

ОЦЕНКА ЗАЩИЩЕННОСТИ ВОДНОЙ СРЕДЫ ПРИ РАЗРАБОТКЕ КРУПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МЕДНО-ПОРФИРОВЫХ РУД

Н. В. Гончар¹, И. А. Четверкин², А. И. Вишняк², И. В. Стариков¹

¹ АО «Русская медная компания», г. Екатеринбург, 620075, Российская Федерация, info@rcc-group.ru

² ООО НПФ «ММПИ», г. Екатеринбург, 620014, Российская Федерация, npf_mmpi@mail.ru

Аннотация: Процесс разработки месторождений медных руд неизбежно оказывает влияние на окружающую среду, в том числе на состояние подземных и поверхностных водных ресурсов. Это выражается в образовании депрессионных воронок вокруг карьеров, формировании кислых карьерных, шахтных, подотвальных вод, которые влияют на качество водных ресурсов в районе ведения горных работ. Прежде всего, указанные проблемы связаны с разработкой медно-колчеданных месторождений. Добыча медно-порфировых руд до недавнего времени считалась нерентабельной в связи с низким содержанием полезного компонента в руде и необходимостью большого ежегодного объема дробления и переработки горной массы. В связи со значительными объемами флотационного обогащения медно-порфировых руд необходимо большое количество воды. При этом значительные объемы выводятся из водооборота в связи с заполнением порового пространства при складировании хвостов обогащения. В статье рассмотрен опыт по добыче и переработке медно-порфировых руд, в том числе оценке ресурсов подземных и поверхностных вод, степени гидродинамического взаимодействия, развития воронки депрессии подземных вод, а также прогноза химического состава карьерных и подотвальных вод. На основе полученных результатов определены основные принципы для минимизации экологического ущерба при разработке медно-порфировых месторождений, включая необходимость перехвата подотвальных вод для предотвращения попадания их в водные объекты, по возможности организацию внутреннего отвалообразования, использование хвостов обогащения для производства закладочного материала для ликвидации отработанных карьеров.

Ключевые слова: медно-порфировые руды, модель водного стока, геофильтрационная модель, гидрохимическая модель, нейтрализация карьерных и подотвальных вод, оборотное водоснабжение, хвосты обогащения, ликвидация отработанных карьеров.

Для цитирования: Гончар Н. В., Четверкин И. А., Вишняк А. И., Стариков И. В. Оценка защищенности водной среды при разработке крупных месторождений медно-порфировых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 12-2. – С. 16–26. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_122_0_16.

Assessment of the degree of protection of the aquatic environment during the development of large porphyry copper deposits

N. V. Gonchar¹, I. A. Chetverkin², A. I. Vishnyak², I. V. Starikov¹

¹ JSC "Russian Copper Company", Ekaterinburg, 620075, Russian Federation, info@rcc-group.ru

² MMPI Research and Production Company, LLC, Ekaterinburg, 620014, Russian Federation, npf_mmpi@mail.ru

Abstract: The process of developing copper ore deposits inevitably affects the environment, including the state of underground and surface water sources. This manifests in the formation of cones of depression around open pits and of acidic open pit, mine and dump waters that affect the quality of water resources in the mining area. Primarily, these problems are associated with the development of copper sulphide deposits. Until recently, porphyry copper ore mining was considered unprofitable due to low grade of ore and the need to crush and process large amounts of ROM ore annually. Due to the significant scope of flotation beneficiation of porphyry copper ore, a relatively larger amount of water is required. Substantial volumes are taken out of the water cycle due to the filling of the pore space during the storage of concentration tailings. The article examines extracting and processing porphyry copper ore, including the assessment of groundwater and surface water resources, the degree of hydrodynamic interaction, the development of a cone of depression in groundwater, as well as the forecast of the chemical composition of open-pit and dump water. Based on the information obtained, the main principles for minimizing environmental damage during the development of porphyry copper deposits are determined, including the need to intercept dump water to prevent it from entering water bodies, as well as for organizing (if possible) internal dumping and the possibility of using tailings to produce backfill material for liquidation of depleted open pits.

Key words: porphyry copper ores, aqueous run-off model, geofiltration model, hydrochemical model, neutralization of quarry and sub-basement waters, circulating water supply, concentration tailings, liquidation of spent quarries.

For citation: Gonchar N. V., Chetverkin I. A., Vishnyak A. I., Starikov I. V. Assessment of the degree of protection of the aquatic environment during the development of large porphyry copper deposits. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(12-1):16–26. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_122_0_16.

