

УДК 622.235 + 622.772

**ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ МЕДИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМБИНИРОВАННОЙ ВЗРЫВНОЙ
И РЕАГЕНТНОЙ ПОДГОТОВКИ РУДНОГО МАССИВА**

А. В. Рассказова, А. Г. Секисов, А. А. Галимьянов

*Институт горного дела ДВО РАН,
E-mail: annbot87@mail.ru, sekisovag@mail.ru, azot-1977@mail.ru,
ул. Тургенева, 51, 680000, г. Хабаровск, Россия*

Исследовано комбинированное взрывное и реагентное воздействие на сцементированную минеральную массу, моделирующую рудный массив, осуществляемое путем размещения зарядов взрывчатого вещества внутри растворов реагентов. Предварительная взрывоинъекционная обработка модельного материала различными активными реагентными комплексами приводит к предокислению содержащейся в нем меди, что повышает эффективность процессов ее последующего выщелачивания. Максимально достигнутый прирост выхода меди в продуктивный раствор относительно контрольного значения составил 83 %. Для предокисления меди, входящей в состав модельного материала, в процессах комбинированного взрывного и реагентного воздействия применялись: электроактивированный раствор гидрокарбоната натрия и перекиси водорода, смесь гидроксида натрия и перекиси водорода, гипохлорит натрия, а также дистиллированная вода. В качестве комплексообразователя для выщелачивания меди использовался реагент “Золотая цикада” (Jin Chan) — стандартный и активированный. Установлено, что активация раствора бикарбоната натрия с применением его электрохимической обработки, перед вводом в него комплексообразователя, позволяет более эффективно извлекать медь из подготовленного взрывоинъекционной обработкой модельного материала.

Медь, модель рудного массива, комбинированное взрывное и реагентное воздействие, активация рабочего раствора, выщелачивание

DOI: 10.15372/FTPRPI20230615

При подземной разработке крупных рудных месторождений в недрах Земли остаются неизвлеченными значительные запасы некондиционных и бедных руд, оставленные в целиках, и недовыпущенных руд в отработанных блоках [1]. Использование традиционных геотехнологий в этих случаях, как правило, нерентабельно или технически невозможно. На подобных объектах весьма актуально оценить перспективы доизвлечения золота с помощью способа шахтного (блочного) выщелачивания (ШПВ) [2].

Работа выполнена при поддержке научного гранта “Извлечение упорных форм золота из техногенного минерального сырья с применением физико-химических геотехнологий”, предоставленного Правительством Хабаровского края по соглашению № 49 С/2023 от 18.12.2023 и в рамках соглашения № 075-15-2021-663, финансируемого РФ в лице Минобрнауки.

В зависимости от содержания меди в перерабатываемой руде, медные руды условно подразделяются на богатые (содержание меди более 2 %), средние (0.8–2.0 %), бедные (0.5–0.8 %) и забалансовые (менее 0.3 %) [3]. Качество добываемых руд снижается, и большинство добывающих компаний имеют дело с бедными рудами [4]. Неуклонно растет доля меди, добываемая методами геотехнологии, в том числе с применением кучного выщелачивания. При кучном выщелачивании проницаемость штабеля для рабочих растворов — один из ключевых факторов; трещиноватая структура куска руды обеспечивает подвод растворителя к минералам меди и ее эффективное извлечение в продуктивный раствор.

При подземном выщелачивании меди, в отличие от кучного выщелачивания, основной проблемой является обеспечение как требуемой трещиноватости, так и крупности дробления руды при взрыве. Разрушение массива горных пород и взрывное дробление фрагментов сопровождаются изменением их физических свойств после взрывных работ из-за распространения ранее существовавших трещин и образования новых трещин различного порядка: макротрещиноватость генерируется в масштабе сантиметров и более; микротрещиноватость развивается в масштабе от первых микрон до миллиметров [5–7]. Кинетика выщелачивания определяется рядом факторов (рН растворов, температура, минералогический состав руды и ее сортность, аппаратное оформление орошения, природная пористость руды, гранулометрический состав материала штабеля, глинистость, высота кучи и степень ее аэрации) [5].

