



ПЛАКСИНСКИЕ
ЧТЕНИЯ

2015

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ
КОМПЛЕКСНОЙ И ГЛУБОКОЙ
ПЕРЕРАБОТКИ
ТРУДНООБОГАТИМОГО
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

**МЕЖДУНАРОДНОЕ
СОВЕЩАНИЕ
ПОСВЯЩАЕТСЯ ПАМЯТИ
ЛЕОНОВА
СЕРГЕЯ БОРИСОВИЧА**

**Иркутск
2015**

- Григорьев К.А., Каплан С.Ф., Ковалев В.Н.* Определение кинетической области реакции автоклавного окисления пирита. 326
- Зелотарев Ф.Д., Александрова Т.Н., Каплан С.Ф.* Влияние добавки Cl⁻ и CN⁻ ионов в процесс автоклавного окисления на извлечение золота из упорного сырья. 329
- Зыряев А.В., Баликов С.В., Гудков С.С., Емельянов Ю.Е., Богородский А.В.* Автоклавно-сорбционное извлечение золота из упорных сульфидных концентратов. 330
- Иванченко А.Е., Аксенов А.В., Васильев А.А., Серёдкин Ю.Г.* Глубокое атмосферное окисление сульфидных золотосодержащих концентратов по технологии «Альбион». 331
- Долотов А.С.* Применение обратного осмоса в замкнутом водообороте при автоклавной технологии вскрытия упорных сульфидных Au-флотоконцентратов. 335
- Дзгоев Ч.Т., Батушескии И.И., Штойк С.Г., Епифоров А.В., Гудков С.С., Емельянов Ю.Е., Баликов С.В.* Автоклавно-пирометаллургическая технология переработки сульфидных золотосодержащих и свинцово-цинковых флотоконцентратов. 338
- Мастюгин С.А., Ласточкина М.А., Каралев А.А., Лобанов В.Г., Волков Р.С.* Гидрометаллургическая схема переработки анодных медных шламов. 341
- Волков Р.С., Мастюгин С.А., Каралев А.А., Лобанов В.Г., Топоркова Ю.И.* К проблеме переработки хвостов флотационного обогащения медьэлектролитных шламов. 343
- Мальчишин А.С., Елиши В.В., Богородский А.В.* Кинетические закономерности высокотемпературного окисления золото-медных сульфидных минералов. 345
- Сазунов А.Л., Томская Е.С.* Исследование текстурно-структурных свойств поверхности и элементного состава золотосодержащих сульфидов при взаимодействии с модифицированными хлорсодержащими растворами. 346
- Мухомов В.М., Кирилл В., Хмельницкая О.Д., Лодейщиков В.М., Быкальцев А.В., Ефимов А.В., Петров С.В.* Разработка технологии извлечения золота из пирит-пирротинсодержащих руд. 349
- Магомедов Д.Р., Койжанова А.К., Каматов Э.М., Ерденова М.Б., Абулхалиев А.Т.* Биохимическое выщелачивание золота из упорной руды месторождения Бестюбе. 350
- Фалчишко Н.В., Мурашев М.И., Кондратьева Т.Ф.* Комплексная переработка некондиционных сульфидных концентратов с применением двухстадийного биовыщелачивания. 353
- Булаев А.Г.1, Канаев А.Т.2, Канаева Э.К.3, Кондратьева Т.Ф.* Биоокисление упорных сульфидных золотых руд. 357
- Щёкин А.А., Чекулина Т.В., Воробьев А.Е., Афанасьев Г.М., Шошбаев А.Т., Досаев В.М.* Некоторые аспекты тиосульфатного выщелачивания золота. 360
- Миронов А.П., Елиши В.В., Овсянов А.Е.* Математическое моделирование динамики высокотемпературной десорбции золота из активных углей на основе физико-химических представлений о процессе. 364
- Антропова И.Г., Дамбаева А.Ю., Данжеева Т.Ж.* Технологические особенности переработки окисленных свинцово-цинковых руд месторождения Озерное. 366
- Набиуллин Р.Н., Дзгоев Ч.Т., Епифоров А.В., Емельянов Ю.Е.* Сопоставление способов окислительного выщелачивания свинцово-цинкового флотоконцентрата. 368
- Епифоров А.В., Дзгоев Ч.Т.* Химизм высоко-температурного автоклавного окисления свинцово-цинковых флотоконцентратов. 370
- Рогожников Д.А., Мамиченков С.В., Атсымова О.С., Дизер О.А., Берстенов Н.В.*

