ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2019;(8):198-208

УДК 622.7-027.32 DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-198-208

КОМБИНИРОВАННОЕ КУЧНОЕ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕ СЛОЖНОИЗВЛЕКАЕМЫХ ФОРМ ЗОЛОТА ИЗ ТЕХНОГЕННО-ТРАНСФОРМИРОВАННОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

А.Г. Секисов[1], А.В. Рассказова[1], Н.М. Литвинова[1], М.С. Кирильчук[1]

[1] Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН, Хабаровск, Россия,
e-mail: sekisovag@mail.ru

Аннотация: Целью исследования является оценка эффективности использования высокоактивных окислителей для повышения извлечения дисперсных форм золота из техногенно-трансформированного минерального сырья. Методика исследования процессов активационного кучного выщелачивания включает окомкование минеральной массы с использованием растворов, содержащих гидратированные активные формы кислорода, полученные посредством электро-фотохимической обработки растворов ряда исходных реагентов, выдерживание окомкованной массы в штабеле при различных вариантах укладки ее различных гранулометрических фракций и орошение ее растворами, содержащими комплексообразователи для золота. Рассмотрен новый подход к извлечению дисперсного золота из шламообразующих фракций техногенно-трансформируемого минерального сырья, заключающийся в дифференцированном размещении крупнодробленной и окомкованной тонкой фракции. Как результат, повышаются фильтрационные свойства штабеля выщелачивания, обеспечивается его равномерная проницаемость для выщелачивающих растворов, что обеспечивает повышение извлечения золота в продуктивный раствор. Особенностью предлагаемого подхода является диффузионное окисление минералов-концентраторов дисперсного и инкапсулированного золота за счет пропитки раствором, содержащим гидратированные активные формы кислорода (включая пероксидные соединения). Экспериментальные исследования рассмотренных процессов активационного выщелачивания из окомкованной шламообразующей фракции и дробленого крупнофракционного материала отработанных штабелей ряда рудников позволили установить, что при их комбинированном использовании обеспечивается извлечение/доизвлечение золота в диапазоне 55—70%.

Ключевые слова: техногенно-трансформированная минеральная масса, активные растворы, электрофотохимическая обработка, декластеризация, кеки, кольматация, диффузионное окисление, комплексообразователи, кучное выщелачивание, пофракционная укладка, перколяционное выщелачивание.

Благодарность: Работа выполнена при поддержке проекта президиума ДВО РАН № 18-2-015 «Золото-медно-порфировое оруденение Дальнего Востока: индикаторы геодинамических обстановок, рудоносного магматизма и минералого-геохимические особенности рудно-магматических систем в связи с решением проблем прогноза, поиска, оценки и технологий разработки месторождений данного типа».

Для цитирования: *Секисов А. Г., Рассказова А. В., Литвинова Н. М., Кирильчук М. С.* Комбинированное кучное выщелачивание сложноизвлекаемых форм золота из техногенно-трансформированного минерального сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 8. – С. 198–208. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-198-208.

© А.Г. Секисов, А.В. Рассказова, Н.М. Литвинова, М.С. Кирильчук. 2019.

Integrated heap leaching of rebellious gold from altered mineral waste

A.G. Sekisov[1], A.V. Rasskazova[1], N.M. Litvinova[1], M.S. Kirilchuk[1]

[1] Mining Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, 680000, Khabarovsk, Russia, e-mail: sekisovag@mail.ru

Abstract: This study was supported by the Presidium of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, Project no. 18-2-015: Gold–copper–porphyritic mineralization in the Russian Far East: Indicators of geodynamic behavior, metalliferous magmatism and geochemical mineralogical features of metallogenic magmatic systems in the context of prediction, prospecting, appraisal and development technology for such type deposits Mineral waste management is a topical issue of the current concern. Content of valuable components in mineral waste is often higher than in natural ore bodies. Major problems of heap gold leaching from such waste is mudding and inapproachability of disperse gold particles for complexing agents. This study aims to assess efficiency of highly active oxidizers in stimulation of extractability of disperse gold from altered mineral waste. The research procedure of activated heap leaching includes nodulizing of mineral mass using solutions of hydrated active oxygen after electro-photo-chemical treatment, ageing of nodulized mass in piles obtained by different variants of stacking various particle-size fractions and sprinkling of the piles by solutions of gold complexing agents. The discussed new approach to disperse gold extraction from slurry fractions of altered mineral waste consists in differentiated arrangement of coarse and nodulized fine fractions. As a result, permeability of leaching piles is improved, and uniform penetrability is ensured for leaching solutions, which ensures increased gold recovery in pregnant solution. A feature of the proposed approach diffusive oxidation of minerals–concentrators of disperse and encapsulated gold by means of impregnation with solution containing activated hydrated oxygen (including peroxy compounds). Experimental tests on activated leaching from nodulized slurry fractions and coarse fractions of waste piles at some mines reveal that this integrated approach ensures extraction / additional recovery of gold in the range of 55–70%.

