

УДК 622.7

DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-4-34-41

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРКАРБОНАТНО-ЦИАНИДНЫХ И ПЕРКАРБОНАТНО-ХЛОРИДНЫХ КЛАСТЕРНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ «УПОРНОГО» ЗОЛОТА**USE OF PEROXYCARBONATE-CYANIDE AND PEROXY-CARBONATE-CHLORIDE CLUSTER COMPLEXES FOR LEACHING “RESISTANT” GOLD**

А. Г. Секисов,
Институт горного дела
Хабаровского Федерального
исследовательского центра
ДВО РАН, г. Хабаровск
sekisovag@mail.ru

A. Sekisov,
Mining Institute Far Eastern
Branch of the Russian Academy,
Khabarovsk



Т. Г. Конарева,
Институт горного дела
Хабаровского Федерального
исследовательского центра ДВО РАН,
г. Хабаровск
sekisovag@mail.ru

T. Konoreva,
Mining Institute Far Eastern Branch of
the Russian Academy, Khabarovsk

Месторождения золота как рудные, так и россыпные, составляющие основу современной минерально-сырьевой базы благородного металла, характеризуются преимущественно субмикронными формами его нахождения и сложным вещественным составом минерального сырья, предопределяющими его технологическую упорность в целом. Решение проблемы выщелачивания инкапсулированного и дисперсного, химически связанного золота, являющихся его сложноизвлекаемыми, т. е. упорными формами нахождения в минеральном веществе, предлагается осуществлять с использованием перкарбонатно-цианидных и перкарбонатно-хлоридных реагентных комплексов.

Предлагаемые комплексы представляют собой кластеризованные структуры, формируемые в технологических растворах путем комбинация электрохимической и фотохимической обработки растворов соответствующих исходных реагентов. При этом наличие пероксидной группы в синтезируемых метастабильных кластерных структурах обуславливает генерацию ими коллективизированных высокоактивных протонов, трансформирующих обобществленные электронные оболочки кластерных образований в минеральном веществе, обеспечивая повышение их реакционной активности при взаимодействии с гидратированными комплексообразователями. Использование активированных растворов, содержащих пероксидные группы до ввода в минеральную массу растворов с комплексообразователями для золота позволяет осуществлять вещественно-структурную трансформацию минерального вещества, включая окисление углистого вещества, серы и металлоидов, а также формирование микродефектов кристаллических решеток минералов-концентраторов золота. При этом в ряде случаев взаимодействие этих групп с двухвалентным железом, входящим в состав соответствующих минералов, интенсифицирует процесс их трансформации с образованием гидроксил-радикалов и активных протонов.

Приводится обзор результатов экспериментов и опытно-промышленных испытаний с использованием выщелачивания сложноизвлекаемых форм золота из руд, песков россыпей и техногенно-трансформированного минерального сырья перкарбонатно-цианидными и перкарбонатно-хлоридными растворами

Ключевые слова: наноразмерное золото; упорное золото; кластерное золото; формы нахождения золота; технологическая упорность руд; кучное выщелачивание; кюветное выщелачивание; перкарбонатно-цианидные и перкарбонатно-хлоридные реагентные комплексы; электрохимическая обработка раствора; фотохимическая обработка раствора; электролизер; ультрафиолетовое излучение

Gold deposits, both ore and placer, which form the basis of the modern mineral resource base of this precious metal, are characterized mainly by submicron forms of its location and the complex material composition of mineral raw materials, which determine its overall technological tenacity. In the article, it is proposed to solve the problem of leaching encapsulated and dispersed, chemically bound gold, which are its difficult-to-recover,

and therefore persistent forms of being in the mineral substance, using peroxy carbonate-cyanide and peroxy carbonate-chloride reagent complexes.