Важными задачами для использования перколяционного выщелачивания являются обеспечение формирования сети микротрещин и микродефектов во взорванной руде и частичная трансформация вещественного состава (при окислении или гидратации) рудных минералов.

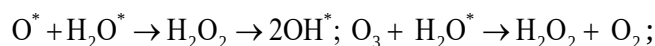
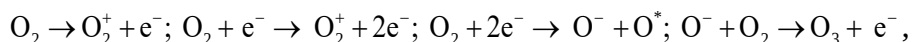
Перспективный метод решения этой проблемы — впрыск реагентов в раскрывающиеся при взрыве руды трещины. С этой целью внутри зарядов взрывчатого вещества (ВВ) размещают растворы реагентов-окислителей, которые, подвергаясь термобарическому воздействию взрывных газов, переходят в парообразное состояние и при проникновении в раскрывающиеся микротрещины частично окисляют поверхностные слои рудных минералов. Наиболее целесообразно использовать кислотные и щелочные растворы, полученные на основе соответствующих продуктов электролиза первичных водных растворов. Вода после электрохимической или фотоэлектрохимической обработки находится в активном метастабильном состоянии. Также вода насыщена растворенными газами (O_2 , H_2 , CO_2 , Cl_2 и др.), частично переходящими при термобарическом воздействии в ионизированное состояние или трансформирующимися в радикалы и ион-радикалы. В результате химических реакций, протекающих в условиях высокого давления и температуры, формируются активные окислители для минералообразующих элементов (железа, меди, серы и др.) [1, 8].

Наиболее технологично повысить выход радикалов и ионов кислорода можно в момент взрывного разрушения кислородсодержащих твердых взрывчатых веществ и инъецировать их в образующиеся пары воды для синтеза наиболее активных окислителей — гидроксил-радикалов, атомарного кислорода и перекисных соединений. Выделяющийся газообразный кислород будет создавать не только давление в объеме скважины, передающееся массиву руды, но и служить источником образования высокоактивных окислителей для металлов и серы.

В настоящем исследовании для взрывного разрушения применялся термитный состав на основе перхлората калия (66 % $KClO_4$), порошка алюминиевой пудры и технологической добавки в виде дисульфида вольфрама [9–11]. С учетом химического состава вещества, используемого для взрывного разрушения модельного материала, предложен следующий механизм реагентной подготовки модели массива горных пород в результате термобарического взрыва:

- прохождение упругих волн через целиковую минеральную массу при скачке давления образующихся при взрыве газов ($KClO_4 = KCl + 2O_2^*$) с формированием в ней микротрещин и трещин;

- ионизация кислорода и образование активных радикалов в газовой фазе:



- взаимодействие образовавшихся высокоактивных радикалов с медью.

На эффективность разрушения горных пород под действием взрыва и формирование сети макро- и микротрещин оказывают влияние природные и техногенные факторы. Крупные трещины в результате взрыва формируются в результате слияния более мелких [12 – 14]. На дробимость породного массива выемочного блока основное влияние оказывает макротрещиноватость, обуславливающая делимость горных пород на природные отдельности. Размеры природных отдельностей выемочного блока определяются параметрами систем макротрещин. Структурно-текстурные характеристики горных пород можно исследовать методами компьютерной рентгеновской микротомографии [15 – 17].

Интерес к гидрометаллургическому способу извлечения меди, в частности с применением физико-химических технологий подземного и кучного выщелачивания, возрастает с течением времени [18, 19].

Цель настоящего исследования — сравнение эффективности растворения меди при ее выщелачивании после взрывного воздействия, комбинированного с реагентным и при стандартной взрывной подготовке. В экспериментах использовалась модель рудного массива, представляющая собой монолитный образец цементно-песчаной смеси с равномерно распределенным порошком меди.

Извлечение меди из модельного материала нецелесообразно проводить раствором серной кислоты, так как она вступает в химическую реакцию с компонентами цементно-песчаной смеси (по результатам рентгенофлуоресцентного анализа цементно-песчаная смесь содержит 34.52 % кальция и 1.28 % железа). Цемент в среднем на 35–40 % состоит из известняка (CaCO_3), около 15 % оксида железа [20], поэтому необходим селективный комплексообразователь для меди, адаптированный к щелочной среде.