Key words: altered mineral waste, active solutions, electro-photo-chemical treatment, de-clustering, cakes, mudding, diffusive oxidation, complexing agents, heap leaching, piling by fractions, percolation leaching.

Acknowledgements: This study was supported by the Presidium of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Project No. 18-2-015.

For citation: Sekisov A. G., Rasskazova A. V., Litvinova N. M., Kirilchuk M. S. Integrated heap leaching of rebellious gold from altered mineral waste. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(8):198-208. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-198-208.

Введение

В связи с истощением минерально-сырьевой базы золота, на фоне малой вероятности открытия уникальных и крупных месторождений, все большую актуальность приобретает вовлечение в переработку техногенно-трансформированного минерального сырья. Учитывая, что в таком минеральном сырье золото находится преимущественно в сложноокисляемых минеральных матрицах в дисперсной, химически связанной и инкапсулированной формах, объективно необходима разработка новых технических решений, не требующих значительных затрат электроэнергии и расхода реагентов на его извлечение. Для обогащения упорных руд, а также руд, характеризующихся двойной упорностью, применяются сложные комбинированные схемы обогащения, в том числе комбинированные гравитационно-флотационно-металлургические [1].

В основу технологических решений должно быть положено максимально дифференцированное воздействие на золо-

тосодержащие компоненты техногенно трансформированного минерального сырья высокоактивными окислителями, получаемыми с использованием в качестве основных их источников воды, воздуха и микроорганизмов.

Ресурсный потенциал техногенных образований отработанных россыпных месторождений золота является существенным резервом пополнения минерально-сырьевой базы золотодобывающих предприятий. Традиционно оценка его производится, основываясь в основном на величине технологических потерь. Однако потери золота существенны, и содержания золота порой в техногенных образованиях значительно превышают таковые в исходных песках. Объясняется этот факт с различных позиций: последующим высвобождением золота из глинистого материала в процессе осушки и промораживания; гранулометрией золота — преобладанием в исходных песках тонкой и мелкой фракции; несовершенством разведочного и промывочного оборудования.

К основным параметрам, определяющим ресурсный потенциал техногенных образований, относятся: гранулометрический состав металла и его морфология; первичные содержания драгметалла в песках; количество тяжелых минералов в шлихе исходных песков; гранулометрический состав исходных песков; литологический состав песков; особенности плотика россыпей; оборудование и техника, используемые при добыче; человеческие возможности; оборудование, используемое при доводке шлихов; время года, когда происходила промывка песков; оборудование, используемое при доводке шлиховых концентратов; качество разведки; рекультивационные мероприятия.

Их совокупность следует учитывать при определении ресурсного потенциала всего комплекса техногенных-трансформированного минерального сырья [2]. Следует учитывать также неравномерное распределение металла в техногенных (отвалах, хвостохранилищах) и техногенно-трансформированных (межкотлованных целиках, отработанных штабелях КВ) объектах. Максимальные направления изменчивости содержания золота (тяжелой фракции) расположены по радиусу от зоны боя потока гидравлического прибора для сформированных отвалов россыпных месторождений. Опробование зоны концентрации металла позволяет выявить экономически выгодные участки для повторной переработки и извлечения золота [3].

Значительную часть золота, содержащегося в техногенном минеральном сырье, составляют трудноизвлекаемые тонкие, пластинчатые, инкапсулированные и дисперсные частицы. При исследовании поверхностей тонкопластинчатого золота россыпей сотрудниками ИГД ДВО РАН выявлено его кластерное строение. Кластеры в этом случае — зоны роста, формирующие кристаллическую решетку минерала, имеют вид разных по размеру сферических и эллипсоидных образований, при этом золото каждого географического объекта имеет определенный рельеф и структурные особенности поверхности. Размеры кластеров колеблются от 10 до 400 нм. Накапливаясь на выпуклой поверхности кластеров, электроны создают отрицательный заряд, который препятствует образованию вокруг частицы золота двойного электрического поля, что и служит причиной несмачиваемости поверхности частиц металла [4]. Несмачиваемость и малый размер частиц обусловливают высокую эффективность применения гидрометаллургических методов обогащения техногенно-транформированных россыпных объектов.

