

Исследование биотехнологической переработки сульфидной золотосодержащей руды

© В.А. Верховина*, Е.В. Верховина**, Л.И. Шкетова***, С.С. Тимофеева*

* Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

** Институт земной коры Сибирского отделения РАН, г. Иркутск, Российская Федерация

*** Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: Цель исследования – проведение поиска способов биотехнологической переработки сульфидных углистых золотосодержащих руд для последующего извлечения из них золота. Выделен и адаптирован мезофильный штамм бактерии *Acidithiobacillus ferrooxidans*, обладающий устойчивой активностью в течение длительного времени (12 месяцев), его активность варьировала от 1,4 до 2,8 г/л час окисленного железа. В процессе кучного бактериального окисления происходит значительное снижение упорности сульфидных руд. Установлено, что при дроблении руды до класса крупности 2 мм была достигнута степень окисления 89–93% арсенопирита и 50–56% пирита. Таким образом, на переработку могут быть направлены руды, содержащие 0,9–1,5 г/т золота, так как при кучном биовыщелачивании (КВ) извлечение золота составит около 65–75%. Полученные результаты подтверждены полупромышленными испытаниями. Разработанная технология кучного бактериального окисления позволяет подготовить сульфидные упорные золотосодержащие руды для последующего извлечения золота на основе использования технологии БВ, что приводит к значительному приросту извлечения золота. При этом сульфидные минералы переходят в естественные окисленные формы с минимальным техногенным воздействием на окружающую среду.

Ключевые слова: биотехнологии, кучное биовыщелачивание, упорные сульфидные руды

Информация о статье: Дата поступления 5 июля 2018 г.; дата принятия к печати 4 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 29 марта 2019 г.

Для цитирования: Верховина В.А., Верховина Е.В., Шкетова Л.И., Тимофеева С.С. Исследование биотехнологической переработки сульфидной золотосодержащей руды // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9, N 1. С. 109–117. DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-1-109-117.

A study of biotechnological processing of sulphide gold-containing ores

© Valentina A. Verkhovina*, Elena V. Verkhovina**, Ludmila E. Shketova***, Svetlana S. Timofeeva*

* Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

** Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

*** Irkutsk research institute of precious and rare metals and diamonds, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: In this research, we set out to search for methods that can be used in biotechnological processing of sulphide carbonaceous refractory gold-containing ores with a view of subsequent gold extraction. The mesophilic strain of the *Acidithiobacillus ferrooxidans* bacterium, which exhibits sustained activity over prolonged periods (12 months), has been isolated and adapted. The activity of this strain is shown to vary from 1,4 to 2,8 g/l of oxidised iron per hour. In the process of heap bacterial oxidation, a significant decrease in the refractoriness of sulphide ores is observed. Under the conditions of ore crushing to a particle size of 2 mm, the oxidation degree of arsenopyrite and pyrite is determined to reach the values of 89–93% and 50–56%, respectively. Thus, ores containing 0,9–1,5 g/t of gold appear to be appropriate for processing, since the gold recovery reaches 65–75% after heap bioleaching (HB). The obtained results are confirmed by semi-industrial tests. The proposed technology of heap bacterial oxidation permits the preparation of sulphide re-

refractory gold-containing ores for subsequent gold extraction based on the bacterial leaching technology (BL), which leads to a significant increase in the extraction of gold. Under this process, sulphide minerals are transformed into natural oxidised forms with a minimal anthropogenic impact on the environment.

Keywords: *biotechnology, heap bioleaching, refractory sulphide ores*

Information about the article: Received July 5, 2018; accepted for publication March 4, 2019; available online March 29, 2019.

For citation: Verkhovina V.A., Verkhovina E.V., Shketova L.E., Timofeeva S.S. A study of biotechnological processing of sulphide gold-containing ores. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology]. 2019, vol. 9, no. 1, pp. 109–117. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-1-109-117.

ВВЕДЕНИЕ

Добыча и переработка полезных ископаемых – одно из стратегических направлений экономики России. Возрастающая стоимость добычи и переработки ценных металлов из руд наряду с истощением высококачественных запасов делает актуальным развитие экологически чистых технологий в горнодобывающей промышленности. Необходимо менять стратегию использования природных ресурсов в плане их сбалансированного потребления с привлечением наукоемких технологий, оказывающих минимальное техногенное воздействие на окружающую среду, что, несомненно, актуально и общественно значимо.