Для растворения меди применялся комплексный реагент “Золотая цикада” (Jin Chan), содержащий эффективный комплексообразователь для золота и его аналогов из первой группы периодической системы элементов — серебра и меди. Новым высокотехнологичным продуктом, созданным китайской компанией Guangxi Senhe High Technology Co. Lmt, является запатентованный реагент Jinchan Environmental-friendly Gold Dressing Agent (JGD) [21]. Согласно патентному свидетельству, в состав реагента входят гидроксиды щелочных металлов, карбонаты или гидрокарбонаты щелочных металлов, карбамид, гексацианоферрат калия, бутиловый ксантогенат и хлорид сложного состава (Na_3CNOHCl). На некоторых зарубежных крупных промышленных предприятиях по добыче золота, в том числе China National Gold Mine Group, Shandong Gold Group, Zhaoyuan Gold Group, Zijin Mine Group, реагент успешно опробован и внедрен в производственный процесс [14]. В России данный реагент используется компаний “Золото Дельмачик” при отработке Дельмачикского золоторудного месторождения [22 – 26].

Протекающие в системе выщелачивания реакции аналогичны цианированию в щелочной среде. Соединения, входящие в состав “Золотой цикады”, способствуют более глубокому протеканию диссоциации комплексного иона $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$. Комплексный анион диссоциирует как слабый электролит, но эта диссоциация отличается тем, что координационное число комплексообразователя сохраняется постоянным за счет замены лиганда молекулой воды. Медь активно взаимодействует с цианогруппой и образует цианистые комплексы, переходя в раствори-

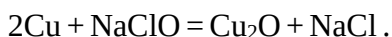
мую форму [27]. Медь при взаимодействии с цианидами может образовывать комплексы различного состава: $[\text{Cu}(\text{CN})_2]^-$, $[\text{Cu}(\text{CN})_3]^{2-}$, $[\text{Cu}(\text{CN})_4]^{3-}$ [27]. Для подтверждения растворимости меди в “Золотой цикаде” выполнено тестирование. Концентрация реагента Jin Chan — 1 масс. %, соотношение Т/Ж = 1/100. Растворение проводилось при постоянном перемешивании магнитной мешалкой. Визуально медь растворяется в данном реагенте за 2 ч.

Стандартный электродный потенциал (E^0) перехода Cu^+/Cu^0 , соответствующий реакции $\text{Cu}^+ + e \rightarrow \text{Cu}^0$, составляет 0.521 В. Стандартный электродный потенциал (E^0) перехода $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^+$ равен +0.167 В [28]. Таким образом, предокусление с введением реагентов позволяет запустить процессы окисления меди, способствуя ее дальнейшему комплексообразованию и переходу в продуктивный раствор.

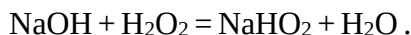
Исследование по комбинированному взрывному и реагентному воздействию заключается в предварительной обработке меди различными реагентными комплексами с целью интенсификации ее растворения после предокусления. Предположительно, поэтапное окисление меди может улучшить кинетику ее выщелачивания в продуктивный раствор при последующем выщелачивании.

При выборе реагентов для комбинированного взрывного и реагентного воздействия учитывались следующие соображения. Известно, что медь корродирует и растворяется в растворе гидрокарбоната или бикарбоната, переходя в оксид меди I, а впоследствии и в оксид двухвалентной меди в смеси с карбонатными соединениями меди [29].

Механизм взаимодействия меди с раствором гипохлорита натрия достаточно прост:



Взаимодействие меди с раствором гидроксида натрия протекает при определенных рН и E_h системы [30, 31]. В данном исследовании применялась смесь гидроксида натрия с пероксидом водорода, при взаимодействии которых образовалась кислая соль — гидроперекись натрия [32]. Гидроперекись натрия — более мощный окислитель по сравнению с исходными реагентами:



Следует отметить, что стандартные законы химических взаимодействий не вполне применимы в условиях взрыва горной массы, когда образуется значительное количество газов (600–1000 л/кг) и выделяется тепло ($2.5 \cdot 10^3 - 7.1 \cdot 10^3$ Дж/кг), которое обеспечивает нагревание продуктов взрыва до температуры 1900–4500 °С [33].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Моделью рудного массива является затвердевшая цементно-песчаная смесь с предварительно введенным порошком меди. Содержание меди 0.3 масс. %.