The proposed complexes are clustered structures formed in technological solutions by combining electrochemical and photochemical treatment of solutions of the corresponding initial reagents. At the same time, the presence of a peroxide group in such synthesized metastable cluster structures causes their generation of collectivized highly active protons that transform the generalized electronic shells of cluster formations in the mineral substance, providing an increase in their reactivity when interacting with hydrated complex agents. The use of activated solutions containing peroxide groups before the introduction of solutions with complex agents for gold into the mineral mass allows for the material-structural transformation of the mineral substance, including the oxidation of carbonaceous matter, sulfur and metalloids, as well as the formation of micro-defects of crystal lattices of gold-concentrating minerals. At the same time, in some cases, the interaction of these groups with divalent iron, which is part of the corresponding minerals, intensifies the process of their transformation with the formation of hydroxyl radicals and active protons.

An overview of the results of experiments and pilot tests using leaching of complex forms of gold from ores, placer sands and technogenically transformed mineral raw materials with peroxy carbonate-cyanide and peroxy carbonate-chloride solutions is given

Key words: *nanoscale gold; resistant gold; technological resistance of ores; heap leaching; peroxy carbonate-cyanide and peroxy carbonate-chloride reagent complexes; electrochemical treatment of solution; photochemical treatment of solution; electrolyser; ultraviolet radiation*

Введение. Месторождения золота как рудные, так и россыпные, составляющие основу современной минерально-сырьевой базы благородного металла, характеризуются преимущественно субмикронными формами его нахождения и сложным веществовым составом минерального сырья, предопределяющими в целом его технологическую упорность. Включения самородного наноразмерного золота крупностью от 5 нм в кристаллических решетках рудообразующих минералов достоверно выявляются с использованием современных методов электронной микроскопии, в частности приборов АСЭМ ZEISS EVO-50 XVP, с энергодисперсионным рентгеновским (ЭДР) спектрометром INCA Energy-350; электронного микроанализатора JXA-8100 (JEOL, Япония). Наиболее часто субмикронные частицы золота выявляются в кварце-халцедоне, адуляре, сульфидных, сульфосолевых (сульфосольных) минералах, сульфоарсенидах и скородите, лимоните, магнетите, самородных металлах (Ag, Cu, Pb, Fe, Hg). Несмотря на сложность визуализации наноразмерного золота даже средствами электронной микроскопии, реальность существования, по крайней мере, его монокристаллических форм в настоящее время доказана многочисленными исследованиями энерго-дисперсионного спектра индуцированного рентгеновского излучения отдельных субмикронных участков образцов минерального вещества [1; 3; 5; 9].

Присутствие в рудах и песках россыпей золота с размером частиц менее 0,5 нм доказывается не только экстраполяцией эффекта многоуровневой размерности его частиц, варьирующей в диапазоне $5 \cdot 10^7$ нм, но и многочисленными фактами отсутствия его визуализируемых частиц в богатых рудах. Так, при устанавливаемых относительно высоких содержаниях в руде золота (до десятков г/т), его частицы не выявляются даже такими высокочувствительными методами, как нейтронно-активационная автордиография и вторичная масс-спектрометрия. Возникают сложности исследования процессов перевода в растворы и расплавы названных форм золота. Сложности до сих пор не преодолены, в этой связи *разработанность темы* находится в начальной стадии.

Повышение эффективности промышленного освоения месторождений, содержащих упорное наноразмерное золото, определяется разработкой и внедрением в производство низкочувствительных и экологически безопасных технологий, которые обеспечивают возможность извлечения из минерального сырья ценных компонентов, содержащихся в нем в форме инкапсулированных и дисперсных наноразмерных включений. Этим обусловлена *актуальность* исследований инкапсулированных и наноразмерных форм нахождения золота в рудах и песках россыпей и новых низкочувствительных и экологически безопасных процессов их извлечения.

Объектом исследования являются руды и пески россыпей, содержащие инкапсулированные и наноразмерные формы нахождения золота, предметом – процессы хемогенной вещественно-структурной трансформации кристаллических решеток минералов-концентраторов инкапсулированного и наноразмерного золота компонентами выщелачивающих растворов, а также процессы комплексообразования кластерных включений золота.

Цель исследования – научное обоснование эффективных и безопасных физико-химических геотехнологий, обеспечивающих повышение извлечения упорных форм золота из руд и песков россыпей, следовательно, повышение эффективности разработки рудных и россыпных месторождений золота.