комплекс может привести к модернизации существующих технологий производства цветных металлов и к повышению их извлечения из перерабатываемого сырья. При этом возможно также значительное снижение затрат на процессы обогащения сульфидных руд, т.к. выщелачивание можно проводить на некондиционном сульфидном сырье, таком, как низкосортные коллективные сульфидные концентраты. На пирометаллургическую переработку при этом направлять преимущественно богатые по содержанию цветных металлов концентраты с относительно небольшим выходом. Снижение нагрузки на пирометаллургию позволит снизить экологическую опасность металлургических предприятий вследствие уменьшения выбросов диоксида серы, а также полной утилизации сернистого газа в виде кислоты в двухстадийном процессе биовыщелачивания сульфидного сырья.

БИООКСИЛЕНИЕ УПОРНЫХ СУЛЬФИДНЫХ ЗОЛОТЫХ РУД

Булаев А.Г.¹, Канаев А.Т.², Канаева Э.К.³, Кондратьева Т.Ф.¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН, г. Москва, Россия;

² Казахский национальный университет имени аль-Фараби,
г. Алматы, Республика Казахстан;

³ Казахский национальный технический университет имени К. И. Сатпаева, г. Алматы,
Республика Казахстан.

bulaev.inmi@yandex.ru, ashim1959@mail.ru, kanaeva1992@mail.ru, kondr@inmi.ru

The effectiveness of column biooxidation of off-balance gold ores from Bakyrchik and Bolshevik deposits containing pyrite and arsenopyrite was examined. The gold recoveries from the unoxidized Bakyrchik ore and bioleach solid residue were 4.5% and 21.0%, whereas recoveries from the unoxidized Bolshevik ore and bioleach residue were 8.2% and 48.5%.

Биогидрометаллургия использует три метода биоокисления сульфидных руд или концентратов: отвальное, кучное и чановое. В настоящее время с помощью биогидрометаллургии получают в промышленном масштабе такие металлы как медь, уран и золото, есть сведения о проведении испытаний по выщелачиванию никеля, промышленном получении кобальта, биоокисления руд для извлечения металлов платиновой группы. Кучное и отвальное биовыщелачивание обычно используется для получения цветных металлов, прежде всего меди. Благодаря низким капитальным и эксплуатационным затратам кучное биовыщелачивание применяется для переработки бедных руд цветных металлов. Чановое биоокисление обычно применяется для переработки сульфидных концентратов золотосодержащих руд – из-за относительно высоких затрат данная технология не может быть применена для переработки бедных руд цветных металлов. В настоящее время в мире насчитывается около 15 предприятий, использующих чановое биоокисление для получения золота. Все они перерабатывают концентраты золотосодержащих руд. При этом известно, что из сульфидных руд многих месторождений из-за особенностей минерального состава

невозможно получить кондиционные концентраты, пригодные для биоокисления. Одним из возможных решений, позволяющих вовлечь такие руды в хозяйственный оборот, могло бы быть применение кучного биоокисления для вскрытия золота в таких рудах. Известен пример применения кучного биоокисления для вскрытия золота в бедной пирит-арсенопиритной руде (технология BIOPRO™). Кучное биоокисление руды продолжительностью примерно 150 дней позволило увеличить извлечение золота цианированием с 30 до 55%.

Всего с помощью данной технологии компания Newmont Mining Corporation (США) переработала около 8 млн. т золотой руды и получила 12 т золота. Таким образом, было показано, что технология кучного биоокисления золотых руд может быть применена на практике для переработки труднообогатимых сульфидных руд.

Целью данной работы была оценка потенциальной эффективности технологии кучного биоокисления для переработки забалансовых сульфидных руд месторождений Бакырчикского золоторудного района: Бакырчик и Большевик. Минеральный и химический состав руд представлен в таблицах 1 и 2. Частицы класса крупности -74 мкм составляли 95% ($P_{95} = 74$ мкм).

