

АКТИВАЦИОННОЕ КУЧНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ ДИСПЕРСНОГО ЗОЛОТА ИЗ МАЛОСУЛЬФИДНЫХ РУД

А.Г.СЕКИСОВ, *д-р техн. наук, директор, sekisovag@mail.ru*

Ю.И.РУБЦОВ, *д-р техн. наук, заведующий лабораторией, rubtsov.jri@yandex.ru*

А.Ю.ЛАВРОВ, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник, lavrov_2002@mail.ru*

Читинский филиал института горного дела СО РАН, Россия

Предложена физико-химическая модель процессов кучного выщелачивания (КВ), позволяющая обосновать новые технологические подходы к извлечению дисперсных форм золота из руд, песков россыпей и техногенного минерального сырья. Ключевым процессом модели является диффузия в кристаллическую решетку минералов высокоэнергетичных ионов водорода и гидроксил-радикалов, образующихся в результате фотохимической и электрохимической обработки водных растворов исходных реагентов. Активные компоненты водно-газовых эмульсий, полученных при обработке исходных растворов реагентов, обеспечивают структурно-вещественную трансформацию кристаллических решеток минералов, концентрирующих кластеры дисперсного золота, создавая условия для его взаимодействия с комплексообразователями рабочих растворов. Рассмотрены технологические процессы активационного кучного выщелачивания дисперсного золота из руд месторождения «Погромное» и результаты экспериментов в перколяторах с их загрузкой массой от 3 до 100 кг, подтвердившие эффективность использования подготовленных в фотоэлектрохимическом реакторе водно-газовых эмульсий с активными ион-радикальными окислителями.

Ключевые слова: активационное кучное выщелачивание, малосульфидные руды, дисперсное золото, фотоэлектрохимическая подготовка растворов, водно-газовые эмульсии.

Введение. В рудах месторождений большинства формационных типов золото находится преимущественно в рассеянном состоянии, причем не только атомарного уровня (в виде структур внедрения в междоузлиях кристаллических решеток ряда минералов и изоморфных примесей), но и, как показывают исследования многих авторов, в форме полиэлементных или моноэлементных кластеров [1, 3]. Учитывая высокую степень геохимической связи кремния и золота, установление факта кластерообразования кремния со щелочными металлами, являющимися в определенной степени аналогами золота, можно предположить существование в рудах золото-кварцевой и золото-сульфидно-кварцевой формаций, полиэлементных кластеров золота и кремния (Au_nSi_m).

Известно, что полиэлементные кластеры могут иметь структуру типа металл-лиганды (например, $Mo_3S_7Cl_4$), металл-неметалл (например, Ti_8C_{12}) или металл 1-металл 2 (например, $Au_{18}-Ag_{20}$). Поскольку кремний является аналогом углерода и также проявляет способность к образованию химических связей комбинированного типа, то наиболее вероятной формой золото-кремниевых кластеров могут быть группы атомов с общей формулой (Au_nSi_m). По гипотезе профессора МГРИ-РГГРУ П.А.Игнатова, в рудах некоторых месторождений золото может присутствовать и в остаточных поровых растворах, а не только в наноразмерных структурных компонентах твердых тел.

В этом случае золото (и серебро) может содержаться в растворах не только в форме комплексных ионов, но и моноэлементных металлических кластеров – коллоидных частиц, например, соответственно Au_{55} , Ag_8 . Такой тип кластеров может также являться субструктурой природных сплавов и амальгам в твердых минералах. Природное минеральное вещество, по крайней мере в пределах земной коры, взаимосвязано с водной средой, причем непосредственно с адсорбционной составляющей пленочной субфазы на поверхности внутрикристаллических нанотрещин (с расстоянием между их «стенками» 0,001-0,01 мкм) и

пор [2]. Адсорбционная вода мономолекулярного слоя имеет относительно высокую энергию связи с атомами поверхностного слоя кристаллической решетки минерала (40-120 кДж/моль) и поэтому при получении «извне» дополнительной энергии может активно участвовать во внутрикристаллических процессах. При этом ее воздействие на атомы (ионы) глубинных слоев кристаллической решетки может быть как опосредованным (путем последовательной передачи импульсов от атомов поверхностного слоя атомам внутренних слоев), так и непосредственным: активные молекулы воды и продукты их диссоциации (протоны, гидроксил-ионы, гидроксил-радикалы и т.д.) диффундируют внутрь решетки через междоузлия до столкновения с узлами внутренних слоев.