Одним из подходов к решению этих задач является применение биотехнологических методов. Современный мир стремительно движется к новому экономическому укладу, основанному на использовании возобновляемого сырья, к построению биоэкономики, двигателем технологического развития которой является плавный переход от химической индустрии, основанной на ископаемом углеводородном сырье, к зеленой индустрии на основе возобновляемого сырья (биомассы)

В 2015 г. в Российской Федерации разработана технологическая платформа «Биоиндустрия и биоресурсы» («БиоТех2030»), призванная стать инструментом осуществления научнотехнической и инновационной политики российской экономики [1]. В рамках данной технологической платформы предполагается развитие таких направлений, как биогеотехнология и природоохранные (экологические) биотехнологии.

Сегодня выщелачивание (извлечение) металлов – использование ацидофильных хемолитотрофных микроорганизмов, окисляющих закисное железо, элементную серу и ее восстановленные соединения, в том числе множество сульфидных минералов, – широко применяется для извлечения благородных металлов или выщелачивания цветных металлов из горных пород, руд, продуктов их обогащения (концентратов) и отходов горно-перерабатывающей промышленности. Биодобыча осуществляется тремя методами: биовыщелачивание из отвалов, кучное биовыщелачивание (биооксидация) и чановое биовыщелачивание (биооксидация

минералов). Биовыщелачивание обычно относят к технологии биодобычи, применяемой для основных металлов, тогда как биооксидация минералов зачастую связана с золотоносными рудами и концентратами, которые трудно поддаются обработке [2].

В настоящее время запасы легкообогащаемого золотосодержащего сырья россыпных и окисленных рудных месторождений близки к истощению. В переработку вовлекаются сложные (упорные) сульфидные руды, которые не пригодны для промышленного производства ввиду тесной ассоциации золота с сульфидами. Для извлечения из них золота в качестве подготовительных процессов используются окислительный обжиг, чановое бактериальное или автоклавное выщелачивание. Эти способы довольно энергоемкие и требуют значительных капитальных затрат. Одним из альтернативных методов переработки сульфидных руд является кучное бактериальное выщелачивание (окисление).

Выщелачивание металлов из руд известно давно. В 1947 г. американскими микробиологами из рудничных вод был выделен неизвестный ранее микроорганизм *Th. ferrooxidans*, который окисляет практически все сульфидные минералы, серу и ряд ее восстановленных соединений, а также закисное железо [3]. Промышленное применение бактериального выщелачивания начато в 1960-х гг. с кучного и подземного извлечения металлов из бедных забалансовых медных и урановых руд и отвалов в США, Канаде, Болгарии, СССР и других странах. В последние десятилетия промышленное применение железо- и сероокисляющих микроорганизмов с целью извлечения ценных компонентов из руд достигло широких масштабов в разных странах. Сегодня различными компаниями России, стран Северной и Южной Америки, Африки и Австралии используются бактериально-химические технологии добычи меди, кобальта, никеля, золота, цинка, урана [4–8]. В СССР исследования начаты в конце 50-х гг. прошлого века. Изучение процесса бактериального окисления железа и выщелачивания металлов начато после выделения из дренажных кислых вод угольной шахты микроорганизмов, способных принимать участие в окислении двухвалентного

железа до трехвалентного, – бактерий *At. ferrooxidans* (ранее называемых *Th. ferrooxidans*).

Роль ацидофильных хемолитотрофных бактерий в окислении закисного железа, элементарной серы и ее восстановленных соединений, а также сульфидных минералов отмечена многими авторами, например, [9–12]. Тиобациллы широко распространены в месторождениях, содержащих минералы сульфидов металлов. Обычно эти бактерии выделяются из руд, которые характеризуются разнообразием состава минералов, их количественным соотношением, концентрацией ионов металлов и токсичных элементов, накапливаемых в процессе окисления в жидкой фазе.

Микробное выщелачивание сульфидных руд и концентратов было признано привлекательной альтернативой традиционным физическим и химическим методам благодаря сокращению потребления энергии, транспортных затрат и менее пагубному воздействию на окружающую среду. При окислении сульфидов рассеянное в них тонкодисперсное золото освобождается и становится доступным для извлечения. Решающая роль в ускорении этого процесса принадлежит бактериям. Кучное бактериальное окисление воспроизводит естественные процессы, протекающие в земной коре при преобразовании сульфидных месторождений в окисленные, при этом сульфидные минералы переходят в естественные окисленные формы [6, 13–15]. Отсюда возникает необходимость разработки технологий, основанных на деятельности этих бактерий применительно к конкретным месторождениям или видам сульфидного сырья.