Введение

Медь имеет очень большую значимость в мировой экономике, которая только увеличивается в связи с постепенным переходом на экологически чистые электрические технологии во всех сферах жизни, ведь медь является основой электротехники.

Несмотря на важную роль меди в сфере экологических преобразований, саму её добычу принято считать процессом, наносящим вред природе, и прежде всего водной среде. У нас в стране это связано с печальным опытом разработки медно-колчеданных месторождений, которые даже после окончания добычи десятилетиями являются источниками загрязнения водных объектов [1, 2, 3]. Из шахт Лёвихинского, Дегтярского и многих других подземных рудников вытекают потоки кислых рудничных вод с концентрациями тяжёлых и редкоземельных метал-

лов, превышающими допустимые нормы в тысячи раз. Для их нейтрализации ежегодно выделяются государственные средства, но и это не решает полностью экологических проблем, тем более что никаких предпосылок к прекращению образования кислых рудничных вод нет. Не лучше ситуация и на отработанных карьерах таких месторождений, как Блява, Яман-Касы, Кабан, имени XIX партсъезда и других [4]. Там в выработанном пространстве карьеров образованы водоёмы с миллионами кубометров кислых токсичных вод, причём уровень в этих водоёмах повышается, а вода из некоторых вытекает через отвалы или подземный водоносный горизонт в речную сеть. В этой связи стоит упомянуть и о бывшем Карабашском руднике и его тяжёлом экологическом наследии, с которым приходится бороться Русской медной компании [5, 6].

В последнее десятилетие Русская медная компания сделала ставку на крупные месторождения медно-порфириновых руд [7, 8], доказав, что именно этот тип месторождений наиболее благополучен с точки зрения безопасности окружающей природной среды.

В соответствии с Государственным докладом «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году» месторождения медно-порфириновых руд занимают первое место по запасам в мире, но в СССР они считались нерентабельными из-за низких содержаний меди [9]. Пионером в их разработке на постсоветском пространстве является Русская медная компания, которая доказала экономическую целесообразность добычи медно-порфириновых руд благодаря внедрению передовых технологий извлечения полезного ископаемого [7]. В разработке Русской медной компании и её дочерних подразделений находятся три медно-порфириновых месторождения, которые входят в число 50-ти крупнейших в мире. Это два уральских месторождения — Михеевское и Томинское, а также Малыжское в Хабаровском крае.

Медно-порфириновые месторождения из-за своих больших размеров и бедных содержаний меди имеют особенности при строительстве горно-обогатительных комбинатов. В частности, большие ежегодные объёмы дробления и переработки горной массы требуют серьёзного количества воды, значительные объёмы которой выводятся из оборота при складировании хвостов обогащения, так как вода заполняет поровое пространство. Высока интенсивность взаимодействия в системе вода/порода как в технологических процессах обогащения, так и в бортах карьеров и теле отвалов, которые занимают большие площади, а ведь именно

эти процессы формируют химический состав воды.

Водной среде при добыче полезных ископаемых уделяется особое внимание [10, 11], а на медно-порфириновых месторождениях эта проблема и вовсе порой выходит на первый план, особенно с учётом особенностей технологии обогащения. При этом важно оценить ресурсы подземных и поверхностных вод, степень гидродинамического взаимодействия проектируемых объектов горно-обогатительного комбината и развитие воронки депрессии подземных вод, а также дать прогноз химического состава карьерных и подотвальных вод [12–14].

Методы

Для решения задач оценки защищённости водной среды при разработке крупных месторождений медно-порфириновых руд Русская медная компания использует комплексный научный подход, основанный на трёх взаимосвязанных моделях:

- 1) модель водного стока;
- 2) геофильтрационная модель;
- 3) гидрохимическая модель.

Модель водного стока основывается на представлениях довольно молодой научной дисциплины «Геогидрологии» [15]. Данная модель показывает зависимость поверхностного и подземного стока территории от метеорологических и геоморфологических факторов, а также даёт оценку среднего и экстремального стока для разных сезонов. Данная модель строится на основе параллельных наблюдений за стоком рек и гидрометеорологическими факторами. Далее решается общая система балансовых уравнений, которая состоит из уравнений баланса поверхностных вод, уравнений баланса подземных вод и уравнения речного стока. Цель решения данной системы балансовых

уравнений — получение значений обобщённых параметров для конкретного речного бассейна. В дальнейшем, учитывая значения этих параметров, мы можем прогнозировать подземный, поверхностный и общий речной сток, а также динамические запасы подземных вод, имея многолетние метеоданные по атмосферным осадкам и температуре воздуха.

