

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.772

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ХИМИКО-ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА ИЗ УПОРНОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

В. А. Чантурия, А. Л. Самусев, В. Г. Миненко

*Институт проблем комплексного освоения недр РАН,
E-mail: andrey63vzm@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Приведены результаты экспериментальных исследований по интенсификации химико-электрохимического выщелачивания золота из упорного концентрата ультразвуком. На основе оценки эффективности насыщения электрохимически активным хлором хлоридных растворов и изучения изменения морфологии поверхности, элементного, фазового и гранулометрического составов концентрата определен механизм интенсификации процесса выщелачивания и установлены рациональные параметры ультразвуковой обработки минеральной суспензии, обеспечивающие повышение извлечения золота за 5 ч на 39 %.

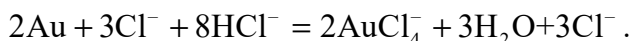
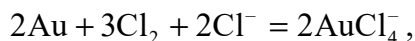
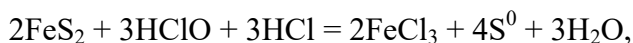
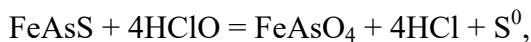
Упорные золотосодержащие руды, арсенопирит, активный хлор, гипохлорит, электрохимическое выщелачивание, хлорид натрия, ультразвук

DOI: 10.15372/FTPRPI20200518

Актуальная проблема золотодобывающей промышленности России — увеличение в структуре минерально-сырьевых запасов упорных сульфидных руд, в которых золото находится в тесной ассоциации с пиритом и арсенопиритом, характеризующимися высокой химической устойчивостью к большинству выщелачивающих реагентов. В процессе выщелачивания этих минералов образуется значительное количество железосодержащих пленок и соединений на поверхности, препятствующих проникновению к минералам выщелачивающего реагента. При переработке упорных золотосодержащих сульфидных руд и концентратов традиционным методом цианидного выщелачивания извлекается недостаточный объем золота [1–9]. В настоящее время исследуется более 25 альтернативных цианированию процессов выщелачивания упорного золотосодержащего сырья [10–12]. Процессы выщелачивания с использованием тиосульфатов и галогенидов проработаны наиболее подробно и реализованы в промышленности [13, 14].

Один из эффективных методов — выщелачивание водными растворами хлора (гидрохлорирование), характеризующимися высокой окислительной и растворяющей способностью по отношению к золоту [15–20]. Его суть заключается в окислении золотосодержащих суль-

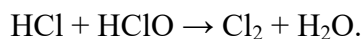
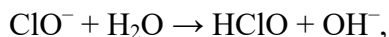
фидов, например пирита и арсенопирита, и содержащегося в них золота водными растворами активного хлора с образованием комплекса $[\text{AuCl}_4]^-$. Скорость растворения золота и устойчивость хлоридного комплекса Au(III) зависят от pH и температуры раствора, концентраций активного хлора и хлоридов [21 – 23].



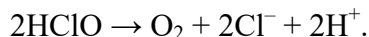
В [24, 25] научно обоснован и апробирован метод химико-электрохимического выщелачивания золота из упорного концентрата, основанный на использовании в качестве растворителя электрохимически обработанного в бездиафрагменном электролизере (без мембранного разделения электродного пространства) раствора хлорида натрия, характеризующегося после обработки содержанием активного хлора до 2 г/дм³. Суммарную реакцию электролитического получения гипохлорита натрия в электролизере без мембранного разделения электродного пространства (pH 5 – 10) запишем как



Гипохлорит натрия образует в воде хлорноватистую кислоту и гипохлоритный ион в соотношениях, определяемых реакциями гидролиза гипохлорита натрия и диссоциации хлорноватистой кислоты, протекание которых взаимосвязано с pH воды. При выщелачивании за счет растворения сульфидных минералов происходит снижение pH в кислую область с 2 до 5. Это приводит к смещению соотношения между гипохлорит-ионом и хлорноватистой кислотой в сторону увеличения концентраций хлорноватистой кислоты, а также к образованию в растворе свободного хлора:



В данном диапазоне значений pH возможно разложение хлорноватистой кислоты по кислотному механизму:



Процессы электрохимического получения активного хлора и растворения золота совмещены в одном технологическом аппарате. В [25] определены параметры химико-электрохимического выщелачивания упорного золотосодержащего концентрата, обеспечивающие максимальное извлечение золота (59.8 %) за 10 ч. Актуальна задача интенсификации процесса химико-электрохимического выщелачивания.