Внутрикристаллические вторичные процессы, обусловленные взаимодействием ионизированных молекул воды, протонов, гидроксил-ионов и гидроксил-радикалов с атомами кристаллической решетки, могут иметь как деструктивный (образование вакансий и структур внедрения), так и кластерообразующий характер.

Для извлечения из кристаллической решетки условно неокисляемых кислородом минералов требуется использование растворов, содержащих компоненты, обеспечивающие гидратационную трансформацию при взаимодействии с кремнием и кислородом кристаллической решетки. При этом в отдельных ее участках образуются поликремниевые кислоты $n\text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$. Соответственно, будучи представлены аморфными образованиями, такие участки становятся более проницаемыми для компонентов выщелачивающих растворов, что обеспечивает в свою очередь возможность протекания с их участием реакций комплекссообразования с атомами дисперсного золота.

Методика работ. Образование поликремниевых кислот возможно в водной среде, содержащей гидроксид натрия и углекислый газ, причем этот процесс интенсифицируется присутствием активных форм кислорода:



Для формирования такой активной среды в фотоэлектрохимическом реакторе готовится водно-газовая эмульсия. Растворение исходных компонентов в воде на первом этапе осуществляется путем барботаж их смеси воздухом с последующим электролизом, после завершения которого в полученную водно-газовую эмульсию вводят перекись водорода и облучают УФ-светом в диапазоне длин электромагнитных волн 180-250 нм, получая в газовой фазе активный кислород – O , а также сложные окиси углерода: CO_2 , C_2O_4 . Полученную активную водно-газовую эмульсию используют для подготовки золотосодержащей минеральной массы к выщелачиванию. При этом минеральную массу укладывают в штабели или помещают в емкости, в том числе в кюветы, орошают активной водно-газовой эмульсией и выдерживают паузу для повышения проницаемости частиц золотосодержащего кварца-халцедона, а также интенсивного выщелачивания железа и меди гидрокарбонатами и окисления серы активными формами кислорода.

После этого минеральную массу обрабатывают выщелачивающим раствором, содержащим комплексообразователи для золота, например цианид натрия. Продуктивные золотосодержащие растворы собираются в дренажной канаве или откачиваются из емкости и подаются насосом в накопительную емкость или (в зависимости от содержания золота в растворе) на сорбцию в сорбционные колонны. Далее циклы орошения активной водно-газовой эмульсией и раствором, содержащим комплексообразователи для золота, продолжают до достижения экономически оправданного уровня его извлечения.

Предлагаемая технология активационного кучного выщелачивания прошла экспериментальную проверку на рудах месторождения «Погромное» (ООО «Рудник Апрельково»), представленных малосульфидными золотосодержащими метасоматитами переменного минерального состава. Доля высвобождаемого при измельчении этой руды золота (условно свободного) составляет 60-70 %, золота в сростках 15-20 %, дисперсного и инкапсулиро-

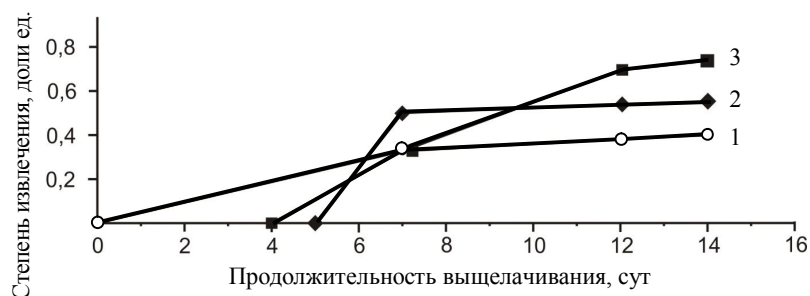


Рис.1. Кинетика выщелачивания золота из руд месторождения «Погромное»
1 – контрольная схема КВ с предварительной агломерацией; 2 – контрольная схема КВ с предварительной агломерацией и насыщением выщелачивающих растворов х.ч. кислородом; 3 – активационная схема КВ с использованием газовой эмульсии, приготовленной в фотоэлектрохимическом реакторе

ванного золота в алюмосиликатных, силикатных и в меньшей степени в сульфидных минералах – до 15 % (остальное золото покрыто пленками).

Результаты исследований. Испытания малых технологических проб проводились на предоставленном предприятием материале, из которого было взято три навески по 3 кг. Агломерация дробленой руды до

класса –10 мм осуществлялась по различным схемам. Агломерированная масса загружалась в лабораторные перколяторы и выдерживалась в них для реализации процесса диффузионного окисления минералов, содержащих дисперсное золото и укрепления окатышей.

