УДК 669.213

**Комплексное использование минерального сырья. № 2. 2013.**

*А.С. БОГИНСКАЯ*, Г.В. ПЕТРОВ, А.Я. БОДУЭН, И.И. МАРДАРЬ*

Национальный минерально-сырьевой университет "Горный", г. Санкт-Петербург, Россия
*kina_fora@mail.ru

# СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЕРЕРАБОТКИ УПОРНЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО РАЗВИТИЯ

Рассмотрены современные методы извлечения золота из упорных руд с использованием процессов окислительного обжига, биовыщелачивания и автоклавного окисления и перспективы развития золотодобывающей отрасли. Проанализированы преимущества и недостатки каждого из них, произведено сравнение основных технологий, используемых в настоящее время, для выделения наиболее эффективного и безопасного для окружающей среды метода переработки упорных руд. Приведены сведения и основные показатели предприятий в различных странах, работающих по этим технологиям, а также задачи, которые стоят перед золотодобывающей промышленностью для обеспечения эффективной работы в будущем. На основе изложенных данных выделен метод автоклавного окисления, как наиболее эффективный и перспективный для разработки золоторудных месторождений с точки зрения степени извлечения золота из руд, рентабельности, экологичности производства и требований к предварительной подготовке материала для обработки.

**Ключевые слова**: упорные золотосодержащие руды, автоклавное окисление, биовыщелачивание, окислительный обжиг

**Введение.** В современной золотодобывающей промышленности особое место занимают упорные руды, переработка которых при традиционных условиях цианидного выщелачивания характеризуется недостаточным извлечением золота. Доля руд, содержащих упорное золото, весьма значительна и составляет более 30% от его общих запасов в мире [1]. 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») [2]. Необходимо также отметить, что 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 ценного компонента на стадии цианирования предполагает предварительную обработку [3].

Традиционный метод извлечения золота из упорных руд заключается во флотационном обогащении, обжиге и последующем цианировании огарка [4]. 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 [5]. В меньшем масштабе применяют процессы Albion, Leachox, Nitrox, Arseno и другие. К перспек -

тивным способам переработки упорного золотосодержащего сырья относятся различные виды гидрохлорирования [6].

**Обсуждение методов переработки.** *Обжиг.* Наиболее изученным и широко распространенным в промышленности 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 (таблица 1). 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

Таблица 1 - Заводы по обжигу упорного золотосодержащего сырья в мире

| Компания | Страна | Владелец | Тип печи* | Используемый материал | Общая производительность (т/сут) | Год пуска |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Gidji/W.A. KCGN | Австралия | Barrick/ Newmont | 1хЦКС | Концентрат (Te) | 1,150 | 1987 |
| Kanowna Belle | Австралия | Barrick/ Newmont | 2хЦКС | Концентрат (As) | | 1994 |
| Carlin | США | Newmont | 2хЦКС | Недроблённая руда | 7,680 | 1994 |
| Tongling | Китай | Tongling Nonferrous | ПКС | Концентрат | 150 | 1997 |
| Goldstrike | США | Barrick/ Newmont | 2хЦКС | Недроблённая руда | 11,600 | 2000 |
| Dongfang | Китай | Dongfang smelting | ПКС | Концентрат (As) | 200 | 2004 |
| Syama | Мали | Resolute Gold | 1хЦКС | Концентрат | 590 | 2007 |
| Tanjiansha | Китай | Eldorado Gold | ПКС | Концентрат (As) | | 2008 |
| Tongguan | Китай | Tongguan | ПКС | Концентрат (As) | 200 | 2010 |
| *ПКС – пузырьковый кипящий слой, ЦКС – циркулирующий кипящий слой | | | | | | |

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 $As_2O_3$.

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 золотинах пленок легкоплавких соединений и уносом части золота в мышьяковистые возгоны; неизбежным загрязнением окружающей среды выбросами мышьяка и серы; необходимостью дорогостоящего захоронения высокотоксичного триоксида мышьяка [7].