Перспективные методы интенсификации выщелачивания упорного золотосодержащего сырья — применение различных видов энергетических воздействий: электрохимической, ультразвуковой и ультрафиолетовой обработки суспензий, энергии ускоренных электронов, мощных электромагнитных импульсов и др. Ультразвук используется в разных гидрометаллургических процессах: при вскрытии упорных руд, активации реагентов-растворителей, выщелачивании концентратов, экстракции и электролизе металлов и др. [26 – 33]. Воздействие ультразвуковых волн на суспензию вызывает гидродинамические возмущения в виде микроударных волн, кумулятивных струек и микропотоков жидкости, способствуя высокоскоростным столкновениям

твердых частиц, увеличению количества микропор на поверхности минералов и ускорению диффузии раствора. Данные процессы повышают скорость протекания химических процессов. Интенсивность ультразвуковой обработки и температура суспензии влияют на эффективность выщелачивания. Превышение оптимальных значений данных параметров приводит к ослаблению эффекта кавитации, разложению реагента-растворителя и снижению скорости растворения ценных компонентов [27, 28].

Цель настоящей работы — исследование влияния ультразвуковых воздействий на механизм и эффективность химико-электрохимического выщелачивания упорного золотосодержащего концентрата.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились на флотационном золотосодержащем концентрате Васильковского месторождения (Казахстан). Основной компонент концентрата — арсенопирит (60–65 %), среднее содержание золота — 52.5 г/т (табл. 1, 2). Золото в данном концентрате находится в тесной ассоциации с арсенопиритом, входя в его структуру в виде тонковкрапленных или эмульсионных включений, поэтому при прямом цианировании уровень извлечения благородного металла не превышает 60–65 % за 20 ч [34].

ТАБЛИЦА 1. Химический состав исследуемого концентрата, мас. %

Элемент	Химический состав	Соединение	Химический состав
Si	12.30	SiO ₂	26.30
Mg	0.12	MgO	0.40
Ca	0.10	CaO	0.35
Fe	25.84	FeS ₂	1.90
Al	3.12	Al ₂ O ₃	5.90
S	15.19	FeAsS	61.50
As	28.26	K ₂ O	2.25
Mn	<0.005	Na ₂ O	0.73
Cu	0.236	Прочее	0.70
Au, г/т	52.50	—	—
Ag, г/т	6.60	—	—

Выщелачивание золота выполнялось на пробах массой 30 г в лабораторной установке, обеспечивающей комбинированные ультразвуковые и электрохимические воздействия (рис. 1). Материал электродов — титан с покрытием смеси оксида иридия и рутения (ОИРТА-И1). Ультразвуковая обработка осуществлялась с помощью диспергатора МЭФ-15 (МЭЛФИЗ, Россия) мощностью 600 Вт и рабочей частотой 22 кГц.

ТАБЛИЦА 2. Гранулометрический состав пробы с распределением золота по классам крупности

Класс крупности, мм	Выход, %	Содержание золота, г/т
+0.074	5.05	43.4
–0.074 + 0.044	4.57	48.1
–0.044	90.38	53.2
Итого	100.00	52.5

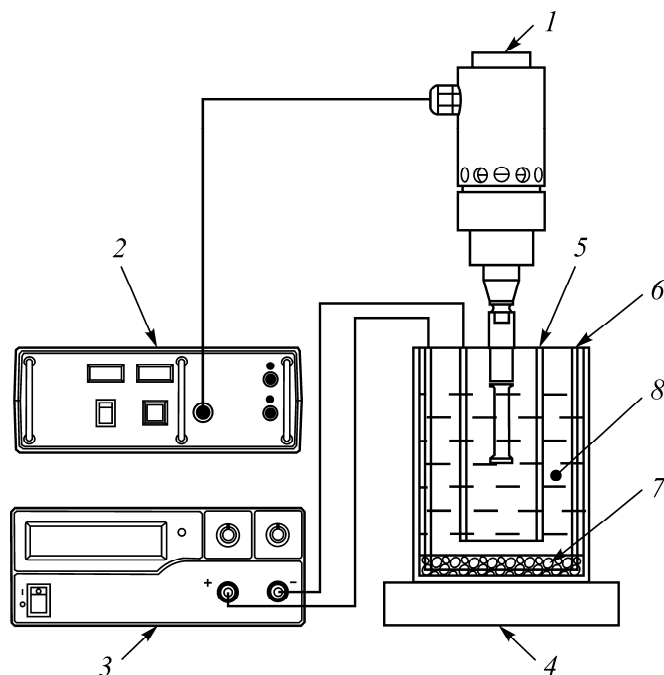


Рис. 1. Лабораторная установка: 1 — ультразвуковой диспергатор; 2 — блок управления диспергатором; 3 — источник постоянного тока; 4 — магнитная мешалка; 5 — сетчатый катод; 6 — анод; 7 — минеральная навеска; 8 — раствор хлорида натрия

Химико-электрохимическое выщелачивание осуществляли при ранее разработанных оптимальных параметрах: концентрации NaCl 250 г/дм^3 , соотношении Т : Ж = 1 : 10, объемной плотности тока 3.75 А/дм^3 , напряжении $2.5\text{--}3.0 \text{ В}$, продолжительности выщелачивания $5\text{--}10 \text{ ч}$ [25]. В данных условиях концентрация гипохлорит-ионов составляет $1.5\text{--}2.0 \text{ г/дм}^3$. Остаток, полученный после выщелачивания концентрата, промывали дистиллированной водой, высушивали и анализировали.