В техногенно-трансформированном рудноминеральном сырье, как правило, в первую очередь проявлена его неод-

нородность по фракционному составу. В шламовых фракциях хвостов флотационного и гравитационного обогащения может оставаться основная часть недоизвлеченного при переработке золота. В шламообразующих фракциях (размером частиц порядка 100 мкм) кеков кучного выщелачивания недоизвлеченным золото остается в результате сцепления между частицами, формируются уплотненные скопления, в которых диффузионные процессы протекают крайне медленно. Такие скопления, заполняющие свободное пространство между относительно крупными минеральными частицами и их агрегатами, обуславливают физическую и физико-химическую кольматацию, снижая общую проницаемость материала штабеля для выщелачивающих растворов. Кроме того, выпадение из выщелачивающих растворов в поровом пространстве штабелей КВ сульфатных и карбонатных соединений приводит к химической кольматации.

Низкая проницаемость штабеля влечет за собой низкое извлечение целевого компонента. На медном месторождении Янгла (Южный Китай) вышеперечисленные трудности привели к 1%-ному извлечению меди по результатам трехмесячного кислотного выщелачивания низкосортной окисленной руды. Поднять извлечение меди до уровня, превышающего 60%, позволили следующие технические усовершенствования: введение антискаланта (препятствующего карбонатным и сульфатным отложениям), промывка руды с целью удаления шламовой фракции, дробление и грохочение материала, тонкослойная конвейерная укладка материала в штабель, механическая активация (ворошение кучи), химическая активация. Из-за высоких концентраций нецелевых металлов (Fe^{2+}, Fe^{3+}, Al^{3+}) в штабеле кучного выщелачивания, усиливается выпадение осадка, особенно при возрастании pH продуктивного раствора. Высокая концентрация Fe_2O_3 в руде на 10% увеличивает потребление кислоты и образование осадков. Предварительная химическая обработка раствора рабочего реагента согласно уравнению, приведенному ниже, снижает концентрацию легко осаждающихся металлов в рабочем растворе.

$$3Fe_2(SO_4)_3 + 12H_2O + M_2SO_4 = M_2Fe_6(SO_4)_4(OH)_{12} + 6H_2SO_4, \quad (1)$$

где M — NH_4^+ или другой ион щелочного металла.

Важными факторами в процессе кучного выщелачивания также являются: эрозионные процессы на поверхности рудных частиц, распределение частиц по крупности в пределах кучи, структура штабеля, скорость орошения [5].

Наличие углистых включений и глинисто-слюдистых минералов приводят к паразитарной сорбции растворенного золота. В относительно крупных фракциях техногенно трансформированного минерального сырья (в хвостах обогащения более 500 мкм, в кеках кучного выщелачивания более 10 мм) в следствие ограниченного контакта с выщелачивающими растворами также остается недоизвлеченным значительная часть золота.

Теоретические основы процессов, протекающих при окислении минеральной матрицы

При переработке золотосодержащей техногенно-трансформированной минеральной массы, необходимо избежать переизмельчения и повышенного выхода тонких классов и обеспечить решение проблем окисления минеральных матриц, содержащих дисперсное золото, развитие системы дополнительных микродефектов в их кристаллических решетках, а также подавление сорбционной активности углистого вещества (при его наличии).

Идея использования высокоактивных окислителей, таких как озон, была обоснована еще в работах 30—40-х годов XX-го века выдающимся российским ученым-металлургом чл.-корр. АН СССР И.Н. Плаксиным [6]. Вследствие высоких энергозатрат на производство озона и сопутствующих ему активных форм кислорода, несмотря на многочисленные преимущества этого способа окисления руд пока не позволяет найти ему широкое применение в гидрометаллургии. Вместе с тем, если осуществлять подготовку выщелачивающих растворов не путем барботажа их озонсодержащей газовой смесью, а синтезировать непосредственно в них высокоактивные перекисные соединения кислорода с водородом, включая, в первую очередь гидратированный гидроксил-радикал и перекись водорода, то соответствующие затраты могут быть существенно снижены. При облучении УФ-светом в диапазоне длин волн 180—250 нм водно-газовой эмульсии, формируемой при электролизе, в объеме выделяющихся при этом газовых пузырьков формируются высокоактивные окислители, такие как атомарный кислород, супероксид-ион-радикал (O^{*-}), озон, гидроксил-радикал (OH^*), создающие при взаимодействии с пленочной водой, окружающей газовые пузырьки, ион-радикальные и радикал содержащие кластеры. В этом случае образование гидратных оболочек происходит вокруг центров ионизации — «затравочных» ионов, радикалов и ион-радикалов водорода, кислорода и их соединений, в частности H^+, OH^-, OH^*, O^{*-} и других [6]. Кроме того, в водной фазе синтезируются и такие устойчивые окислители, как надпероксиды щелочных металлов.