Ниже на рис. 1 приведено сравнение фактического и модельного стока по реке Биха в районе Малмыжского месторождения, которое говорит о высокой точности модели водного стока при наличии длительных и подробных рядов наблюдений за речным стоком. Кроме того, модель водного стока позволяет оценить интенсивность питания подземных вод. Эта информация нужна для создания геофильтрационной и гидрохимической моделей.

Районы расположения месторождений медно-порфировых руд, как правило, характеризуются резкой плановой и вертикальной фильтрационной неод-

нородностью горных пород и сложным характером гидрогеологических границ. Проектируемые карьеры имеют значительную глубину и площадь, вскрывая как по глубине, так и в плане различные фильтрационные зоны с водопроницаемостью, отличающейся на порядки. Применение в таких условиях типовых аналитических решений невозможно, поэтому для прогноза подземных водопритоков и развития депрессии от карьеров Русская медная компания использует метод математического моделирования геофильтрации [16] с применением алгоритмов конечно-разностных уравнений и эксплуатацией отечественного программного обеспечения. При этом на каждом объекте создаётся своя геофильтрационная модель района месторождения, позволяющая прогнозировать развитие депрессии в водоносном горизонте и карьерные водопритоки в условиях гидродинамического взаимодействия различных карьеров, водозаборов и гидротехнических сооружений.

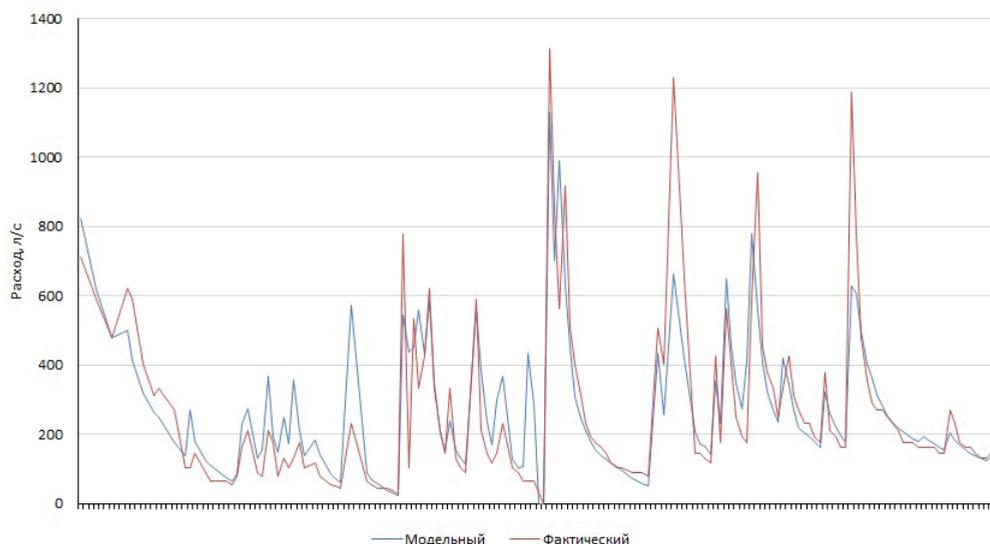


Рис. 1. Сравнение модельного и фактического расхода по реке Биха за май — октябрь 2017
Fig. 1. Comparison of design and actual flow rate on the Bikha River for May — October 2017

Химический состав карьерных и подотвальных вод медных месторождений определяется двумя процессами [17, 18]:

1) окислением сульфидных минералов кислородом воздуха с формированием сульфатных растворов с содержаниями тяжёлых металлов и редких земель;

2) частичной или полной нейтрализацией кислых растворов вмещающими породами с гипсообразованием и выпадением в осадок части металлов и редких земель.

В случае Малмыжского рудного поля к этим двум процессам добавляется ещё и растворение некоторых минералов, содержащихся в горной породе в виде примесей, например, гипса и ангидрита. Растворение этих минералов должно проявиться на самом первом этапе, когда раздробленная горная порода только попадёт в отвал или только будет вскрыта карьером. В дальнейшем, после интенсивной промывки горной породы атмосферными водами, процесс растворения этих минералов отойдёт на второй план в связи с их исчерпанием, и на первый план выйдут процессы окисления сульфидов и нейтрализации растворов.

