

менения РЗМ-2015: Сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. — М., 2015. — С. 73–75.

4. Пермякова, Н.А. Технологическая оценка пирохлор-монацит-гётитовых руд Чукотского рудного поля в рамках геолого-технологического картирования / Н.А. Пермякова, Е.Г. Лихникевич, Н.А. Сычева, Ф.И. Отрубяников / Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плакские чтения-2017): Матер. Междунар. научной конф. — Красноярск, 2017. — С. 66–68.

5. Сидоренко, Г.А. Технологическая минералогия редкометалльных руд / Г.А. Сидоренко, И.Т. Александрова, Н.В. Петрова. — СПб.: Наука, 1992. — 236 с.

© Лихникевич Е.Г., 2018

Лихникевич Елена Германовна // Likhnikievich@mail.ru

УДК 579.852.083.18

Седелникова Г.В., Ким Д.Х., Ибрагимова Н.В. (ФГБУ «ЦНИГРИ»)

ОСОБЕННОСТИ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ БИОГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ УПОРНЫХ КОМПЛЕКСНЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД

*В статье приведены результаты исследований вещественного состава упорных комплексных золотосодержащих руд и показаны преимущества применения биогидрометаллургической технологии их переработки по сравнению с традиционными методами извлечения благородных и цветных металлов. **Ключевые слова:** упорная руда, концентрат, золото, серебро, медь, цинк, биоокисление, цианирование.*

Sedelnikova G.V., Kim D.H., Ibragimova N.V. (TSNIGRI)

FEATURES OF SUBSTANCE COMPOSITION AND BIOHYDROMETALLURGICAL PROCESSING TECHNOLOGICAL SCHEME OF REFRACTORY COMPLEX GOLD ORES

*The article presents the results of studies of the material composition of resistant complex gold ores and shows the advantages of using biohydrometallurgical technology of their processing compared to traditional methods of extraction of precious and non-ferrous metals. **Keywords:** refractory ore, concentrate, gold, silver, copper, zinc, biooxidation, cyanidation.*

Упорные руды занимают значительную долю в запасах коренного золота (более 40 %). Тонкая вкрапленность золота в сульфидные минералы (в основном пирит, арсенопирит, пирротин, халькопирит и др.), а также наличие природного органического углерода, способного сорбировать растворенный цианидный комплекс золота (так называемое явление «preg-robbing») и вызывать потери его с хвостами, обуславливают низкую эффективность традиционной технологии цианирования и требуют применения предварительных методов окисления сульфидов и вскрытия золота.

В настоящее время наиболее распространенными методами переработки сульфидного сырья благород-

ных и цветных металлов являются бактериальное и автоклавное выщелачивание с последующим извлечением благородных металлов методом цианирования из остатков выщелачивания. Наиболее простым, относительно дешевым и экологически безопасным методом является бактериальное выщелачивание (биоокисление применительно к золотосодержащим сульфидам).

Биоокисление упорных золотосодержащих сульфидных концентратов (в чановом варианте на заводских установках) с использованием микроорганизмов успешно применяется в мировой практике золотодобычи [2, 4, 7, 8]. Известно о работе более 15 предприятий по переработке концентратов и планируется ввод новых заводов в эксплуатацию [2].

В России группа компаний «Полюс» успешно использует с 2001 г. технологию чанового биоокисления для извлечения золота из упорных золото-пирротин-арсенопирит-пиритовых концентратов Олимпиадинского месторождения (Красноярский край). Биоокисление проводится в суровых северных условиях на трех биоустановках (БИО-1, БИО-2 и БИО-3) общей производительностью 1350 т/сут концентрата. Ведется строительство четвертой очереди — БИО-4, особенностью которой будет открытое размещение [6].

Наряду с промышленным освоением биотехнологии во всем мире проводятся исследования новых объектов упорных золотосодержащих руд и концентратов [3, 7, 9–12]. Изучаются особенности вещественного состава минерального сырья (содержание сульфидов, карбонатов, сорбционная активность органического углерода — «preg-robbing» и др.), оптимальные условия процесса биоокисления сульфидов и последующей гидрометаллургической переработки остатков биоокисления.