Задачи исследования:

- теоретически обосновать реагентные комплексы для выщелачивания дисперсных форм ценных компонентов из руд и песков россыпей;

- экспериментально исследовать процессы активации технологических растворов, обеспечивающих их образование;

- установить эффективные параметры процессов физико-химических геотехнологий с использованием активированных растворов.

Методология, материалы и методы исследования. Методология исследования – синтез апробированных научных методов, включая обобщение результатов современных исследований геохимии золота, теоретических моделей кластерообразования, разработанных отечественными и зарубежными исследователями, обоснование рабочих гипотез и теоретических моделей процессов, протекающих в кристаллических решетках минералов-концентраторов золота и на границе раздела твердой и жидкой фаз, экспериментальные исследования. В работе обобщена и проанализирована научно-техническая и специальная литература, разработана физико-химическая модель и исследованы процессы фотоэлектроактивного выщелачивания золота из упорных руд и песков россыпей в лабораторных, опытно-промышленных и промышленных условиях. При проведении экспериментальных исследований применены методы физического моделирования процессов выщелачивания, методы анализа: атомно-абсорбционной спектроскопии, индуктивно-связанной

плазмы, электронной микроскопии, пробирного анализа и др.

Основная гипотеза, положенная в основу работы – присутствие в минеральном веществе золота наноразмерного уровня рассеяния, которой придерживаются также многие отечественные и зарубежные геологи, имеет под собой как теоретическое, так и косвенное экспериментальное подтверждение. Рядом исследователей предполагается, что эффект «скрытого», сложно выявляемого, т. е. с технологических позиций «упорного» золота, связан с наличием в руде его особых, кластерных форм.

Отличительной особенностью кластеров является наличие у входящих в их состав атомов уплотненной обобществленной электронной оболочки. В этой связи кластеры, в том числе и золота, проявляют себя во многих физических и физико-химических процессах как целостные частицы, в том числе и при формировании химических связей с окружающими их атомами других образований и взаимодействуют с ускоренными электронами, нейтронами или квантами рентгеновского излучения иначе, чем другие атомарно-молекулярные структуры.

Нанодисперсное золото представлено в основном кластеризованными атомами, имеющими повышенную (для конкретных термобарических условий) энергию моноэлементных металлических связей и связей с атомами других элементов, формирующих вокруг них своеобразную оболочечную структуру.

Для выявления и извлечения полиэлементных кластерных образований золота целесообразно использовать процессы, обеспечивающие трансформацию кристаллической решетки минералов-концентраторов с перемещением «ядерной», металлической части кластеров как целостных частиц или их фрагментов к поверхности микро- и нанотрещин и пор и их последующую агрегацию. Реализация этих процессов может быть осуществлена как путем физического воздействия на кристаллическую решетку минералов тепловым полем, ионизирующим или лазерным излучением, пучком ускоренных электронов, так и химическим путем: использованием растворов, содержащих активные компоненты, способные проникать в ее внутренние слои [7]. Возможен и третий, комбинированный, путь – физико-химический. В

этом случае активация и/или декластеризация наноразмерных включений благородных металлов осуществляется активными коллективизированными протонами, при совмещенном физическом воздействии на вмещающую их кристаллическую решетку.

Наиболее вероятно, что в определенных P-t условиях нанодисперсное золото метастабильно и может переходить из кластерной формы в атомарно-кластерную и обратно. Например, в арсенопирите при проникновении в его кристаллическую решетку ионов или атомов водорода, обладающих достаточной энергией, в результате гидрирования могут образовываться промежуточные метастабильные соединения (AuH^*), соответственно возможны переходы: $(\text{Fe}, \text{AuH}^*) - \text{Au}_2\text{S} = (\text{Fe}, \text{Au}_3)\text{SH}^*$. Кластер, состоящий из трех атомов золота при окислении атомов железа и/или серы может разорвать с ними связи и переместиться в междоузлие как самостоятельная микрочастица.