Равновесные концентрации компонентов в карьерных и подотвальных водах могут быть просчитаны путём термодинамического моделирования химических реакций. Для этого необходимо знать минеральный состав руд и вмещающих пород [19]. Однако состав карьерных и подотвальных вод почти всегда сильно отличается от равновесного, что связано с кинетикой реакций [20]. Скорость химических реакций и физико-химических процессов не является мгновенной. При этом важна не только скорость химических реакций и физико-химических процессов, но и интенсивность поступления

воды и кислорода в зону взаимодействия с горной породой. Интенсификация поступления кислорода приводит к ускорению процессов окисления сульфидов, а интенсификация поступления воды приводит к разбавлению и уменьшению концентраций компонентов в растворе.

Таким образом, химический состав карьерных и подотвальных вод зависит от минерального состава руд и вмещающих пород, от кинетики химических реакций и физико-химических процессов, от интенсивности поступления кислорода и воды в зону реакции и от многих других параметров и процессов, учесть которые порой бывает очень трудно [21].

Интенсивность поступления кислорода в зону реакции определяется, прежде всего, площадью поверхности рудных минералов в зоне аэрации. Например, в отвале площадь поверхности сульфидов зависит как от их концентрации во вмещающих породах, так и от крупности кусков породы, слагающих отвал (чем мельче куски — тем выше их удельная поверхность). В карьере же, первостепенное значение имеет площадь выхода рудных тел в борта карьера на разных этапах его разработки.

Наименее изученной является кинетика химических реакций и физико-химических процессов. В частности, кинетика окисления сульфидов и кинетика взаимодействия кислых растворов с карбонатной составляющей и алюмосиликатами вмещающих пород. Существуют, конечно, некоторые представления о кинетике этих реакций, но наиболее точную информацию могут дать только натурные эксперименты с рудами и вмещающими породами.

Учитывая вышесказанное, для прогноза химического состава карьерных

и подотвальных вод Русская медная компания обычно использует метод натурального гидрохимического моделирования взаимодействия горных пород с водой и воздухом [22,23].

Натурное исследование медленных реакций и процессов возможно только при условии их ускорения (в противном случае на проведение экспериментов потребуются месяцы и годы). Ускорения реакций и процессов можно легко добиться путём увеличения площади взаимодействия сред. Например, при дроблении куска горной породы размером 1 дм до состояния мелкого песка (размер частиц около 0,1 мм) площадь поверхности породы увеличивается в тысячу раз. Соответственно, в тысячу раз ускоряются химические реакции и физико-химические процессы на поверхности фаз. Это даёт нам возможность изучать относительно медленные процессы в экспериментах с разумной продолжительностью по времени.

Для натурального моделирования отбираются типовые образцы из керна горных пород, которые дробятся и используются для приготовления сухих смесей. Смеси готовятся в пропорциях, которые статистически отражают соотношение разных горных пород в бортах карьеров и теле отвалов. Далее сухие смеси загружаются в лабораторные реакторы с необходимым соотношением вода / порода и постоянной подачей воздуха. Жидкая фаза в реакторах в ходе экспериментов может обновляться с использованием принципа «проточных реакторов». На рис. 2 показан рост концентрации сульфат-иона в ходе первой ступени опыта по участкам Малмыжского месторождения, причём начальный скачок концентрации обеспечивается водорастворимыми минералами типа гипса и ангидрита, которые содержатся в горных породах.

Результаты

Разработанные стоковые, геофильтрационные и гидрохимические модели, а также первый опыт разработки медно-порфировых месторождений, позволили сделать общие выводы, которые справедливы и для Михеевского, и для Томинского, и для Малмыжского месторождений:

1) Благодаря низким содержаниям сульфидных минералов в горных породах медно-порфировых месторождений процессы нейтрализации доминируют над процессами окисления. Кислые воды не образуются, а концентрация тяжёлых металлов в карьерных и подотвальных водах на порядки ниже, чем, к примеру, на колчеданных месторождениях, так как в околонеutralной среде подвижность тяжёлых металлов низка. Минерализация карьерных и подотвальных вод на медно-порфировых месторождениях также невысока, и обычно не превышает 2–3 г/л, так как контролируется растворимостью гипса. Для природной гидросферы такие воды не представляют высокой опасности, в отличие от токсичных вод медно-колчеданных месторождений. К тому же, химический состав карьерных и подотвальных вод медно-порфировых месторождений позволяет использовать их для подпитки оборотной системы водоснабжения горно-обогачительного комбината.

2) Высокая интенсивность добычи и обогащения руд, которая необходима на медно-порфировых месторождениях для обеспечения рентабельности горно-обогачительного комбината, приводит к острому дефициту воды в системе оборотного водоснабжения. Это позволяет полностью использовать все образующиеся карьерные и подотвальные воды для подпитки системы оборотного водоснабжения и исключает поступление загрязнённых вод в природную гидросферу.