Как правило, основным ценным компонентом упорных золотосодержащих руд является золото, попутным — серебро. В комплексных рудах помимо золота и серебра присутствуют также другие ценные компоненты — медь, цинк, свинец, никель, кобальт, сурьма и пр.), комплексное извлечение которых повышает технико-экономические показатели переработки руды. Упорные руды характеризуются также наличием вредных компонентов (мышьяк, сурьма, ртуть), осложняющих технологию переработки.

В зависимости от состава выщелачиваемого сырья и устойчивости микроорганизмов к токсичным ионам тяжелых металлов, которые переходят в жидкую фазу при окислении сульфидов, используют различные микроорганизмы: мезофильные, умеренно термофильные и термофильные [1]. Перспективными для окисления серы являются термофильные археи [10]. Для биоокисления арсенопиритсодержащих руд и концентратов рекомендуется применение мезофильных и умеренно термофильных бактерий, которые более устойчивы к мышьяку по сравнению с термофильными. Поэтому выбор сообщества микроорганизмов для биоокисления минерального субстрата играет большую роль.

В количественном отношении чаще пирит преобладает над арсенопиритом и имеет более низкую ско-

Таблица 1
Содержание основных компонентов химического состава

Объект исследования	Содержание, г/т, %								
	Au	Ag	Fe	S _s	Sb	As	Cu	Zn	C орг.
Концентрат	7,0	219	35,2	32,0	<0,01	5,5	0,05	1,0	0,12
Руда	2,6	40,7	3,5	4,2	0,02	<0,01	0,6	1,1	0,05

Таблица 2
Содержание основных сульфидных минералов

Объект	Содержание сульфидов, %					
	Пирит	Арсенопирит	Антимонит	Халькопирит	Сфалерит	Общее
Концентрат	58,7	11,3	отс.	0,1	2,2	72,3
Руда	5,8	следы	следы	1,2	1,5	8,5

рость окисления. В результате биоокисления пиритсодержащих руд и концентратов часть пирита остается не окисленным, что отрицательно влияет на последующий процесс извлечения благородных металлов из твердых остатков биоокисления цианированием. В щелочной цианидной среде пирит интенсивно окисляется и образует соединения железа с цианидом, вызывая повышенный расход кислорода и цианида и снижая извлечения благородных металлов. Для доокисления пирита перед цианированием рекомендуется предварительная аэрация в щелочной среде и добавки растворимых солей свинца (II) или глета.

В работе [5] отмечается, что свинец (II) используют для повышения скорости растворения золота не только на стадии цианирования, но и в операции предварительного окисления. В этом случае образуются нерастворимые пленки на поверхности пирита и пассивируют его. Приведены примеры применения добавки свинца в практике цианирования сульфидных руд золота. При цианировании арсенопирит-пирит-пирротинового концентрата с добавкой нитрата свинца в количестве 100–200 г/т достигается снижение расхода цианида на 32 %. Отмечается повышение извлечения золота с 94,7 до 100 % и серебра с 45 до 48,9 % при добавлении нитрата свинца в количестве 300 г/т при цианировании руды, содержащей 4,6 г/т Au, 256 г/т Ag, 18,5 % S.

В настоящей работе приведены результаты исследований вещественного состава и биогидрометаллургической переработки двух разновидностей упорного золотосодержащего сырья комплексного состава: 1 — золото-серебросодержащего пирит-арсенопиритового концентрата, полученного от обогащения золотосодержащей руды и 2 — золото-серебро-медно-цинковой пиритсодержащей (полиметаллической) руды. Показаны особенности переработ-

ки сырья, содержащего наряду с благородными также и цветные металлы, которые попутно извлекаются в дополнительную товарную продукцию. Приведены принципиальные схемы извлечения полезных и попутных компонентов.

Содержание основных компонентов химического состава исследуемых объектов приведено в табл. 1, основных сульфидных минералов — в табл. 2.

Главным ценным компонентом в концентрате и руде является золото с содержанием 7,0 и 2,6 г/т, попутными — серебро, соответственно 219 и 40,7 г/т. В руде попутными компонентами кроме серебра являются медь и цинк с содержанием 0,6 и 1,1 % соответственно.