С 2000 г. ОАО «Иргиредмет» выполняет лабораторные и полупромышленные испытания технологии биоокисления для месторождений «Кючус», «Албазино», «Кокпатас», «Березняковское», «Ведуга», «Боголюбовское» и др. [16]. Установлено, что коллекционные штаммы менее активны и не выдерживают конкуренции с бактериальными штаммами культур микроорганизмов, выделенными из золотосодержащей руды [17–19].

Цель настоящего исследования состояла в поиске способов биотехнологической переработки сульфидных углистых золотосодержащих руд для последующего извлечения из них золота.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследования являлись упорные сульфидные золотосодержащие руды месторождений Приморского края, расположенных в Амурской области, при прямом цианировании которых технологическое извлечение золота составляет от 6 до 20%.

Методы исследования. Проведены лабораторные исследования, укрупненные лабораторные и полупромышленные испытания комбинированных методов кучного бактериального

окисления (КБО) и кучного выщелачивания (КВ) золота. Процесс бактериального вскрытия золота путем окисления сульфидных минералов исследован в лабораторных условиях на ряде концентратов и испытан в замкнутых циклах на полупромышленных установках.

Исследование минералогического и химического состава руды. Качественный минеральный состав проб руды был определен по данным рентгеноструктурного фазового (дифрактометрического) анализа, выполненного на аппарате «Дрон-2». В исследуемых пробах диагностированы следующие минералы: кварц, полевые шпаты, гидрослюда, пирит, арсенопирит. Количественный минералогический анализ выполнен на дробленном материале исходной руды крупностью 2,0 мм с использованием данных микроскопических исследований прозрачных и полированных шлифов. При определении химического состава проб руды использованы спектральный полуколичественный, количественный рентгенофлуоресцентный и фазовый атомно-абсорбционный метод. Массовая доля углерода в органической форме определялась методом сухого сжигания, а в карбонатной – титриметрическим методом определения диоксида углерода. Содержание золота устанавливалось методом пробирной плавки. При обработке результатов был применен метод корреляционного анализа [20].

Выделение и адаптация бактериальных штаммов. Выделение бактерий проводили методом посева руды на среду Сильвермана и Люндгрена 9К¹. Кроме того, в среду добавляли раствор микроэлементов и вытяжку из руды, предварительно простерилизованную. Это делалось для активизации выделенных штаммов и, в какой-то мере, для их адаптации. Посев инкубировали в термостате при температуре 30 °С при постоянной подаче воздуха. Активность бактерий оценивали по скорости окисления Fe²⁺ до Fe³⁺. Полученная культура бактерий показала активность 2 г/л в час, что является приемлемым показателем активности железобактерий. Через 10 суток наблюдениям соединений трехвалентного железа, что указывает на пик развития бактерий. Окислительно-восстановительный потенциал *Eh* измеряли иономером ЭВ-74, он составлял от 350 до 450 мВ.

¹ Биоготехнология металлов. Практическое руководство // под ред. Г.И. Каравайко. М.: Изд-во Центра международных проектов ГКНТ, 1989. 375 с. / *Biogotekhnologiya metallov. Prakticheskoe ruko-vodstvo* [Biogotechnology of metals. A practical guide]. Under the editorship of G.I. Karavayko. Moscow: Publishing House of the Center for International Projects of the SCST, 1989, 375 p.

Расчистку штаммов выделенных бактерий производили методом титров на жидкой среде 9К [21]. При микроскопировании культур было видно, что *A. ferrooxidans* представлены мелкими палочковидными клетками с одним полярным жгутиком. Длина клеток составляла 0,8–1,0 мкм, ширина – 0,4 мкм. Оптимальная температура для роста – около 28–30 °С. Энергию получали от окисления серы и ее соединений до серной кислоты и Fe²⁺. При низких значениях pH эти бактерии не окисляют железо. Они являются строгими аэробами, хотя в природе окисление субстратов, т.е. железа или серы, может происходить как в аэробных, так и в анаэробных условиях за счет окисления нитратов. Концентрацию клеток в бактериальном растворе определяли на денситометре «DEN-1», предварительно отделив бактерии от минеральных взвесей на центрифуге при 1000–1300 об./мин. Концентрацию клеток определяли по калибровочной кривой. После получения активной адаптированной культуры бактерий производили наработку биомассы в пульповом варианте для дальнейшего ее использования в проведении экспериментов по кучному бактериальному окислению сульфидных минералов руды. В результате проведенных экспериментов по адаптации выделена культура бактерий, пригодная для окисления сульфидных руд данного месторождения, которая применялась для дальнейших исследований по кучному бактериальному окислению.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Состав проб руды. Основная доля работ по технологии БВ была направлена на исследование окисления отдельных минералов (чаще – пирита, халькопирита, сфалерита) чистыми культурами (отдельными штаммами) микроорганизмов. Однако исследуемая руда состояла из нескольких минералов. Результаты минералогического анализа проб согласованы с

данными химического и рентгеноструктурного анализов (табл. 1).

