1:25 000, которая в дальнейшем использовалась для моделирования (см. рис. 1). Площадь водосбора составляет 22 км<sup>2</sup>.

Отметки рельефа изменяются от 110 м (пойма р. К.) до 265 м в северо-западной части площади, разность высотных отметок поверхности участка составляет 155 м. Общее понижение рельефа происходит в восточном направлении к долине р. К.

Геотриационная модель представляет собой двухпластовую плано-пространственную модель фильтрации подземных вод. Верхний пласт приурочен к коре выветривания мощностью от 20 до 40 м, нижний — к зоне трещиноватости коренных пород мощностью 30 м.

Фильтрационный поток исследуемой области на площади размером 11 км \* 7 км моделировался равномерной прямоугольной сеткой с шагом 50 м, состоящей из 220\*140 = 30 800 блоков.

Фильтрационные свойства горных пород изучены по данным одиночных откачек и одной кустовой откачки. Первый пласт безнапорный, его коэффициент фильтрации задавался в зависимости от геоморфологического положения и изменялся от 1 м/сут на водораздельных пространствах до 4 м/сут в осевой части лога и в долине реки. Проводимость пересчитывается в каждом расчетном блоке в соответствии с мощностью пласта. Второй пласт напорно-безнапорный с переменной проводимостью,

его коэффициент фильтрации зонировался по такой же схеме от 0,5 м/сут до 3 м/сут.

Горные выработки реализованы на модели посредством задания граничного условия 3 рода (ГУ III дрена), которое позволяет имитировать поддержание уровня подземных вод, отвечающего отметке дрены, через дополнительное фильтрационное сопротивление  $k_d$ . Отметки 190 м задавались по проектируемому дну карьера, коэффициент проницаемости дрены задавался величиной 50 м<sup>2</sup>/сут.

### Результаты калибровки модели

Для доказательства адекватности модели природным условиям и уточнения геотриационных параметров выполняется решение обратных задач геотриационной фильтрации. Критерием достоверности решения является положение уровней подземных вод, не противоречащее природным условиям. Результаты решения обратных задач приведены на рис. 2, а (см. Приложение, с. 37) и в табл. 2.

Среднемноголетняя величина инфильтрационного питания на территориях с естественным режимом подземных вод характеризуется модулем подземного стока. По результатам калибровки модели в естественных условиях значение модуля было принято величиной 0,25 л/с·км<sup>2</sup>, эксплуатационный модуль составил 1,25 л/с·км<sup>2</sup> с учетом привлекаемых ресурсов из заболоченной долины реки и из болота. В соответствии с результатами работы по оценке обеспеченности модуль здесь изменяется от 0,75 л/с·км<sup>2</sup> до 1,75 л/с·км<sup>2</sup> [13]. На площади водосбора за счет инфильтрационного питания формируется поток подземных вод (естественные ресурсы) в объеме 493 м<sup>3</sup>/сут, который разгружается в заболоченной долине реки. Уровни подземных вод понижаются от 233 м на водораздельных пространствах до 214 м

Таблица 2

**Балансовые составляющие водосбора по этапам (+ приток, – отток, м<sup>3</sup>/сут)**  
**Underground catchment components by stages (+ inflow, – outflow, m<sup>3</sup>/day)**

Составляющие баланса по этапам	Естественные условия		Отработка									
			6 мес.		12 мес.		24 мес.		48 мес.		стационар	
	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
Инфильтрация	493		493		493		493		493		493	
Реки/болота		493	242		787		1315		1666		1762	
Емкость			3215		2182		1181		485			
Водоотлив				3951		3463		2989		2645		2255
Всего	493	493	3950	3951	3462	3463	2989	2989	2644	2645	2255	2255

у реки, в районе проектируемого карьера их отметки составляют 218,5 м, они залегают на глубине 19,96 – 14,05 м, что соответствует фактически замеренным значениям.

На прогнозной модели реализованы стационарная и нестационарные задачи (на 0,5, 1, 2 и 4 года), целью которых было исследование и анализ процессов карьерного водопонижения и их последствий. Результаты решения представлены в табл. 2 и на рис. 2, б.