Наиболее активной кластерообразующей частицей является гидроксил-радикал-OH^*, окислительно-восстановительный потенциал которого достигает значения 2,8 В, в то время как таковой для атомарно кислорода составляет 2,42 В, а озона — 2,07 В [8]. Из этого факта следует, что не только неспаренный электрон атома кислорода, но и, в большей степени, активный атом водорода или его 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, то можно предположить, что электрон атома водорода периодически переходит на свободную орбиту электронной оболочки атома кислорода. При этом в таком радикале периодическая осуществляется «внутренняя» диссоциация $OH^* = O^{*-}{*}H^+$. Атом водорода в составе гидроксил-радикала, периодически смещаясь к условной границе электронной оболочки, становится свободной частицей-протоном, с достаточно высокой энергией.

Соответственно, существует вероятность того, что его местоположение не ограничивается только электронной оболочкой связанного с ним ион-радикала кислорода. Поэтому систему ($OH^* = O^{*-} * H^+$) можно рассматривать и как метастабильную ион-радикальную пару $O^{*-} * p^+$, обладающую, с одной стороны, функцией акцептора протонов, с другой — электронов. Отделившийся от радикала OH^* первичный протон p^+, проникает в электронную оболочку другой ближайшей молекулы воды. Таким образом появляется ион гидроксония ($p^+ + H_2O = H_3O^+$). Оставшийся «свободным», ион-радикал кислорода O^{*-} поляризует и притягивает своей уплотненной электронной оболочкой один из атомов водорода соседней молекулы воды. При этом поляризуемый атом водорода ионизируется по мере удаления от ион-радикала кислорода, в итоге происходит вынужденная диссоциация молекулы воды с образованием гидроксил-иона OH^- и протона (p^+).

Высвобожденный протон (p^+), взаимодействуя с ион-радикалом кислорода, воспроизводит гидроксил-радикал и, соответственно, метастабильную пару ($O^{*-} * H^+$). Встречное перемещение по цепочке центров образования ионов гидроксония и гидроксил-ионов, приводит в итоге к их взаимодействию: при проникновении протона внутрь электронной оболочки гидроксил-иона могут возникать ионные пары ($H^+ H^-$) или метастабильные пары атомов водорода, объединяемые электрон-позитронными (экситонными) связями ($H_{e+e}- * H^*$).

В результате чего происходит локальная кластеризация соседних молекул воды, с образованием как минимум ее димеров: $H_3O^+ + OH^- = H_4O_2{}^*$. Цикл индуцированной гидроксил-радикалами диссоциации и ассоциации (кластеризации) молекул воды повторяется с вовлечением в него других соседних молекул. Создаваемые таким образом ион-радикальные гидратные кластеры, в своей основе содержат коллективизированные системы электронов или протонов, с достаточным энергетическим потенциалом, способным нарушить связи между коллективизированными электронами кластеризованного углерода, серы и связанного с ними дисперсного золота.

Кластеризованные атомы дисперсного золота относительно прочно связаны системой коллективизированных электронов с атомами ближайшего окружения основных минералообразующих, и/или примесных элементов. Поэтому выщелачивающие растворы также должны содержать кластеризованные компоненты, обладающие при этом достаточной энергией для изменения структуры обобществленных электронных оболочек золотосодержащих кластеров. При предварительной обработке руды с небольшим (до 3%) содержанием сульфидных минералов, такими активированными растворами кластеризованное дисперсное золото с обобществленными электронными оболочками (в том числе гибридными, уровней 5d-6s), после окисления химически связанной с ним серы высвобождается и фрагментарно может вступать во взаимодействие с гидроксил-радикалом и с атомарным водородом. При этом может осуществляться и ослабление связей между кластеризованными атомами золота. Известно, что даже в природных водах существует стабильная форма нахождения золота — $AuOH(H_2O)^0$ при широком интервале Eh—pH. Поэтому, при определенных условиях, в системе минеральная среда-технологический раствор становится возможной декластеризации золота активными гидратными комплексами и его передислокация в атомарной(ионной) форме или в составе соединений $AuOH^*$, AuH^* к поверхности микротрещин и пор минерала-концентратора.