Из вредных компонентов присутствует органический углерод — 0,12 и 0,05 % соответственно в концентрате и руде, в концентрате дополнительно содержится 5,5 % мышьяка. Концентрат характеризуется высоким содержанием сульфидной серы 32,0 и железа 35,2 %. Известно, что высокое содержание серы и наличие мышьяка осложняет биогидрометаллургическую переработку. Высокое содержание сульфидной серы приводит к увеличению продолжительности бактериального выщелачивания и повышению содержания элементной серы, вызывающей повышенный расход цианида при последующем цианировании остатка биоокисления. Наличие токсичного мышьяка в растворах бактериального выщелачивания требует обезвреживания его путем осаждения с переводом в трудно-растворимое соединение — арсенат железа.

Из табл. 2 видно, что концентрат характеризуется высоким содержанием сульфидов 72,3, в т.ч. 58,7 % пирита. Вторым по значимости является арсенопирит

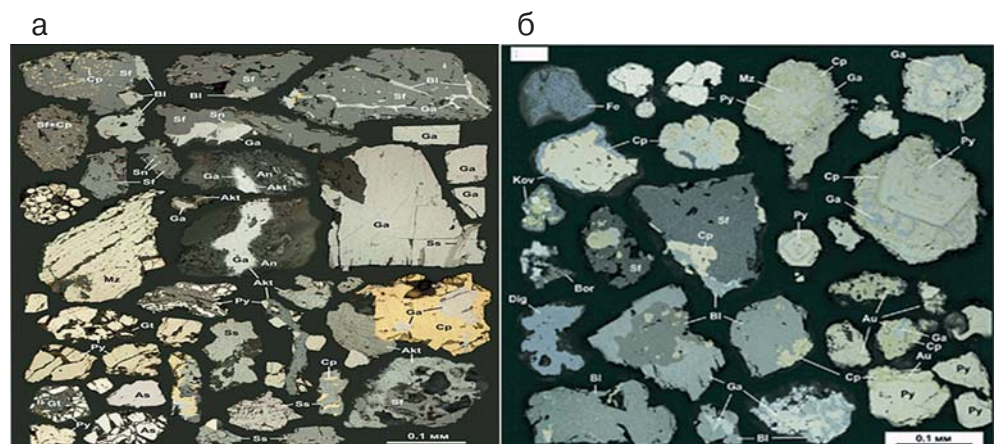


Рис. 1. Рудные минералы: а — концентрат, б — руда (фото монтированных аншлифов): Py — пирит, Mz — марказит, As — арсенопирит, Cp — халькопирит, Sf — сфалерит, Ga — галенит, Po — пирротин, Mt — магнетит, Gt — гидроксиды Fe (гетит), Bi — минералы висмута., Bl — блеклая руда, Au — самородное золото, Dig — дигенит, Bor — борнит, Kov — ковеллин

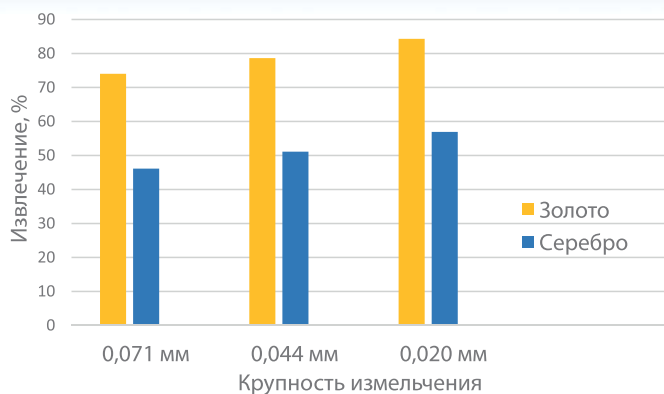


Рис. 2. Извлечение золота и серебра из концентрата в зависимости от крупности измельчения

с содержанием 11,3 %. В руде содержится 8,5 %, в т.ч. значительную долю также занимает пирит — 5,8 %. Сульфиды цветных металлов присутствуют в подчиненном количестве: в концентрате — 0,1 % халькопирита, 2,2 % сфалерита; в руде — 1,2 и 1,5 % соответственно (рис. 1).