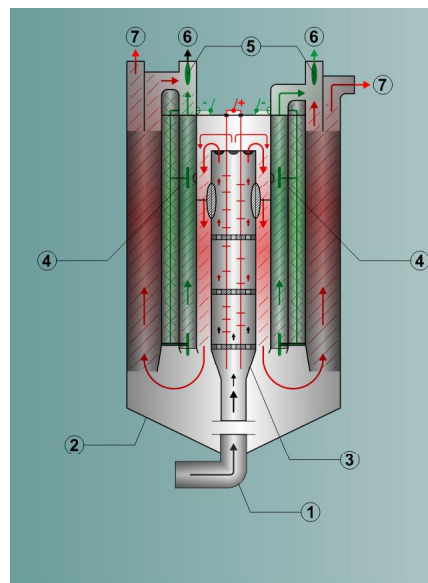
Известно, что даже в природных водах существует стабильная форма нахождения золота – $\text{AuOH}(\text{H}_2\text{O})^0$ при широком интервале Eh-pH [5]. При определенных условиях в системе минеральная среда – технологический раствор, становится возможной декластеризация золота также активными гидратными комплексами и его передислокация в составе соединений AuOH к внутренним и внешним «свободным» поверхностям минерала-концентрактора. При наличии в выщелачивающем растворе в достаточных концентрациях перекисных соединений, железо в составе сульфидных минералов и арсенопирита может протонироваться: $\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} = (\text{Fe}^{2+} \cdot \text{H}^+) + \text{OH}^- + 2\text{OH}^-$ (в классической форме, в соответствии с известной реакцией Фентона: эта реакция записывается как $\text{Fe}^{2+} + \text{H}_2\text{O}_2 = \text{Fe}^{3+} + \text{OH}^- + \text{OH}^-$).

Протонированное железо связывает сульфат-анионы, а формирование в поверхностных слоях железосодержащих сульфидов сульфата окиси железа (три сульфата) повышает их проницаемость и кластеризует кислород, соответственно возрастает вероятность комплексообразования локализованного в них дисперсного золота. В последующем при контакте с выщелачивающим раствором происходит формирование более устойчивых комплексов золота с соответствующими комплексообразующими компонентами как непосредственно, так и через

стадию формирования вторичных гидратированных кластеров золота [2; 4; 6; 8]. Таким образом, в технологических растворах, используемых для окисления минерального вещества и выщелачивания из него нанодисперсного кластеризованного золота, должны содержаться метастабильные перекисные и надперекисные соединения.

Одним из наиболее технологичных способов подготовки растворов, содержащих соединения для окисления и выщелачивания руд с упорным золотом, является электрофотохимический, сочетающий процессы электролиза и фотолиза растворов. В ходе электролиза в растворах генерируются газовые пузырьки водорода и кислорода, при облучении которых источником ультрафиолетового излучения в диапазоне длин волн 180...250 нм, в пленочной фазе воды формируется ряд гидратированных соединений с функциональной группой O-O.

Авторами разработана и успешно испытана конструкция реализующего эту идеологию фотоэлектрохимического реактора, схема которого изображена на рисунке.



Фотоэлектрохимический реактор. Экспликация:

- 1 – подвод исходного раствора, 2 – корпус реактора, 3 – анодная камера, 4 – катодные камеры, 5 – погружная УФ-лампа, 6 – отвод эмульсии H_2 , O_2 , OH^- , 7 – отвод кислородной эмульсии / Photoelectrochemical reactor. Explication: 1 – solution supply, 2 – reactor building, 3 – anodic camera, 4 – cathodic cameras, 5 – UV submersible lamp, 6 – withdrawal of H_2 , O_2 , OH^- emulsion, 7 – withdrawal of oxygen emulsion

Из синтезируемых в реакторе активных форм кислорода наиболее реакционно-активной частицей является гидроксил-радикал-ОН^{*}, окислительно-восстановительный потенциал которого достигает значения 2,8 В, в то время как таковой для атомарного кислорода составляет 2,42 В, а озона – 2,07 В [7]. Из этого следует, что не только неспаренный электрон атома кислорода, но и в большей степени активный атом водорода или его метастабильная ионная форма-протон в составе гидроксил-радикала изменяет структурно-энергетические параметры электронных оболочек контактирующих с ним молекул (атомов).