*Процесс биовыщелачивания*. 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 [8]. Процесс показал высокую надежность, и в настоящее время в мире существует 18 подобных производств (таблица 2). Общая производительность по концентрату 7500 т/день.

В процессе используется смесь разных групп бактерий для окисления сульфидной минеральной матрицы при температурах около 40-50ºС. 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 [9].

Базовая химия процесса биоокисления в целом сходна с автоклавным окислением, но есть ряд важных отличий[5].

Таблица 2 - Предприятия, работающие по технологии биоокисления золотосодержащего сырья

| Рудник | Владелец | Технология | Расположение | Производительность (т/д) | Год пуска |
|---|---|---|---|---|---|
| Fairview | Pan African Resource | BIOX | Южная Африка | 55 | 1986 |
| Wiluna | Apex Minerals | BIOX | Австралия | 158 | 1993 |
| Ashanti | AngloAshanti | BIOX | Гана | 960 | 1994 |
| Yantai Gold | | CCGRI | Янтай, Шандонг | 50+80 | 2000 |
| Beacons-field | BCD Resource | BACOX | Австралия | 70 | 2000 |
| Laizhou | Eldorado Gold | BACOX | Китай | 200 | 2001 |
| Олимпиада | Полюс | BIO-NORD | Россия | 1000 | 2001 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Tianli | | CCGRI | Фенченг, Ляонин | 100 | 2003 |
| Axi | | JLMRI | Яининг, Хинджанг | 50+80 | 2004 |
| Fosterville | Crocodile Gold | BIOX | Австралия | 211 | 2005 |
| Суздаль | Южно-Верхоянская Горнодобывающая Компания | BIOX | Казахстан | 520 | 2005 |
| Sanhe | | CCGRI | Дексинг, Джиан-гкси | 70 | 2006 |
| Bogoso | Star Resource | BIOX | Гана | 820 | 2007 |
| Jinfeng | Eldorado Gold | BIOX | Китай | 790 | 2007 |
| Innovation | | CCGRI | Китай | 150 | 2007 |
| Jinchiling | | CCGRI | Жауян, Шандонг | 100 | 2007 |
| Кокпатас | Навоийский горно-металлургический комбинат | BIOX | Узбекистан | 1069+1069 | 2009 |
| Agnes | Galaxy Gold | BIOX | Южная Африка | 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 фосфор, 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 [9]. 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[9].

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.

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 сожа -

лению, некоторые руды для нее непригодны.

*Процесс автоклавного окисления*. 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 POX для переработки упорного золотосодержащего сырья была построена на предприятии МакЛафлин Голд Майн (США) в 1986 году [10]. В настоящее время существует восемь производств, перерабатывающих упорные золотосодержащие руды с использованием автоклавного окисления (Таблица 3).

Таблица 3 - Предприятия, работающие по технологии автоклавного выщелачивания золотосодержащего сырья

| Завод | Компания | Расположение | Сырьё | Производительность (т/д) | Рабочая температура, С° | Год пуска |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Goldstrike | Barrick | США | Руда | 15,000 | 225 | 1990 |
| Campbell | Placer Dome | Канада | Концентрат | 71 | 190 | 1990 |
| Porgera | Barrick | Папуа Новая Гвинея | Концентрат | 1,350 | 190 | 1991 |
| Lihir | Newcrest | Папуа Новая Гвинея | Руда/ Концентрат | 9,000 | 210 | 1994 |
| Twin Creeks | Newmont | США | Руда | 7,260 | 225 | 1996 |
| Macraes | OceanaGold | Новая Зеландия | Концентрат | 20 | 225 | 1999 |
| Killita | Agnico-Eagle | Финляндия | Концентрат | | 190 | 2008 |
| Амурск | Полиметалл | Россия | Концентрат | | 190 | 2012 |

Для автоклавного выщелачивания применяют горизонтальные многокамерные автоклавы, футерованные кислотостойким кирпичом [6]. Процесс ведут при 450-500К 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 (до 98 % по сравнению с 90%, получаемом при биоокислении); 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, при котором сульфиды недоокисляются на 20 %, в основном, за счет пирита, автоклавное вскрытие обеспечивает, как правило, более полное окисление сульфидов (в т.ч. упорного пирита) на уровне 99% и потому более высокое извлечение золота. Автоклавный метод применим как к рудам, так и к 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.