Выход по току вычислялся как отношение массы фактически прореагировавшего (выделившегося) вещества m_f (определяется по концентрации в растворе) к теоретическому массопереносу m_t , рассчитанному по первому закону Фарадея:

$$B_t = \frac{m_f}{m_t} 100\% = \frac{m_f n F}{\mu I t} 100\%,$$

где n — заряд иона; μ — молярная масса, г/моль ; $F = 96\,500$ — число Фарадея, Кл; I — ток, пропущенный через электролит, А; t — продолжительность электрохимической обработки, с.

Интенсивность ультразвуковой обработки, т. е. удельный расход электроэнергии на ультразвуковую обработку концентрата при выщелачивании, определялась по формуле

$$I_{\text{уз}} = \frac{Pt}{3600m},$$

здесь P — мощность ультразвукового диспергатора, Вт; $t = t_{\text{лоб}} \gamma k$ — суммарное время ультразвуковой обработки минеральной суспензии при выщелачивании, с; m — масса обрабатываемой минеральной пробы, г; $t_{\text{лоб}}$ — продолжительность разовой ультразвуковой обработки минеральной суспензии, с; γ — частота ультразвуковых обработок минеральной суспензии за 1 ч выщелачивания, 1/ч; k — время выщелачивания концентрата, ч.

Интенсивность ультразвуковых воздействий регулировалась продолжительностью и периодичностью работы ультразвукового генератора. Анализ морфологии и структурно-химических свойств поверхности золотосодержащего концентрата выполнен растровой электронной микроскопией (РЭМ) (LEO 1420VP, Carl Zeiss), элементный и фазовый составы определялись методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой (Agilent 725 ICP-OES, Agilent Technologies) и рентгеновской дифрактометрией (XRD 7000, Shimadzu) в ЦКП ИПКОН РАН “Аналитический центр изучения природного вещества при комплексном освоении недр”. Концентрации активного хлора устанавливались методом йодометрического титрования. Распределение минеральных частиц по крупности проводилось с помощью лазерного анализатора Analysette 22, Fritsch.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние ультразвука на эффективность образования активного хлора. При ультразвуковой обработке жидкость нагревается. Даже кратковременная ультразвуковая обработка в течение 20–40 с приводит к повышению температуры суспензии до 30–35 °С (рис. 2а), что способствует разложению хлорноватистой кислоты по кислородному механизму, хлоратному разложению гипохлорит иона и снижению растворимости свободного хлора, концентрации активного хлора и эффективности растворения ценных компонентов:

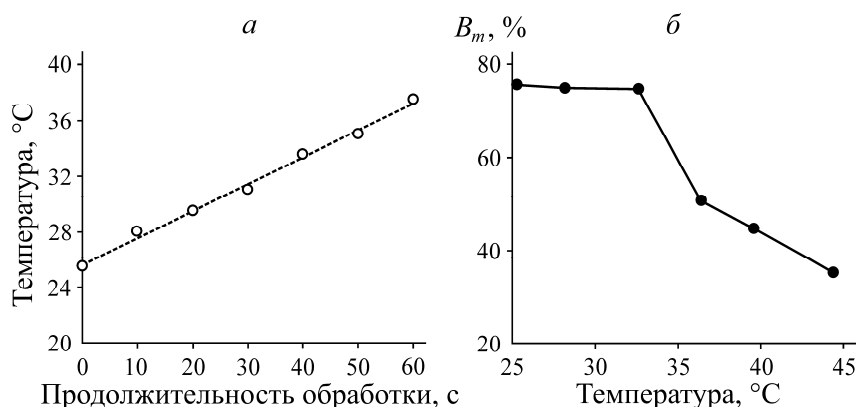


Рис. 2. Зависимости температуры суспензии от продолжительности ультразвуковой обработки (а) и выхода по току активного хлора от температуры суспензии (б)

Для оценки влияния температуры суспензии на эффективность электролитического получения активного хлора рассчитаны значения выхода по току B_i (рис. 2б). При температуре выше 32–37 °С происходит резкое снижение выхода по току активного хлора более чем на 25–40 %. В дальнейших исследованиях процесса выщелачивания концентрата продолжительность ультразвуковой обработки не превышала 15 с за один период.

