

Как «штурмуют» упорные руды золота

О.Н.Новиков

Вскрытие упорной руды золота

Что такое упорные руды? Термин «упорная руда — это технологически упорные руды и концентраты, не поддающихся обработке простыми, общепринятыми в промышленной практике, методами, в которых основной извлекаемый элемент является тонковкрапленным (субмикроскопическим) трудно вскрываемым.

Упорные руды золота характеризуются тонко вкрапленным (субмикроскопическим) трудно вскрываемым золотом, присутствием минералов сурьмы, меди, мышьяка, двухвалентного железа, а также сульфидов (пиритов) и углистых сланцев. По смыслу термина упорные руды золота — это те, руды, с которыми методы цианирования не работают.

Механические методы обогащения

Зачастую руды, представляющие упорный материал для цианирования, часто легко подвергаются механическому обогащению. Так, например, золото в сульфидных рудах, может быть достаточно полно извлечено из руды методом флотации, так как сульфиды флотируются, а золото осаждается. Медленно растворяющееся в цианиде крупное золото, а также золото, покрытое всякого рода поверхностями, пленками хорошо извлекается в гравитационные концентраты.

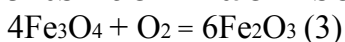
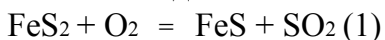
Гравитация. Гравитационными процессами обогащения называются процессы, в которых разделение минеральных частиц, отличающихся плотностью, размером или формой, обусловлено различием в характере и скорости их движения в среде под действием силы тяжести, инерции и сил аэро- и гидродинамического сопротивления. В качестве среды, в которой осуществляется гравитационное обогащение, используются при мокром обогащении вода, тяжелая суспензия или растворы; при пневматическом — воздух. Гравитационные методы занимают ведущее место среди других методов обогащения, особенно в практике переработки угля, золотосодержащих, вольфрамовых, молибденовых руд и руд черных металлов. К гравитационным процессам относятся отсадка, обогащение в тяжелых средах (преимущественно в минеральных суспензиях), концентрация на столах, обогащение в шлюзах, желобах, струйных концентраторах, конусных, винтовых и противоточных сепараторах, пневматическое обогащение.

Флотация. Флотация представляет собой процесс разделения тонкоизмельченных частиц, применяемый для обогащения руд различных металлов, твердого топлива и неметаллических полезных ископаемых посредством воздушных пузырьков, за счет разницы в адгезии отдельных фракций сырья. При применении флотации для обогащения полезных ископаемых выделяется продукт, не содержащий полезных

минералов, называемый «хвостами», и концентраты, в которых сосредотачиваются полезные минералы. Концентраты в некоторых случаях могут быть использованы в качестве конечных готовых продуктов, но большей частью они требуют дальнейшей обработки (плавки, выщелачивания). Перед флотообогащением руду измельчают, для того чтобы каждая отдельная частица по возможности состояла из одних ценных минералов или пустой породы. Эта операция называется раскрытием минеральных зерен. При флотации разделение происходит в воде, в которой частицы твердого находятся во взвешенном состоянии. Осуществляется оно в результате прилипания некоторых твердых частиц к пузырькам газа, образующимся в пульпе или введенным в неё, в то время как другие твердые частицы смачиваются водой и не прикрепляются к пузырькам, оставаясь в пульпе по-прежнему во взвешенном состоянии. Твердые частицы, прикрепившиеся к пузырькам воздуха, всплывают на поверхность пульпы, образуя пенный продукт, отличающийся по своему составу от исходной пульпы. Высший пилотаж для технолога при флотационном обогащении золотосодержащих руд — применение смачивателей, которые могут увеличить адгезию пузырьков либо к примесям, балласту, либо к золоту. Например в качестве таких собирателей применяют культуры бактерий.

Разложение флотоконцентратов и осадков

По мере концентрирования становятся экономически целесообразными и термические методы извлечения золота. Так, например, становится применим окислительный обжиг. Окисление пирита начинается при обжиге при температуре 450 - 500 °С. Процесс протекает с образованием в качестве промежуточного продукта пирротина, который окисляется до магнетита и далее до гематита:

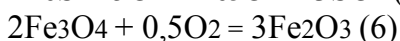
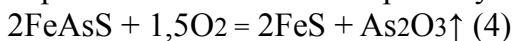


Практически установлено, что оптимальная температура обжига пирита колеблется в пределах 500 — 700 °С.

При добавке свинца одновременно с окислением происходит экстракция золота микрокаплями свинца.

Кстати, магнитные свойства железа в ходе окисления тоже меняются. Этот процесс тоже можно использовать, например, для магнитной сепарации.

