

А.Г. Секисов, А.Ю. Лавров, В.П. Мязин, Г.Ю. Попова
ПЕРСПЕКТИВЫ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ
ЗОЛОТА ИЗ УПОРНЫХ РУД И ТЕХНОГЕННОГО
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ФОТОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА АКТИВНЫХ
РЕАГЕНТНЫХ КОМПЛЕКСОВ В РАБОЧИХ РАСТВОРАХ

Рассмотрен механизм проникновения активных компонентов раствора в кристаллическую решетку силикатных и алюмосиликатных минералов. Предложено использовать сочетание процессов электрохимической диссоциации воды и обработки получаемой при этом суспензии источником ультрафиолетового облучения.

Ключевые слова: упорные руды, техногенное минеральное сырье, фотоэлектроактивация, выщелачивание.

Золото в рудах большинства разрабатываемых в настоящее время крупномасштабных месторождений находится в них преимущественно в форме микровключений, природных сплавов, химических соединений с теллуром и селеном или кластеризованных атомов. Кластеризованные атомы золота в минеральном веществе представляют собой наноразмерные частицы, имеющие внутренние молекулосообразные металлические связи (золото-золото) и внешние связи – с группой атомов соответствующих минералообразующих химических элементов. Извлечение таких форм золота из руд требует применения новых технологий, одной из которых является разработанная в Читинском филиале ИГД СО РАН (на базе ЗабГУ) и МГРИ-РГГРУ технология его кучного выщелачивания растворами, в которых посредством фотоэлектрохимического синтеза из сравнительно простых и не дорогостоящих реагентов формируются активные окислители и комплексобразователи. Такие активные компоненты, представленные радикальными и ион-радикальными формами нахождения в растворах элементного

кислорода, водорода, углерода и их соединений способны к проникновению в кристаллическую решетку минералов и окислению основных минералообразующих элементов, в первую очередь железа и серы или трансформации структуры решеток силикатных и алюмосиликатных минералов, с образованием относительно хорошо проницаемых гелеобразных участков поликремниевых кислот $n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$.

В реальной кристаллической решетке любого минерала всегда имеют место не только видимые в микроскоп, но и скрытые-точечные дефекты (вакансии, структуры внедрения и т.д.), что обеспечивает возможность тунелирования через междоузлия частиц малого радиуса (ионного, атомарного или молекулярного): протонов, отрицательно заряженных ионов водорода, их связанных пар, гидроксил-ионов и гидроксил-радикалов. Естественно, что при этом перечисленные частицы должны иметь соответствующую энергию, что может быть обеспечено воздействием на водный раствор с соответствующими растворенными компонентами определенными физическими полями и и/или излучениями.

Для синтеза в окисляющих растворах высокоактивных радикалов и образования в нем гидроксил-ионов и ионов гидроксония, предлагается использовать сочетание процессов электролитической диссоциации воды, сопровождающейся продуцированием газов, выделяющихся на электродах в виде пузырьков и параллельной и/или последовательной обработки получаемой при этом водно-газовой суспензии источником ультрафиолетового излучения в диапазоне 180–250 нм (рис. 1). При этом в объеме выделяемых при электролизе пузырьков газов, включая молекулы H_2O и окружающей их пленочной воде, реализуется комплекс фотохимических реакций, приводящих к образованию атомарного кислорода, озона, перекиси водорода, гидроксил-радикала и других высокоактивных окислителей. В отличие от известного способа насыщения раствора озонированным воздухом (или химически чистым кислородом), в предлагаемом способе выход конечных активных соединений значительно выше ввиду быстрого гидратационного взаимодействия с пленочной водой перечисленных выше окислителей и, соответственно, их минимальных потерь при рекомбинации в газовой фазе. Кроме того, при комбинировании этих процессов, в сравнении с известными электрохимическими реакциями, кроме протонов H^+ и гидроксил-ионов OH^- , образующимися при

электродиссоциации воды, метастабильной перекиси водорода, образующейся при разряде гидроксил-ионов на аноде, синтезируются гидроксил-радикалы, активные ион-радикальные кластеры ($\text{H}^+ \cdot n\text{H}_2\text{O} \cdot \text{HO}^\bullet \cdot m\text{H}_2\text{O}$), а также метастабильные анионы водорода (H^-), периодически обособляющиеся от или гидроксил-ионрадикалов $\text{OH}^\bullet$, вследствие их фотодиссоциации ($\text{OH}^\bullet = \text{O} + \text{H}^-$, $\text{OH}^\bullet = \text{O}^\bullet + \text{H}$).