Предварительно определялись физико-механические показатели модельного материала: предел прочности на сжатие и крепость по Протодюкову. Размер модельного материала — диаметр 150 мм, высота 240 мм.

Для взрывного воздействия на модель рудного массива применялся состав для дробления негабарита [17]. Активация растворов, используемых для комбинированного взрывного и реагентного воздействия ($\text{NaHCO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$, $\text{NaOH} + \text{H}_2\text{O}_2$, NaClO , H_2O), выполнялась методом электролиза с рабочим током 8 А, продолжительность 15 мин/л. Для предотвращения разлета кусков эксперименты по комбинированному взрывному и реагентному воздействию осуществлялись в металлической бочке объемом 200 л.

В исследовании процессов перколяционного выщелачивания (выщелачивания просачиванием) выделены три этапа. Первый — лабораторные тесты с рудой в режиме агитационного выщелачивания; второй — перколяционное выщелачивание в лабораторных перколяционных

колоннах и третий — полупромышленные испытания процессов перколяционного выщелачивания, к которым относятся процессы подземного шахтного выщелачивания. В данном исследовании лабораторные тесты с модельным материалом выполнялись в режиме агитационного выщелачивания.

В качестве комплексообразователя меди применялся реагент Jin Chan [21], так как стандартный растворитель — раствор серной кислоты вступает в активную реакцию со связующим модельного материала — цементно-песчаной смесью. Соотношение в экспериментах составило $T/J = 1/2$. Концентрация реагента Jin Chan — 10 масс. %.

Исследовалась эффективность двух вариантов применения реагентного комплекса Jin Chan — стандартного и активированного. Стандартный реагентный комплекс Jin Chan изготавливался на основе дистиллированной воды, активированный раствор Jin Chan — на основе электроактивированного гидрокарбонатного раствора с концентрацией NaHCO_3 10 г/л. Электроактивация выполнялась методом электролиза с рабочим током 8 А, продолжительность 15 мин/л. Отбор проб выполнялся через 15, 30, 60 мин. Общая продолжительность выщелачивания составила 120 мин. Выщелачивание проводилось в агитационном режиме.

Анализ продуктивных растворов осуществлялся методом атомно-адсорбционной спектроскопии (Shimadzy AA-6000).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Предел прочности при одноосном сжатии получаемого модельного материала составил 5 МПа; коэффициент крепости по Протоdjяконову 0.4; плотность исследуемого модельного материала 1.89 г/см^3 . На рис. 1 показана схема расположения термитного состава и реагентов в монолите модельного материала.

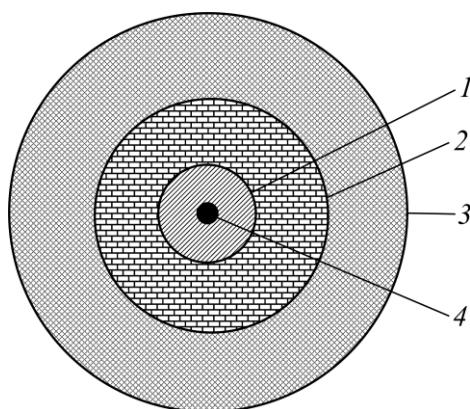


Рис. 1. Схема расположения термитного состава и реагентов в монолите модельного материала
1 — пластиковая капсула с термитным составом; 2 — полиэтиленовая капсула с раствором реагента; 3 — монолит модельного материала; 4 — средства инициирования

Ниже дана гранулометрическая характеристика модельного материала после комбинированного взрывного и реагентного воздействия (в результате различной интенсивности взрывного воздействия):

Крупность фракции, мм	Выход фракции, %
+ 20	73.90
– 20 + 10	5.12
– 10 + 5	3.61
– 5 + 0	17.37
Итого	100.00

Динамика выхода меди в продуктивный раствор в результате комбинированного взрывного и реагентного воздействия с применением различных реагентов приведена на рис. 2. “Нулевой” опыт представляет собой взрывное разрушение модели рудного массива с последующим выщелачиванием стандартным раствором реагента (жирная кривая). Изменение концентрации меди в продуктивном растворе рассчитывалось относительно “нулевого” эксперимента.