Влияние интенсивности ультразвуковой обработки на эффективность выщелачивания. Ниже приведены результаты извлечения золота при выщелачивании концентрата в зависимости от интенсивности ультразвуковой обработки (удельный расход электроэнергии на ультразвуковую обработку концентрата при выщелачивании):

$I_{\text{вз}}$, Вт·ч/г	0	0.42	0.84	1.25	1.67
Извлечение Au, %	40.1	64.00	66.60	79.00	75.10

Интенсивность ультразвука составляла 0–1.67 Вт·ч/г и зависела от количества ультразвуковых обработок минеральной суспензии в течение каждого часа (от 0 до 4) и продолжительности выщелачивания, так как мощность ультразвукового диспергатора (600 Вт), масса минеральной пробы (30 г) и продолжительность разовой ультразвуковой обработки (15 с) — постоянные.

Увеличение удельной мощности с 0.42 (1 ультразвуковая обработка в час) до 1.25 Вт·ч/г (3 ультразвуковые обработки в час) обеспечивает повышение извлечения золота за 5 ч выщелачивания с 40.1 до 79.0 %. При увеличении с 1.25 до 1.67 Вт·ч/г (4 ультразвуковые обработки в час) извлечение золота уменьшается с 79.0 до 75.1 % из-за температуры суспензии более 37 °С после 1.5–2.0 ч выщелачивания и снижения эффективности образования активного хлора.

Минералогические исследования. На рис. 3–5 представлены РЭМ-изображения исходного золотосодержащего концентрата, остатка после стандартного выщелачивания и выщелачивания с ультразвуком. Размер большинства минеральных частиц исходного концентрата не превышает 40–60 мкм, поверхность зерен арсенопирита выглядит гладкой, дефекты и трещины не наблюдались (рис. 3а, б). Атомные отношения FeAsS на энергодисперсионных спектрах поверхности частиц арсенопирита близки к теоретическому значению 1 : 1 : 1 (рис. 3в).

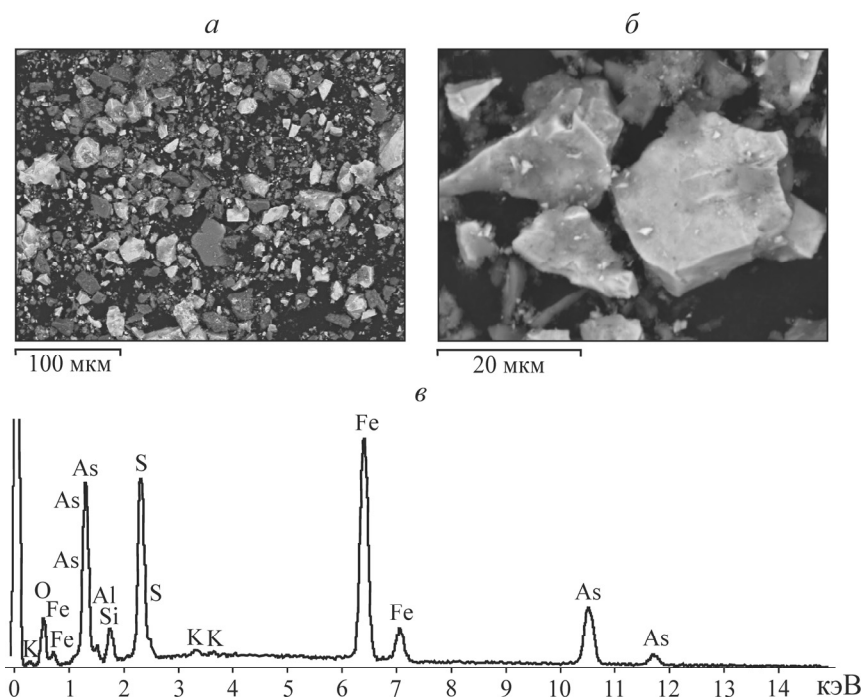


Рис. 3. Изображения (а, б) и энергодисперсионный спектр (в) поверхности частиц арсенопирита до выщелачивания

В образцах концентрата после стандартного выщелачивания заметно увеличение количества частиц менее 10 мкм (рис. 4а). Поверхность зерен арсенопирита имеет чешуйчатое покрытие и дефекты (рис. 4б). Анализ энергодисперсионных спектров выявил повышение пиков Fe и O при снижении пиков As и S, связанное с образованием новых фаз: гидроксидов железа, элементарной серы и др. (рис. 4в). Окисленные пленки затрудняют доступ растворителя к поверхности непрореагировавшего арсенопирита, что обуславливает низкую эффективность выщелачивания.