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.

В процессе обработки водного раствора гидрокарбоната натрия в электрохимических и фотохимических реакторах могут быть синтезированы надперекисные карбоксильные соединения (мононадугольная H_2CO_4 и надугольная $H_2C_2O_6$ кислоты). Такие надперекисные соединения являются метастабильными, поэтому внутри кластерных структур они диссоциируют, продуцируя высокоактивные гидроксил-радикалы OH^* (через промежуточную стадию выделения перекиси водорода):

$$H_2CO_4 = H_2O_2 + CO_2, \quad (2)$$

$$H_2C_2O_6 = H_2O_2 + 2CO_2, \quad (3)$$

$$H_2O_2 + OH^- = H_2O + O^{*-} + OH^*, \quad (4)$$

• или ион-радикалы гидроксила и карбоксил-катионы $2OH^{*-} + C_2O_2^+$, $2OH^* + C_2O_4^+$.

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 гидратационного кластерообразования — декластеризации. Реальность таких автоколебательных процессов в гидрокарбонатных водных растворах доказана экспериментально в исследованиях, поведенных в МГУ под руководством проф., д.б.н. В.Л. Воейкова [9]. Поэтому такие растворы, а точнее водно-газовые эмульсии, сравнительно длительное время (десятки часов) сохраняют свою 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 позволит достаточное время поддерживать их активность.

Методические подходы к выщелачиванию сложноизвлекаемых форм золота

Целесообразно при повторной переработке хвостов обогащения кеков выщелачивания предварительно исследовать распределение золота по грануломет-рическим фракциям с позиций оценки возможности исключения из повторной переработки методом кучного выщелачивания непродуктивных фракций [10]. Также комбинация автоматизированных минералогических исследований, картирования распределения элементов и химический анализ продуктивных растворов кучного выщелачивания являются эффективными средствами мониторинга поведения тонкофракционных материалов в процессе перколяционного выщелачивания [11]. Но даже при отсутствии таковых, необходимо осуществлять грохочение и/или гидроциклонирование перерабатываемого материала с выделением шламообразующих фракций, которые необходимо окомковывать и крупных фракций, как правило, требующих додрабливания предпочтительно в режиме механохимической активации. При этом при последующей повторной укладке в штабель его нижние слои целесообразно формировать из фракций размером в диапазоне 1—5 мм, а окомкованную минеральную массу укладывать в верхнюю часть штабелей. Сегрегация руды, укладываемой в штабель, по крупности, считается эффективным инструментом повышения извлечения целевого компонента при кучном выщелачивании. Под сегрегацией подразумевается разделение на фракции разной крупности в процессе укладки руды [12].

Как окомкование, так и додрабливание в режиме механохимической активации целесообразно осуществлять с использованием растворов, содержащих активные окислители, предпочтительно активные формы кислорода. Процессы окомкования руды и затвердевания окатышей являются недостаточно исследованными, но играют важную роль в перколяционном выщелачивании. При исследовании медной руды, содержащей халькопирит, было установлено, что присутствие хлорид-ионов необходимо для улучшения кинетики выщелачивания, ведь известным фактом является низкая скорость выщелачивания из халькопирита. В целом, введение хлоридов на стадии агломерации медных руд может быть действенным приемом для переработки низкосортных сульфидных медных руд [13]. Объектами данного исследования являются кеки кучного выщелачивания месторождений Апрелково и Дельмачик.

В данном исследовании был применен инфильтрационный гидродинами-

ческий режим выщелачивания. Подача раствора осуществлялась через 2—5 суток после укладки окомкованной минеральной массы в штабель с удельной плотностью орошения рабочим раствором 5—7 л/м^2 · ч. При большем времени выдерживания минеральной массы (5—10 суток) требуемой для полноценной реализации диффузионных и массобменных процессов в минеральной массе, с плотной структурой и слабоокисляемой вещественной основой, целесообразно использовать фильтрационный гидродинамический режим выщелачивания. Поэтому удельная плотность орошения раствором, после выстаивания окомкованной массы, должна быть по крайней мере, в первые сутки не менее 10 л/м^2 · ч. В обоих случаях удельный расход раствора не превышает обычно 0,75 м^3/т руды, а расход комплексообразователя для золота цианида натрия — 1,5 г/т руды.