Все пробы представлены в основном оксидами кремния (56–65%) и алюминия (12–15%). Породообразующие минералы составляют основную массу и представлены главным образом кварцем (38–48%), полевыми шпатами (22–24%), слюдястыми минералами (18–21%) с явным преобладанием кварца. Основным сульфидом является пирит – в пробах 1 и 2 его массовая доля составляет 3,0–3,2%, в пробах 3 и 4 – 2,2–2,3%. Основной причиной технологической упорности к цианированию для всех вышеуказанных проб является тесная ассоциация золота с сульфидами. Таким образом, все исследованные пробы относятся к технологическому типу «трудноцианируемые руды», упорность которых обусловлена в основном тонкой вкрапленностью благородного металла в сульфиды.

Бактериальное вскрытие золотосодержащих минералов. Для вскрытия упорной золотосодержащей руды был опробован метод биохимического окисления, при котором автотрофные бактерии: *A. thiooxidans*, *A. ferrooxidans*, окисляют золотосодержащие сульфиды железа до конечных химических соединений. Выделенные штаммы бактерий считались адаптированными и подготовленными к технологическим исследованиям процесса бактериального выщелачивания, если в течение ряда последовательных пересевов на пульпе с заданной плотностью были получены удовлетворительные результаты по скорости окисления сульфидных минералов при высокой активности биомассы.

В результате проведенных экспериментов выделена культура бактерий, пригодная для окисления сульфидных руд данного месторождения, которая применялась для дальнейших исследований по кучному бактериальному окислению. Применение адаптированного штамма позволило значительно интенсифицировать бактериальные окислительные процессы.

Таблица 1

Минеральный состав проб руды

Table 1

Mineral composition of ore samples

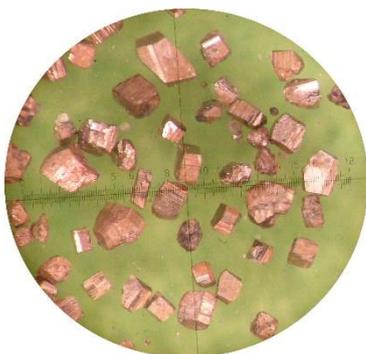
Минералы и группы минералов	Массовая доля, %			
	Проба 1	Проба 2	Проба 3	Проба 4
Кварц (SiO ₂)	38,9	48,0	39,0	38,0
Полевые шпаты (плагиоклаз, КПШ)	24,0	22,0	22,0	24,6
Глинисто-гидрослюдистые (гидросерицит, иллит)	21,0	18,0	21,0	20,0
Карбонаты (анкерит, доломит, сидерит, кальцит)	10,0	5,4	12,0	11,0
Пирит	3,2	3,0	2,2	2,3
Арсенопирит	1,3	1,7	1,2	1,3
Сфалерит, халькопирит	Единичные знаки			
Гидроксиды железа (лимонит, гетит)	0,3	0,9	1,1	1,4
Акцессорные: эпидот, рутил, сфен, лейкоксен, ярозит, магнетит	Знаки и единичные знаки			
Углеродистое вещество	1,3	0,3	1,5	1,4
Итого	100,0	100,0	100,0	100,0

Установлено, что в результате бактериального окисления существенно сокращается доля золота, связанного с породообразующими минералами и сорбированного на углистоое вещество. Существенных изменений породы не наблюдалось, но в процессе бактериального окисления изменялись свойства углистоого вещества, поскольку, вероятно, происходила пассивация (экранирование) сорбционно-активной поверхности углерода продуктами жизнедеятельности бактерий. Изменения, произошедшие при бактериальном окислении руды, показали, что в исходной руде (рис. 1, а) поверхность зерен пирита блестящая и ровная, в то время как в продукте БО (рис. 1, б) поверхность пористая, неравномерная («изъеденная» бактериями, с кавернами), покрыта хрупкими тонкозернистыми продуктами окисления.