По 1-й контрольной схеме цианидный раствор, используемый на стадии агломерации, готовился на основе водопроводной воды. По 2-й контрольной схеме цианидный раствор не использовался на стадии агломерации.

В дальнейшем выщелачивающий раствор подавался капельно на агломерированную руду (после ее выстаивания) из расчета удельного расхода 0,3 г NaCN на 1 кг руды (по предварительному согласованию с руководством предприятия), что равно удельному расходу цианида, принятому в соответствии с техническим регламентом.

Орошение контрольных проб руды осуществлялось после их выстаивания в колоннах выщелачивающими растворами: 1-я схема – водным цианидным раствором; 2-я – на кислороженным водным цианидным раствором. Для орошения экспериментальной навески руды, после агломерации и выстаивания, использовался активный цианидный раствор, который готовился на базе активной водно-газовой эмульсии, подготовленной в фотоэлектрохимическом реакторе.

Результаты исследований приведены на рис.1.

Далее эксперименты были продолжены непосредственно на предприятии ООО «Рудник Апрельково». Отобранная проба руды была усреднена и отквартирована (разделена) на навески весом по 70 кг. В одну из колонн загружалась агломерированная (с добавкой цемента, окиси кальция и водного раствора цианида натрия) контрольная навеска, во вторую – навеска, агломерированная с добавкой цемента и активной газовой эмульсии из фотоэлектрохимического реактора, подготовленного в лаборатории Читинского филиала ИГД СО РАН.

После окомкования в механическом агломераторе навески выдерживались в колоннах в течение трех суток. Далее в колонны в капельном режиме подавался раствор цианида натрия. В экспериментальный перколятор подавался раствор цианида натрия, подготовленный на базе активной водно-газовой эмульсии (пероксидно-карбонатного раствора из фотоэлектрохимического реактора).

Продуктивные растворы собирались в приемной емкости и передавались на анализ. Результаты испытаний, представленные на рис.2, показывают, что итоговое извлечение золота в раствор по экспериментальной схеме (кривая 1) существенно выше, чем по контрольной (кривая 2).

По данным анализов твердой фазы извлечение по экспериментальной схеме составило 83 %, а по контрольной – 43 %.

Исследования второго этапа на предприятии с оборотными реактивируемыми растворами были проведены на ООО «Рудник Апрельково» в период 02.07.2014-10.08.2014. Для

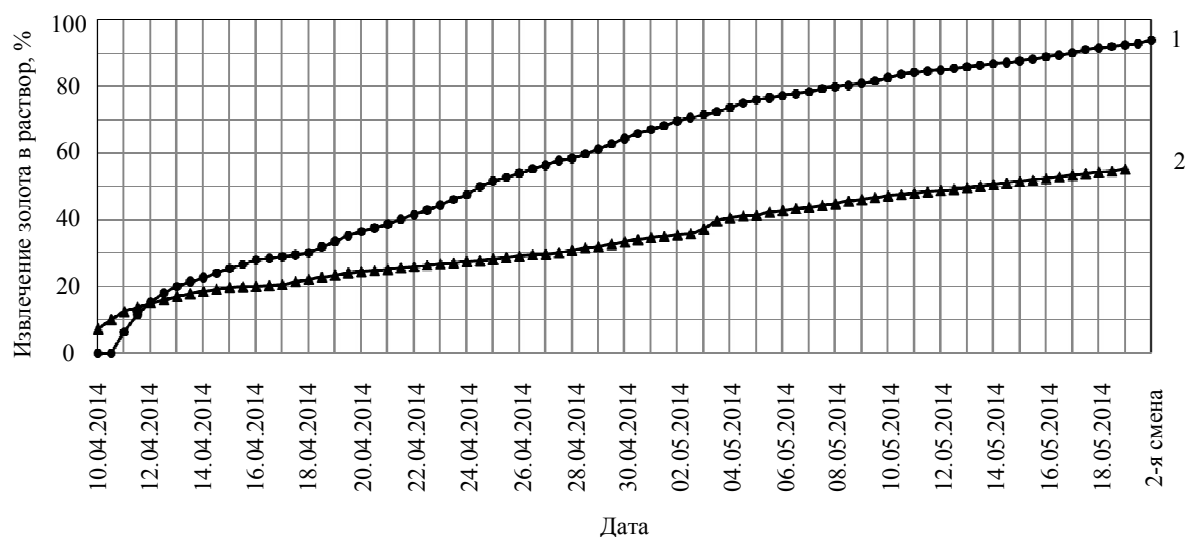


Рис. 2. Извлечение золота в раствор при перколяционном выщелачивании
1 – экспериментальная схема; 2 – контрольная схема

проведения эксперимента в перколяторы, изготовленные на предприятии, были загружены четыре навески по 100 кг, выделенные из усредненной крупнообъемной пробы руды текущей добычи. Все навески перед загрузкой были агломерированы с использованием цианидных растворов, причем 1-й и 4-й перколяторы использовались как контрольные. При этом во второй контрольной схеме (4-й перколятор) применяли дополнительный окислитель – перекись водорода.

