

СОВРЕМЕННЫЕ ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ УПОРНОГО ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ

¹Бодуэн А.Я., ¹Фокина С.Б., ¹Петров Г.В., ¹Серебряков М.А.

¹Национальный Минерально-Сырьевой Университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия (199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2;), e-mail: bodyen-anna@mail.ru

В течение последних десятилетий неуклонно уменьшается доля золота, извлекаемого из простых в технологическом отношении золотых руд. Одновременно возрастает доля золота извлекаемого из упорных руд, эффективная обработка которых требует значительно более сложных и развитых схем, включающих подготовительные операции (обжиг, биовыщелачивание, автоклавное окислительное выщелачивание) перед операцией цианирования. На основании проанализированных литературных источников в настоящей статье приведен зарубежный и отечественный опыт гидрометаллургической переработки упорного золотосодержащего сырья. Применение гидрометаллургических технологий переработки упорного золотосодержащего сырья (автоклавное и биоокисление) позволяет повысить извлечение золота и решить проблемы с токсичными выбросами мышьяка в атмосферу, характерными для обжига пирит-арсенопиритного золотосодержащего сырья. Внедрение методов автоклавного и биоокисления позволило разрабатывать ранее нерентабельные золоторудные месторождения. В заключении работы излагаются будущие задачи стоящие перед гидрометаллургическими технологиями переработки упорного золота, связанные с решением вопросов экологии и сокращением эксплуатационных и капитальных затрат.

Ключевые слова: золото, упорные руды, бактериальное окисление, автоклавное окисление.

MODERN HYDROMETALLURGICAL TECHNOLOGIES FOR PROCESSING REFRACTORY GOLD-BEARING RAW MATERIALS

¹Boduen A.J., ¹Fokina S.B., ¹Petrov G.V., ¹Serebrjakov M.A.

¹National Mineral Resources University, Saint-Petersburg, Russia (199106, Saint-Petersburg, 21 line of Vasilyevsky island 2), e-mail: bodyen-anna@mail.ru

The share of the gold, extracted from simple gold ores in the technological relation, decreases recently. At the same time the share of the gold extracted from persistent ores increases. Effective processing of such ores demands much more difficult and developed schemes including preparatory operations (roasting, bioleaching, autoclave oxidative leaching) before cyanidation. On the basis of the analyzed literature the present paper provides foreign and domestic experience of hydrometallurgical processing of refractory gold-bearing raw materials. Application of hydrometallurgical technologies for processing of persistent gold-bearing raw materials (bio-oxidation and autoclave oxidation) allows to increase extraction of gold and to solve problems with toxic emissions of arsenic in the atmosphere, typical for roasting pyrite-arsenopyrite gold raw materials. Introduction bio-oxidation and autoclave oxidation allowed to process earlier unprofitable gold fields. Future tasks, facing before hydrometallurgical technologies of processing of persistent gold, are stated. They are connected with the solution of environmental issues and reduction of operational and capital expenditure.

Keywords: gold, persistent ores, bio-oxidation, autoclave oxidation.

Россия, наряду с ЮАР, является мировым лидером по количеству запасов золота, пригодных для промышленной отработки. Многолетней не только производственной, но и социальной проблемой в России является снижение добычи золота из россыпей, в то время как рост производства металла из руд коренных месторождений идет довольно медленно. Одной из причин сложившейся тенденции, соответствующей общемировому тренду, является нарастание в структуре золотых минерально-сырьевых запасов России упорных руд, переработка которых при традиционных условиях цианидного выщелачивания характеризуются недостаточным извлечением золота [2].

Доля отечественных руд, содержащих упорное золото, весьма значительна и в настоящее время достигает 30%. Причинами низкой вскрываемости упорного золотосодержащего сырья, в первую очередь, являются тонкая диспергация золота в сульфидных минералах, чаще всего в пирите и арсенопирите, и наличие в некоторых из руд «активного» углерода», сорбирующего золото на стадии цианирования (это явление получило название «прег-роббинг») [4, 9]. Одной из важных проблем переработки упорных руд является вывод содержащегося в них мышьяка в относительно безвредных и пригодных для складирования и захоронения формах. Переработка упорных руд для повышения извлечения на цианировании предполагает предварительную обработку [8].

Традиционный метод извлечения золота из упорных руд заключается во флотационном обогащении, обжиге и последующем цианировании огарка [3]. С конца восьмидесятых годов прошлого века произошло внедрение гидрометаллургических технологий, включающих автоклавное и бактериальное вскрытие руд и концентратов в кислой среде с последующим цианированием твердых остатков [7]. В меньшем масштабе применяют процессы Albion, Leachox, Nitrox, Arseno и др. К перспективным способам переработки упорного золотосодержащего сырья относятся различные виды гидрохлорирования [5].