Укрупненные испытания проводились на пробе массой 10 кг, дробленной до класса -2, -5 и -10 мм. Пробы руды помещали в перколяционные колонны и непрерывно орошали бактери-

альными растворами, находящимися в постоянном обороте. Периодически из колонн отбирали пробы жидких и твердых продуктов. Эффективность бактериального процесса оценивали по степени окисления сульфидов. Установлено, что наиболее эффективно процесс окисления протекает на руде, дробленной до класса -2 мм (рис. 2). Проведенные минералогические исследования руды после кучного бактериального окисления показали, что состав породообразующих минералов (кварц, плагиоклазы) не изменился, частично подверглись растворению гидрослюдастые минералы и плагиоклазы, доля карбонатов в продуктах БО резко сократилась, пирит выщелачивается частично, а арсенопирит выщелачивается почти полностью. Основная масса окисленного железа находилась в сульфатной форме. Массовая доля лимонита в пробах – около 0,3–0,5%. В результате КБО в продуктах БО образовались новые минералы группы алунита (переходные разновидности между ярозитом, натроярозитом и карфосидеритом) и гипс.

Бинокляр. Цена деления окулярной линейки 0,025 мм



а

Бинокляр. Поле зрения рисунка 4,5 мм



б

Рис. 1. Внешний вид исходной сульфидной фракции (а) и после биоокисления (б)

Fig. 1. Appearance of the original sulfide fraction (a) and after biooxidation (b)

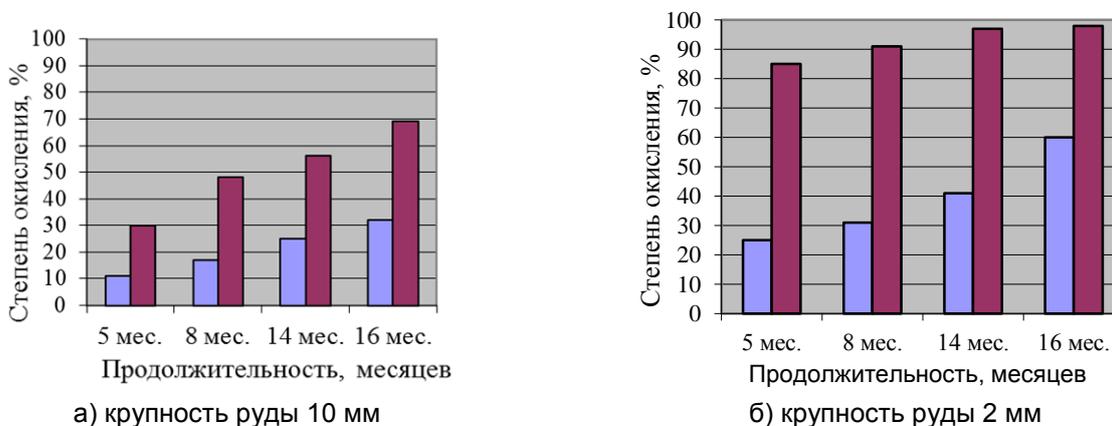


Рис. 2. Зависимость степени окисления от продолжительности процесса КБ:

■ – пирит; ■ – арсенопирит

Fig. 2. Oxidation degree versus duration of KB process:

■ – pyrite; ■ – arsenopyrite

Проведение испытаний в полупромышленном масштабе. Испытания технологической схемы кучного бактериального окисления в полупромышленном масштабе проводились в колонне высотой 6 м и диаметром 0,62 м. Необходимый температурный режим (28–35 °С) поддерживался за счет обогрева колонны, напорной и приемной емкостей, куда в каждую точку подавался сжатый воздух с расходом 2–5 л/мин. Крупность дробления руды для полупромышленных испытаний составляла 10 мм и была выбрана исходя из технических возможностей стандартной схемы дробления в трех стадиях.

Лучший результат степени окисления арсенопирита и пирита достигался в верхней и средней частях колонны (табл. 2). Для большей информативности перед цианированием осуществляли рассев по классам крупности проб, отобранных из верхней, средней и нижней частей колонны. Изначально обогащенный по золоту мелкий класс руды в процессе бактериального окисления обогащался дополнительно с 2,7 до 5,33 г/т. Высвобождавшиеся в процессе окисления сульфидов тонкодисперсные части-

цы золота переходили в мелкий класс.