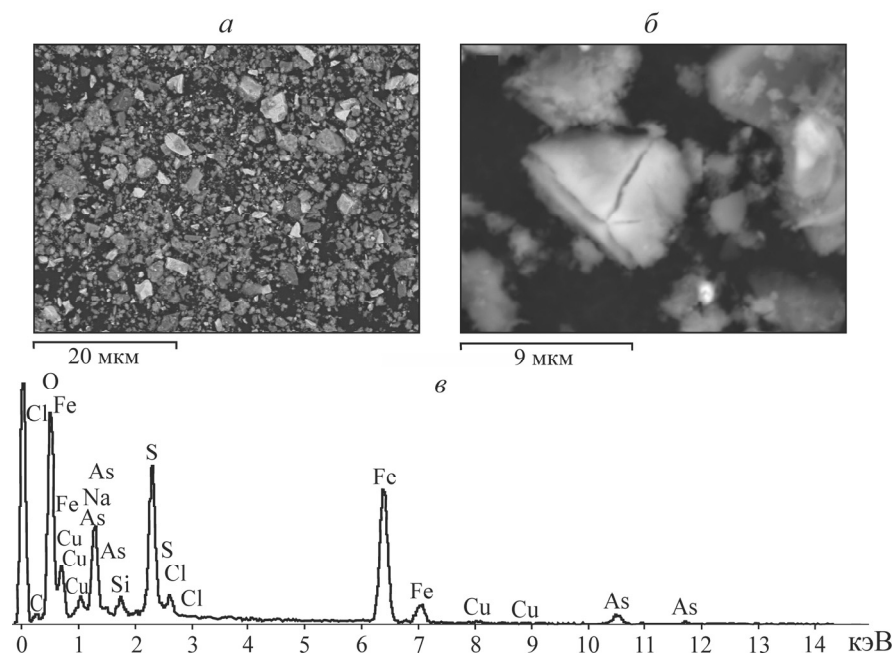


Рис. 4. Изображения (а, б) и энергодисперсионный спектр (в) поверхности частиц арсенопирита после выщелачивания

На поверхности арсенопирита после выщелачивания с ультразвуком обнаружены многочисленные микропоры, дефекты и зоны травления (рис. 5а). Элементный состав поверхности близок к исходному состоянию арсенопирита (рис. 5в). Отсутствие окисленных пленок и многочисленные дефекты связаны с ультразвуковой обработкой суспензии в процессе выщелачивания. Изменение крупности отдельных зерен арсенопирита в результате выщелачивания с ультразвуковой обработкой методом РЭМ не наблюдается. При выщелачивании золотосодержащего концентрата образуется взвесь тонкодисперсных частиц менее 1 мкм, элементный состав которых близок к исходному арсенопириту, с примесями Si и Al (рис. 5б).

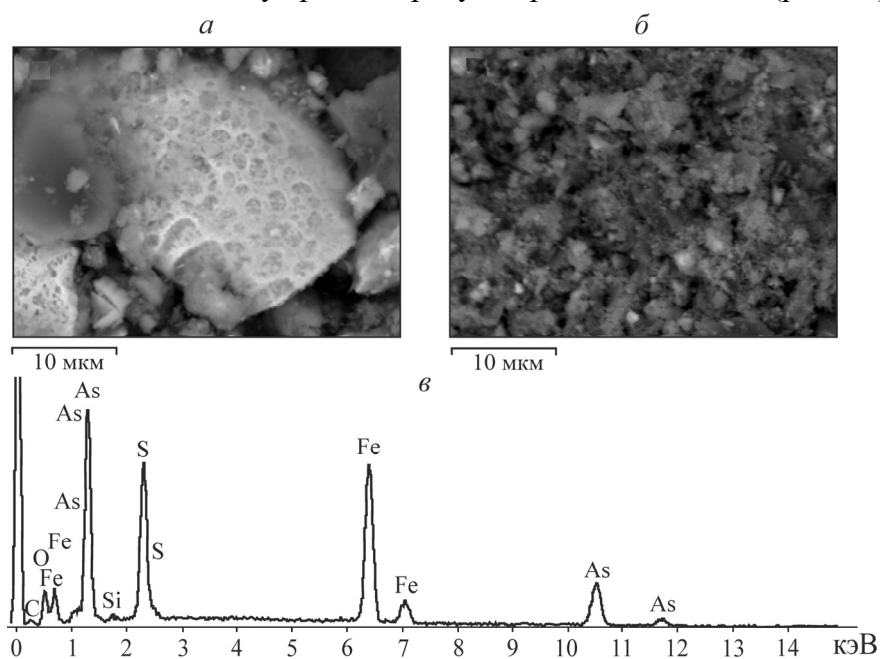


Рис. 5. Изображения (а, б) и энергодисперсионный спектр (в) поверхности частиц арсенопирита после выщелачивания с ультразвуком 1.25 Вт·ч/г

На рис. 6 приведены рентгенограммы исходного концентрата и остатков выщелачивания. Снижение интенсивности пиков фазы FeAsS и увеличение интенсивности пиков SiO₂ указывают на растворение арсенопирита при стандартном выщелачивании. Остаток выщелачивания с ультразвуком характеризуется большим уменьшением интенсивности пиков фазы FeAsS и наличием пиков фазы скородита (слаботоксичной формы мышьяка) — нерастворимого арсената железа FeAsO₄·2H₂O.