Интенсивное окисление арсенопирита начинается примерно при 450 °С и протекает с образованием в качестве промежуточных продуктов пирротина и магнетита:



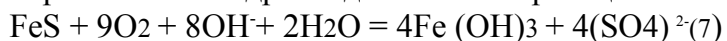
В настоящее время обжиг флотационных пиритно-арсенопиритных концентратов применяют на многих золотоизвлекательных предприятиях. Как правило, исходные сульфидные концентраты содержат 18 – 25 % серы, 5 – 10 % мышьяка, 50- 250 г/т золота.

При плавке в присутствии различных добавок, например свинца, золото при плавке можно из такого концентрата извлечь, но при превышении температуры золото может перейти в пар и выход его уменьшится. Впрочем, перевод в паровую фазу с

последующим улавливанием паров тоже может рассматриваться как метод концентрирования золота.

Возможно предварительное щелочное разложение сульфидных золотосодержащих концентратов.

Известно, что при аэрации в щелочном растворе сульфиды железа окисляются с образованием гидроксида железа по реакции:

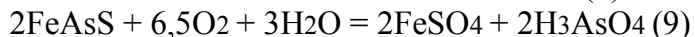
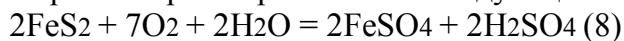


Трехвалентное железо в отличие от гидроксида двухвалентного железа не взаимодействует с золотом и не осаждает его. Из суспензии золото можно извлечь цианидом, отделив от железа фильтрацией, осаждением или декантацией. Недостатком применения данной реакции в промышленности является то, что стадия индукции этой реакции очень длительная, она автокаталитическая, требуется предварительное введение трехвалентного железа. Часто трехвалентное железо вводят специально в раствор выщелачивания для ускорения процесса.

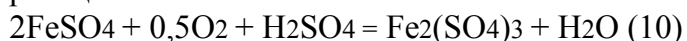
Сульфиды сурьмы и мышьяка хорошо разлагаются щелочью. Основным фактором, определяющим скорость перехода сурьмы и мышьяка в раствор – концентрация щелочи. Что касается пирита и арсенопирита, наиболее распространенных минералов золотосодержащих руд, то они очень плохо разлагаются щелочью. Заметное выщелачивание пирита, как сообщается в литературных источниках, осуществляется раствором гидроксида натрия лишь при температуре 400 °С. В этом случае в 2,5 молярном растворе гидроксида натрия за 2 ч в раствор извлекалось 94 % серы, а остаток представлял собой коричневую массу, состоящую из окиси железа.

Автоклавное выщелачивание

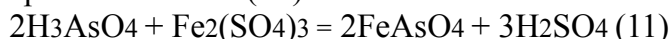
Часто концентрация окислителя, например, кислорода воздуха, при нормальном давлении слишком мала и процесс идет медленно. Повышение давления ускоряет процесс за счет пропорционального увеличения концентрации окислительного агента. Автоклавное выщелачивание сульфидных золотосодержащих концентратов может осуществляться как в кислой, так и в щелочной средах. При выщелачивании в кислой среде разрушение пирита и арсенопирита протекает по следующим окислительно-восстановительным реакциям:



Ионы двухвалентного железа окисляются кислородом до трехвалентного состояния по реакции:

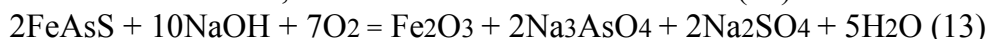


Перешедший в раствор мышьяк осаждается в виде сравнительно малорастворимого арсената железа (+3):



Приемлемая степень окисления пирита и арсенопирита достигается за 2 - 4 ч при температуре 120 – 180 °С и давлении 0,2 – 1,0 МПа. Вскрытое из сульфидов золото полностью остается в осадке и опять же его надо извлекать.

При выщелачивании пирита и арсенопирита в щелочной среде протекают следующие реакции:



В результате железо (вместе с золотом) остается в осадке, а сера и мышьяк переходят в раствор. По сравнению с окислительным обжигом предварительное автоклавное выщелачивание обеспечивает более глубокое вскрытие золота из сульфидов. Это объясняется тем, что при автоклавном выщелачивании вскрываемое золото остается со свободной поверхностью, тогда как при окислительном обжиге оно частично покрывается пленками легкоплавких соединений, примесей. Поэтому извлечение золота при последующем цианировании автоклавных осадков выше (до 96–98 %), чем при цианировании огарков. Естественно, автоклав ограничен по объему, дорог и подлежит контролю от Котлонадзора.