Результаты комбинированного кучного выщелачивания золота из техногенного минерального сырья

При значительной высоте штабеля кучного выщелачивания (свыше 6 м) перенос с растворами вторичных шламовых частиц из верхних слоев в его основной объем будет приводить к кольматации и препятствовать проникновению раствора вглубь материала. Поэтому наиболее предпочтительным, с позиций обеспечения высокого уровня доизвлечения золота, является вариант комбинированного кучного выщелачивания, заключающийся в дифференцированном размещении в объеме штабеля дробленой (додробленной) крупной фракции и окомкованной шламообразующей (рисунок).

По комбинированному варианту кучного выщелачивания, окомкованная с цементом и раствором, содержащим гидратированные формы активного кислорода, шламообразующая фракция материала, укладывается между штабелями неокомкованной дробленой руды. Таким путем решается проблема шламируемости руд. Соответственно, существенно снижается кольматация. При этом перед укладкой окомкованной руды в межштабельном пространстве, заполненном окомкованной с использованием электрофотоактивированных растворов минеральной массой, устанавливаются перфорированные трубы для последующей периодической подачи в нее под напо-

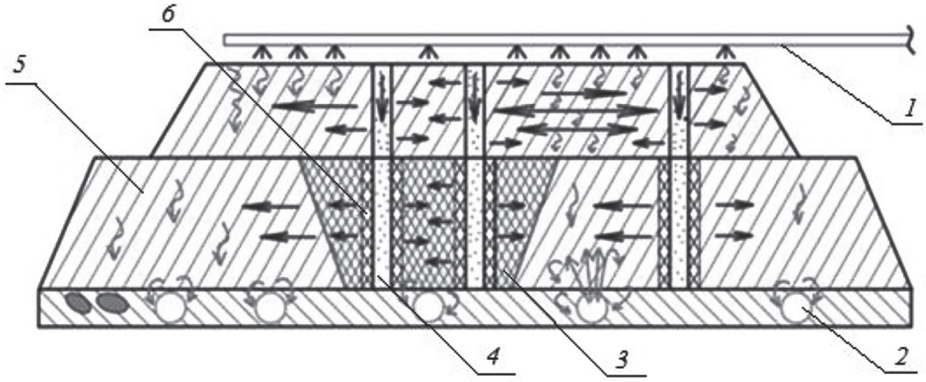


Схема кучно-скважинного выщелачивания: 1 — система орошения штабеля, 2 — дренажные трубы, 3 — окомкованная тонкая фракция, 4 — перфорированные трубы (орошение горизонтальными потоками), 5 — крупнокусковой додробленный материал, 6 — гравийная обсыпка

In-situ heap leaching layout: 1—pile sprinkling, 2—drainage pipes; 3—nodulized fine fraction; 4—perforated pipes (horizontal sprinkling); 5—coarse fraction material; 6—gravel package

ром рабочих растворов с комплексообразователем для золота горизонтально-ориентированными струями [14]. Опосредованно эти растворы попадают в штабели с крупнофракционным неокомкованным материалом, проходя через окомкованную мелкофракционную массу, дополнительно обрабатывая зоны, не охваченные рабочими растворами, подаваемыми при орошении штабелей с поверхности (рисунок).

Периодическая подача под напором рабочих растворов через скважины обеспечивает перевод золота из пленочных вод в подвижную жидкую фазу. Таким образом, обеспечивается его выщелачивание из окомкованного материала в пульсационно-статическом гидродинамическом режиме и своевременный вынос из материала образующихся шламовых частиц.

Крупнофракционные кеки предыдущего кучного выщелачивания руд, уложенные в основных секциях штабеля, могут орошаться раствором, содержащим гидратированные активные формы кислорода (включая пероксидные соединения), до их полной пропитки. После диффузионного окисления всей минеральной массы в течение 3—5 суток, весь штабель с поверхности орошается цианидным или хлоридным раствором. Продуктивные растворы, вытекающие из нижней части штабеля через дренажные трубы, собираются в аккумулирующих канавках и далее в зумпфах, из которых откачиваются в прудок-накопитель.

Экспериментальные исследования рассмотренных процессов активационного выщелачивания из окомкованной шламообразующей фракции и дробленого крупнофракционного материала отработанных штабелей рудников Апрелково и Дельмачик, позволили установить, что при их комбинированном использовании обеспечивается извлечение (доизвлечение) золота в диапазоне 55—70%.

Обсуждение результатов и заключение

С точки зрения экономии энергетических и материальных ресурсов, а также минимизации экологических издержек, при переработке золотосодержащей минеральной массы со значительной долей сульфидных железосодержащих минералов, предпочтительно осуществлять ее окисление бактериями.