При отработке карьера происходит перераспределение потоков подземных вод в бассейне стока. На начальных этапах водоотлива величина его будет достигать почти 4 тыс. м<sup>3</sup>/сут, постепенно снижаясь до 2645 м<sup>3</sup>/сут через 4 года и до 2255 м<sup>3</sup>/сут через 10 лет. В структуре водоотлива ведущее значение на первых этапах играет сброс емкости (80%), к концу 4-го года возрастает доля привлекаемых ресурсов из заболоченной долины реки (60%).

### Обсуждение результатов

Для переработки руды месторождения принята технология кучного выщелачивания цианидными растворами с последующей цементацией золота на цинковый порошок.

На рудных штабелях агломерированная руда укладывается на специально

подготовленное противотрационной основой, исключающее проникновение технологических растворов в грунтовые воды. Выщелачивание золота из агломерированной руды осуществляется в фильтрационном режиме слабыми (менее 0,6 – 1 г/л) щелочными растворами цианида натрия с защитной щелочью, что исключает гидролиз цианида натрия и образование циановодорода.

Подача раствора на рудные штабели предусматривается по методу капельного орошения.

Основными источниками загрязнения окружающей среды при гидрометаллургической переработке руд являются аварийные утечки. Согласно технологическому регламенту продолжительность утечки не должна превышать 1 – 3 сут. В табл. 3 приведены общая площадь выщелачивания и среднегодовой объем растворов в зависимости от бортового содержания золота. Исходя из этого, была рассчитана величина модуля питания в пределах площадки кучного выщелачивания, которая составляет 250 – 268 л/с·км<sup>2</sup> (табл. 3).

Зона аэрации в пределах участка имеет мощность до 21 м и сложена глинисто-щебнистыми образованиями коры выветривания и выветрелыми сланцами. Время вертикальной фильтрации ( $t_0$ ) возможного загрязнения до водонос-

Таблица 3

**Параметры орошения по вариантам бортового содержания золота**  
**Sprinkler irrigation parameters based on gold cutoff grades**

Наименование	Ед. изм.	Бортовое содержание золота, г/т		
		0,5	0,3	0,1
Общая площадь выщелачивания	тыс. м <sup>2</sup>	33,4	45,93	71,09
Среднегодовой объем растворов на влагонасыщение и выщелачивание руды	тыс. м <sup>3</sup> в год	277,55	387,33	600,12
Модуль питания	л/с·км <sup>2</sup>	250	267	268
	м/сут	0,022	0,023	0,023

ного горизонта через зону аэрации определяется по формуле [14]

$$t_0 = \frac{n_a m_0}{\sqrt[3]{\varepsilon^2 k}},$$

где  $n_a$  — активная пористость пород зоны аэрации, д.ед.;  $m_0$  — мощность зоны аэрации, м;  $k$  — коэффициент фильтрации пород зоны аэрации, м/сут;  $\varepsilon$  — интенсивность инфильтрации (модуль питания), м/сут.

Величина  $\varepsilon$  принимается в соответствии с табл. 3.

Расчетные параметры и результаты расчетов и для участка кучного выщелачивания приведены в табл. 4. Время просачивания составит 32 сут. Этого будет достаточно для обнаружения, локализации и устранения аварийной ситуации.

Для оценки скорости, ареала и времени возможного распространения загрязнения в водоносном горизонте выполнено гидрогеомиграционное моделирование. Для получения поля ско-

ростей подземных вод использовалась геофильтрационная модель, разработанная на этапе оценки водопритоков в карьерную выработку. Активная пористость верхнего пласта принята 0,2, нижнего 0,05.

Задача решалась в относительных концентрациях

$$\bar{C} = \frac{C - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}},$$

где  $C$  — текущая концентрация,  $C_{\min}$ ,  $C_{\max}$  — минимальная и максимальная концентрации. На участке выщелачивания принята максимальная концентрация  $C_{\max} = 1$  г/л. На остальной территории задавалось  $C_{\min} = 0$ .