Бактериальные способы окисления

Честь открытия «живого» золота принадлежит Д. Халлбауэру из Йоханнесбурга. В 1979 г. он описал нитчатые формы самородного золота из руд, залегающих в гигантском месторождении Витватерсранд. Столь необычные сгустки золота, по предположениям, образовались на месте чехлов нитчатых бактерий. Но в 1991 г. Дж. Уоттерсону из проб, взятых на золотых россыпях Аляски, удалось выделить самородное золото в виде гирлянд микроскопических пустотелых шариков. По размерам и форме они точно соответствовали оболочкам почвенных бактерий. Необычные формы агрегатов золота образуются в результате полного замещения биомембран металлом и поэтому имеют вид микроскопических шариков или простых, спирально закрученных и ветвящихся нитей диаметром около 0,002 мм. Если золотом замещаются целые бактериальные колонии, то размер агрегатов достигает нескольких миллиметров. Исследователи провели анализ золотых самородков, найденных на территории двух австралийских золотых приисков, находящихся на расстоянии 3400 км друг от друга: в Новом Южном Уэльсе и Квинсленде. При этом также были обнаружены структуры, представляющие собой остовы бактерий, заключенные в оболочку из золота. Генетический анализ выявил во входящей в состав золотых зерен бактериальной биопленке молекула ДНК 30 видов бактерий. Останки представителей одного из них, идентифицированного как *Ralstonia metallidurans*, присутствуют на самородках из обоих приисков, но не содержатся в окружающей почве.

Эти микроорганизмы, *R. metallidurans*, могут жить в среде, содержащей токсические хлориды металлов, в том числе золота. Бактерии поглощают ядовитые соединения и таким образом обезвреживают окружающую среду. Считают, что в процессе образования самородков задействованы также химические комплексы, содержащие тиосульфат золота. Тионовые бактерии *Thiobacillus ferrooxidans* могут применяться для выщелачивания меди, никеля, цинка, мышьяка, кадмия, золота и других металлов. Фактически это биологический аналог тиосульфатного метода.

Бактериальные методы выщелачивания в основном относятся к вспомогательным методам вскрытия золотосодержащих видов сырья. Метод основан на способности различных хемолитотрофных бактерий окислять сульфидные минералы до сульфатов и высвобождать от них золото. Окисление происходит в разбавленных серноокислотных растворах. Высвобожденное золото остается в твердой фазе, которая после

бактериального окисления подвергается последующему выщелачиванию различными реагентами.

Бактериальные методы извлечения золота из руд базируются на результатах изучения микрофлоры крупных золоторудных месторождений, позволивших выделить культуры доминирующих видов бактерий и грибов, то есть требуют строго индивидуального подхода.

Собственно биовыщелачивание золота

В промышленности собственно биовыщелачивание золота практически не применяется. Но исследования идут интенсивно. Началось все с опытов Лунгвица, относящихся еще к 1900 г. Лунгвиц смешивал порошкообразное золото с раствором, содержащим остатки гниющих растений, и при этом установил факт растворения золота. Пионерами исследований по бактериальному выщелачиванию золота были институт Пастера (Франция) и университет г. Даккар (Сенегал). Информация об этих работах появилась в печати в 60 - х годах XX века. Установлено, что повышенной активностью в процессе растворения золота обладают представители родов *Bacillus*, *Bacterium*, *Chromobacterium*, а также полученные на основе индуцированного мутагенеза штаммы бактерий *Bacillus mesentericus* (Картофельная палочка) 12 и 129. Микроскопические грибы, в отличие от бактерий, способны аккумулировать золото из растворов. Наиболее эффективны представители родов *Aspergillus*, *A. niger* (черная плесень) и *A. Oryzae* (используется при синтезе лимонной кислоты). В процессах бактериального выщелачивания золота определяющая роль принадлежит продуктам микробного синтеза: аминокислотам, пептидам, белкам и нуклеиновым кислотам. Углеводы в растворении золота участия не принимают.

Для выщелачивания были использованы накопительные культуры (т. е. колонии развивающихся микроорганизмов на специальной питательной среде), в которых микробы были убиты нагреванием в автоклаве до 120° С, введением ацетона или толуола, или же применением ультразвуковых колебаний. Несмотря на это, была установлена возможность растворения золота с помощью питательных сред с посевами, не содержащими живых бактерий. Следовательно, растворяющей субстанцией являются не непосредственно сами микроорганизмы, а выделяемые ими в окружающую среду продукты их жизнедеятельности (метаболизма). При этом они действуют наиболее активно в момент выделения бактериями, вследствие чего извлечение золота при обработке питательной среды с живыми бактериями несколько выше, чем одними, заранее выделенными продуктами метаболизма.