Поскольку система, состоящая из возбужденных атомов кислорода и водорода, является метастабильной, можно предположить, что электрон атома водорода периодически переходит на свободную орбиту электронной оболочки атома кислорода. При этом в таком радикале осуществляется «внутренняя» диссоциация $\text{OH}^* = (\text{O}^{*-}\text{H}^+)$. Поэтому в стадии диссоциации связанные ион-радикалы (O^{*-}H^+) можно рассматривать как метастабильные пары частиц O^{*-}p^+ , активно воздействующие на электронные оболочки окружающих их молекул.

Протон, по современным представлениям физики элементарных частиц, состоит из трех кварков с зарядами $+2/3$ и $-1/3$. Соответственно, в отличие от позитрона, при взаимодействии с электроном не происходит аннигиляции, так как линейные электрические поля, создаваемые кварками, несущими разноименные заряды, будут обеспечивать не только сближение протона и электрона, но и на малых расстояниях – их отталкивание. Поэтому наиболее вероятно, что гидроксил-радикал является осциллирующей частицей с переменным расстоянием между протоном и анион-радикалом кислорода.

Положительно заряженный ион водорода – протон, периодически смещаясь к условной границе электронной оболочки атома кислорода, имеет высокую вероятность стать свободной частицей с достаточно высокой энергией. Отделившийся от радикала ОН^{*}, первичный протон p⁺ проникает в электронную оболочку ближайшей молекулы воды. Таким образом появляется ион гидроксония ($\text{p}^+ + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_3\text{O}^+$). Оставшийся ион-радикал кислорода O^{*-} поляризует и притягивает своей уплотненной электронной оболочкой один

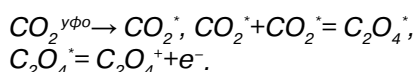
из атомов водорода соседней молекулы воды. При этом, в зависимости от ее энергии либо образуется молекула перекиси водорода и электрон ($\text{H}_2\text{O} + \text{O}^{*-} = \text{H}_2\text{O}_2 + \text{e}^-$), либо поляризуемый атом водорода ионизируется по мере удаления от ион-радикала кислорода. В итоге происходит вынужденная диссоциация молекулы воды с образованием гидроксил-иона ОН⁻ и протона (p⁺): $\text{H}_2\text{O} + \text{O}^{*-} = \text{O} + \text{OH}^- + \text{p}^+$.

При взаимодействии с ион-радикалом кислорода высвобожденный протон (p⁺) воспроизводит гидроксил-радикал и, соответственно, новую метастабильную пару (O^{*-}H^+). При достаточно высокой концентрации ионов гидроксония и гидроксил-ионов и вероятности их взаимодействия происходит локальная кластеризация соседних молекул воды, с образованием, как минимум, ее димеров: $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^- = \text{H}_4\text{O}_2$. Коллективизированные электронные оболочки в кристаллической решетке минералов могут быть с большой вероятностью трансформированы (вплоть до разрушения) при взаимодействии с коллективизированными (кластеризованными) протонами, движущимися в одном направлении. В этой связи в качестве реакционно-активных форм кислорода более целесообразно использовать не перекись водорода, а кластеризованные гидратированные соединения, содержащие несколько функциональных групп О-О.

Формирование относительно крупных активных гидратных кластеров, генерирующих коллективизированные протоны в водных растворах, может осуществляться на основе электрофотохимического синтеза в них надперекисных соединений. Надперекисные соединения, содержащие несколько метастабильных групп ОН, со связями О-О, таких как моноадсерная (H_2SO_5) и надсерная ($\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$), моноадугольная (H_2CO_4) и надугольная ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_6$) кислоты, соответствующие соли щелочных металлов (надпероксиды щелочных металлов – $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_6$, $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_6$), являются метастабильными, поэтому внутри кластерных структур они диссоциируют, продуцируя высокоактивные гидроксил-радикалы ОН^{*} (через промежуточную стадию выделения перекиси водорода).