В водных растворах на короткое время (порядка 10^{-12} с и менее) могут возникать плазмообразные области, представленные метастабильной группой $\text{H}^+ \cdot \text{H}^- \cdot \text{O}^\bullet \cdot n\text{H}_2\text{O}$ или $2\text{H}^+ \cdot 2\text{e}^- \cdot n\text{H}_2\text{O} \cdot \text{O}^\bullet$, поэтому инициированная взаимодействием со свободными радикалами, ион-радикалами диссоциация молекул воды (в составе образующихся клатратов и/или кластеров) приводит к существенному повышению их реакционной активности. В гетерогенной системе на контакте твердой фазы с жидкой, включающей плазмообразные образования, последние могут дегидратировать, т.е. за счет разрыва метастабильных связей разделяться на ионные пары $\text{H}^+ \cdot \text{H}^-$ (или пары протонов и электронов), активный атомарный кислород и активные молекулы воды. Поэтому массообменные и электроннообменные процессы в области двойного электрического слоя (ДЭС) в этом случае существенно ускоряются. Кроме того, ионные пары $\text{H}^+ \cdot \text{H}^-$, как связанные образования, могут про-

никать в кристаллическую решетку минералов, вызывая в ней разрыв химических связей в кластерах и процессы передислокации примесных атомов, в том числе золота. В водной среде ионные пары $\text{H}^+ \cdot \text{H}^-$ и гидроксил-радикалы в составе водно-гидроксидно-цианидных кластеров возбуждают электронные обо-

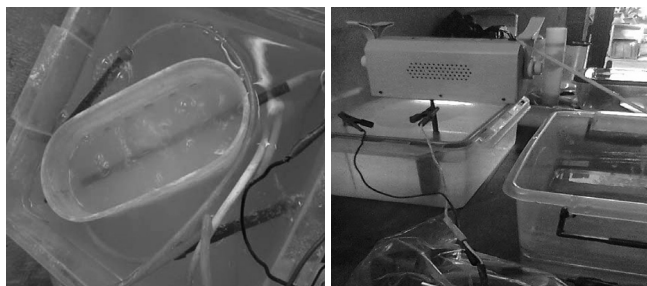
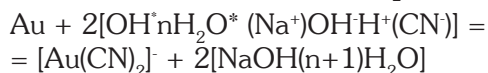


Рис. 1. Фотоэлектрохимические реакторы для подготовки активных растворов

лочки атомов золота, локализованного на поверхности микротрещин и пор и обеспечивают их взаимодействие с димерными гидратированными комплексами $2(\text{CN})$, а, следовательно и возможность одноактного образования комплексного аниона $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$:



Эксперименты по фотоэлектроактивационному выщелачиванию дисперсного золота были проведены нами на рудах и месторождения Погромное и рудной массе отработанных штабелей выщелачивания первоначально в лабораторных условиях, а затем непосредственно на руднике Апрельково в специально подготовленных предприятием перколяторах с загрузкой 100 кг каждый (рис. 2). Руда месторождения Погромное представляет собой метасоматиты переменного вещественного состава, развитые преимущественно по гранитоидам с незначительным количеством золотосодержащих сульфидных минералов и высоким содержанием продуктивного кварца и алюмосиликатных минералов.

Эксперимент на предприятии длился 38 суток, в течение которых из рудной массы экспериментальных колонн было извлечено 67–69% золота, из контрольной – 48%. По данным пробирно-



Рис. 2. Перколяторы для моделирования кучного выщелачивания на руднике Апрельково

го анализа сорбентов (активированного угля) разница в извлечении золота по фотоэлектрохимической схеме относительно контрольной была еще больше – 49,5%. Аналогичные успешные эксперименты в лабораторных перколяторах были проведены нами на упорных рудах Дарасунского, Талатуйского, Новоширокинского, Амазарканского, Савкинского, Мурунтауского, Кокпатасского месторождений и техногенном минеральном сырье Дарасунского рудника (хвосты обогащения, огарки, кеки цианирования), Балей (хвосты обогащения ЗИФ-1, ЗИФ-2), Илинского рудника (хвосты обогащения), материале отработанного штабеля ЗАО «Апрельково», алевроитовой фракции гале-эфельных отвалов артели Газимур и ЗАО «Кварц».

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Секисов Артур Геннадьевич – доктор технических наук, заместитель директора по научной работе ИГД СО РАН, директор Читинского филиала ИГД СО РАН на базе ЗабГУ, e-mail: sekisovag@mail.ru,

Мязин Виктор Петрович – доктор технических наук, профессор, e-mail: myazinvpchita@mail.ru,

Лавров Александр Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, декан факультета экономики и управления, e-mail: lavrov_2002@mail.ru,

Попова Галина Юрьевна – кандидат технических наук, зав. кафедрой, e-mail: galina.1965@inbox.ru,

Забайкальский государственный университет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лавров А.Ю., Секисов А.Г. Фотохимическая и электрохимическая активация процессов выщелачивания и сорбции дисперсных форм благородных металлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 6. – С. 179–183.

2. Секисов А.Г., Лавров А.Ю., Манзырев Д.В. Перспективные способы выщелачивания золота из техногенных образований Забайкалья с использованием фотоэлектрохимических процессов // Вестник Читинского государственного университета. – 2011. – № 2.

3. Лавров А.Ю. Кюветное, кучное и скважинное выщелачивание золота из техногенных минеральных образований и песков россыпей Забайкалья с использованием фотоэлектрохимических и электросорбционных процессов // Вестник Читинского государственного университета. – 2013. – № 1.