Руда, загружаемая в экспериментальные колонны, делилась на две части, одна из которых обрабатывалась цианидным раствором концентрацией 1 г/л (как и контрольные навески), вторая – активной водно-газовой эмульсией, подготовленной в фотоэлектрохимическом реакторе, переданном во временное пользование предприятию. После этого окомкованные части руды перемешивались в агломераторе и усредненная масса засыпалась в колонны № 2, 3.

После выстаивания навесок в перколяторы (для формирования окатышей и реализации диффузионного режима выщелачивания и окисления) подавались цианидные растворы равной концентрации, причем в экспериментальные – приготовленные на базе активной водно-газовой эмульсии из фотоэлектрохимического реактора.

Выпускаемые из экспериментальных перколяторов продуктивные растворы пропускались через емкости с активированным углем и после сорбции из них золота полученные маточные растворы направлялись на реактивацию. Маточные растворы перколяторов № 2 и 3 насыщались кислородом с помощью компрессора и поступали в реактор на электрохимическую обработку (для формирования в растворе активных гидратированных комплексов) без облучения УФ-лампой. При этом во 2-й перколятор помимо реактивированного обратного раствора капельно добавлялся свежий активный раствор (активная водно-газовая эмульсия), прошедший фотоэлектрохимическую обработку (соотношение подачи этих растворов 10:1). Растворы доукреплялись цианидом натрия и кондиционировались щелочью до pH = 10,5.

Результаты экспериментов по выщелачиванию дисперсного золота показали (по данным анализов, выполненных лабораторией ООО «Рудник Апрельково»), что за 40 сут выщелачивания активными растворами из упорных руд 69 и 67 % (соответственно экспериментальные перколяторы № 2 и 3) металла, в то время как по контрольным схемам – 50 и 62 % (соответственно контрольные перколяторы № 1 и 4). Динамика извлечения золота в раствор по всем схемам приведена на рис. 3.

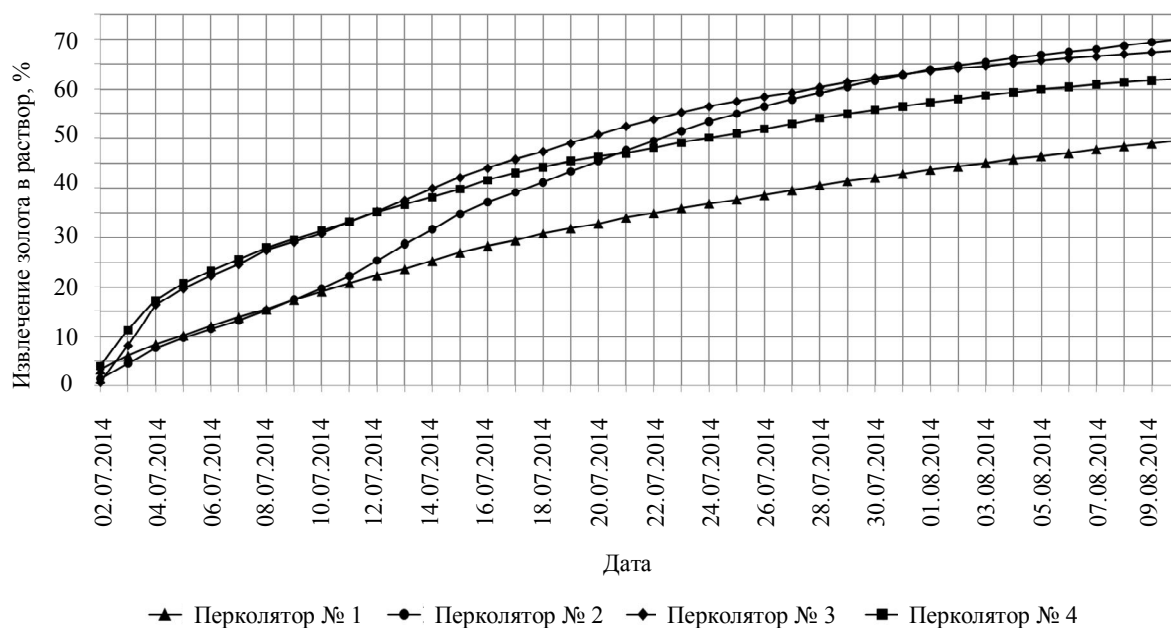


Рис.3. Извлечение золота в раствор при перколяционном выщелачивании с оборотными реактивируемыми растворами

Данные анализов по емкости сорбента (угля) и твердых хвостов также подтвердили преимущества экспериментальных схем (см. таблицу).