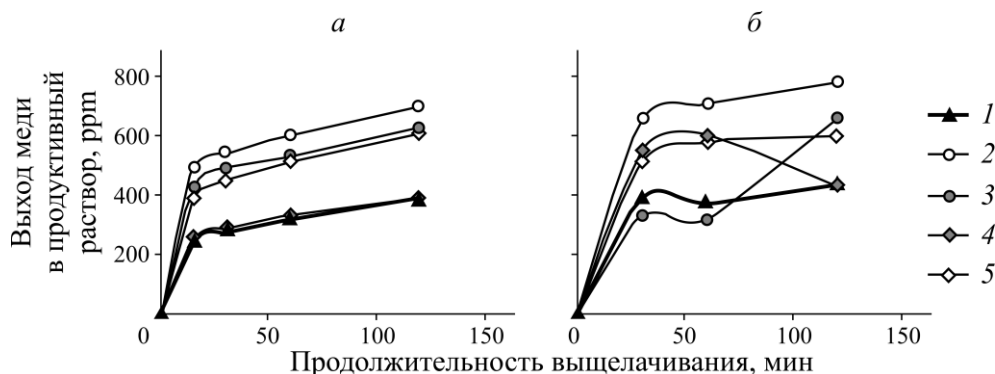


Рис. 2. Динамика выхода меди после комбинированной взрывной и реагентной подготовки с применением различных реагентов: комплексообразователя Jin Chan без активации (а) и электроактивированного (б): 1 — взрывное дробление без реагента; 2 — H_2O ; 3 — $\text{NaHCO}_3^* + \text{H}_2\text{O}_2$; 4 — Cl^* ; 5 — $\text{NaOH}^* + \text{H}_2\text{O}_2$

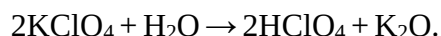
На рис. 2а приведены результаты по выщелачиванию меди с применением стандартного комплексообразователя, раствор которого приготовлен на основе дистиллированной воды. На рис. 2б представлена динамика выхода меди в продуктивный раствор после комбинированной взрывной и реагентной подготовки с применением различных реагентов. В данном эксперименте использовался активированный комплексообразователь Jin Chan.

При применении активированного раствора реагента Jin Chan выход меди в продуктивный раствор для всех видов реагентов, используемых при комбинированном взрывном и реагентном воздействии ($\text{NaHCO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$, $\text{NaOH} + \text{H}_2\text{O}_2$, NaClO , H_2O), выше в каждом случае. Следовательно, активация комплексообразователя Jin Chan с применением раствора электроактивированного раствора гидрокарбоната натрия повышает эффективность выхода меди в продуктивный раствор (таблица).

Сравнительная эффективность выхода меди в продуктивный раствор при различных режимах комбинированной взрывной и реагентной обработки модели рудного массива

Реагент, применяемый в комбинированной взрывной и реагентной подготовке	Максимальный выход реагента Jin Chan, ppm		Прирост концентрации, %	
	стандартного	электроактивированного	Комбинация взрывного и реагентного воздействия	Влияние активации выщелачивающего раствора
H_2O	698	780	83.2	11.7
$\text{NaHCO}_3^* + \text{H}_2\text{O}_2$	624	659	63.8	5.6
$\text{NaOH}^* + \text{H}_2\text{O}_2$	603	597	50.0	28.9
NaClO^*	300	615	3.4	105.0
“Нулевой” опыт	381	436	—	14.4

Реакция, протекающая между водой и перхлоратом калия, приводит к образованию хлорной кислоты, являющейся сильнейшим окислителем:



Именно благодаря образованию хлорной кислоты при взаимодействии термитного состава и инъектируемой в модель рудного массива воды достигнут максимальный прирост выхода меди в продуктивный раствор за счет комбинированного взрывного и реагентного воздействия. Он составил 83 % для электроактивированного реагента-комплексобразователя.