Наилучшие результаты по биорастворению золота достигаются, когда начальное значение рН среды 6,8 или 8. Бактерии в процессе растворения несколько подщелачивают среду, в результате чего значение рН соответственно возрастает до 7,7 и 8,6. Пропускание потока стерилизованного воздуха через культуры микроорганизмов, так же как и механическое перемешивание, ухудшают растворение золота. Предварительные исследования основных положений биовыщелачивания золота позволили исследователям вплотную подойти к полевым испытаниям разрабатываемой бактериальной технологии и к ее внедрению на золотосодержащих объектах Сенегала. Первые испытания были проведены

по выщелачиванию лактеритов, содержащих 6,6—19,8 г/т золота с помощью бактерий вида Р-76 (спорообразующих подвижных с полярными жгутиками грамм—отрицательных). За 217 дней в раствор было извлечено от 10 до 82% золота, и при этом концентрация металла в растворе колебалась в пределах 0,2—1,1 мг/л. Из всех испытанных питательных сред для бактерий наиболее эффективной оказалась манитол-содержащая.

Широкая гамма микроорганизмов, в том числе 8 штаммов, выделенных из золотосодержащих пород месторождения «Берег Слоновой Кости», была испытана для извлечения золота из руд, содержащих 11,2—18,3 г/т металла. В качестве питательной среды использовали бульон из зеленых орехов различной концентрации. Наиболее активными оказались четыре культуры, выделенные из руды, которые позволили за 74 дня выщелачивания получить растворы с содержанием 12—15 мг/л золота. На аналогичных культурах были проведены исследования по установлению влияния концентрации пептона на процесс растворения чистого золота. Установлено, что при концентрации пептона в средах 1,0 и 2,5 г/л содержание золота соответственно достигает 1,5 и 12 мг/л, т. е. с уменьшением содержания питательного реагента содержание золота в растворе резко понижается, достигая 1 мг/л в среде с содержанием пептона 0,1 г/л. Дальнейшее извлечение золота осуществлялось на угле или анионите.

Полевыми испытаниями установлено, что процесс бактериального растворения золота из руд имеет следующие последовательные этапы. Прежде всего существует скрытая фаза, которая длится от 3 недель при использовании наиболее благоприятных культур, и до 5 недель, если питательные среды менее пригодны для развития растворяющих способностей бактерий. После этого наступает этап растворения, возрастающего неравномерно, и иногда с повторными выделениями осадка металла. Максимум растворения наблюдается между 2,5 и 3 месяцами. Степень растворения золота на следующем этапе практически не изменяется. Этот этап назван ступенью растворимости. В этот период концентрация растворенного золота держится на довольно высоком уровне (~10 мг/л) в течение полгода - год. После этого наступает последний этап, характеризующийся явно выраженным снижением растворимости золота. Таким образом, требуемая продолжительность бактериального выщелачивания до достижения максимума извлечения (ступень растворимости) должна в среднем составлять 75—90 дней. При проведении бактериального выщелачивания в промышленных условиях исследователи столкнулись с существенными трудностями, связанными с необходимостью использования неасептических сред. Солерастворимые белки микробного синтеза существенно лучше действуют на золото, чем глобулин животного происхождения. Реакционная способность пептидов зависит от их молекулярного веса: чем он меньше, тем выше в его растворе растворимость золота. Установлено, что повышенной активностью в процессе растворения золота обладают представители родов *Bacillus*, *Bacterium*, *Chromobacterium*, а также полученные на основе индуцированного мутагенеза штаммы бактерий *Bacillus mesentericus* 12 и 129.

Микроскопические грибы, в отличие от бактерий, способны аккумулировать золото из растворов. Наиболее эффективны представители родов *Aspergillus niger* и *Aspergillus ogyzae*. Одной из наиболее активных по отношению к золоту групп бактерий является

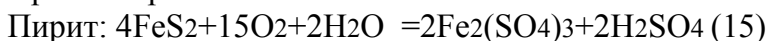
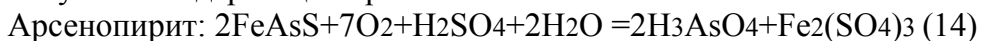
разновидность, относящаяся к виду *Aeromonas* (патогены рыб, лягушек, могут вызвать гастроэнтериты у людей с ослабленным иммунитетом). На рост и развитие этих микроорганизмов оказывает большое влияние не только химический состав руд, но и температурные условия, химический состав вод.