Биоокисление руд проводили в лабораторных перколяторах, которые вмещали в себя по 200 г руды и 200 мл жидкой питательной среды для микроорганизмов (состав среды (г/л): 1.0 $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 0.75 $(NH_4)_2SO_4$, 0.08 KCl, 0.15 NaCl, 0.1 $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$, 1.0 Fe^{3+} pH=1.5). Эксперименты проводили в двух повторностях (по два перколятора для каждой руды). Накопительная культура ацидофильных микроорганизмов (включающая штаммы *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A. caldus*, *Leptospirillum ferriphilum*, *Ferroplasma acidiphilum*, *Acidiplasma* spp.), полученная ранее из пиритных хвостов флотации полиметаллических руд, была использована в качестве инокулята. Продолжительность биоокисления составила 60 сут, процесс проводил при комнатной температуре (20-25°C). В процессе биовыщелачивания проводили измерения pH, Eh среды, концентраций железа и мышьяка. pH поддерживали в пределах 1.4-1.6 путем добавления серной кислоты. После завершения процесса биоокисления был определен состав кеков биоокисления и проведено извлечение золота цианированием.

Таблица 1 – Минеральный состав руд.

| Руда | Содержание, % | | | | | |
|-----------|---------------------------|---------------------|----------|-----------|---|----------------------------|
| | Пирит (FeS ₂) | Арсенопирит (FeAsS) | Силикаты | Карбонаты | Гипс (CaSO ₄ ·2H ₂ O) | Рутиль (TiO ₂) |
| Бакырчик | 1,5 | 3 | 84,5 | 4 | 1 | 1 |
| Большевик | 1 | 1 | 87 | 4 | Не обнаружен | 1 |

Таблица 2 – Химический состав руд.

| Руда | Содержание, % | | | | | Содержание, г/т |
|-----------|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| | Fe _{общ} | Fe _s | As _{общ} | As _s | S _s | Au |
| Бакырчик | 3.14 | 1.58 | 0.63 | 0.585 | 1.45 | 4.5 |
| Большевик | 3.81 | 2.00 | 0.84 | 0.812 | 1.80 | 10.7 |

Добавление серной кислоты для поддержания pH в необходимых пределах требовалось на протяжении всего времени эксперимента. В конце экспериментов был

рассчитано потребление серной кислоты для каждой из руд. Для руды месторождения Бакырчик оно составило 11 кг/т, для руды месторождения Большевик – 8 кг/т. Концентрация трехвалентного железа росла на протяжении эксперимента и к концу процесса составляла примерно 2 г/л и 4 г/л в растворах биоокисления руд месторождений Бакырчик и Большевик, соответственно. Двухвалентное железо отсутствовало в обоих растворах после 30 сут биоокисления, что свидетельствовало об интенсивном окислении железа микроорганизмами. Eh растворов повышался в соответствии с повышением концентрации трехвалентного железа и снижением концентрации двухвалентного. К концу экспериментов Eh достигал примерно 760 мВ в обоих растворах. Концентрации мышьяка в растворах тоже постепенно возрастали и на 60 сут проведения эксперимента составили примерно 0.8 г/л в обоих растворах.

После проведения биоокисления был проведен анализ состава кеков биоокисления и рассчитаны степени окисления сульфидных минералов. Выход твердой фазы после биоокисления обеих руд составил 95%. Степени окисления пирита и арсенопирита представлены в таблицу 3.

Степень извлечения золота цианированием является наиболее важным критерием для оценки эффективности вскрытия золота в процессе биоокисления. Данные по извлечению золота цианированием представлены в таблице 4. Из представленных данных следует, что в обоих случаях извлечение золота из кеков биоокисления было примерно в 5 раз выше, чем из неокисленных руд. При этом извлечение золота из руды и кека биоокисления руды месторождения Бакырчик было низким (4.5% и 21.0%), тогда как извлечение золота из руды и кека биоокисления руды месторождения Большевик было намного выше (8.2% и 48.5%).

В результате проведенной работы показано, что в результате биоокисления за относительно короткий срок может быть значительно повышена степень извлечения золота из забалансовых сульфидных руд. При этом эффективность применения биоокисления зависит от особенностей конкурентной руды.

Таблица 3 – Степень окисления сульфидных минералов после биоокисления руд в течении 60 сут.

| Руда | Степень окисления, % | |
|-----------|----------------------|-------------|
| | Пирит | Арсенопирит |
| Бакырчик | 37 | 35 |
| Большевик | 17 | 51 |

Таблица 4 – Извлечение сорбционным цианированием золота из руд и кеков биоокисления.

| Руда | Извлечение, % | |
|-----------|---------------|------|
| | Руда | Кек |
| Бакырчик | 4.5 | 21.0 |
| Большевик | 8.2 | 48.5 |

Степень извлечения золота как из неокисленной руды, так и из кека окисления месторождения Бакырчик были относительно низкими по сравнению с извлечением из руды и кека биоокисления руды месторождения Большевик.