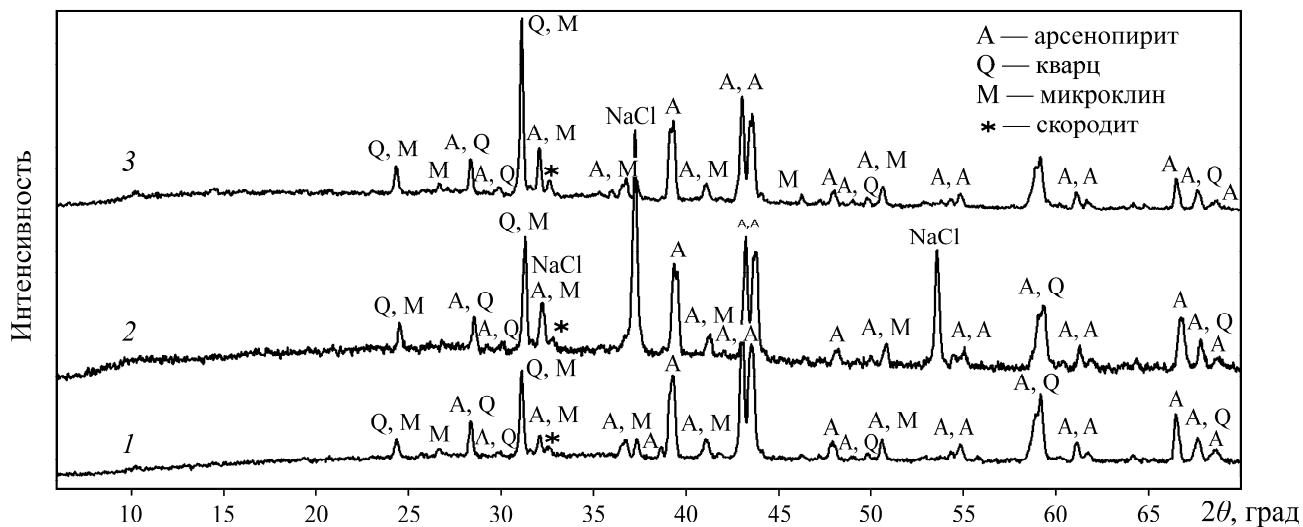


Рис. 6. Рентгенограммы исходного концентрата (1), остатков после исходного (2) химико-электрохимического выщелачивания и с ультразвуком (3)

Гранулометрические составы исходного концентрата и остатков выщелачивания при различных режимах ультразвуковой обработки представлены на рис. 7.

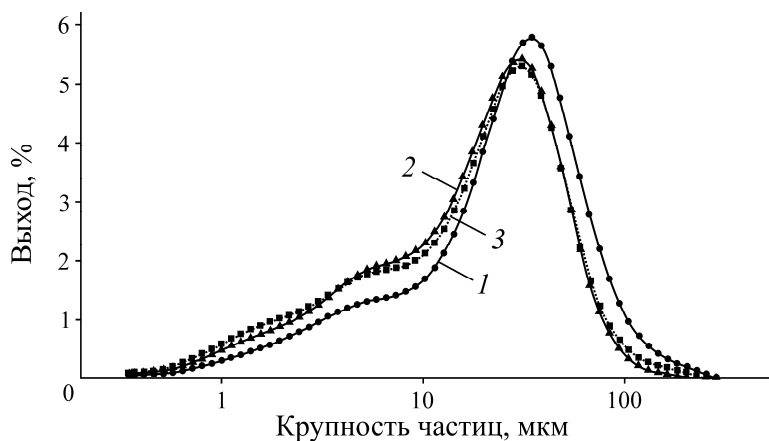


Рис. 7. Распределение по крупности частиц концентрата: 1 — исходный; 2 — после 5 ч выщелачивания без ультразвука; 3 — после 5 ч выщелачивания с ультразвуком 1.25 Вт·ч/г

Согласно кривым распределения частиц по размерам, размер частиц исходного концентрата составлял 0.3–300 мкм. Кривые распределения образцов концентрата после стандартного выщелачивания и с ультразвуковым воздействием на минеральную суспензию выявили уменьшение количества частиц размером 30–300 мкм и увеличение доли частиц размером 0.4–20 мкм, что обусловлено растворением зерен арсенопирита при выщелачивании и измель-

чением концентрата при ультразвуковой обработке и перемешивании минеральной суспензии. Поскольку диапазон измерений по крупности лазерного анализатора Analysette 22, Fritsch составляет 0.3–300 мкм, коллоидные частицы в образцах концентрата после выщелачивания с ультразвуковой обработкой не фиксируются. Выявленные частицы методом РЭМ позволяют предположить о сильном разрушении минеральных частиц при ультразвуковой обработке суспензии.

Влияние продолжительности процесса на эффективность химико-электрохимического выщелачивания. На рис. 8 представлена зависимость извлечения золота от продолжительности химико-электрохимического выщелачивания концентрата с ультразвуковой обработкой суспензии.