Миграционная задача решалась в системе МТ3D. Предполагалось, что загрязнение распространяется только конвективным переносом, диффузия и дисперсия не учитывались. Утечки на площадке кучного выщелачивания задавались через увеличенное значение инфильтрационного питания (см. табл. 3) с единичной относительной концентра-

Таблица 4

**Расчет времени просачивания загрязнения до водоносного горизонта**  
**Calculation of time of pollution seepage down to aquifer**

Породы зоны аэрации	Мощность аэрации $m_0$ , м	Активная пористость $n_a$ , д.ед.	Коэффициент фильтрации $k$ , м/сут	Модуль питания $\varepsilon$		Время просачивания загрязнения $t_0$ , сут
				л/с·км <sup>2</sup>	м/сут	
Глинисто-щебнистые образования коры выветривания, выветрелые сланцы	21	0,2	4	272	0,024	32



цией, значение фоновой концентрации было принято равным нулю.

Рассматривался следующий неблагоприятный сценарий:

- первый год — работает карьерный водоотлив, утечек на площадке кучного выщелачивания нет;
- на протяжении работы в течение всего второго года отработки ежеквартально в течение 5 сут происходит полная утечка технологических растворов;
- до конца отработки утечек не происходит.

Отслеживание фронта загрязнения продолжается 10 лет после завершения отработки.

Миграционная задача решалась в системе MT3D, предполагалось, что загрязнение от участка кучного выщелачивания распространяется только конвективным переносом, диффузия и дисперсия не учитывались.

В первом модельном пласте под площадкой кучного выщелачивания после всех утечек относительная концентрация не превышает  $6 \times 10^{-2}$ , а фронт загрязнения, околнуренный по концентрации  $1 \times 10^{-10}$ , не превышает  $750 \text{ м} \times 300 \text{ м}$  после первой утечки,  $1050 \text{ м} \times 600 \text{ м}$  после последней. На конец отработки карьера «язык» загрязнения (околнуренный по

относительной концентрации  $1 \times 10^{-10}$ ) будет вытянут на 1000 м от площадки кучного выщелачивания в сторону карьера, расстояние между карьером и «языком» будет 750 м (рис. 3, а, см. Приложение, с. 38). В следующие за отработкой 10 лет фронт медленно мигрирует в сторону ближайшей балки и речной сети, причем повышенные концентрации сохраняются в пределах площадки кучного выщелачивания, постепенно снижаясь (рис. 3, б). Во втором модельном пласте будет наблюдаться схожая ситуация, но с более низкими концентрациями.

За время работы карьера фронт загрязнения не достигает ни контура карьера, ни поверхностных водотоков. На графиках изменения концентраций в контрольных точках (рис. 3), расположенных между площадкой кучного выщелачивания и карьером, видно прохождение фронта загрязнения в первом и втором пластах: в контрольных точках 1 и 2, расположенных на расстоянии 250 м от площадки, максимальная концентрация  $5 - 7 \times 10^{-4}$  будет наблюдаться через 2200 сут после начала утечек (рис. 4), снижаясь в дальнейшем до  $2 - 4 \times 10^{-4}$ . В наблюдательных точках 3 и 4, расположенных в 500 м от площадки,

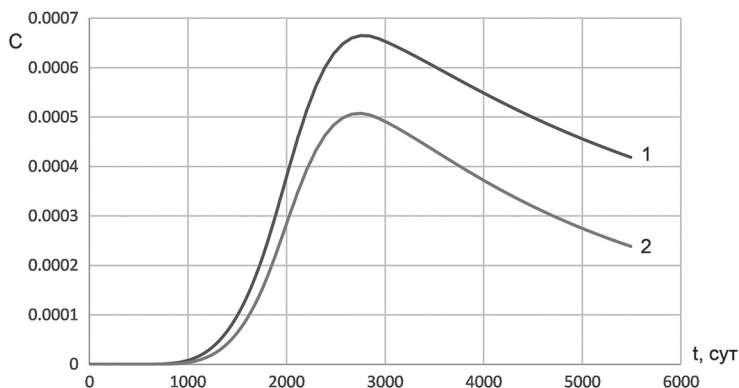


Рис. 4. График изменения относительной концентрации в контрольных точках 1 (первый пласт, линия 1) и 2 (второй пласт, линия 2)

Fig. 4. Change in relative concentration at check points 1 (stratum 1, line 1) and 2 (stratum 2, line 2)



максимальная концентрация  $1 - 5 \times 10^{-6}$  будет наблюдаться через 2400 сут после начала утечек, снижаясь в дальнейшем до  $0,5 - 2 \times 10^{-6}$ . В точках 5 и 6, расположенных на расстоянии 500 м от площадки кучного выщелачивания в сторону речной сети, концентрации не превышают  $1 \times 10^{-8}$  через 10 лет после окончания отработки карьера.