Наиболее приемлемыми как с технико-экономических, так и с экологических позиций является применение в качестве надперекисных соединений надугольных кислот и надпероксидов щелочных металлов. Кла-

стерные надуглекислотные соединения могут быть получены при электролизе растворов гидрокарбоната или карбоната натрия и фотохимической обработке прианодной зоны реактора. При электролизе и облучении ультрафиолетовым светом гидрокарбонатного (содового) раствора на аноде (в газовой фазе получаемой эмульсии) образуются следующие активные частицы:



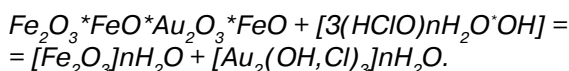
При гидратации такие кластерные соединения продуцируют мононадугольную и надугольную кислоты.

Далее в растворе осуществляются следующие реакции, приводящие к образованию активных радикальных и ион-радикальных соединений: $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_6 = \text{H}_2\text{O}_2 + 2\text{CO}_2$, $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{OH}^- = \text{H}_2\text{O} + \text{O}^{\cdot-} + \text{OH}^{\cdot}$. Полученные продукты диссоциации, взаимодействуя через гидратные оболочки, реверсивно образуют ассоциаты, т. е. гидратированные кластеры с восстановленной «затравочной» частью – надперекисными соединениями. Таким образом, в растворе осуществляются автоколебательные процессы гидратного кластерообразования – декластеризации.

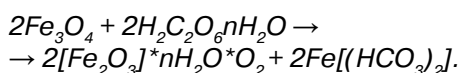
Реальность таких автоколебательных процессов в гидрокарбонатных водных растворах доказана экспериментально в исследованиях, проведенных в МГУ под руководством В. Л. Воейкова [10]. Поэтому такие растворы сравнительно длительное время (десяtkи часов) сохраняют активность, в то время как сам гидроксил-радикал в свободном виде может существовать не более 10^{-12} с. В связи с этим наличие надпероксидных соединений в выщелачивающих растворах позволяет достаточное время поддерживать их активность. Важным свойством перкарбонатных соединений является их синергетическое (совместно с такими комплексообразователями, как цианиды и хлориды) действие на кластеризованное золото и окисляющее воздействие на углистое вещество и серу. В частности, при реакции с метастабильной мононадугольной кислотой, углеродистые включения в рудах окисляются до монооксида углерода $\text{H}_2\text{CO}_4 + \text{C} = \text{H}_2\text{CO}_3 + \text{CO}$. Далее монооксид углерода доокисляется до CO_2 перекисью водорода или гидроксил-радикалом: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Дисперсное золото, сохранившее связь с углеродом, входящим

в состав руд после его окисления, в этом случае может взаимодействовать с гидроксил-радикалом, формируя метастабильные комплексы типа $\text{Au-Au}(\text{OH}, \text{HCO}_3)$.

Перкарбонатно-цианидный комплекс позволяет за счет кластеризации комплексообразователя (формирования групп $n(\text{CN})_2$) и $n[(\text{CN})(\text{OH})]$ обеспечить одностадийное комплексообразование кластеров золота, т. е. образование комплексных кластеризованных соединений типа $[\text{Au } n(\text{CN})_2 \text{ n}]^n$. Для руд с большим содержанием элементов-цианидодов, а также для условий, ограничивающих применение цианидов, могут быть использованы перкарбонатно-хлоридные комплексы, в которых за счет обратимых процессов $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_6 \cdot n\text{H}_2\text{O} + 2\text{NaClO} = 2\text{HClO} \cdot n\text{H}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_6$ образуется кластерный гидратированный комплекс хлорноватистой кислоты, образующий сложные кластерные соединения с нанодисперсным золотом. В последнем случае выщелачивание золота может быть осуществлено в одну стадию.