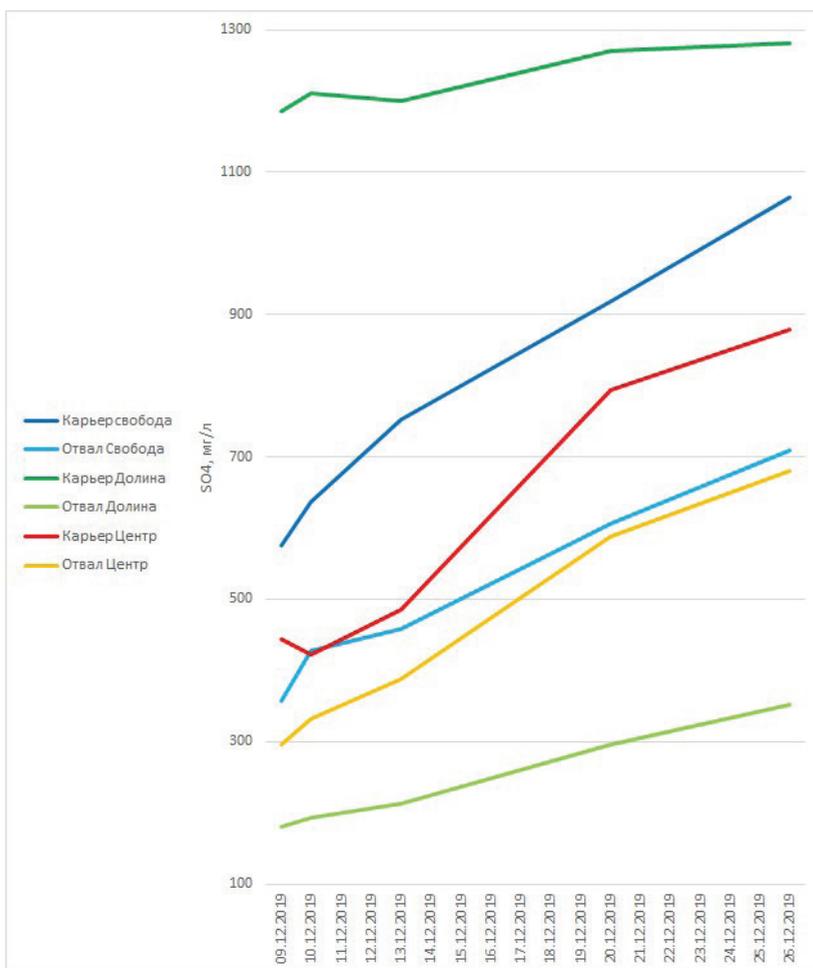


Рис. 2. Изменение концентрации сульфат-иона в ходе 1 ступени натурного опыта по участкам «Центр», «Долина» и «Свобода» Малмыжского месторождения
 Fig. 2. Change in the concentration of sulfate ion during Stage 1 of the field experiment in the "Center", "Dolina" and "Svoboda" areas of the Malmyzh deposit

Полученные результаты при определенных допущениях могут быть применимы для других крупных месторождений медно-порфировых руд. Из этих выводов следует, что добыча меди на крупных медно-порфировых месторождениях является наиболее безопасной для природной гидросферы по сравнению с другими типами месторождений меди. По этой причине разработка крупных медно-порфировых месторождений является приоритетом

Русской медной компании на ближайшие десятилетия.

Заключение

Для минимизации экологического ущерба при разработке медно-порфировых месторождений важно соблюдать следующие принципы:

1) Грамотная организация системы полного перехвата подотвальных вод для недопущения их поступления в водные объекты.

2) Приоритет внутреннего отвалообразования, там, где это возможно, с расположением верхней границы горной массы ниже потенциального уровня затопления отработанного карьера. Это позволяет полностью «законсервировать» отвалы без доступа кислорода из воздуха, превратив их в абсолютно инертную горную массу.

3) Возможность использования хвостов обогащения для производства закладочного материала с целью ликвидации отработанных карьеров, что полностью исключает утечки оборотной воды, позволяет рекультивировать карьеры и сберегает земли, которые в противном случае пришлось бы выделять под обширные по площади карты хвостохранилищ.