Среди породообразующих минералов в руде отмечается повышенное содержание (31 %) карбонатов, которые, как известно, осложняют процесс биовыщелачивания, вызывая повышенный расход серной кислоты.

Исследуемые объекты характеризуются тонкой вкрапленностью благородных металлов в сульфидные минералы. В концентрате с повышенным содержанием серебра (219 г/т) видимое самородное золото (более 1 мкм) в аншлифах не установлено. Определены различные минеральные формы серебра: тонкодисперсный гипергенный акантит (Ag_2S) в гидроксидах железа и ярозите, блеклая руда — серебросодержащий тетраэдрит, который находится в сростках со сфалеритом, матильдит (AgBiS_2), сульфосоли серебра из группы пирсеит-полибазит (рис.1 а).

В руде выявлены ультратонкие (1–2 мкм) выделения самородного золота (10 золотинок, в т.ч. в сростках с галенитом, халькопиритом, баритом, доломитом и другими минералами, а также полностью закрытое (тонковкрапленное) золото (5 золотинок) в халькопирите, кварце, барите и доломите (рис.1 б).

Фазовым анализом золота установлено, что значительная часть его находится в упорной форме в основном в тонко вкрапленном состоянии с сульфидами. Традиционным методом сорбционного цианирования при крупности 95 % –0,74 мм не удается получить приемлемых показателей извлечения благородных металлов из исследуемых объектов. Извлечение золота из концентрата и руды составляет соответственно 80,1 и 28,8 %, серебра соответственно 46,6 и 23,4 %. Попутные цветные металлы при этом не извлекаются.

Применение сверхтонкого измельчения концентрата до –0,02 мм незначительно увеличивает извлечение золота и серебра соответственно с 80,1 до 84,3 % и с 46,6 до 56,9 % (рис. 2).

С целью повышения извлечения благородных металлов и комплексности использования минерального сырья исследовали предварительную обработку методом бактериального окисления. На основании ранее выполненных работ по биоокислению золото-сульфидных руд и концентратов в ФГУП «ЦНИГРИ» было установлено, что окисление арсенопирита эффективно протекает при температуре 36–38 °С с использованием мезофильных автотрофных бактерий *A.ferrooxidans*. Пирит, как менее электроотрицательный минерал по сравнению с арсенопиритом окисляется значительно медленнее, и образовавшаяся при окислении сульфидов элементарная сера также медленно окисляется до сульфатной. Поэтому для повышения скорости биоокисления пирита и доокисления серы применяются умеренно термофильные или термофильные микроорганизмы. При окислении пирит-арсенопиритовых концентратов отечественных месторождений упорных руд в ФГУП «ЦНИГРИ» хорошо зарекомендовала себя ассоциация мезофильных и умеренно термофильных бактерий, включающая *A.ferrooxidans*, *A.thiooxidans*, *Leptospirillum* (*L.ferrooxidans*), *Sulfobacillus*, *Ferroplasma*, иногда *A. Calvus* [3].

Учитывая особенности вещественного состава исследуемых объектов применяли разные технологические схемы переработки для комплексного извлечения полезных компонентов. На рис. 3 приведена блок-схема биогидрометаллургической переработки золото-серебросодержащего-пирит-арсенопиритового концентрата, включающая биоокисление концентрата и последующее цианирование с получением товарной продукции в виде сплава Доре (Au-Ag).

Наличие различных минеральных форм цветных металлов обуславливает применение постадийного их растворения: в процессе предварительного сернокислотного химического выщелачивания («закисления руды») растворяются карбонаты, окисленные соединения и легко окисляемые вторичные сульфиды.