Активное участие в процессах биовыщелачивания оказывают продукты метаболизма, в частности белки. Причем реакционная способность пептидов зависит от их молекулярного веса: чем он меньше, тем выше растворимость золота. В 1994 г в Австралии построена установка ВАСОХ фирмы ВacTech. Она позволила на фабрике производительностью 60 000 унций/год повысить извлечение золота из огнеупорной руды с 40 до 90 %. Такие же установки были установлены в Тасмании и в Китае. Новая технология, разработанная этой фирмой совместно с компанией Minteck, позволила повысить извлечение золота до 99,5%. На фабрике Mansa Mina установка BioCOP была установлена между секцией флотации и цехом гидрометаллургии. Щелочной раствор из установки BioCOP, насыщенный медью, смешивался с раствором, отобранном после выщелачивания в кучах, и направлен в гидрометаллургический цех для дальнейшей обработки и электролиза. Эта схема была полностью запущена в эксплуатацию в 2003г. Позже оказалось, что биовыщелачивание собственно золота оказалось неэффективным, так как было нестабильно. Сообщается, что процесс успешно применяется для меди, золото там извлекают цианированием по настоящее время.

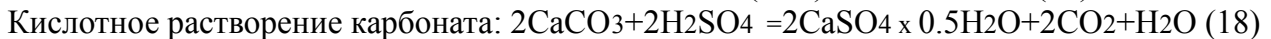
Биовскрытие

Биовскрытие как оказалось эффективнее, чем собственно выщелачивание золота. По современным представлениям окисление сульфидного минерала осуществляется совокупностью прямого и косвенного механизмами окисления.

Механизм прямого окисления: бактерии напрямую окисляют минерал биологически без необходимости применения вспомогательных реагентов, отжига и автоклавов для получения содержащих трехвалентное железо ионов:



Косвенный механизм: бактерии окисляют ионы двухвалентного железа в растворе до ионов трехвалентного железа, а ионы трехвалентного железа ионы выщелачивают минерал:



Сравнение технологических показателей применяемых методов

Большой практически опыт эксплуатации биотехнологических промышленных установок добычи золота за рубежом показали высокую экономическую эффективность за счет снижения капитальных затрат и уменьшения эксплуатационных расходов при увеличении извлечения золота и экологичности.

Например при переработке в год 75 000 тонн золото–мышьякового концентрата, капитальные вложения будут в 2.3 раза меньше, чем по процессу обжиг - цианирование. Для биотехнологического процесса характерным является самый низкий уровень эксплуатационных расходов и приведенных затрат (Табл 1.).

Таблица 1

Технико–экономические показатели биотехнологии переработки золото–мышьяковых концентратов на фабрике Фервью (ЮАР).

Показатели	Окислительный обжиг– цианирование	Бактериальное выщелачивание– цианирование
Извлечение золота, %	92	97
Капитальные затраты, %	100	50–80
Эксплуатационные расходы, %	100	80
Срок окупаемости, лет	8,7	6,2
Рентабельность, %	100	170

Преимущества биотехнологических методов добычи и переработки золота и других драгоценных и редкоземельных металлов заключаются не только в экологических и экономических аспектах, которые бесспорны в данном случае, но и в том, что они направлены на переработку упорных концентратов, хвостохранилищ, и забалансовых руд, если классические методы переработки малоэффективны. Применение биогидрометаллургической технологии позволяет отделить мышьяк и сурьму от золота, а так же отказаться от применения цианидов используемых для растворения благородных металлов, заменив их плавкой концентрата. Как известно мышьяк и сурьма аккумулируются по трофическим цепям и применение биологических методов требует полной утилизации биомассы. Для вскрытия сульфидов металлов из трудно обогащаемого полиметаллического сырья в настоящее время предпочтение отдают безавтоклавным гидрометаллургическим технологиям, химическим или бактериальным, что сокращает капитальные затраты. Наиболее выгодной по экологическим и экономическим соображениям является технология биовыщелачивания с использованием кислотоустойчивых бактерий *Thiobacillus*, позволяющая перерабатывать бедные руды и концентраты благодаря возможности селективного извлечения металлов и способности бактерий к авторегенерации и автоподкислению. Одним из недостатков использования данной технологии является низкая скорость процессов биовыщелачивания и высокие требования к однородности химического состава сырья поступающего на биоокисление, необходимость введения компонентов культуральной жидкости. При окончательном выборе технологии и техникоэкономическом обосновании его следует учитывать:

- требуемую производительность;
- минеральный состав и форму нахождения золота в исходном продукте;

О.Н.Новиков, Л.А. Новицкая Как «штурмуют» упорные руды золота

- извлечение золота в товарную продукцию;
- необходимость и степень защиты окружающей среды от токсичных отходов производства;
- безопасность труда на производстве, т. к. некоторые из применяемых видов бактерий являются патогенными и условно-патогенными для человека;
- безусловная работа по утилизации и обеззараживанию отходов производства и отработанных сред.