Третий пункт наиболее ярко был реализован на Томинском горно-обогатительном комбинате. Там удалось вообще отказаться от обширных хвостохранилищ и попутно проводить ликвидацию огромного Коркинского угольного разреза, расположенного неподалёку и являвшегося зоной экологического бедствия из-за угольных пожаров.

В процессе ликвидации в бывшем Коркинском угольном разрезе будет образован водоём, уровень воды в котором после завершения рекультивации меняться практически не будет благодаря нулевому балансу воды, и установится на отметках +206...+207 (в зависимости от водности года). Это

достигается за счёт компенсации испарения с поверхности водоёма притоком подземных вод и атмосферных осадков именно на этих отметках. Глубина образованного водоёма также останется стабильной, и составит 26–27 м. При этом вокруг разреза будет сохраняться депрессионная воронка, что полностью исключает поступление воды из данного водоёма в водоносные горизонты и её подтягивание к подземным водозаборам. Подтопление территории города Коркино по этой причине также исключается.

Минерализация воды в водоёме Коркинского разреза ожидается на уровне 1,5 г/л при жёсткости чуть выше нормы и нейтральной реакции. Химический состав воды будет весьма благополучным.

Ликвидация Коркинского разреза закладочным материалом, приготовленным на основе хвостов обогащения Томинского ГОКа, является образцом того, что добыча и обогащение медно-порфиновых руд может решать многолетние экологические проблемы, а не создавать их. Ещё более важным является факт того, что на всех медно-порфиновых месторождениях Русской медной компании полностью отсутствует сброс техногенных загрязнённых вод в природные водные объекты, что достигается за счёт дефицитного водного баланса, характерного для горно-обогатительных комбинатов на месторождениях данного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А., Наволокина В. Ю. Оценка влияния затопленного Левихинского медноколчеданного рудника на качество поверхностных вод реки Тагил // Проблемы недропользования. — 2019. — № 3. — С. 155–161. DOI: 10.25635/2313–1586.2019.03.155.

2. Рыбникова Л. С., Рыбников П. А. Эколого-экономическая оценка шахтных вод на примере затопленных медноколчеданных рудников Урала // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2016. — № 1. — С. 52–65.

3. *Елохина С. Н.* Гидрогеологические последствия горного техногенеза на Урале. — Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. — 187 с.
4. *Петрищев В. П., Артамонова С. В., Дубровская С. А., Ряхов Р. В., Норейка С. Ю.* Ландшафтно-геоэкологические основы формирования техногеосистем медноколчеданных месторождений: монография. — Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2019. — 156 с.
5. *Тацкий Ю. Г.* Эколого-геохимическая оценка загрязнения окружающей среды в зоне действия Карабашского медеплавильного комбината // Вестник Тюменского государственного университета. — 2012. — № 12. — С. 90–96.
6. *Калабин Г. В., Титова А. В., Шаров А. В.* Модернизация медеплавильного производства комбината ЗАО «Карабашмедь» и динамика состояния природной среды в зоне его влияния // Маркшейдерия и недропользование. — 2011. — № 3. — С. 65–70.
7. *Алтушкин И. А., Левин В. В., Сизиков А. В., Король Ю. А.* Опыт освоения месторождений медно-порфирирового типа на Урале // Записки Горного института. — 2017. — Т. 228. — С. 641–648.
8. *Алтушкин И. А., Левин В. В., Гордеев А. И., Пикалов В. А.* Особенности освоения Томинского и Михеевского меднорудных месторождений Южного Урала // Цветные металлы. — 2019. — № 7. — С. 21–28.
9. *Кривцов А. И., Звездов В. С., Мизгачев И. Ф., Минина О. В.* Меднопорфирировые месторождения. Серия: Модели месторождений благородных и цветных металлов. — М.: ЦНИГРИ, 2001. — 232 с.
10. *Wolkersdorfer C.* Water management at abandoned flooded underground mines. Fundamentals. Tracer tests. Modelling. Water treatment. Springer, 2008, 465 p.
11. *Younger P. L., Jenkins D. A., Rees B., Robinson J., Jarvis A. P., Ralph J., Johnston D. N., Coulton R. H.* Mine waters in Wales: pollution, risk management and remediation. Urban geology in Wales. National Museums and Galleries of Wales. Geological Series. 2004, no 23, pp. 138–154.
12. *Плотников Н. И., Рогинец И. И.* Гидрогеология рудных месторождений. — М.: Недра, 1987. — 227 с.
13. *Румынин В. Г.* Геомиграционные модели в гидрогеологии. — СПб.: Наука, 2011. — 1158 с.
14. *Anderson M. P., Woessner W. W. and Hunt R. J.* Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press; Second Edition, 2015, 564 p.
15. *Шестаков В. М., Поздняков С. П.* Геогидрология. — М.: Академкнига, 2003. — 173 с.
16. *Ломакин Е. А., Мироненко В. А., Шестаков В. М.* Численное моделирование геофильтрации. — М.: Недра, 1988. — 228 с.
17. *Вахрушева З. Г.* Некоторые данные о рудах и геохимических ореолах колчеданных месторождений Урала // Геология, геохимия и полезные ископаемые Урала. Межвузовский научный тематический сборник. Вып.1. — Свердловск: Изд-во УПИ, 1977. — С.14–24.
18. *Шадрунова И. В., Самойлова А. С., Орехова Н. Н.* Закономерности формирования медьсодержащих стоков на горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2008. — № 3. — С. 304–311.
19. *Шварцев С. Л., Рыженко Б. Н., Алексеев В. А., Дутова Е. М., Кондратьева И. А., Копылова Ю. Г., Лепокурова О. Е.* Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода-порода: в 5 томах. Т. 2: Система вода-порода в условиях зоны гипергенеза / отв. ред. *Рыженко Б. Н.* — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. — 389 с.
20. *Рафальский Р. П.* Гидротермальные равновесия и процессы минералообразования. — М.: Атомиздат, 1973. — 288 с.
21. *Голубев В. С., Кричевец Г. Н.* Динамика геотехнологических процессов. — М.: Недра, 1989. — 120 с.