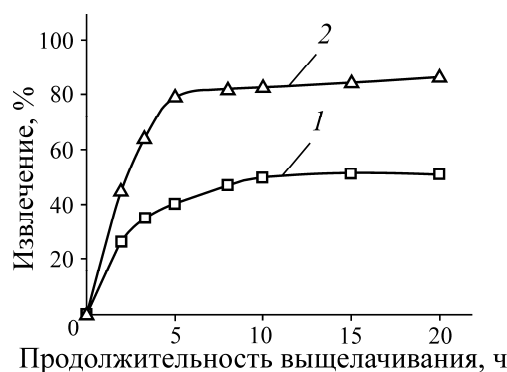


Рис. 8. Влияние продолжительности химико-электрохимического выщелачивания на извлечение золота: 1 — исходное выщелачивание; 2 — выщелачивание с ультразвуком

Увеличение продолжительности процесса выщелачивания с ультразвуковой обработкой минеральной суспензии с 5 ($I_{yz} = 1.25$ Вт·ч/г) до 10 и 20 ч повышает извлечение золота с 79.0 % до 82.5 и 86.4 % соответственно. Но это экономически нецелесообразно, так как увеличивается удельный расход электроэнергии в 2–4 раза. Рациональная величина интенсивности ультразвуковой обработки минеральной суспензии, обеспечивающая повышение извлечения золота за 5 ч выщелачивания на 39 % (с 40 до 79 %), соответствует 1.25 Вт·ч/г.

ВЫВОДЫ

Получены новые научные данные о механизме интенсификации химико-электрохимического выщелачивания упорного золотосодержащего концентрата при ультразвуковых воздействиях, заключающемся в удалении окисленных пленок и интенсивном растворении частиц арсенопирита за счет образования на их поверхности многочисленных микропор и зон травления. Установлена рациональная величина интенсивности ультразвуковой обработки минеральной суспензии (1.25 Вт·ч/г), обеспечивающая повышение извлечения золота за 5 ч с 40 до 79 %.

Авторы благодарны Е. В. Копорулиной и А. Б. Палкину за оказанную помощь при выполнении экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лодейщиков В. В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд. — Иркутск: Иргиредмет, 1999. — 342 с.
2. Лодейщиков В. В. Упорные золотые руды и основные принципы их металлургической переработки // Гидрометаллургия золота. — 1980. — С. 5–18.

3. Фазлуллин М. И. Кучное выщелачивание благородных металлов. — М.: АГН, 2001. — 657 с.
4. Палеев П. Л., Гуляшинов А. Н., Антропова И. Г., Гуляшинов П. А. Извлечение золота из упорных арсенопиритовых руд и концентратов // Золото и технологии. — 2013. — № 2 (20). — С. 36–38.
5. Меретуков М. А., Орлов А. М. Металлургия благородных металлов. Зарубежный опыт. — М.: Металлургия, 1990. — 416 с.
6. Sedelnikova G., Kim D., and Ibragimova N. Recovery gold from refractory old sulfide tailings using heap bio-oxidation, IMPC-2016, 28th Int. Miner. Proc. Congress, Conf. Proc., 2016. — 724 p.
7. Лузин Б. С., Голик В. И. Выщелачивание золота из некондиционного сырья // ФТПРПИ. — 2004. — № 4. — С. 84–88.
8. Опарин В. Н., Секисов А. Г., Трубачев А. И., Смоляницкий Б. Н., Салихов В. С., Зыков Н. В. Перспективные технологии разработки золотороссыпных месторождений Забайкальского края // ФТПРПИ. — 2017. — № 3. — С. 70–78.
9. Гурман М. А., Щербак Л. И., Рассказова А. В. Извлечение золота и мышьяка из продуктов обжига упорных пирит-арсенопиритовых концентратов // ФТПРПИ. — 2015. — № 3. — С. 145–150.
10. Aylmore M. G. Alternative lixivants to cyanide for leaching gold ores, *Developments in Miner. Proc.*, 2005, Vol. 15.
11. Adams M. D. Gold ore processing, chapter 29 — chloride as an alternative lixiviant to cyanide for gold ores, 2016. — P. 525–531.
12. Зашихин А. В., Свиридова М. Л. Выщелачивание золота гуминовыми препаратами // ФТПРПИ. — 2019. — № 4. — С. 151–156.
13. Muir D. M. and Aylmore M. G. Thiosulfate as an alternative to cyanide for gold processing — issues and impediments, *Miner. Proc. and Extraction Metal., Trans. Inst. Min. Metal.*, 2004. — P. 113, C2–C12.
14. Wardell-Johnson M., Steiner G., and Dreisinger D. Engineering aspects of the Platsol process. In: *ALTA-2009 Nickel-Cobalt, Copper and Uranium Conf., ALTA Metallurgical Services, Melbourne*, 2009.
15. Зырянов М. Н., Леонов С. Б. Хлоридная металлургия золота. — М.: СП “Интермет инжиниринг”, 1997. — 288 с.
16. Hasab M. G., Raygan S., and Rashchi F. Chloride-hypochlorite leaching of gold from a mechanically activated refractory sulfide concentrate, *Hydrometallurgy*, 2013, Vol. 138. — P. 59–64.
17. Baghalha M. Leaching of an oxide gold ore with chloride/hypochlorite solutions, *Int. J. of Miner. Proc.*, 2007, Vol. 82, No. 4. — P. 178–186.
18. Cheng Y., Shen S., Zhang J., Chen S., Xiong L., and Liu J. Fast and effective gold leaching from a desulfurized gold ore using acidic sodium chlorate solution at low temperature, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2013, Vol. 52, No. 47. — P. 16622–16629.
19. Donga Z., Zhu Y., Han Y., Gao P., Gu X., and Sun Y. Chemical oxidation of arsenopyrite using a novel oxidant-Chlorine dioxide, *Miner. Eng.*, 2019. — 105863.
20. Теут А. О., Куимов Д. В., Косьянов Э. А. Извлечение золота из упорных сульфидных руд методом электрохлоринации // Плаксинские чтения–2011: Новые технологии обогащения и комплексной переработки труднообогатимого природного и техногенного минерального сырья: материалы междунар. совещания. — С. 513–516.
21. Tran T., Lee K., and Fernando K. Halide as an alternative lixiviant for gold processing — an update. In: Young C. A., Twidwell L. G., Anderson C. G. (Eds.), *Cyanide: Social, Industrial and Economic Aspects*, The Minerals, Metals and Materials Society, Warrendale, PA, USA, 2001. — P. 501–508.
22. Jeffrey M., Breuer P., and Choo W. L. How rapidly do alternative lixivants leach gold, In: Young C. (Ed.), *Cyanide: Social, Industrial and Economic Aspects*, TMS, 2001. — P. 441–454.