Наиболее изученным и широко распространенным в промышленности методом подготовки золотых сульфидных руд к цианидному вскрытию является окислительный обжиг. Для обжига золотосодержащих руд и концентратов применяют многоподовые печи, печи кипящего слоя, печи с циркулирующим кипящим слоем. В процессе обжига железо, содержащееся в сульфидах, превращается в гематит, а сера и мышьяк переходят в газовую фазу в форме триоксида мышьяка и диоксида серы. Из полученного огарка, представляющего собой пористую, хорошо проницаемую для растворов массу оксида железа, золото легко извлекается цианированием.

Обжиговый метод достаточно прост, хорошо освоен и до сих пор применяется в Канаде, ЮАР, Австралии и других странах. Основное количество мышьяка переводят в малотоксичные соединения для складирования в хвостохранилищах. Газы содержат достаточное количество сернистого ангидрида для производства серной кислоты; также могут быть сброшены в атмосферу или обработаны щелочью для образования сульфата кальция. Обжиг позволяет удалить природный уголь (имеющий эффект «прег-роббинга»), содержащийся в топливе, за счет его окисления (горения). Однако имеются примеры, когда обжиг способствует активации ранее неактивного угля (например, добавка угля для повышения температуры в обжиговой печи). Обжиг является экономичным способом

переработки упорных золотосодержащих руд, однако его эффективность снижается при необходимости жесткого контроля за выбросами SO_2 и As_2O_3 .

Таблица 1

Заводы по обжигу упорного золотосодержащего сырья в мире

Завод	Страна	Компания	Сырье	Мощность, т/сут	Год пуска завода
Gidji/W.A. KCGr	Австралия	Barrick/Ne wmont	концентрат с повышенным содержанием Те	1150	1987
Kanowna Belle	Австралия	Barrick/Ne wmont	концентрат (As)		1994
Carlin	США	Newmont	руда	7680	1994
Tongling	Китай	Tongling Nonferrous	концентрат	150	1997
Goldstrike	США	Barrick/Ne wmont	руда	11600	2000
Oongfang	Китай	Dongfang smelting	концентрат (As)	200	2004
Syama	Мали	Resolute Gold	концентрат	590	2007
Tanjiansha	Китай	Eldorado Gold	концентрат (As)		2008
Tongguan	Китай	Tongguan	концентрат (As)	200	2010

В последние годы наметилась устойчивая тенденция сокращения применения обжига для предварительной обработки упорного золотосодержащего сырья в связи с его серьезными недостатками: невысоким извлечением золота, обусловленным образованием на вскрываемых золотилах пленок легкоплавких соединений и уносом части золота в мышьяковистые возгоны; неизбежным загрязнением окружающей среды выбросами мышьяка и серы; необходимостью дорогостоящего захоронения высокотоксичного триоксида мышьяка [6].

Бактериальное окисление применяется в течение многих веков и уже эффективно превратило миллионы тонн упорной руды в материал, требующий только цианидного выщелачивания для извлечения золота. Процесс биоокисления для переработки упорных золотосодержащих руд и концентратов был промышленно внедрен в 1986 году, когда технология биоокисления BIOX® была успешно применена на золотом руднике Fairview в Южной Африке [12]. Процесс показал высокую надежность, и в настоящее время в мире

существует 19 подобных производств (таблица 5). Общая производительность по концентрату 7500 т/день.

В процессе используется смесь разных групп бактерий для окисления сульфидной минеральной матрицы при температурах около 40-50°C. Типичный цех биологического окисления для переработки флотационного концентрата включает в себя следующие операции: непосредственно процесс в реакторе с баком-смесителем, подача воздуха в реакторы, охлаждение раствора реактора, промывка противоточной декантацией и нейтрализация стоков [10].

Базовая химия процесса биоокисления в целом сходна с автоклавным окислением, но есть ряд важных отличий [7].

Таблица 2

Предприятия, работающие по технологии биоокисления золотосодержащего сырья

Завод	Компания	Технология	Страна	Производительность, т/сут	Год пуска завода
Fairview	Pan African Resources	BIOX ®	ЮАР	55	1986
Wiluna	Apex Minerals	BIOX ®	Австралия	158	1993
Ashanti	AngloAshani	BIOX ®	Гана	960	1994
Yantai Gold		CCGRI	Китай	50+80	2000
Beaconsfield	BCD Resources	BACOX	Австралия	70	2000
Laizhou	Tarzan BioGold	BACOX	Китай	200	2001
Olympiada	Polyus	BIONORD ®	Россия	1000	2001
Tianli		CCGRI	Китай	100	2003
Axi		JLMRI	Китай	50+80	2004
Fosterville	Crocodile Gold	BIOX ®	Австралия	211	2005
Suzdal	South Verhojansk Mining Company	BIOX ®	Казахстан	520	2005
Sanhe		CCGRI	Китай	70	2006
Bogoso	Star Resources	BIOX ®	Гана	820	2007
Jinfeng	Elderado Gold	BIOX ®	Китай	790	2007
Innovation		CCGRI	Китай	150	2007
Jinchiling		CCGRI	Китай	100	2007
Kokpatas	Novi Mining and Metallurgical Combinat	BIOX ®	Узбекистан	1069+1069	2009
Agnes	Galaxy Gold	BIOX ®	ЮАР	20	2010