Более высокая степень вскрытия золота мелких классов приводит к более полному его извлечению (табл. 3). Более интенсивное вскрытие происходит в первый год. Максимальное извлечение золота в мелких классах достигается за 9 месяцев.

Таким образом, полупромышленными испытаниями подтверждены основные закономерности, выявленные при лабораторных и укрупненно-лабораторных исследованиях. Технология КБО позволяет повысить извлечение золота с 13 до 65%. Наиболее интенсивное окисление руды при бактериальном окислении происходит в первый год. На переработку могут быть направлены руды, содержащие 0,9–1,5 г/т золота, в то время как другие технологические схемы, включающие операции вскрытия с использованием автоклавной технологии или чанового бактериального окисления, перерабатывают руды, которые должны содержать не менее 2,0 г/т. Кроме того, при прямом цианировании технологическое извлечение золота составляет от 6 до 20%, а при кучном выщелачивании – около 65–75%.

Таблица 2

Результаты анализа продуктов окисления (24 месяца КБО)

Table 2

Analysis of the oxidation products (24 months) after bacterial oxidation

Наименование материала	Массовая доля, %						Степень окисления, %	
	Железо		Мышьяк		Сера			
	общее	сульфид	общий	сульфид	общая	сульфид	арсенопирита	пирита
Исходная руда	4,50	2,60	0,68	0,60	1,91	1,80		
Проба с верхней части колонны	4,32	0,61	0,50	0,08	2,78	0,74	87	75
Проба со средней части колонны	5,21	0,83	0,45	0,10	2,87	0,95	83	67
Проба с нижней части колонны	5,30	0,98	0,31	0,16	3,15	1,14	73	59

Таблица 3

Сводные данные пофракционного извлечения золота из продуктов КБО

Table 3

Results of fractional gold extraction after bacterial oxidation

Класс крупности, мм	Извлечение золота из продуктов КБО, %						
	Исходная проба	4 месяца КБО	9 месяцев КБО	18 месяцев КБО	24 месяца КБО		
					Верхняя часть	Средняя часть	Нижняя часть
	Верх колонны						
-10+2	14	19	25	42	46	41	47
-2+0,4	11	61	38	44	44	77	73
-0,4+0	18	69	86	89	85	87	80
-10+0 (по балансу)	13	38	56	63	62	65	58

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования, подтвержденные полупромышленными испытаниями, показали возможность применения кучного бактериального окисления для снижения упорности сульфидных руд, что приводит к значительному приросту извлечения золота. Установлено, что в про-

цессе бактериального окисления руды происходит частичное окисление пирита, арсенопирит выщелачивается практически полностью. В результате образуются новые минералы группы алунита (переходные разности между ярозитом, натроярозитом и карфосидеритом) и гипс. Состав породообразующих минералов (кварц, плагио-

клазы) практически не изменяется. Из нерудных минералов незначительно подверглись выщелачиванию гидрослюдистые минералы и плагиоклазы. Доля карбонатов в пробах БО значительно сократилась. Таким образом, образующиеся в процессе кучного бактериального окисления химические соединения соответствуют природным аналогам, присутствующим в земной коре, что обеспечивает экологическую