Как показали расчеты, при производительности установок 50 и 90 т/сутки, капитальные затраты по сравнению с автоклавным выщелачиванием снижаются в 2,3 — 2,9 раза, а эксплуатационные расходы в 1,1 — 1,8 раза (таблица 2). Как отмечалось выше, одним из достоинств технологии переработки золото-мышьяковых концентратов, в которой для вскрытия тонковкрапленного золота применяется бактериальное выщелачивание, являются сравнительно более низкие капитальные затраты и эксплуатационные расходы по сравнению с самым дорогим автоклавным методом. Для обоснования этих преимуществ обычно сравниваются три варианта технологий:

- «Окислительный обжиг – цианирование»,
- «Автоклавное выщелачиваниецианирование»,
- «БВ-цианирование».

Таблица 2

Экономическое сравнение технологий переработки
золото-мышьяковых концентратов и руд

Фирма, год	Затраты	Исходное сырьё			Технология с цианированием		
		Производит. т/сутки	Содержание Сера, %	Содержание Мышьяк, %	Окислит. обжиг	Автоклав. окисление	Биоокисление
Дженкор (ЮАР) 1986 год	Капитальные вложения, %	240	24	14	123	165	100
Райт Энджи-нирс (Канада) 1986 год	Капитальные вложения, %	100	20	10	129	198	100
	Эксплуатационные расходы: (дол/ т.)/%				55,9/130	42,8/99	43,1/100
Айт Энджи-нирс (Канада) 1987 год	Капитальные вложения, %	900	0,95	0,75	113	146	100
	Эксплуатационные расходы (дол/т.)/ %				19,4/104	20,3/109	18,7/100

Промышленный опыт показали, что чановый метод выщелачивания золотомышьяковых концентратов обладает рядом достоинств, что позволяет все более широко использовать его наряду с другими пирометаллургическими процессами при переработке упорных концентратов. В то же время совершенно очевидно, что кучное выщелачивание — наиболее экономичный метод выщелачивания. Кучное биовыщелачивание применяется на золотоизвлекательных комбинатах России и Зарубежья. (Олимпиадинском месторождении «Полюс Золота» и месторождении «Суздаль» в Казахстане (разрабатывает «Северная золоторудная компания», «Северсталь»)). Обобщив можно отметить, что основными преимуществами технологии биоокисления являются:

- более высокое извлечение золота при низком качестве исходного сырья;
- сравнительно низкие капитальные и эксплуатационные затраты;
- устойчивый процесс – идеален для отдаленных площадок;
- различные содержания сульфидной серы, при создании необходимых условий для адаптации биокультуры;
- короткое время реализации проекта (постройка основной линии);
- простота расширения;

Положительный эффект биовскрытия сульфидных руд иногда составляет до 80% [2], но точного механизма этого влияния не установлено. Вероятно бактерии прежде всего снимают с поверхности золота более химически активные вещества, предотвращая пассивирование золота.

Отрицательные особенности:

- требуется высокий уровень квалификации эксплуатационного персонала для адаптации биокультуры и поддержания параметров;
- длительная наладка функционирования биокультуры;
- опасность вторичного загрязнения и переноса мышьяка по трофическим цепям;
- внезапное и непредсказуемое явление деградации бактериальной культуры;
- множество влияющих факторов, даже химсостав воды [2].

Как отдельная стадия может рассматриваться обезвреживание мышьяковистых вод биовыщелачиванием. Исследователи из Геологической службы США (USGS) обнаружили штамм бактерий, которые используют соединения мышьяка в качестве источника энергии (Kulp, Hoefft, Asao, Madigan, Hollibaugh, Fisher, Stolz, Culbertson, Miller, Oremland, 2008: 967–970). Эти бактерии образуют пленки на поверхности воды, содержащей значительные концентрации соединений мышьяка, вымываемых из горных пород горячими источниками. Образующаяся пленка отправляется на производство мышьяка или его утилизацию с обезвреживанием. Раствор возвращается в оборот. Соответственно применив именно эти виды микроорганизмов, можно обеспечить селективное выщелачивание мышьяка, что упрощает дальнейшее извлечение драгметаллов на других растворах выщелачивания. Но пока не ясно, что делать в дальнейшем с мышьяком, содержащемся в бишламе-концентрате.

Хотя биовскрытие руд имеет ряд нерешенных вопросов, по сравнению с цианированием

технологический процесс в целом чище, и соединять эти процессы в одной технологии представляется нелогичным, так как ассоритмент токсикантов увеличивается в два раза. Другое дело заменить цианирование обработкой тиосульфатом, в котором, кроме меньшей токсичности, скорость выщелачивания вдвое больше, стоимость химикатов тоже меньше в два раза [3]. Фактически для правильного функционирования биовыщелачивания нужно создавать искусственный биоценоз, способный к длительному существованию.