Для стандартного раствора Jin Chan наблюдается планомерный прирост концентрации меди в растворе. Для активированного раствора динамика выхода меди в раствор характеризуется прогибами (рис. 2б), отражающими снижение концентрации меди в растворе. Возможно, снижение концентрации меди в растворе с увеличением продолжительности выщелачивания связано с процессами переосаждения.

Применение реагентного воздействия в комбинации со взрывным приводит к повышенному выходу меди в продуктивный раствор на 83,2 % (относительно “нулевого” опыта). Прирост извлечения меди в продуктивный раствор происходит за счет образования хлорной кислоты при взаимодействии термитного состава и инъектируемой в модель рудного массива воды. Активирующее воздействие на рабочий раствор выщелачивания повышает извлечения меди в продуктивный раствор на 11,7 %.

Использование гидрокарбонатно-пероксидного раствора ($\text{NaHCO}_3^* + \text{H}_2\text{O}_2$) при комбинированном взрывном и реагентом воздействии обеспечивает максимальную итоговую концентрацию меди в продуктивном растворе 659 ppm, что соответствует модельному материалу, подвергнутому комбинированному взрывному и реагентному воздействию и выщелачиваемому активированным раствором комплексобразователя.

Максимальная концентрация меди при выщелачивании модельного материала после использования активного хлоридного раствора (Cl^*) при комбинированном взрывном и реагентом воздействии составляет 615 ppm (при активационном выщелачивании). Оптимальная продолжительность выщелачивания снижена до 44 мин. Далее наблюдается снижение концентрации меди вследствие ее восстановления и перехода в нерастворимое состояние.

Рост концентрации меди при выщелачивании модельного материала после использования щелочно-пероксидного раствора ($\text{NaOH}^* + \text{H}_2\text{O}_2$) при комбинированном взрывном и реагентом воздействии активно происходит до 44 мин, после выходит на “плато”. В данном эксперименте активация раствора выщелачивания позволила снизить продолжительность выщелачивания до 44 мин для достижения концентрации меди в продуктивном растворе 580 ppm.

Во всех экспериментах комбинация взрывного и реагентного воздействия на модельный материал, а также активация раствора выщелачивания оказывала положительное влияние на прирост извлечения меди в продуктивный раствор в последующих процессах выщелачивания (по сравнению с обычной взрывной подготовкой перед выщелачиванием). Прирост концентрации меди составляет 50 – 83 % в зависимости от применяемого реагента.

ВЫВОДЫ

Экспериментально подтверждена эффективность взрывоинъекционного окисления и выщелачивания меди из модельного материала, максимально соответствующего по прочностным параметрам метасоматизированным меднопорфировым рудам: достигнуто существенное повышение выхода этого металла в продуктивные растворы (фильтраты пульпы) относительно контрольных значений, полученных при стандартной взрывной подготовке.

Максимальный прирост выхода меди в продуктивный раствор (83.2 % относительно “нулевого” опыта) достигнут при использовании в экспериментах в качестве инъектируемого агента электроактивированной дистиллированной воды, пары которой, образующиеся при термическом воздействии взрывных газов, формируют высокоактивные окислители: хлорную кислоту при взаимодействии с основным компонентом взрывчатого вещества перхлоратом калия и пероксиды водорода при взаимодействии с продуктами его диспропорционирования радикалами и ион-радикалами кислорода.

Использование в качестве инъектируемого агента гидрокарбонатно-пероксидного раствора ($\text{NaHCO}_3^* + \text{H}_2\text{O}_2$) при комбинированном взрывном и реагентом воздействии обеспечивает максимальную итоговую концентрацию меди в продуктивном растворе, по сравнению с другими реагентными комплексами.

Установлено, что общий максимальный эффект достигается при комбинации взрывоинъекционной подготовки и последующего выщелачивания металлов электроактивированными растворами реагентов соответствующего состава, при этом комбинированное взрывное и реагентное воздействие на модельный материал с применением активных растворов снижает продолжительность выщелачивания меди из модельного материала с 2 ч до 44 мин.

Полученные результаты позволяют использовать взрывоинъекционную подготовку в технологии шахтного (блочного) выщелачивания при освоении запасов меди в целиках, в обрушенной руде отработанных блоков, в нижних участках основных залежей, в маломощных рудных телах, а также в доизвлечении ее из твердеющей закладки камер отработанных горизонтов, сформированной на основе хвостов флотации.