безопасность разработанной технологии. Технологию бактериального извлечения золота целесообразно использовать при переработке сульфидной золотосодержащей руды, бедного сырья и хвостов как с теоретической, так и практической точек зрения. Это решение особенно актуально в связи с истощением природных ресурсов и загрязнением окружающей среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Российская технологическая платформа «БиоТех2030» [Электронный ресурс]. URL: <http://biotech2030.ru/> (12.05.2018).
2. Тимофеева С.С. Фитомайнинг: современное состояние и перспективы // XXI век. Техносферная безопасность. 2018. Т. 3. № 3 (11). С. 112–128. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-112-128>.
3. Colmer A.R., Hinkle M.E. The Role of Microorganisms in Acid Mine Drainage: A Preliminary Report // Science. 1947. Vol. 106. No. 2751. P. 253–256.
4. Alvarez S., Jeres C. Copper ions stimulate polyphosphate degradation and phosphate efflux in *Acidithiobacillus ferrooxidans* // Appl. Environ. Microbiol. 2004. Vol. 70. P. 5177–5182.
5. Breed A.W., Dempers C.J.N., Hansford G.S. Studies on the bioleaching of refractory concentrates // Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 2000. Vol. 100. No. 7. P. 161–174.
6. D'Hugues P., Foucher S., Galle-Cavalloni P., Morin D. Continuous bioleaching of chalcocopyrite using a novel extremely thermophilic mixed culture // International Journal of Mineral Processing. 2002. Vol. 66. No. 4. P. 107–119.
7. Brierley C.L. Bacterial succession in bioheap leaching // Hydrometallurgy. 2001. Vol. 59. P. 249–255.
8. Podar M., Reysenbach A.-L. New opportunities revealed by biotechnological explorations of extremophiles // Current Opinion in Biotechnology. 2006. Vol. 17. No. 3. P. 250–255.
9. Варданян Н.С., Нагдалян С.З. Периодический процесс биовыщелачивания упорной золотосодержащей пиритной руды // Прикладная биохимия и микробиология. 2009. Т. 45. № 4. С. 446–451.
10. Каравайко Г.И., Дубинина Г.А., Кондратьева Т.Ф. Литотрофные микроорганизмы окислительных циклов серы и железа // Микробиология. 2006. Т. 75. № 5. С. 593–629.
11. Минеев Г.Г. Биометаллургия золота. М: Metallurgy, 1989. 159 с.
12. Фомченко Н.В., Муравьев М.И., Кондратьева Т.Ф., Бирюков В.В. Роль первой стадии в двухстадийном процессе бактериально-химического окисления золотомышьяковых концентратов с использованием умеренно термофильных микроорганизмов // Биотехнология. 2009. № 2. С. 60–68.
13. Ehrlich H.L. Past, present and future of biohydrometallurgy // Hydrometallurgy. 2001. Vol. 59. P. 127–137.
14. Podar M., Reysenbach A.-L. New opportunities revealed by biotechnological explorations of extremophiles // Current Opinion in Biotechnology. 2006. Vol. 17. No. 3. P. 250–255.
15. Rawlings D.E. Characteristics and adaptability of iron- and sulfur-oxidizing microorganisms used for the recovery of metals from minerals and their concentrates // Microbial Cell Factories. 2005. Vol. 4. No. 13. P. 4–13. DOI: [10.1186/1475-2859-4-13](https://doi.org/10.1186/1475-2859-4-13).
16. Войлошников Г.И. Международный симпозиум по биогидрометаллургии IBS 2011 [Электронный ресурс]. URL: <https://zolotodb.ru/article/10513> (12.05.2018).
17. Верховина В.А., Верховина Е.В., Гудков С.С., Емельянов Ю.Е., Рязанова И.И., Шкетова Л.Е. Биогеохимические процессы трансформации металлов с участием микроорганизмов и их использование в биотехнологических разработках // Вестник ИрГТУ. 2002. № 12. С. 65–71.
18. Верховина В.А., Верховина Е.В., Шкетова Л.Е. Поиск инновационных экологически чистых технологий при переработке упорных концентратов золотосодержащей руды // Вестник ИрГТУ. 2012. № 4 (63). С. 48–53.
19. Емельянов Ю.Е., Шкетова Л.Е., Гудков С.С., Копылова Н.В., Верховина В.А. Кучное бактериальное выщелачивание золотосодержащих руд // Горный журнал. 2012. № 8. С. 108–111.
20. Kraemer H. Correlation coefficients in medical research: from product moment correlation to the odds ratio // Statistical Methods in Medical research. 2006. Vol. 15. P. 525–544.
21. Польшин С.И., Адамов Э.В., Панин В.В. Технология бактериального выщелачивания цветных и редких металлов. М.: Недра, 1982. 288 с.

REFERENCES

1. Rossiiskaya tekhnologicheskaya platforma «BioTekh2030» [Russian technology platform «BioTech2030»]. Available at: <http://biotech2030.ru/> (accessed 12.05.2018).
2. Timofeeva S.S. Phytomining: current state and prospects. XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost' [Technosphere Safety. XXI century]. 2018, vol. 3, no. 3 (11), pp. 112–128. DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-112-128>
3. Colmer A.R., Hinkle M.E. The Role of Micro-

organisms in Acid Mine Drainage: A Preliminary Report. *Science*. 1947, vol. 106, no. 2751, pp. 253–256.

4. Alvarez S., Jeres C. Copper ions stimulate polyphosphate degradation and phosphate efflux in *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Appl. Environ. Microbiol.* 2004, vol. 70, pp. 5177–5182.

5. Breed A.W., Dempers C.J.N., Hansford G.S. Studies on the bioleaching of refractory concentrates. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2000, vol. 100, no. 7, pp. 161–174.