Бактерии являются и катализаторами, и непосредственными участниками реакций окисления. Это живые организмы, поэтому для их жизни и роста важны стабильная температура и соответствующее питание (углерод и питательная среда, в том числе, такие микроэлементы как фосфат, азот, калий). Рабочая температура зависит от используемой бактериальной культуры. Важный фактор в конструкции реактора - создание возможностей для роста бактерий вдвое на первой стадии, что предотвратит бактериальное вымывание.

В мышьяковистых флотационных концентратах железо, сера и мышьяк растворяются в процессе биологического окисления до сульфата железа, серной кислоты и мышьяковой кислоты. Для обеспечения достаточной скорости окисления в биологический реактор должно быть введено большое количество воздуха [10]. Во многих цехах окисления флотоконцентрат измельчают для повышения кинетики выщелачивания. Тепло, выделившееся в процессе окисления, имеет большое значение. Важно, чтобы оно было эффективно рассеяно, так как бактерии перестают успешно функционировать при температурах, выходящих за пределы рабочего диапазона. Аккумуляция тепла происходит с помощью внутренних охлаждающих змеевиков, вставленных в реакторы биоокисления, далее тепло выводится в атмосферу через башенные охладители [10].

Основные факторы, оказывающие наибольшее влияние на капитальные затраты – это производительность по сырью, время выдержки при биоокислении, система подачи воздуха (дутье), смесители для распределения воздуха и поддержания частиц во взвешенном состоянии и конструкция реактора (конструкционные материалы). Продолжительность обработки концентрата в реакторе обычно составляет 4-6 дней.

Сущность автоклавного метода вскрытия упорного золота заключается в окислении золотосодержащих сульфидных концентратов в водной среде под действием кислорода при повышенных температурах. Ассоциированное с сульфидами субмикроскопическое и твердорастворимое золото освобождается и делается доступным выщелачиванию цианистым раствором. Первая промышленная установка РОХ для переработки упорного золотосодержащего сырья была построена на предприятии МакЛафлин Голд Майн (США) в 1986 году [11]. В настоящее время существует восемь производств, перерабатывающих упорные золотосодержащие руды с использованием автоклавного окисления.

Таблица 3

Предприятия, работающие по технологии автоклавного выщелачивания
золотосодержащего сырья

Завод	Компания	Страна	Сырье	Производительность, т/сут	Температура, °С	Год пуска завода

Goldstrike	Barrick	США	руда	15000	225	1990
Campbell	Placer Dome	Канада	концентрат	71	190	1990
Porgera	Barrick	Новая Гвинея	концентрат	1,350	190	1991
Lihir	Newcrest	Новая Гвинея	руда/ концентрат	9000	210	1994
Twin Creeks	Newmont	USA	руда	7260	225	1996
Macraes	OceanaGold	Новая Зеландия	концентрат	20	225	1999
Killita	Agnico-Eagle	Финляндия	концентрат		190	2008
Amursk	Polymel	Россия	концентрат		190	2010

Для автоклавного выщелачивания применяют горизонтальные многокамерные автоклавы, футерованные кислотостойким кирпичом [5]. Процесс ведут при 450-500 К и давлении кислорода 200-700 кПа (общее давление в автоклаве 1800-3200 кПа); эти условия практически исключают образование элементарной серы. Необходимая продолжительность автоклавного выщелачивания обычно не превышает 1-1,5 ч.

По сравнению с обжигом, автоклавный метод вскрытия имеет следующие преимущества: более высокое извлечение золота; отсутствие газовых выбросов соединений мышьяка и серы; вывод мышьяка в виде малотоксичного арсената железа, сброс которого возможен в обычное хвостохранилище; малая чувствительность к присутствию в сырье таких примесей, как сурьма и свинец (снижающих извлечение золота в случае применения обжига); возможность переработки, как флотационных концентратов, так и непосредственно руд.