4. Лавров А.Ю. Повышение эффективности освоения рудных месторождений на основе использования инновационных геотехнологий с фотоэлектрохимической активацией компонентов технологических систем // Вестник Читинского государственного университета. – 2013. – № 2.

5. Лавров А.Ю., Манзырев Д.В. Использование фотоэлектрохимических и электросорбционных процессов при геологотехнологическом тестировании упорных руд // Вестник Читинского государственного университета. – 2013. – № 2.

6. Секисов А.Г., Рубцов Ю.И., Резник Ю.Н., Лавров А.Ю., Конарева Т.Г. Кучное и кюветное выщелачивание дисперсного золота из техногенного минерального сырья с использованием активированных рабочих

растворов при агломерации / Материалы конференции с участием иностранных ученых «Фундаментальные проблемы формирования техногенной среды». – Новосибирск: ИГД ДВО РАН, 2012. – С. 302–306.

7. Секисов А.Г., Лавров А.Ю., Манзырев Д.В. Фотоэлектрохимическая подготовка рабочих растворов для кучного и кюветного выщелачивания дисперсного золота из техногенного минерального сырья / XI Международная конференция «Новые идеи в науках о Земле». – М.: РГГУ, 2013. – С. 211–213.

8. Секисов А.Г., Рубцов Ю.И., Лавров А.Ю., Манзырев Д.В. Кучное и кучно-кюветное выщелачивание золота с использованием фотоэлектроактивированных растворов // Золотодобывающая промышленность. – 2013. – № 1. – С. 18–26.

9. Секисов А.Г., Трубачев А.И., Лавров А.Ю., Салихов В.С., Манзырев Д.В., Шевченко Ю.С. Геолого-технологическая оценка и новые геотехнологии освоения природного и техногенного золотосодержащего сырья Восточного Забайкалья: монография. – Чита: ЗабГУ, 2011. – С. 312. **ГИАБ**

UDC 622.34

POSSIBILITIES OF GOLD HEAP LEACHING FROM REFRACTORY ORES AND TECHNOGENIC RAW MATERIALS WITH THE HELP OF PHOTOELECTROCHEMICAL SYNTHESIS OF ACTIVE REAGENT COMPLEXES IN PROCESS SOLUTIONS

Sekisov A.G., Doctor of Technical Sciences, Deputy Director on Scientific Work, Institute of Mining of SB RAS, Director of Chita Branch of Institute of Mining of SB RAS on the basis of Transbaikalian State University, e-mail: sekisovag@mail.ru, Myazin V.P.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: myazinvpchita@mail.ru, Lavrov A.Yu.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: lavrov_2002@mail.ru, Popova G.Yu.¹, Candidate of Technical Sciences, Head of Chair, e-mail: galina.1965@inbox.ru, ¹ Transbaikalian State University, 672039, Chita, Russia.

The article describes the interaction mechanism of active solution components and crystalline lattice of silicate and aluminosilicate minerals. The author contributes the idea of using the combination of electrochemical water dissociation process and ultraviolet illumination of the resulted suspension.

Key words: refractory ores, technogenic mineral raw materials, photoelectroactivation, leaching.

REFERENCES

1. Lavrov A.Yu., Sekisov A.G. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2009, no 6, pp. 179–183.
2. Sekisov A.G., Lavrov A.Yu., Manzyrev D.V. *Vestnik Chitinskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2011, no 2.
3. Lavrov A.Yu. *Vestnik Chitinskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013, no 1.
4. Lavrov A.Yu. *Vestnik Chitinskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013, no 2.
5. Lavrov A.Yu., Manzyrev D.V. *Vestnik Chitinskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013, no 2.
6. Sekisov A.G., Rubtsov Yu.I., Reznik Yu.N., Lavrov A.Yu., Konareva T.G. *Materialy konferentsii s uchastiem inostrannykh uchenykh «Fundamental'nye problemy formirovaniya tekhnogennoi sredy»* (Proceedings of International Conference in Partnership with Foreign Scientists on Fundamental Problems of GeoEnvironment Formation under Industrial Impact), Novosibirsk, IGD DVO RAN, 2012, pp. 302–306.
7. Sekisov A.G., Lavrov A.Yu., Manzyrev D.V. *XI Mezhdunarodnaya konferentsiya «Novye idei v nauках o Zemle»* (XI Международная конференция «Новые идеи в науках о Земле»), Moscow, RGGU, 2013, pp. 211–213.
8. Sekisov A.G., Rubtsov Yu.I., Lavrov A.Yu., Manzyrev D.V. *Zolotodobyvayushchaya promyshlennost'*. 2013, no 1, pp. 18–26.
9. Sekisov A.G., Trubachev A.I., Lavrov A.Yu., Salikhov V.S., Manzyrev D.V., Shevchenko Yu.S. *Geologo-tekhnologicheskaya otsenka i novye geotekhnologii osvoeniya prirodnogo i tekhnogennogo zolotosoderzhashchego syr'ya Vostochnogo Zabaikal'ya: monografiya* (Geological-technological evaluation and new geotechnologies for natural and technogenic gold-bearing materials in the East Transbaikalia: Monograph), Chita, ZabGU, 2011, pp. 312.