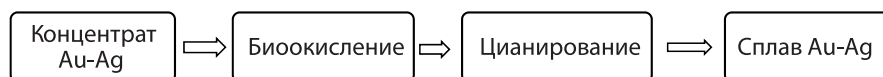


Рис. 3. Блок-схема биогидрометаллургической переработки золото-серебросодержащего-пирит-арсенопиритового концентрата

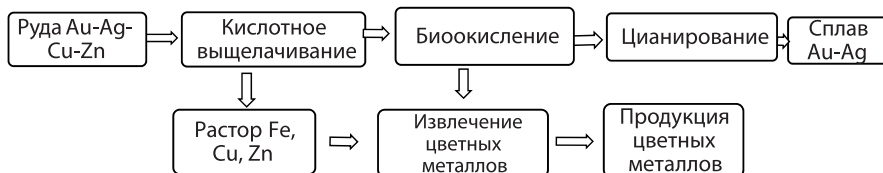


Рис. 4. Блок-схема биогидрометаллургической переработки золото-серебро-медно-цинковой пиритсодержащей руды

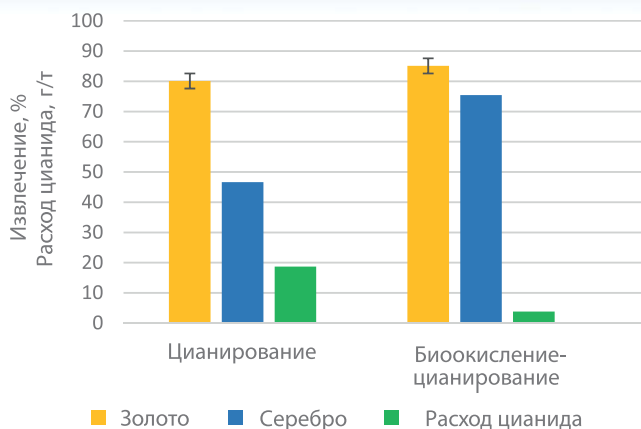


Рис. 5. Извлечение золота и серебра и снижение расхода цианида при традиционном цианировании и биогидрометаллургической переработке концентрата

Выщелачивание меди из труднорастворимого халькопирита протекает на стадии бактериального выщелачивания совместно с сульфидными минералами, содержащими благородные металлы, в данном случае с пиритом. Извлечение цветных металлов в товарную продукцию осуществляется из растворов выщелачивания. Благородные металлы «вскрываются» при окислении золотосодержащих сульфидов и извлекаются из твердых остатков биовыщелачивания методом цианирования (рис. 3).

Полнота окисления сульфидного золотосодержащего сырья с высоким содержанием сульфидной серы 30–40 %, в основном в пирите, достигается за счет применения умеренно-термофильных бактерий и повышения продолжительности биовыщелачивания до 144 вместо 100–120 часов при содержании сульфидной серы 10–20 %.

Для повышения извлечения золота и серебра из исследуемого концентрата в процессе гидрометаллургической переработки требуется предварительная известковая аэрация для доокисления пирита и элементной серы, образующейся при окислении сульфидов, и вызывающей повышенный расход цианида, а также добавка солей Pb (II). Повышенное содержание серебра в остатках биоокисления обуславливает необходимость наиболее полного его извлечения при увеличении продолжительности сорбционного цианирования с обычных 24 до 36–48 часов.

Сорбционным цианированием остатков биоокисления концентрата извлекается 85,1 % золота и 75,4 % серебра по сравнению с 80,1 и 46,6 % соответственно при сорбционном цианировании без предварительного биоокисления. Расход цианида сокращается с 18,7 до 3–5 кг/т концентрата и извести с 20 до 3 кг/т.

Применение биогидрометаллургической технологии для переработки руды позволяет повысить извлечение благородных и цветных металлов по сравнению с традиционной переработкой методом флотационного обогащения, при котором золото и серебро недостаточно эффективно извлекаются в медный и цинковый концентраты: золота с 69,6 до 84,4 %, сере-

бра с 51,5 до 76,4 %, меди с 54,4 до 73,2 %, цинка с 47,5 до 64,6 %. Извлечение меди из бактериального раствора проводили методом цементации из бактериальных растворов. Полученная медь — цементная с содержанием 62,10 % меди при извлечении 73,22 % пригодна к переработке на металлургическом заводе. Цинк осаждали в виде гидроксида цинка или карбоната с извлечением 60–64,6 %.