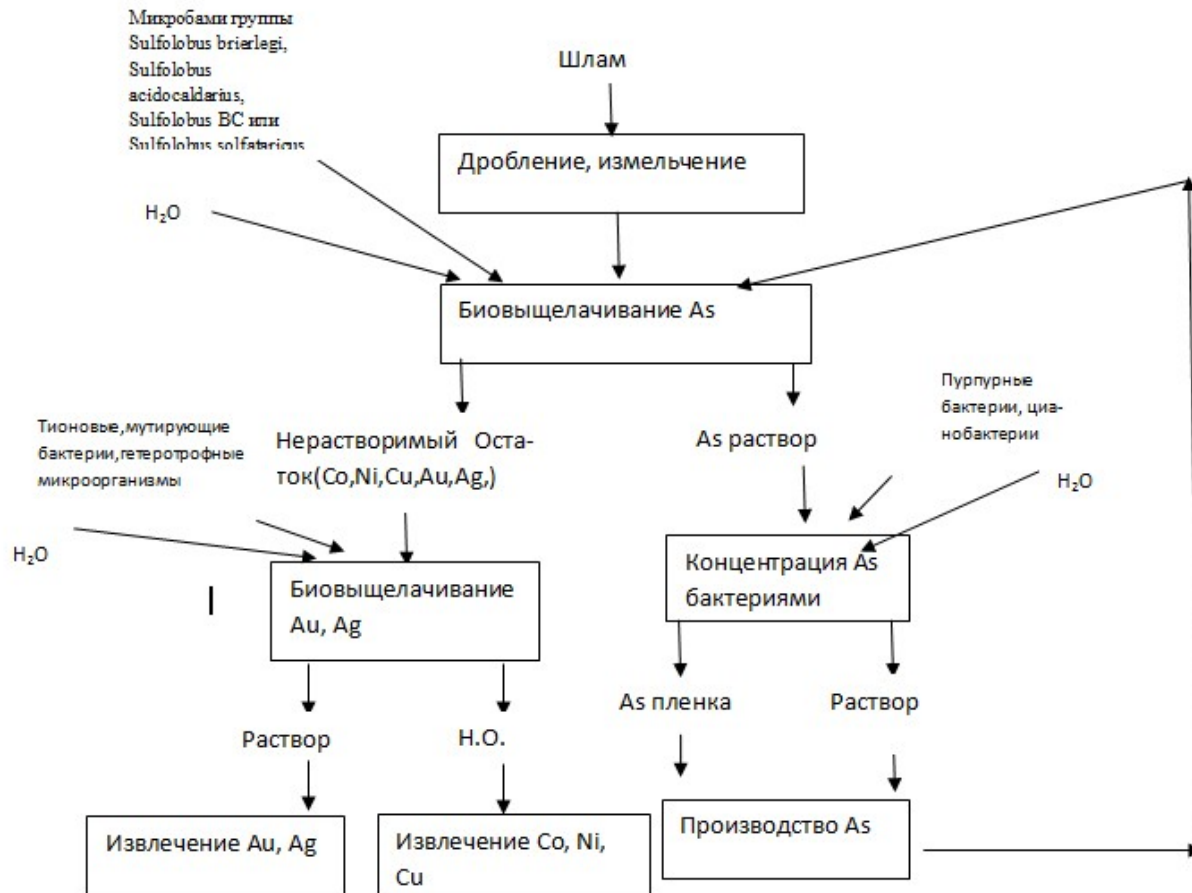


Схема 1. Двухстадийное биовыщелачивание[1]

Мировой опыт использования технологий бактериального окисления сульфидных золотосодержащих руд

В настоящее время в мире работает более 10 промышленных предприятий использующих технологию бактериального окисления с последующим цианированием продуктов биоокисления. Наиболее известными такими предприятиями являются Fairview (ЮАР), Sao –Bento (Бразилия), Harbour и Wiluna (Австралия), Ashanti (Гана), Alvarez, Jere, 2004; Das et al., 1998; Brierley, 2001; Ehrlich, 2001; Breed et al., 2000 [3]. Наибольшая производительность 1000–1200 тонн в сутки концентрата имеет завод Ashanti. Однако с пуском второй очереди пальма первенства достанется ГМЗЗ НГМК (Узбекистан). Одним