Анализ балансовых составляющих потоков подземных вод на разных этапах освоения позволяет утверждать, что за время работы карьера и после прекращения водоотлива благодаря разбавлению за счет инфильтрации атмосферных осадков фронт загрязнения не достигает ни контура карьера, ни поверхностных водотоков.

Решение прогнозных миграционных задач показало, что даже при наиболее неблагоприятном сценарии — периодических утечках всего объема выщелачиваемого раствора 4 раза за год, загрязнение подземных вод имеет локальный характер: относительные концентрации под площадкой не превышают  $6 \times 10^{-2}$ , фронт загрязнения за 4 года не достигает контуров карьера, после окончания отработки фронт медленно движется в сторону речной сети, при этом разбавление достигает десятков миллионов раз.

Требования к мониторингу. Для контроля распространения возможного загрязнения рекомендуется организовать наблюдательную сеть, состоящую из 6 скважин (см. рис. 3): три на кору выветривания, глубиной 40 м; три на коренные породы, глубиной 60—70 м. Еще один куст скважин необходимо оборудовать в непосредственной близости к участку кучного выщелачивания. После запуска площадки кучного выщелачивания необходимо ежемесячно проводить прокачку скважин и отбор проб воды на расширенный перечень компонентов, включая цианиды.

## Выводы

1. С использованием гидрогеоимитационного моделирования выполнено гидрогеологическое обоснование регламента отработки золоторудного месторождения на Среднем Урале и экологической безопасности использования методов кучного выщелачивания как на активной стадии при работающем водоотливе, так и после завершения добычи на постэксплуатационном этапе.

2. Для определения водопритоков в проектируемый карьер, формирующихся за счет подземных вод, площади депрессионной воронки, определения необходимого и достаточного объема водоотлива, обеспечивающего безопасную добычу полезного ископаемого, оценены балансовые составляющие водосборной площади, в пределах которой расположен проектируемый объект. При отработке карьерного поля происходит перераспределение потоков подземных вод в бассейне стока. На начальных этапах величина водоотлива будет достигать почти 4 тыс. м<sup>3</sup>/сут, постепенно снижаясь до 2645 м<sup>3</sup>/сут через 4 года и до 2255 м<sup>3</sup>/сут через 10 лет. В структуре водоотлива ведущее значение на первых этапах играет сработка емкости (80%), к концу отработки возрастает доля привлекаемых ресурсов из заболоченной долины реки (60%).

3. Для переработки руды месторождения принята технология кучного выщелачивания цианидными растворами с последующей цементацией золота на цинковый порошок. Основными источниками загрязнения окружающей среды при гидрометаллургической переработке руд являются аварийные утечки. Величина модуля питания в пределах площадки кучного выщелачивания рассчитана исходя из общей площади выщелачивания и среднегодового объема растворов в зависимости от бортового содержания золота. Она составила

272 л/с·км<sup>2</sup> при эксплуатационном модуле подземного стока 1,25 л/с·км<sup>2</sup>.

4. Зона аэрации в пределах участка имеет мощность до 21 м и сложена глинисто-щебнистыми образованиями коры выветривания и выветрелыми сланцами. Время вертикальной фильтрации загрязнения до водоносного горизонта через зону аэрации составит 32 сут. Этого времени достаточно, чтобы обнаружить и устранить аварийную ситуацию.

5. Оценка возможного распространения загрязнения в водоносном горизонте выполнялась исходя из предположения, что загрязнение распространяется только конвективным переносом, диффузия и дисперсия не учитывались. Утечки на площадке кучного выщелачивания задавались через увеличенное значение инфильтрационного питания с единичной относительной концентрацией, значение фоновой концентрации было принято равным нулю. Рассматривался следующий неблагоприятный сценарий: первый год — работает карьерный водоотлив, утечек на площадке кучного выщелачивания нет; на протяжении

второго года отработки ежеквартально в течение 5 сут происходит полная утечка технологических растворов; до конца отработки утечек не происходит.