**Выводы.** 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.

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.

И, наконец, в перспективе – пути дальнейшего совершенствования сегодняшних процессов, некоторые из них уже реализованы (или реализуются). В 2012 году компания ОАО “Полиметалл” запустила гидрометаллургический завод в Амурске. ГК “Петропавловск” в 2014 году планирует запуск автоклавно-гидрометаллургического комплекса “Покровский рудник”.

ЛИТЕРАТУРА

1 Metal Bulletin Monthly, 1995, Apr., suppl – p. 26-31

2 Miller, J., Wan, R-Y. and Diaz, X., “Preg-robbing gold ores”,*in Developments in Mineral Processing (ed: M D Adams)*, 2005. – С. 21- 72 , 937-972.

3 Lunt, D, and Briggs, N, “Refractory gold ores case studies”, *in Developments in Mineral Processing (ed: M D Adams),* 2005. - С. 920- 936 ,

4 Лодейщиков В.В. Технология извлечения золота и серебра из упорных руд. В 2-х томах. – Иркутск:ОАО «Иргиредмет», 1999

5 Goode, J. R.. Refractory gold ore: causes, processes, testing and plants //in Proceedings Annual SME Conference (Society for Mining, Metallurgy and Exploration: Colorado), 1993. – С. 82-93, 121.

6 Меретуков М.А., Орлов А.М. Металлургия благородных металлов. Зарубежный опыт. - М.: Металлургия, 1991. – 416 с.

7 Набойченко С.С., Шнеерсон Я.М., Калашникова М.И., Чугаев Л.В. Автоклавная гидрометаллургия цветных металлов - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2008. – С. 353.

8 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, 1989. - C.127-144,

9 Miller, P. and Brown, A. Bacterial oxidation of refractory concentrates, in Developments in Mineral Processing (ed: M D Adams), 2005. - C.403-433 , 37-402,

10 Thomas K. G. Pressure oxidation overview, in Developments in Mineral Processing (ed: M D Adams), 2005. – C. 346-369

REFERENCES

1 *Metal Bulletin Monthly*, **1995**, **Apr**., 26-31.

2 Miller, J., Wan, R-Y. and Diaz, X., “Preg-robbing gold ores”,*in Developments in Mineral Processing (ed: M D Adams)*, **2005***,* 21- 72 , 937-972.

3 Lunt, D, and Briggs, N, *“Refractory gold ores case studies”, in Developments in Mineral Processing (ed: M D Adams)*, **2005***,* 920- 936 .

4 Lodeishchikov V.V., *Tekhnologiia izvlecheniia zolota i serebra iz upornykh rud. V 2-kh tomakh. Irkutsk: Irgiredmet,* **1999,** (in Russ.).

5 Goode, J. R., *“Refractory gold ore: causes, processes, testing and plants”, in Proceedings Annual SME Conference (Society for Mining, Metallurgy and Exploration: Colorado)*, **1993**, 82-93, 121.

6 Meretukov M.A., Orlov A.M., *Metallurgiia blagorodnykh metallov. Zarubezhnyi opyt. M.:Metallurgija,* **1991**, 416 p. (in Russ.).

7 Naboichenko S.S., Shneerson Ia.M., Kalashnikova M.I., Chugaev L.V., *Avtoklavnaia gidrometallurgiia tsvetnykh metallov. Ekaterinbur:UPI,* **2008**, 353 p. (in Russ.).

8 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*, **1989**, 127-144.

9 Miller, P. and Brown, A.,*” Bacterial oxidation of refractory concentrates”, in Developments in Mineral Processing (ed: M D Adams),* **2005**, 403-433, 37-402.