из крупнейших производителей золота в России акционерным обществом “Полос Золото”, после ввода в эксплуатацию первой фабрики биоокисления упорных золотосодержащих концентратов проектной производительностью (по руде) 3 млн. тонн в год запланирована постройка второй очереди. Биогидрометаллургический способ добычи в цветной металлургии широко используется в промышленных масштабах в США и других странах. 20% добычи меди в США приходится на ее получение из отвалов забалансовых руд. В Китае и Мексике сооружаются опытные установки для бактериального выщелачивания медных концентратов. Оценка подобных предприятий показывает, что при капитальных затратах на строительство установки порядка 900000 долл. Себестоимость одной тонны получаемого продукта составляет менее 50 долл. и время окупаемости установки – 18 месяцев. То есть, через год после освоения установки, чистая прибыль составляет 375 000 долларов США. В августе 2000 года вместе с корпорацией Billiton была создана компания Alliance Copper, обладающая эксклюзивными правами на продажу технологий биовыщелачивания сульфидных руд содержащих медь и молибден. Компания изучает возможность постройки завода в Chuquibambilla мощностью 20 000 тонн. Компания «Пасифик Ор Технолоджи» на своем предприятии «Радио Хилл» (Австралия), эксплуатирует опытно–промышленную установку кучного бактериального выщелачивания медно–никелевой руды и эта технология, по мнению специалистов, может быть применена для бактериального вскрытия упорных золото–сульфидных руд. Исходя из выше изложенного можно утверждать, что биотехнология, а конкретно бактериальное вскрытие упорных руд перспективная, динамично развивающаяся область применения аэробных бактерий в гидрометаллургии.

Очень важен процессинг при вскрытии пород, так например проведя первоначально химическое окисление можно интенсифицировать последующее биовскрытие сократив общую продолжительность в четыре раза [4].

В любом случае биовыщелачивание применяется как вспомогательный метод вскрытия сырья. Основа — химическое выщелачивание.

Таблица 3.

Сопоставительный анализ методов выщелачивания золота [5].

Система выщелачивания	Расход реагентов, кг на 1 т руды	Степень растворения Au, %
Цианид (pH 10,5-11)	NaCN – 0,15 CaO – 0,55	73
Гипохлорит (pH 6,4-6,5)	NaOCl – 5,55 HCl – 3,25	68
Бром (pH 1,3-2,1)	Br ₂ – 2,85 H ₂ SO ₄ – 6,8	57
Тиосульфат (pH 9,4-9,5)	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₃ – 14,5 NH ₃ – 2,0	37
Тиомочевина (pH 1,1-1,3)	CS(NH ₂) ₂ – 3,0	57

Система выщелачивания	Расход реагентов, кг на 1 т руды	Степень растворения Au, %
	Fe ₂ (SO ₄) ₃ – 9,0 H ₂ SO ₄ – 48,0	
Биовыщелачивание	Биомасса — 0,6 Окислитель -0,4 NaOH - 4	46,7

Как видно из Таблицы 3 наиболее эффективно цианирование. Но если учесть возможность предварительного химического и биохимического выщелачивания, вполне возможно использовать и альтернативные методы. Для упорного золота или предварительно переработанного биохимическим окислением цианирование не эффективно из-за примесей, лучше работают альтернативные методы. С учетом возможности рециклинга, стоимость очистки воды тоже можно значительно снизить. Что же касается упорных руд, то для таких объектов альтернативы показывают всегда более высокие результаты.

Литературные источники

1. Г. Р. Монгуш ПРИМЕНЕНИЕ BIOTEХНОЛОГИИ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ТУВЫ Электронный научный журнал «НОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТУВЫ» www.tuva.asia № 1 2010 г. с.228
2. Канаев А.Т., Канаева З.К., Мырзаханова И.А., Уразбекова Г.Е., Сатыбалдиева Г.К., Мусаев К.Л. ГЛУБОКОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЗОЛОТА ИЗ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АКБАКАЙ КУЛЬТУРОЙ ACIDITIOBACILLUS FERROOXIDANS ADVANCES IN CURRENT NATURAL SCIENCES ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ №6, 2013 с. 115-121
3. Жаркенов М.И., Токтамысов М.Т., Сатыбалдин О.Б. Эффективность выщелачивания отвалных и бедных руд цветных и чёрных металлов Казахстана. Алматы: КазГОСИНТИ, 1993. С. 150.
4. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Муравьев Максим Игоревич РАЗРАБОТКА ИНТЕНСИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ БИООКИСЛЕНИЯ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ СУЛЬФИДНЫХ КОНЦЕНТРАТОВ 05.16.02 Москва 2009.
5. Terry McNulty. Cyanide substitutes // Mining Magazine.- Vol. 184, № 5.- May 2001.
6. Mining Magazine, 2001, September, pp.128134