Технологические исследования и химический анализ выполнены на базе ЦКП “ЦИМС” ХФИЦ ДВО РАН. Исследования проведены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием “Центр обработки и хранения научных данных ДВО РАН”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Секисов А. Г., Шевченко Ю. С., Лавров А. Ю. Взрывоинъекционная подготовка руд к выщелачиванию // Всерос. конф. “Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды”. — 2012. — С. 125–132.
2. Строительство и эксплуатация рудников подземного выщелачивания / В. Н. Мосинец, Д. П. Лобанов, М. Н. Тадеев и др. — М.: Недра, 1987. — 303 с.
3. Xie H., Mao Zh., Xiao D., and Liu J. Rapid detection of copper ore grade based on visible-infrared spectroscopy and TSVD-IVTELM, Measurement, 2022, Vol. 203. — 112003.
4. Bahamondez C., Castro R., Vargas T., and Arancibia E. In situ mining through leaching: experimental methodology for evaluating its implementation and economic considerations, J. Southern African Institute Min. and Metallurgy, 2016, Vol. 116, Is. 7. — P. 689–698.
5. Parra H., Onederra I., Michaux S. et al. A study of the impact of blast induced conditioning on leaching performance, Miner. Eng., 2015, Vol. 74. — P. 1–12.
6. Onederra I.A., Furtney J.K., Sellers E., and Iverson S. Modelling blast induced damage from a fully coupled explosive charge, Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., 2013, Vol. 58. — P. 73–84.
7. Ouchterlony F., Bergman P., and Nyberg U. Fragmentation in production rounds and mill through-put in the Aitik copper mine, a summary of development projects 2002–2009, Rock Fragmentation by Blasting, Editors Pradeep K. Singh & Amalendu Sinha, CSIR — Central Institute of Mining and Fuel Research, Dhanbad, India, 2012. — P. 117–128.

8. **Kinyua E.M., Jianhua Zh., Kasomo R. M., Mauti D., and Mwangangi J.** A review of the influence of blast fragmentation on downstream processing of metal ores, *Miner. Eng.*, 2022, Vol. 186. — 107743.
9. **Пат. 660862 РФ.** Термитный состав для разрушения негабаритных кусков горных пород и неметаллических строительных конструкций / И. Г. Березин, П. А. Брагин, С. А. Горинов, И. Ю. Маслов; опубл. 10.07.2018, Бюл. № 19.
10. **Edgar J.O., Gould J.A., Badreshany K., and Telling J.** Mechanochemical generation of perchlorate, *Icarus*, 2022, Vol. 387, Is. 15. — 115202.
11. **Türker L.** Thermobaric and enhanced blast explosives (TBX and EBX), *Defence Technology*, 2016, Vol. 12, Is. 6. — P. 423–445.
12. **Kranz R. L.** Microcracks in rocks: A review, *Tectonophysics*, 1983, Vol. 100, Is. 1–3. — P. 449–480.
13. **Anders M. H., Laubach S. E., and Schol Ch. H.** Microfractures: A review, *J. Structural Geology*, 2014, Vol. 69. — P. 377–378.
14. **Permadi P., Marhaendrajana T., Nandya S., and Idea Kh.** Identification and characterization of microfractures in carbonate samples, *Petroleum Exploration and Development*, 2022, Vol. 49, Is. 2. — P. 415–427.
15. **Таловина И.В., Александрова Т.Н., Попов О., Либервирт Х.** Сравнительный анализ исследования структурно-текстурных характеристик горных пород методами компьютерной рентгеновской микротомографии и количественного микроструктурного анализа // Обогащение руд. — 2017. — № 3 (369). — С. 56–62.
16. **Александрова Т. Н., Гурман М. А., Кондратьев С. А.** Проблемы извлечения золота из упорных руд юга Дальневосточного региона России и некоторые пути их решения // ФТПРПИ. — 2011. — № 5. — С. 124–135.
17. **Беспалько А. А., Яворович Л. В., Еременко А. А., Штирц В. А.** Электромагнитная эмиссия горных пород после массовых взрывов // ФТПРПИ. — 2018. — № 2. — С. 10–17.
18. **Александрова Т. Н.** Комплексная и глубокая переработка минерального сырья природного и техногенного происхождения: состояние и перспективы // Зап. Горн. ин-та. — 2022. — № 256. — С. 503–504.
19. **Sekisov A. and Rasskazova A.** Assessment of the possibility of hydrometallurgical processing of low-grade ores in the oxidation zone of the Malmyzh Cu-Au porphyry deposit, *Minerals*, 2021, Vol. 11, Is. 1. — P. 1–11.
20. **Afflerbach S., Pritzel Ch., Hartwich P. et al.** Effects of thermal treatment on the mechanical properties, microstructure and phase composition of an Ettringite rich cement, *Cement*, 2023, Vol. 11. — 100058.
21. **Jin Chan.** Environmental-friendly Gold Dressing Agent. URL: http://www.gxshgk.com/senhe_en/index.php/content/index/pid/15.html (дата обращения 16.03.2023).
22. **Beyuo M., Abaka-Wood G.B., Asamoah R.K., et al.** A comparative study of sodium cyanide and jinchantm leaching reagents: A Case Study at Goldfields Ghana Limited, 4th UMaT Biennial Int. Min. and Miner. Conf., 2018— P. 195–199.
23. **Gui Q., Fu L., Hu Y., et al.** Gold extraction using alternatives to cyanide: Ultrasonic reinforcement and its leaching kinetics, *Miner. Eng.*, 2023, Vol. 191. — 107939.
24. **Guo X.Y., Liu Z.W., Tian Q.H. et al.** Gold extraction from Carlin-type concentrate by a novel environmentally friendly lixiviant, *Hydrometallurgy*, 2022, Vol. 211. — 105884.
25. **Zhang Y., Cui M., Wang J. et al.** A review of gold extraction using alternatives to cyanide: Focus on current status and future prospects of the novel eco-friendly synthetic gold lixiviants, *Miner. Eng.*, 2022, Vol. 176. — 107336.
26. **Курков А. В., Ануфриева С. И., Соколова В. Н. и др.** Информационно-аналитические материалы: Мировые достижения развития методов, техники и технологий переработки минерального сырья. Серия: Гидрометаллургическая и геотехнологическая переработка минерального сырья. — М.: Изд-во ВИМС, 2020. — 30 с.