На конец отработки «язык» загрязнения (оконтуренный по относительной концентрации  $1 \times 10^{-10}$ ) будет вытянут на 1000 м от площадки кучного выщелачивания в сторону карьера, расстояние между карьером и «языком» будет 750 м. В следующие за отработкой 10 лет фронт медленно мигрирует в сторону ближайшей балки и речной сети.

Решение прогнозных миграционных задач показало, что даже при наиболее неблагоприятном сценарии — периодических утечках всего объема выщелачивающего раствора 4 раза за год, загрязнение подземных вод имеет локальный характер: относительные концентрации под площадкой не превышают  $6 \times 10^{-2}$ , фронт загрязнения за 4 года не достигает контуров карьера. На постэксплуатационном этапе фронт медленно движется в сторону речной сети, существенно разбавляясь в десятки миллионов раз.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хохряков А. В., Ларионова И. В., Москвина О. А., Цейтлин Е. М. Системный подход к обеспечению экологической безопасности в горной промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3-1. — С. 501–517. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-501-517.

2. Корнилков С. В., Антонинова Н. Ю., Панжин А. А., Шубина Л. А., Исаков С. В. О подходах к геоинформационному мониторингу с целью оценки динамики формирования горных предприятий как природно-технологических систем // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2020. — № 8. — С. 41–51. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-41-51.

3. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А. Проблемы самореабилитации гидросферы и очистки шахтных вод на постэксплуатационном этапе (на примере Левихинского рудника, Средний Урал) // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3-1. — С. 488–500. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-488-500.

4. Самарцев В. Н., Поздняков С. П. Опыт калибровки геофильтрационной модели берегового водозабора путем совместного использования данных опытно-фильтрационных работ и результатов мониторинга в период эксплуатации // Инженерная геология. — 2017. — № 3. — С. 36–43.

5. Ivanov P., Davis P., Sizov N., Pozdniakov S. Use of groundwater level fluctuations near an operating water supply well to estimate aquifer transmissivity // Ground Water. 2021, vol. 59, no. 1, pp. 49–58. DOI: 10.1111/gwat.13018.

6. Schneider P., Wolkersdorfer C. Dimensions of water management in the extractive industries / *Sustainable Industrial Water Use – Perspectives, Incentives, and Tools*. 2021, pp. 73 – 87. DOI: 10.2166/9781789060676\_0073.

7. Wolkersdorfer C., Nordstrom D. K., Beckie R., Cicerone D. S., Elliot T., Edraki M., Valente T. M., França S. C. A., Kumar P., Oyarzún Lucero R. A. and Soler A. I. G. Guidance for the integrated use of hydrological, geochemical, and isotopic tools in mining operations // *Mine Water and the Environment*. 2020, vol. 39, no. 2, pp. 204 – 228. DOI: 10.1007/s10230-020-00666-x.

8. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А. Закономерности формирования качества подземных вод на отработанных медноколчеданных рудниках Левихинского рудного поля (Средний Урал, Россия) // *Геохимия*. – 2019. – Т. 64. – № 3. – С. 282 – 299. DOI: 10.31857/S0016-7525643282-299.

9. Chiang W. H., Kinzelbach W. 3D-Groundwater Modeling with PMWIN. 1st edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. 2001, 346 p.

10. Zheng C., Wang P. P. MT3DMS: A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. Documentation and User's Guide. Report No.: SERDP-99-1. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, 1999.

11. Winston R. B. ModelMuse Version 4: a graphical user interface for MODFLOW 6 / Scientific Investigations Report 2019-5036. 2019, 10 p. DOI: 10.3133/sir20195036.

12. White J. T., Foster L., Fienen M. N., Winterle J. R. Toward reproducible environmental modeling for decision support: A worked example / *Frontiers in Earth Science, Hydrosphere*. 2020. DOI: 10.3389/feart.2020.00050.

13. Язвин Л. С. Оценка прогнозных ресурсов питьевых подземных вод и обеспеченность населения России подземными водами для хозяйственно-питьевого водоснабжения // *Разведка и охрана недр*. – 2003. – № 10.