На первом этапе кучного выщелачивания орошение целесообразно осуществлять концентрированными растворами с уменьшенным удельным расходом (соответственно плотностью орошения), обеспечивающим формирование смачивающих пленок на поверхности отдельностей руды и капиллярно-диффузионное проникновение в поры и микротрещины выщелачивающих растворов и/или их компонентов.

В таком случае, на первом этапе может иметь место относительное замедление выхода золотосодержащих комплексов в основной объем формируемого продуктивного раствора (с накоплением их в поровом пространстве и пленочной жидкости), из-за низкой интенсивности конвективных массообменных процессов их с фильтрующимся потоком рабочего раствора. Для снижения эффекта дальнейшей «холостой» миграции золота с микротрещенными водами при перемещении их по замкнутым системам капилляров, после подачи в окомкованную массу выщелачивающих растворов, необходимо на стадии моделирования кучного выщелачивания в перколяторах установить рациональную продолжительность периода выстаивания и плотностью орошения рабочими растворами (или накисложенной водой) окомкованной массы в инфильтрационном или фильтрационном гидродинамическом режимах.

Извлечение (доизвлечение) золота в диапазоне 55—70% из отработанных

штабелей рудников Апрелково и Дельмачик свидетельствует о высокой эффективности процессов активационного кучного выщелачивания из окомкованной шламообразующей фракции и дробленого крупнофракционного материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александрова Т.Н., Гурман М.А., Кондратьев С.А.* Проблемы извлечения золота из упорных руд Юга Дальневосточного региона России и некоторые пути их решения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2011. — № 5. — С. 124—135.

2. *Мирзеханов Г.С.* Оценочные критерии ресурсного потенциала техногенных образований россыпных месторождений золота Дальнего Востока России // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. — 2014. — № 1 (23). — С. 139—150.

3. *Наумов В.А., Илалтдинов И.Я., Наумова О.Б., Кольцов В.А.* Оценка содержания золота в техногенных намывных отложениях // Современные проблемы науки и образования. — 2013. — № 4. — С. 398.

4. *Литвинцев В.С., Банщикова Т.С., Леоненко Н.А., Алексеев В.С.* Рациональные методы извлечения золота из техногенного минерального сырья россыпных месторождений // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2012. — № 1. — С. 190—194.

5. *Yin S., Wang L., Wu A., Free M.L., Kabwe E.* Enhancement of copper recovery by acid leaching of high-mud copper oxides. A case study at Yangla Copper Mine, China // Journal of cleaner production, 2018, 202, pp. 321—331.

6. *Плаксин И.Н.* Металлургия благородных металлов. — М.: Металлургиздат, 1958. — 367 с.

7. *Sekisov A.* Cluster chemical reactions at mineral-liquid interface in metal leaching by photoelectroactive water-and-gas emulsions // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, No. 53, pp. 1—4, DOI:10.1088/1755-1315/53/1/012034.

8. *Лунин В.В.* Электронная библиотека учебных материалов по химии, окислительно-восстановительные потенциалы. URL: http://www.chem.msu.su/rus/handbook/redox/elem_dat/o.html (дата обращения 19.02.2019).

9. *Воейков В.Л.* Ключевая роль устойчиво-неравновесного состояния водных систем в биоэнергетике // Российский химический журнал (Журнал РХО им. Д.И. Менделеева) — 2009. — № 6 (LIII). — С. 41—49.

10. *Секисов А.Г., Резник Ю.Н., Шумилова Л.В., Зыков Н.В., Лавров А.Ю., Королев В.С., Конарева Т.Г.* Патент РФ № 2361937, 2007145306/02 06.12.2007. Способ подготовки упорных сульфидных руд и концентратов к выщелачиванию. 2009. Бюл. № 20. http://www1.fips.ru/Archive/PAT/2009FULL/2009.07.20/DOC/RUNWC1/000/000/002/361/937/DOCUMENT.PDF.

11. *Holley E.A., Yu Y.T., Navarre-Sitchler A.* Quantitative mineralogy and geochemistry of pelletized sulfide-bearing gold concentrates in an alkaline heap leach // Hydrometallurgy, 2018, No. 181, pp. 130—142.

12. *Van Staden P.J., Petersen J.* The effects of simulated stacking phenomena on the percolation leaching of crushed ore, Part 1: Segregation // Minerals engineering, 2018, No. 128, pp. 202—214.

13. *Velasquez-Yevenes L., Torres D., Toro N.* Leaching of chalcopyrite ore agglomerated with high chloride concentration and high curing periods // Hydrometallurgy, 2018, No. 181, pp. 215—220.