27. Дементьев В. Е., Дружина Г. Я., Гудков С. С. Кучное выщелачивание золота и серебра. — Иркутск: Иргиредмет, 2004. — 352 с.
28. **Tabbì G., Giuffrida A., and Bonomo R. P.** Determination of formal redox potentials in aqueous solution of copper(II) complexes with ligands having nitrogen and oxygen donor atoms and comparison with their EPR and UV–Vis spectral features, *J. Inorg Biochem.*, 2013, Vol. 128. — P. 137–145.
29. **Drogowska M., Brossard L., and Ménard H.** Copper Dissolution in NaHCO_3 and $\text{NaHCO}_3 + \text{NaCl}$ Aqueous Solutions at pH 8, *J. Electrochem. Soc.*, 1992, Vol. 139. — P. 39.
30. **Hamidah I., Solehudin A., Hamdani A. et al.** Corrosion of copper alloys in KOH, NaOH, NaCl, and HCl electrolyte solutions and its impact to the mechanical properties, *Alexandria Eng. J.*, 2021, Vol. 60, Is. 2. — P. 2235–2243.
31. **Luo W., Xu Y., and Yan M.** Effect of grain size on corrosion of nanocrystalline copper in NaOH solution, *Corrosion Sci.*, 2010, Vol. 52, Is. 10. — P. 3509–3513.
32. **Gurman M. A., Shcherbak L. I., and Rasskazova A. V.** Gold and arsenic recovery from calcinates of rebellious pyrite–arsenopyrite concentrates, *J. Miner. Sci.*, 2015, Vol. 51, No 3. — P. 586–590.
33. **Wang H., Wang Zh., Wang J. et al.** Effect of confining pressure on damage accumulation of rock under repeated blast loading, *Int. J. Impact Eng.*, 2021, Vol. 156. — 103961.

Поступила в редакцию 06/VI 2023

После доработки 19/X 2023

Принята к публикации 16/XI 2023