При относительно низких содержаниях золота в шлиховых минералах песков россыпей (1...3 г/т) для снижения непродуктивного раствора хлора на окисление и растворение железа более предпочтительна схема с предокислением при использовании на первом этапе гидрокарбонатно-перекисного раствора



Основным результатом экспериментов, проведенных в лабораторных условиях и в ходе опытно-промышленных испытаний чанового и кучного (перколяционного) выщелачивания дисперсного золота из упорных руд, песков россыпей и техногенно-трансформированного минерального сырья перкарбонатно-цианидными и перкарбонатно-хлоридными растворами, является доказательство их эффективности и экологической безопасности.

При переработке упорных сульфидно-мышьяковисто-углистых руд месторождения Кокпатас при использовании схемы предокисления активированными растворами и стадийного сорбционного выщелачивания растворами с перкарбонатно-цианидными комплексами достигнуто извлечение свыше 85 %, что превышает этот показатель для

принятой схемы «флотация – биоокисление концентрата – сорбционное выщелачивание» не менее чем на 5 %. Использование перкарбонатно-хлоридных растворов при кюветном выщелачивании золота из руд месторождения Yellow Jacket позволило обеспечить его извлечение на уровне 90 %. Испытание технологии активационного кучного выщелачивания перкарбонатно-цианидами комплексами в опытных перколяторах на руднике Апрельково (Забайкальский край) обеспечило при равном расходе цианида натрия с традиционной схемой увеличение извлечения золота на сорбент более чем на 30 %.

Заключение. Предлагаемые перкарбонатные реагентные комплексы, содержащие активную функциональную группу О-О, доказали перспективность использования для условий переработки руд со сложноизвлекаемыми формами нахождения золота с их использованием. Комбинированная электрохимическая и фотохимическая обработка растворов исходных реагентов обеспечивает формирование в них перкарбонатных реагентных комплексов.

Подготовка на базе перкарбонатных растворов выщелачивающих растворов перкарбонатно-цианидных и перкарбонатно-хлоридных растворов обеспечивается вводом цианидных и хлоридно-гипохлоритных реагентных комплексов.

В результате многочисленных экспериментов, проведенных в лабораторных условиях и в ходе опытно-промышленных испытаний чанового и кучного (перколяционного) выщелачивания дисперсного золота из упорных руд, песков россыпей и техногенно-трансформированного минерального сырья перкарбонатно-цианидами и перкарбонатно-хлоридными растворами, достигнуто извлечение свыше 85 %, кюветное выщелачивание золота из руд месторождения Yellow Jacket позволило обеспечить его извлечение на уровне 90 %, в опытных перколяторах на руднике Апрельково (Забайкальский край) обеспечило при равном расходе цианида натрия с традиционной схемой увеличение извлечения золота на сорбент более чем на 30 %.

Список литературы

1. Моисеенко В. Г., Кузнецова И. В. Нанозолото в древних известняках и доломитах октябрьского рудного поля (Приамурье) // Доклады академии наук. 2014. Т. 456, № 4. С. 468–471.
2. Birol O., Ucurum M. Investigation of the cyanide leaching optimization for ultrafine grinding gold-silver ore // Particulate science and technology. 2016. Vol. 34, No. 5. P. 633–638.
3. Hough R. M., Noble R. R. P., Reich M. Natural gold nanoparticles // Ore geology reviews. 2011. Vol. 42, No. 1. P. 55–61.
4. Leikola M., Sauer C., Rintala L., Aromaa J., Lundstrom M. Assessing the similarity of cyanide-free gold leaching processes: a case-based reasoning application // Minerals. 2018. Vol. 8, No. 10. P. 434.
5. Mohr F. Gold chemistry: applications and future directions in the life sciences. Weinheim: Wiley-VCH, 2009. 408 p.
6. Ofori-Sarpong G., Osseo-Asare K. Preg-robbling of gold from cyanide and non-cyanide complexes: Effect of fungi pretreatment of carbonaceous matter // International Journal of Mineral Processing. 2013. Vol. 119. P. 27–33.
7. Rahimi S., Ayati B., Rezaee A. Kinetic modeling and determination role of sono/photo nanocatalyst-generated radical species on degradation of hydroquinone in aqueous solution // Environmental science and pollution research. 2016. Vol. 23, No. 12. P. 12185–12198.
8. Rasskazova A. V. Leaching of base gold-bearing ore with chloride-hypochlorite solutions // Proceedings of IMPC 2018. Moscow, 2018. P. 4093–4098.
9. Tauson V. L., Kravtsova R. G., Makshakov A. S., Lipko S. V., Arsent'ev K. Yu. Contrasting surficial composition of native gold from two different types of gold ore deposits // Minerals. 2017. Vol. 7, No. 8. P. 1–16.
10. Voeikov V. L. Biological significance of active oxygen-dependent processes in aqueous systems // Water and the Cell. Dordrecht: Springer Press Netherlands, 2006. P. 285–298.