23. **Jeffrey M., Breuer P., and Choo W. L.** A kinetic study that compares the leaching of gold in the cyanide, thiosulfate, and chloride systems, metallurgical and materials transactions B. Process Metall. Mater. Proc. Sci., 2001, Vol. 32. — P. 979–986.
24. **Samusev A. L. and Tomskaya E. S.** Interaction of gold-bearing sulfides with modified chlorine solutions, J. Min. Sci., 2015, Vol. 51, No. 4. — P. 825–829.
25. **Samusev A. L. and Minenko V. G.** Productivity of chemical-electrochemical gold leaching from rebellious ore, J. Min. Sci., 2014, Vol. 50, No. 1. — P. 171–175.
26. **Глембоцкий В. А., Соколов М. А., Якубович И. А.** Ультразвук в обогащении полезных ископаемых. — Алма-Ата: Наука, 1972. — 229 с.
27. **Zhu P., Zhang X., Li K., Qian G., and Zhou M.** Kinetics of leaching refractory gold ores by ultrasonic-assisted electro-chlorination, Int. J. of Miner., Metal. and Mater., 2012, Vol. 19, No. 6. — P. 473–477.
28. **Zhang G. W., Wang S. X., Zhang L. B., and Peng J. H.** Ultrasound-intensified leaching of gold from a refractory ore, Isij. Int., 2016, Vol. 56, No. 4. — P. 714–718.
29. **Fu L., Zhang L., Wang S., Cui W., and Peng J.** Synergistic extraction of gold from the refractory gold ore via ultrasound and chlorination-oxidation, Ultrasonics Sonochemistry, 2017, Vol. 37. — P. 471–477.
30. **Swamy K. M. and Narayana K. L.** Intensification of leaching process by dual-frequency ultrasound, Ultrasonics Sonochemistry, 2001, Vol. 8. — P. 341–346.
31. **Гроо Е. А., Алгебраистова Н. К., Жижаев А. М., Романченко А. С., Макшанин А. В.** Исследование влияния ультразвуковой обработки для интенсификации процессов извлечения золота из труднообогатимого сырья // ГИАБ. — 2012. — № 2. — С. 89–96.
32. **Киенко Л. А., Воронова О. В., Кондратьев С. А.** Исследование влияния ультразвуковых воздействий на селективность флотации при обогащении отходов производства Ярославской горнорудной компании // ФТПРПИ. — 2019. — № 4. — С. 174–181.
33. **Александрова Т. Н., Афанасова А. В., Александров А. В.** Применение микроволновой обработки для снижения степени упорности углеродистых концентратов // ФТПРПИ. — 2020. — № 1. — С. 148–154.
34. **Васильев А. А.** Разработка технологии переработки золотосодержащего тонкоизмельченного сырья с использованием атмосферного окисления: дис. ... канд. техн. наук. — Иркутск, 2011. — 167 с.

Поступила в редакцию 16/VII 2020

После доработки 02/IX 2020

Принята к публикации 11/IX 2020