По сравнению с бактериальным выщелачиванием автоклавное вскрытие обеспечивает, как правило, более полное окисление сульфидов (в т.ч. упорного пирита) и потому более высокое извлечение золота. Автоклавный метод применим как к рудам, так и концентратам. Биовыщелачивание из-за своей низкой интенсивности и больших потребных объемов аппаратуры применимо лишь к концентратам. Во многих случаях это может быть причиной дополнительных потерь золота при обогащении.

Внедрение автоклавного и биологического окисления, а также инновации в обжиге в середине 1980-х гг. коренным образом изменили стратегию переработки упорных золотосодержащих руд. Данные технологии позволили разрабатывать ранее нерентабельные золоторудные месторождения. Как и в случае со всеми новыми технологиями, проведен

огромный объем исследований. Процессы переработки упорного сырья имеют комплексный характер с точки зрения перспектив технологической схемы, так как отличаются множеством взаимодействующих между собой единичных операций и комплексной химией, связанной с высокотемпературными условиями и биологическими системами [1].

Будущие задачи, без сомнения, связаны с решением вопросов экологии и сокращением эксплуатационных и капитальных затрат. Экологический аспект включает в себя решение проблем с такими токсичными элементами как ртуть, селен, теллур, сурьма и мышьяк, выделяющимися в экстремальных рабочих условиях, с которыми сталкиваются при переработке упорных золотосодержащих руд. За последние 2-3 года капитальные и эксплуатационные затраты значительно выросли и превысили цены на золото в процентном отношении. Как их сократить в условиях долгосрочной и критичной нехватки квалифицированной рабочей силы, роста энергозатрат и повышения стоимости расходных материалов - одна из задач в будущем.

В настоящее время четко прослеживается тенденция использования процесса биоокисления на мелких предприятиях, перерабатывающих упорное золотосодержащее сырье, благодаря относительной простоте и более низким капитальным затратам. Обогащение флотацией – важная часть начального этапа биоокисления, но, к сожалению, некоторые руды для нее непригодны.

И наконец, в перспективе – пути дальнейшего совершенствования сегодняшних процессов, некоторые из них уже реализованы (или реализуются).

В отношении наращивания золотодобычи прекрасным ориентиром для России может служить Китай. Здесь также сокращается добыча россыпного золота, но зато идет быстрое освоение нетрадиционных для страны месторождений, прежде всего, черносланцевого и карлинского типов, вовлечение в переработку упорного и техногенного золотоносного сырья. Россия имеет все предпосылки для того, чтобы наряду с Китаем стать лидером мировой золотодобычи.

Список литературы

1. Бодуэн А.Я., Петров Г.В., Фокина С.Б., Иваник С.А. Ресурсная база благородных металлов в отечественных техногенных месторождениях // Цветные металлы 2013, №7, с. 30-34.
2. Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2011 году». Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. 2011.

3. Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд. В 2-х томах. Иркутск: ОАО «Иргиредмет», 1999.
4. Лодейщиков В.В. // Цветная металлургия, 1993, №2, с. 4-9.
5. Меретуков М.А. Металлургия благородных металлов. Зарубежный опыт / М.А. Меретуков, А.М. Орлов // М.: Металлургия, 1991. 416 с.
6. Набойченко С.С., Шнеерсон Я.М. и др. Автоклавная гидрометаллургия цветных металлов. Екатеринбург. ГОУ ВПО УГГУ-УПИ. 2009. т. 2. с. 353.
7. Goode J.R., «Refractory gold ore: causes, processes, testing and plants», in Proceedings Annual SME Conference (Society for Mining, Metallurgy and Exploration: Colorado), 93-82, 121. 1993.
8. Lunt D., and Briggs N. «Refractory gold ores case studies», in *Developments in Mineral Processing* (ed: M D Adams), 920- 936 (Elsevier), 2005.
9. Miller J., Wan R-Y. and Diaz X., «Preg-robbing gold ores», in *Developments in Mineral Processing* (ed: M D Adams), 21- 72 (Elsevier), 937-972, 2005.
10. Miller P. and Brown A., «Bacterial oxidation of refractory concentrates», in *Developments in Mineral Processing* (ed: M D Adams), 403-433 (Elsevier), 37-402, 2005.
11. Thomas K.G., «Pressure oxidation overview», in *Developments in Mineral Processing* (ed: M D Adams), 346-369 (Elsevier), 2005.
12. Van Aswegen P.C., Godfrey M.W., Miller D.M., Haines A.K., «Design and operation of a commercial bacterial oxidation plant at Fairview», Randol Perth International Gold Conference '89, 127-144, 1989.

Рецензенты:

Бричкин В.Н., д.т.н., заведующий кафедрой металлургии, Министерство образования и науки российской федерации, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург;

Бажин В.Ю., д.т.н., декан Химико-Металлургического факультета, Министерство образования и науки российской федерации, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», г. Санкт-Петербург.