Результаты второго этапа технологических исследований

Технологическая схема	Извлечение золота, %		
	из твердой фазы	в жидкую фазу (раствор)	на сорбент (активированный уголь)
Контрольная (принятая на предприятии)	52	49,56	36,2
Фотоэлектрохимическая (с отдельной подачей реактивированных растворов)	80	69,99	85,7
Фотоэлектрохимическая (с общей подачей реактивированных растворов)	77	67,70	56,6
Перекисно-цианидная	73	61,93	44,5

Выводы. По всем трем технологическим параметрам наилучшие показатели достигнуты по 2-й схеме (см. таблицу), поэтому она может быть рекомендована для проведения опытно-промышленных испытаний. В настоящее время на руднике «Апрелково» принято решение о подготовке к опытно-промышленным испытаниям технологии активационного кучного выщелачивания дисперсного золота и нами совместно со специалистами ЗАО «Нордголд» ведется соответствующая работа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойцов В.Е. Месторождения благородных, радиоактивных и редких металлов / В.Е.Бойцов, Г.Н.Пилипенко, Н.А.Солодов. М.: НИИ-Природа, 1999. 220 с.
2. Королев В.А. Связанная вода в горных породах: новые факты и проблемы // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 9. С.79-85.
3. Лавров А.Ю. Использование фотоэлектрохимических и электросорбционных процессов при геолого-технологическом тестировании упорных руд / А.Ю.Лавров, Д.В.Манзырев // Вестник Читинского государственного университета. 2013. № 3. С.24-29.

REFERENCES

1. Bojcov V.E., Pilipenko G.N., Solodov N.A. Mestorozhdenija blagorodnyh, radioaktivnyh i redkih metallov (*Deposits of precious, radioactive and rare metals*). Moscow: NIA-Priroda, 1999, p.220.
2. Korolev V.A. Svjazannaja voda v gornyh porodah: novye fakty i problemy (*Bound water in rocks: new facts and challenges*). Sorosovskij obrazovatel'nyj zhurnal. 1996. N 9, p.79-85.
3. Lavrov A.Ju., Manzyrev D.V. Ispol'zovanie fotoelektrohimicheskikh i jelektrosorbcionnyh processov pri geologo-tehnologicheskom testirovanii upornyh rud (*Using of photoelectrochemical and electrosorption processes in the geological and technological testing of refractory ores*). Vestnik Chitinskogo gosudarstvennogo universiteta. 2013. N 3, p.24-29.

ACTIVATION OF HEAP LEACHING OF LOW-SULFIDE ORES THE INVISIBLE GOLD

A.G.SEKISOV, Dr. of Engineering Sciences, Director, sekisovag@mail.ru

Y.I.RUBZOV, Dr. of Engineering Sciences, Head of Laboratory, rubtsov.jri@yandex.ru

A.Y.LAVROV, PhD in Engineering Sciences, Senior Researcher, lavrov_2002@mail.ru

Chita branch of Mining Institute SB RAS, Russia

This article deals with a physical-chemical model of heap leaching processes justifying new technological approaches to recovering dispersed forms of gold from ores, placer sands and deutero-gene mineral raw materials. The key process of this model includes lattice diffusion of high-energy hydron minerals and hydroxyl-radicals formed as a result of photochemical and electrochemical processing of initial reagent aqueous solutions. Active components of gas-water emulsions obtained while processing initial reagent solutions provide a structural and material transformation of a mineral lattice which concentrates clusters of dispersed gold creating conditions for its interacting with complexing compounds of process solutions. The article also considers the technological processes of activation heap leaching of dispersed gold from the Pogromnoe ore field and the results of the experiments conducted in percolators with their charge ranged from 3 to 100 kg. The results have proved the efficiency of using gas-water suspensions prepared in the photoelectrochemical reactor with active ion-radical oxidizing agents.

Key words: activation heap leaching, low-sulphide ore, dispersed gold, photoelectrochemical preparation of solutions, water-gas emulsion.