Таким образом, результаты выполненных исследований свидетельствуют о перспективности применения биогидрометаллургической технологии для эффективной переработки упорных золотосодержащих комплексных руд и концентратов, позволяющей повысить извлечение благородных и цветных металлов в товарную продукцию, сократить расход дорогостоящего реагента — растворителя благородных металлов (цианида) и вовлечь в эксплуатацию месторождения с упорными рудами благородных и цветных металлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондратьева, Т.Ф. Микроорганизмы в биотехнологиях переработки сульфидных руд / Т.Ф. Кондратьева, А.Г. Булаев, М.И. Муравьев / Институт микробиологии РАН им. Виноградского. — Москва: Наука, 2015. — 212 с.
2. Седельникова, Г.В. Сравнение автоклавного и бактериального выщелачивания / Г.В. Седельникова // Золото и технологии. — 2014. — № 2 (24). — С. 110–115.
3. Седельникова, Г.В. Извлечение золота из упорных высокосульфидных концентратов с применением биогидрометаллургии / Г.В. Седельникова, Е.Е. Савари, П.А. Заулочный, Е.А. Кошель // Цветные металлы. — 2012. — № 4. — С. 37–42.
4. Совмен, В.К. Переработка золотосодержащих руд с применением бактериального окисления в условиях Крайнего Севера / В.К. Совмен, В.Н. Гуськов, А.В. Белый, З.П. Кузина, С.В. Дроздов, С.И. Савушкина, А.М. Майоров, М.П. Закревский. — Н.: Наука, 2007. — 144 с.
5. Соложенкин, П.М. Эффект свинца (II) на скорость растворения золота в цианиде / П.М. Соложенкин, М.А. Мильман, Н.В. Воробьев-Десятовский // Российский журнал общей химии. — 2007. — Т. 77. — № 1. — С. 1–9.
6. Тесленко, В. Обзор конференции «Золото и технологии 2017» / В. Тесленко // Золото и технологии. — 2017. — № 2 (36). — С. 10–20.
7. Abdolahi, H. Biooxidation of a High-Grade Arsenopyritic Gold Ore Using a Mixed Culture of Moderate Thermophilic Microorganism, Solid State Phenomena / H. Abdolahi, A. Ahmadi, H. Zilouei, M. Khezn. — 2017. — Vol. 262. — PP. 215–218.
8. Van Aswegen, P.C. The BIOX process for the treatment of refractory gold concentrate, in *Biomining*, Rawlings, D.E. and Johnson B.D., Eds. / P.C. Van Aswegen, V. J. Van Niekerk, W. Olivier. — Berlin: Springer, 2007. — PP. 1–35.
9. Groza, N. Application of the BIOX process to the pretreatment of refractory sulphide gold ores and concentrates in order to increase Au and Ag recovery rate in hydrometallurgical extraction process / N. Groza, A. Filcenco-Olteanu, E. Panturu, R. Radulescu, F. Aurelian. — Chem. Bull. «POLITEHNICA» Univ. (Timi oara). — 2008. — Vol. 53(67), 1–2. — PP. 237–240.
10. Sandstorm, A. Bioleaching of complex sulphide ore with moderate thermophilic and extreme thermophilic microorganisms / A. Sandstorm, S. Petersson // *Hydrometallurgy*. — 1997. — Vol. 46. — PP. 181–190.
11. Zhang, X. Enhancement of bio-oxidation of refractory arsenopyritic gold ore by adding pyrolusite in bioleaching system, *The Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Elsevier / X. Zhang, Y.-L. Feng, H.-R. Li. — 2016. — Vol. 26. — Issue 9. — PP. 2479–2484.
12. Wenjie, L. Study on the gold recovery of double refractory gold ore concentrate by biological oxidation pretreatment, 21-st International Biohydrometallurgy Symposium (IBS) 2015, October, 5–9 / L. Wenjie, Y. Hongying, J. Zhenan. — PP. 244–248.

© Седельникова Г.В., Ким Д.Х., Ибрагимова Н.В., 2018

Седельникова Галина Васильевна // gsedelnikova@mail.ru
Ким Дмитрий Хаксунович // dngdrmn@yandex.ru
Ибрагимова Наталья Владимировна // 5658307@mail.ru