22. *Haitjema H. M.* Analytic element modeling of groundwater flow. San Diego: Academic Press, 1995, 394 p.

23. *Nordstrom D. K.* Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of 271 major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters. *Applied Geochemistry*. 2011, no 26, pp. 1777–1791. 

REFERENCES

1. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A., Navolokina V. Yu. Assessment of the influence of the flooded copper mine Levikhinsky on the quality of Tagil river water. *Problems of Subsoil Use*. 2019, no. 3, pp. 155–161. [In Russ].

2. Rybnikova L. S., Rybnikov P. A. Ecological/economical assessment of pit waters: the case of the Ural copper pyrite watersealed mines. *Water Sector of Russia: problems, technologies, management*. 2016, no. 1, pp. 52–65. [In Russ].

3. Elokina S. N. Hydrogeological consequences of mining technogenesis in the Urals. *Ekaterinburg, UIPC*, 2013, 187 p. [In Russ].

4. Petrishchev V. P., Artamonova S. V., Dubrovskaya S. A., Ryahov R. V., Norejka S. Yu. Landscape and geocological foundations for the formation of technogeosystems of copper sulphide deposits: a monograph. *Orenburg, Orenburg State University*. 2019, 156 p. [In Russ].

5. Tatsiy Yu. G. Ecological and geochemical assessment of environmental pollution in the zone of Karabash copper smelting plant operation. 2012, no. 12, pp. 90–96. [In Russ].

6. Kalabin G. V., Titova A. V., Sharov A. V. Modernization of copper smelting production at Karabashmed CJSC and the dynamics of the natural environment in the zone of its influence. *Mine surveying and subsurface use*. 2011, no. 3, pp. 65–70. [In Russ].

7. Altushkin I. A., Levin V. V., Sizikov A. V., Korol Yu. A. Experience of development of copper porphyry type deposits in the Urals. *Zapiski Gornogo instituta*. vol. 228, pp. 641–648. [In Russ].

8. Altushkin I. A., Levin V. V., Gordeev A. I., Pikalov V. A. Development of the Tominsk and Mikheevsk copper ore deposits of the Southern Urals. *Tsvetnye Metally*. 2019, no. 7, pp. 21–28. [In Russ].

9. Krivtsov A. I., Zvezdov V. S., Migachev I. F., Minina O. V. Copper porphyry deposits. Series: Models of noble and non-ferrous metal deposits. Edited by A. I. Krivtsov. *Moscow, TsNIGRI*, 2001, 232 p. [In Russ].

10. Wolkersdorfer C. Water management at abandoned flooded underground mines. *Fundamentals. Tracer tests. Modelling. Water treatment*. Springer, 2008, 465 p.

11. Younger P. L., Jenkins D. A., Rees B., Robinson J., Jarvis A. P., Ralph J., Johnston D. N., Coulton R. H. Mine waters in Wales: pollution, risk management and remediation. *Urban geology in Wales. National Museums and Galleries of Wales Geological Series*. 2004, no. 23, pp. 138–154.