10 Thomas, K. G., *“Pressure oxidation overview”, in Developments in Mineral Processing (ed: M D Adams)*, **2005**, 346-369.

**Түйіндеме**

Қиын өңделетін кендерден тотықтырып күйдіру, биоерітінділеу және автоклавты тотықтыру үрдістерін пайдаланып алтынды алудың қазіргі заманғы әдістері және алтын өндіру саласын дамытудың келешегі қарастырылды. Үрдістердің артықшылықтары мен кемшіліктері талданды, қиын өңделетін кендерді өңдеудің ең тиімді және қоршаған ортаға зиян келтірмейтін әдісін таңдау үшін қазіргі кезде қолданып жатқан негізгі технологияларға салыстыру жүргізілді. Осы технологиялармен жұмыс істейтін әр алуан елдердің алтын өндіруші кәсіпорындарының мәліметтері мен көрсеткіштері келтірілді, сонымен қатар болашақта тиімді жұмыс істеу үшін алтын өндіру өнеркәсібінің алдында тұрған міндеттер қарастырылды. Келтірілген деректердің негізінде кендерден алтынды бөліп алу дәрежесі, рентабельділік, өндірістің экологиясы және материалды өңдеуге қажетті алдын ала жүргізілетін дайындық жұмыстарына қойылатын талаптар тұрғысынан алтынкенді

кенорындарын өңдеу үшін ең тиімді және болашағы бар әдіс ретінде автоклавты тотықтыру әдісі таңдалды.

**Түйін сөздер**: қиын өңделетін алтынқұрамды кендер, автоклавты тотықтыру, биоерітінділеу, тотықтырып күйдіру.

**Summary**

Contemporary methods of gold extraction from refractory ores including roasting process, bacterial oxidation and autoclave oxidation were considered. Prospects of development of gold industry are formulated. Advantages and disadvantages each of methods were analyzed. For choosing the most effective and ecological friendly method of refining of refractory ores main technologies were compaired. The main parameters of plants that realize these technologies are shown. Tasks for future effective work of gold industry are stated. As a result the method of autoclave oxidative leaching was presented as the most effective and perspective method of refining of gold ores. It is breakeven, ecological and characterized by high level of gold recovery from ores and less requirements for pretreatment.

**Key words:** refractory gold ores, autoclave oxidation, bioleaching, oxidative roasting

*Поступила 08. 05. 2013.*

УДК 622.594

**Комплексное использование минерального сырья. № 2. 2013.**

**А.Е. ВОРОБЬЕВ*[1], А.А. З*УБКОВ*[1], *Г.Ж. МОЛДАБАЕВА*[2]

[1]Российский университет дружбы народов, г. Москва, Россия
*fogel_al@mail.ru
[2]Институт горного дела им. Д. Кунаева, г. Алматы

# ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТРУДНООБОГАТИМОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ И РАСТВОРОВ

Накопленные отходы при хранении под воздействием климатических условий и атмосферных осадков превращаются в мощный очаг загрязнения окружающей среды, одновременно являясь потенциальным источником металлов, запасы которых сопоставимы с крупными природными месторождениями. Для решения этих задач был разработан новый концептуальный подход и принципиально новые технологические приемы, во многом решающие имеющиеся экологические и сырьевые проблемы. Предлагается объединить обжиг и автоклавное выщелачивание техногенного и труднообогатимого природного минерального сырья (окисленного и бедного сульфидного) в единый, последовательный и непрерывный процесс по схеме «все в раствор – по одному из раствора». Исходное сырье в большинстве случаев экономически целесообразно перерабатывать в георeакторе (реакторе нового поколения) без предварительной подготовки, а в некоторых случаях использовать бедные коллективные концентраты. Лабораторные и полупромышленные испытания, проведенные на Хайдарканском ртутном металлургическом заводе, показали высокую эффективность флотационного метода извлечения ртути из сточных вод меркаптотиозолом (каптаксом) и перспективность его использования.

**Ключевые слова**: минеральное сырьё, металлургия, переработка, экология, раствор