13. *Секисов А.Г., Рассказова А.В.* Патент РФ № 2647961, 2017120462, 09.06.2017. Способ выщелачивания золота из упорных руд, патент на изобретение. 2018. Бюл. № 9. ГИАБ

REFERENCES

1. Aleksandrova T.N., Gurman M.A., Kondrat'ev S.A. Some approaches to gold extraction from rebellious ores on the South of Russian Far East. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2011, no 5, pp. 124—135. [In Russ].

2. Mirzekhanov G.S. Estimated criteria of resource potential of technogenic formations of alluvial gold deposits of the Far East of Russia. *Vestnik Kamchatskoy regional'noy organizatsii Uchebno-nauchnyy tsentr. Nauki o Zemle*. 2014, no 1 (23), pp. 139—150. [In Russ].

3. Naumov V.A., Ilaltdinov I.Ya., Naumova O.B., Kol'tsov V.A. The assessment of the contents of gold in alluvial technogenic deposits . *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013, no 4, pp. 398. [In Russ].

4. Litvintsev V.S., Banshchikova T.S., Leonenko N.A., Alekseev V.S. Effective methods for gold recovery from mining wastes at placers. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2012, no 1, pp. 190—194. [In Russ].

5. Yin S., Wang L., Wu A., Free M.L., Kabwe E. Enhancement of copper recovery by acid leaching of high-mud copper oxides. A case study at Yangla Copper Mine, China. *Journal of cleaner production*, 2018, 202, pp. 321—331.

6. Plaksin I.N. *Metallurgiya blagorodnykh metallov* [Металлургия благородных металлов], Moscow, Metallurgizdat, 1958, 367 p.

7. Sekisov A. Cluster chemical reactions at mineral-liquid interface in metal leaching by photo-electroactive water-and-gas emulsions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, No. 53, pp. 1—4, DOI:10.1088/1755-1315/53/1/012034.

8. Lunin V.V. *Elektronnaya biblioteka uchebnykh materialov po khimii, okislitel'no-vosstanovitel'nye potentsialy* [Electronic library of training materials on chemistries, redox potentials]. URL: http://www.chem.msu.su/rus/handbook/redox/elem_dat/o.html (accessed 19.02.2019).

9. Voeykov V.L. Ключевая роль устойчиво-неравновесного состояния водных систем в биоэнергетике. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*. 2009, no 6 (LIII), pp. 41—49. [In Russ].

10. Sekisov A.G., Reznik Yu.N., Shumilova L.V., Zykov N.V., Lavrov A.Yu., Korolev V.S., Konareva T.G. *Patent RU 2361937, 2007145306/02 06.12.2007*. 2009. http://www1.fips.ru/Archive/PAT/2009FULL/2009.07.20/DOC/RUNWC1/000/000/002/361/937/DOCUMENT.PDF.

11. Holley E.A., Yu Y.T., Navarre-Sitchler A. Quantitative mineralogy and geochemistry of pelletized sulfide-bearing gold concentrates in an alkaline heap leach. *Hydrometallurgy*, 2018, No. 181, pp. 130—142.

12. Van Staden P.J., Petersen J. The effects of simulated stacking phenomena on the percolation leaching of crushed ore, Part 1: Segregation. *Minerals engineering*, 2018, No. 128, pp. 202—214.

13. Velasquez-Yevenes L., Torres D., Toro N. Leaching of chalcopyrite ore agglomerated with high chloride concentration and high curing periods. *Hydrometallurgy*, 2018, No. 181, pp. 215—220.

13. Sekisov A.G., Rasskazova A.V. *Patent RU 2647961, 2017120462*, 09.06.2017. 2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Секисов Алексей Геннадьевич[1] — д-р техн. наук,
главный научный сотрудник, e-mail: sekisovag@mail.ru,
Рассказова Анна Вадимовна[1] — канд. техн. наук,
старший научный сотрудник,
Литвинова Наталья Михайловна[1] — канд. техн. наук,
заведующая лабораторией,
Кирильчук Максим Сергеевич[1] — аспирант,
[1] Институт горного дела Дальневосточного отделения РАН.
Для контактов: Секисов А.Г., e-mail: sekisovag@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

A.G. Sekisov[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher,
e-mail: sekisovag@mail.ru,
A.V. Rasskazova[1], Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
N.M. Litvinova[1], Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory,
M.S. Kirilchuk[1], Graduate Student,
[1] Mining Institute, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences,
680000, Khabarovsk, Russia.
Corresponding author: A.G. Sekisov, e-mail: sekisovag@mail.ru.