14. Рекомендации по гидрогеологическим расчетам для определения границ 2 и 3 поясов зон санитарной охраны подземных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения. – М.: ВНИИ «ВОДГЕО», 1983. – 103 с. **MIAB**

## REFERENCES

1. Khokhryakov A. V., Larionova I. V., Moskvina O. A., Tseitlin E. M. A systematic approach to ensuring environmental safety in the mining industry. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3-1, pp. 501 – 517. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-501-517.

2. Kornilkov S. V., Antoninova N. Iu., Panzhin A. A., Shubina L. A., Isakov S. V. Specifying the approaches to geoinformation monitoring to assess the development dynamics of mining enterprises as natural-technological systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2020, no. 8, pp. 41 – 51. [In Russ]. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-41-51.

3. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A. Problems of self-rehabilitation of the hydrosphere and mine water purification at the post-operational stage (on the example of the Levikhinsky mine, Middle Urals). *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 3-1, pp. 488 – 500. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-488-500.

4. Samartsev V. N., Pozdnyakov S. P. Experience in calibration of the geofiltration model of coastal water intake by sharing data from pilot filtration works and monitoring results during operation. *Inzhenernaya geologiya*. 2017, no. 3, pp. 36 – 43. [In Russ].

5. Ivanov P., Davis P., Sizov N., Pozdniakov S. Use of groundwater level fluctuations near an operating water supply well to estimate aquifer transmissivity. *Ground Water*. 2021, vol. 59, no. 1, pp. 49 – 58. DOI: 10.1111/gwat.13018.

6. Schneider P., Wolkersdorfer C. Dimensions of water management in the extractive industries. *Sustainable Industrial Water Use – Perspectives, Incentives, and Tools*. 2021, pp. 73 – 87. DOI: 10.2166/9781789060676\_0073.

7. Wolkersdorfer C., Nordstrom D. K., Beckie R., Cicerone D. S., Elliot T., Edraki M., Valente T. M., França S. C. A., Kumar P., Oyarzún Lucero R. A. and Soler A. I. G. Guidance

for the integrated use of hydrological, geochemical, and isotopic tools in mining operations. *Mine Water and the Environment*. 2020, vol. 39, no. 2, pp. 204–228. DOI: 10.1007/s10230-020-00666-x.

8. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A. Regularities in the evolution of groundwater quality at abandoned copper sulfide mines at the Levikha ore field, Central Urals, Russia. *Geokhimiya*. 2019, vol. 64, no. 3, pp. 282–299. DOI: 10.31857/S0016-7525643282-299.

9. Chiang W. H., Kinzelbach W. *3D-Groundwater Modeling with PMWIN*. 1st edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. 2001, 346 p.

10. Zheng C., Wang P. P. *MT3DMS: A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems*. Documentation and User's Guide. Report No.: SERDP-99-1. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, 1999.

11. Winston R. B. *ModelMuse Version 4: a graphical user interface for MODFLOW 6*. Scientific Investigations Report 2019-5036. 2019, 10 p. DOI: 10.3133/sir20195036.

12. White J. T., Foster L., Fienen M. N., Winterle J. R. Toward reproducible environmental modeling for decision support: A worked example. *Frontiers in Earth Science, Hydrosphere*. 2020. DOI: 10.3389/feart.2020.00050.

13. Yazvin L. S. Estimation of forecast resources of drinking groundwater and provision of the population of Russia with groundwater for domestic drinking water supply. *Prospect and protection of mineral resources*. 2003, no. 10. [In Russ].

14. *Rekomendatsii po gidrogeologicheskim raschetam dlya opredeleniya granits 2 i 3 poyasov zon sanitarnoy okhrany podzemnykh istochnikov khozyaystvenno-pit'evogo vodosnabzheniya* [Recommendations on hydrogeological calculations for determining the boundaries of zones 2 and 3 of sanitary protection zones of underground sources of household and drinking water supply], Moscow, VNII «VODGEO», 1983, 103 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Рыбникова Людмила Сергеевна*<sup>1</sup> — д-р геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник, e-mail: luserib@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4221-7879,

*Рыбников Петр Андреевич*<sup>1</sup> — канд. геол.-минерал. наук, доцент, e-mail: ribnikoff@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-7829-5035,

<sup>1</sup> Институт горного дела Уральского отделения РАН.