References

1. Moiseenko V. G., Kuznetsova I. V. *Doklady akademii nauk* (Reports of the Academy of Sciences), 2014, vol. 456, no. 4, pp. 468–471.
2. Birol O., Ucurum M. *Particulate science and technology* (Particulate science and technology), 2016, vol. 34, no. 5, pp. 633–638.
3. Hough R. M., Noble R. R. P., Reich M. *Ore geology reviews* (Ore geology reviews), 2011, vol. 42, no. 1, pp. 55–61.
4. Leikola M., Sauer C., Rintala L., Aromaa J., Lundstrom M. *Minerals* (Minerals), 2018, vol. 8, no. 10, pp. 434.
5. Mohr F. *Gold chemistry: applications and future directions in the life sciences* (Gold chemistry: applications and future directions in the life sciences). Weinheim: Wiley-VCH, 2009. 408 p.
6. Ofori-Sarpong G., Osseo-Asare K. *International Journal of Mineral Processing* (International Journal of Mineral Processing), 2013, vol. 119, pp. 27–33.
7. Rahimi S., Ayati B., Rezaee A. *Environmental science and pollution research* (Environmental science and pollution research), 2016, vol. 23, no. 12, pp. 12185–12198.
8. Rasskazova A. V. *Proceedings of IMPC 2018* (Proceedings of IMPC 2018). Moscow, 2018, pp. 4093–4098.
9. Tauson V. L., Kravtsova R. G., Makshakov A. S., Lipko S. V., Arsent'ev K. Yu. *Minerals* (Minerals), 2017, vol. 7, no. 8, pp. 1–16.
10. Voeikov V. L. *Water and the Cell* (Water and the Cell). Dordrecht: Springer Press Netherlands, 2006, pp. 285–298.

Коротко об авторах

Секисов Артур Геннадиевич, д-р техн. наук, Институт горного дела Хабаровского Федерального исследовательского центра ДВО РАН, г. Хабаровск; профессор, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия. Область научных интересов: горные науки, физическая и химическая геотехнология, экология
sekisovag@mail.ru

Конарева Татьяна Геннадьевна, научный сотрудник, Институт горного дела, Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия. Область научных интересов: горные науки, физическая и химическая геотехнология, экология
sekisovag@mail.ru

Briefly about the authors

Artur Sekisov, doctor of technical sciences, Mining Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy, Khabarovsk; professor, Transbaikal State University, Chita, Russia. Sphere of scientific interests: mining sciences, physical and chemical geotechnology, ecology

Tatyana Konareva, research associate, Institute of Mining, Khabarovsk Federal Research Center, Far Eastern Branch of the Russian Academy, Khabarovsk, Russia. Sphere of scientific interests: mining science, physical and chemical geotechnology, ecology

Образец цитирования

Секисов А. Г., Конарева Т. Г. Использование перкарбонатно-цианидных и перкарбонатно-хлоридных кластерных комплексов для выщелачивания «упорного» золота // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26, № 4. С. 34–41. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-4-34-41.

Sekisov A., Konareva T. Use of peroxy carbonate-cyanide and peroxy carbonate-chloride cluster complexes for leaching “resistant” gold // Transbaikal State University Journal, 2020, vol. 26, no. 4, pp. 34–41. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-4-34-41.

Статья поступила в редакцию: 26.03.2020 г.

Статья принята к публикации: 01.04.2020 г.