12. Plotnikov N. I., Roginets I. I. Hydrogeology of ore deposits. *Moscow, Nedra*, 1987, 227 p. [In Russ].

13. Rumynin V. G. Geomigration models in hydrogeology. *St. Petersburg, Nauka*, 2011, 1158 p. [In Russ].

14. Anderson M. P., Woessner W. W. and Hunt R. J. *Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press; Second Edition, 2015, 564 p.

15. Shestakov V. M., Pozdnyakov S. P. *Geohydrology*. *Moscow, Akademkniga*, 2003, 173 p. [In Russ].

16. Lomakin E. A., Mironenko V. A., Shestakov V. M. Numerical modeling of geofiltration. *Moscow, Nedra*, 1988, 228 p. [In Russ].

17. Vakhrusheva Z. G. Certain data on ores and geochemical aureoles of pyrite deposits in the Urals. *Geologiya, geohimiya i poleznye iskopaemye Urala. Mezhhuzovskij nauchnyj tematicheskij sbornik*. vol. 1. *Sverdlovsk, UPI Publ.*, 1977, pp. 14–24. [In Russ].

18. Shadrunkova I. V., Samoilova A. S., Orekhova N. N. Patterns of the formation of copper-containing effluents at mining enterprises. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2008, no. 3, pp. 304–311 [In Russ].

19. Shvartsev S. L., Ryzhenko B. N., Alekseev V. A., Dutova E. M., Kondratieva I. A., Kopylova Yu. G., Lepokurova O. E. Geological evolution and self-organization of the water-rock system: in 5 volumes. Vol. 2: The water-rock system in the conditions of the hypergenesis zone. Editor-in-chief Ryzhenko B. N. Novosibirsk, Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007, 389 p. [In Russ].

20. Rafalsky R. P. Hydrothermal equilibrium and processes of mineral formation. Moscow, Atomizdat. 1973, 288 p. [In Russ].

21. Golubev V. S., Krichevets G. N. Dynamics of geotechnological processes. Moscow, Nedra, 1989, 120 p. [In Russ].

22. Haitjema H. M. Analytic element modeling of groundwater flow. San Diego: Academic Press, 1995? 394 p.

23. Nordstrom D. K. Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of 271 major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters, *Applied Geochemistry*. 2011, no. 26. pp. 1777–1791.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гончар Наталья В. — вице-президент по экологической и промышленной безопасности, канд. техн. наук, Заслуженный эколог Российской Федерации, ORCID iD 0009–0002–0180–9592, АО «Русская медная компания», г. Екатеринбург, 620075, Российская Федерация, Gonchar_Nataliya@rcc-group.ru;

Четверкин Игорь А. — директор, ORCID iD 0009–0003–4224–4441, ООО НПФ «ММПИ», г. Екатеринбург, 620014, Российская Федерация, Chetverkin@inbox.ru;

Вишняк Александр И. — главный гидрогеолог, ORCID iD 0009–0005–8839–0959, ООО НПФ «ММПИ», г. Екатеринбург, 620014, Российская Федерация, Vihniak@yandex.ru;

Стариков Илья В. — начальник отдела сопровождения инвестиционных проектов по экологической и промышленной безопасности, ORCID iD 0009–0006–6289–3109, АО «Русская медная компания», г. Екатеринбург, 620075, Российская Федерация, Starikov_Ilya@rcc-group.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Gonchar N. V., Vice President for Environmental and Industrial Safety, Cand. Sci. (Eng.), Honored Ecologist of the Russian Federation, ORCID iD 0009–0002–0180–9592, JSC “Russian Copper Company”, Ekaterinburg, 620075, Russia, Gonchar_Nataliya@rcc-group.ru;

Chetverkin I. A., Director, ORCID iD 0009–0003–4224–4441, MMPI Research and Production Company, LLC, Ekaterinburg, 620014, Russian Federation, Chetverkin@inbox.ru;

Vishnyak A. I., Chief Hydrogeologist, ORCID iD 0009–0005–8839–0959, MMPI Research and Production Company, LLC, Ekaterinburg, 620014, Russia, Vihniak@yandex.ru;

Starikov I. V., Head of the Environmental and Industrial Safety Investment Project Support Department, ORCID iD 0009–0006–6289–3109, JSC “Russian Copper Company”, Ekaterinburg, 620075, Russia, Starikov_Ilya@rcc-group.ru.

Получена редакцией 05.10.2023; получена после рецензии 25.10.2023; принята к печати 10.11.2023.

Received by the editors 05.10.2023; received after the review 25.10.2023; accepted for printing 10.11.2023.