**Для контактов:** Рыбникова Л.С., e-mail: luserib@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*L.S. Rybnikova*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Geol. Mineral.), Chief Researcher, e-mail: luserib@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4221-7879,

*P.A. Rybnikov*<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Assistant Professor, e-mail: ribnikoff@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-7829-5035,

<sup>1</sup> Institute of Mining, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 620075, Ekaterinburg, Russia.

**Corresponding author:** L.S. Rybnikova, e-mail: luserib@mail.ru.

Получена редакцией 01.11.2021; получена после рецензии 24.02.2022; принята к печати 10.04.2022.

Received by the editors 01.11.2021; received after the review 24.02.2022; accepted for printing 10.04.2022.

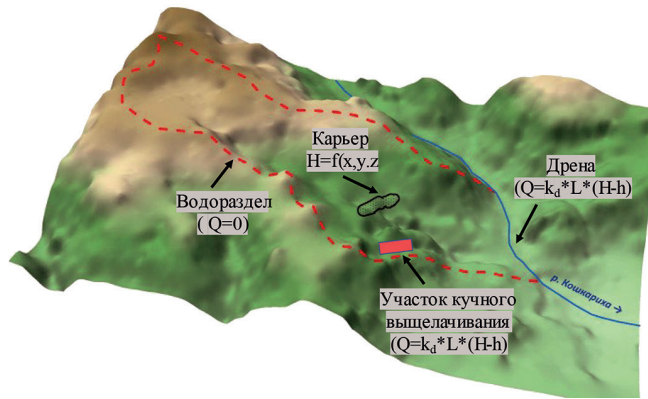


Рис. 1. Объемное представление цифровой модели водосбора и граничные условия геофильтрационной модели

Fig. 1. 3D digital model of underground catchment and boundary conditions of geo-flow model

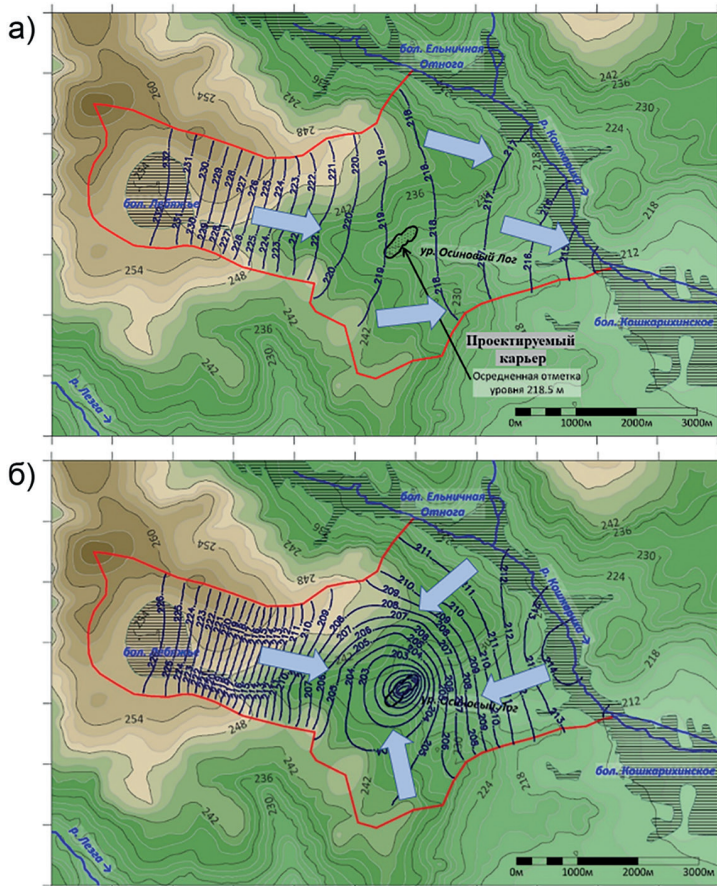


Рис. 2. Распределение уровней подземных вод: в естественных условиях (а); при водоотливе из карьера золоторудного месторождения (б). Стрелками показано направление движения подземных вод

Fig. 2. Patterns of groundwater levels: natural conditions (a); water drainage from open pit gold mine (b). Arrows mark movement direction of groundwater flow



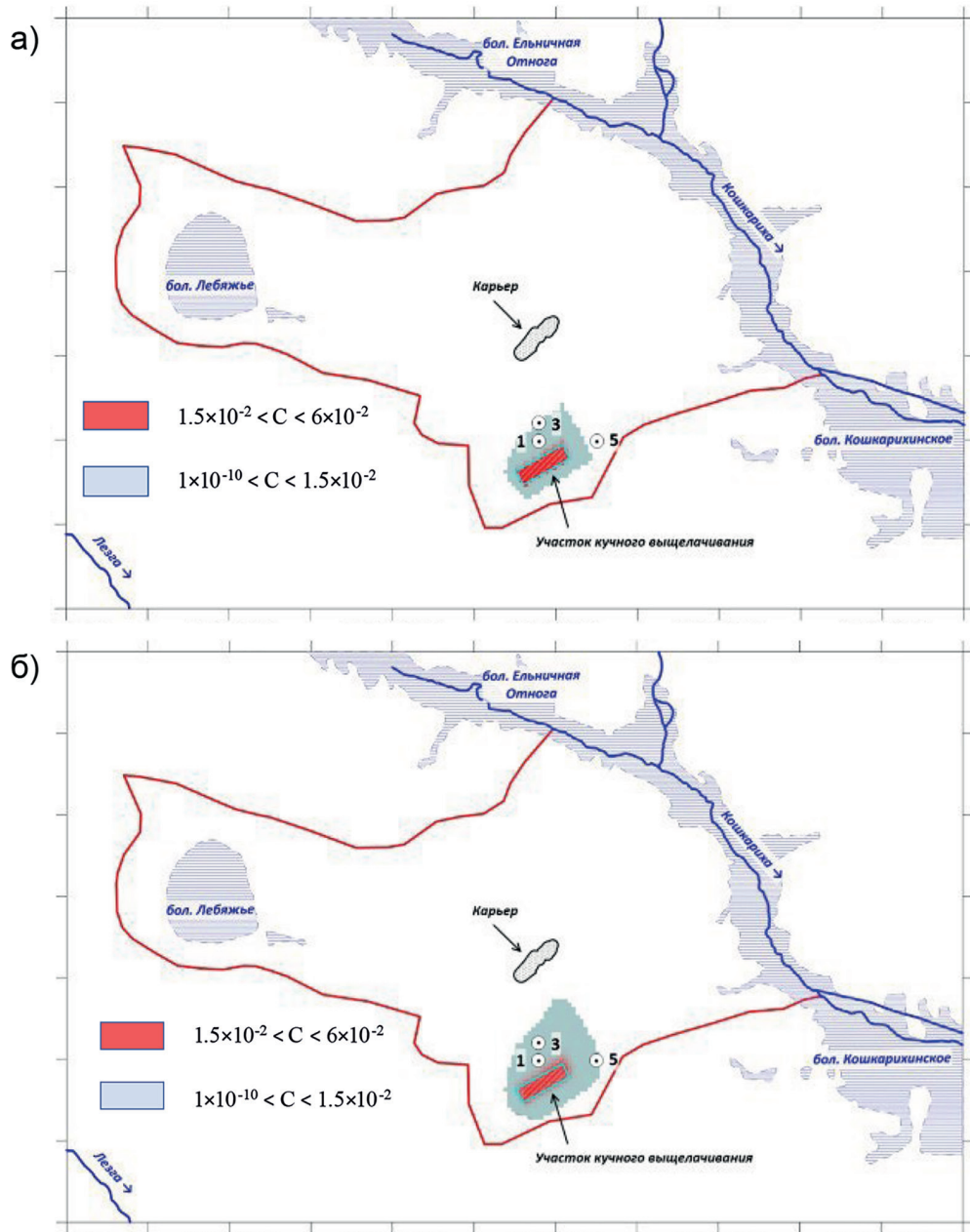


Рис. 3. Положение фронта загрязнения в первом модельном пласте: на конец отработки карьера (а); через 10 лет после конца отработки карьера (б)  
 Fig. 3. Position of pollution front in model stratum 1: end of open pit mining (a); 10 years after open pit mine closure (b)