6. D'Hugues P., Fousher S., Galle-Cavalloni P., Morin D. Continuous bioleaching of chalcopyrite using a novel extremely thermophilic mixed culture. *International Journal of Mineral Processing*. 2002, vol. 66, no. 4, pp. 107–119.

7. Brierley C.L. Bacterial succession in bioheap leaching. *Hydrometallurgy*. 2001, vol. 59, pp. 249–255.

8. Podar M., Reysenbach A.-L. New opportunities revealed by biotechnological explorations of extremophiles. *Current Opinion in Biotechnology*. 2006, vol. 17, no. 3, pp. 250–255.

9. Vardanyan N.S., Nagdalyan S.Z. Periodic bioleaching of refractory gold-bearing pyrite ore. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*. 2009, vol. 45, no. 4, pp. 446–451. (In Russian)

10. Karavaiko G.I., Dubinina G.A., Kondrat'eva T.F. Lithotrophic microorganisms of the oxidative cycles of sulfur and iron. *Mikrobiologiya*. 2006, vol. 75, no. 5, pp. 593–629. (In Russian)

11. Mineev G.G. *Biometallurgiya zolota* [Gold biometallurgy]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1989, 159 p.

12. Fomchenko N.V., Murav'ev M.I., Kondrat'eva T.F., Biryukov V.V. A Role of the First Stage in the Two-Stage Process of Bacterial-Chemical Oxidation of Goldarsenic Concentrates using Moderate Thermophilic Microorganisms. *Biotekhnologiya*. 2009, no. 2, pp. 60–68. (In Russian)

13. Ehrlich H.L. Past, present and future of biohydrometallurgy. *Hydrometallurgy*. 2001, vol. 59, pp. 127–137.

14. Podar M., Reysenbach A.-L. New opportunities revealed by biotechnological explorations of extremophiles. *Current Opinion in Biotechnology*. 2006, vol. 17, no. 3, pp. 250–255.

15. Rawlings D.E. Characteristics and adaptability of iron- and sulfur-oxidizing microorganisms used for the recovery of metals from minerals and their concentrates. *Microbial Cell Factories*. 2005, vol. 4, no. 13, pp. 4–13 DOI: 10.1186/1475-2859-4-13.

16. Voiloshnikov G.I. *Mezhdunarodnyi simpozium po biogidrometallurgii IBS 2011* [IBS 2011 International Biohydrometallurgy Symposium]. Available at: <https://zolotodb.ru/article/10513> (accessed 12.05.2018).

17. Verkhovina V.A., Verkhovina E.V., Gudkov S.S., Emel'yanov Yu.E., Ryazanova I.I., Shketova L.E. Biogeochemical processes of transformation of metals with the participation of microorganisms and their use in biotechnological developments. *Vestnik IrGTU*. 2002, no. 12, pp. 65–71. (In Russian)

18. Verkhovina V.A., Verkhovina E.V., Shketova L.E. Search for innovative, environmentally friendly technologies when processing refractory gold ore concentrates. *Vestnik IrGTU*. 2012, no. 4 (63), pp. 48–53. (In Russian)

19. Emel'yanov Yu.E., Shketova L.E., Gudkov S.S., Kopylova N.V., Verkhovina V.A. Heap biooxidation of gold-containing ores. *Gornyi zhurnal*. 2012, no. 8, pp. 108–111. (In Russian)

20. Kraemer H. Correlation coefficients in medical research: from product moment correlation to the odds ratio. *Statistical Methods in Medical research*. 2006, vol. 15, pp. 525–544.

21. Pol'kin S.I., Adamov E.V., Panin V.V. *Tekhnologiya bakterial'nogo vyshchelachivaniya tsvetnykh i redkikh metallov* [Bacterial leaching of non-ferrous and rare metals]. Moscow: Nedra Publ., 1982, 288 p.

Критерии авторства

Верхозина В.А., Верхозина Е.В., Шкетова Л.Е., Тимофеева С.С. выполнили экспериментальную работу, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Верхозина В.А., Верхозина Е.В., Шкетова Л.Е., Тимофеева С.С. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Верхозина Валентина Александровна ✉, д.х.н., профессор
Иркутский национальный исследовательский технический университет
e-mail: verhval@mail.ru

Contribution

Valentina A. Verkhovina, Elena V. Verkhovina, Ludmila E. Shketova, Svetlana S. Timofeeva carried out the experimental work, on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. Valentina A. Verkhovina, Elena V. Verkhovina, Ludmila E. Shketova, Svetlana S. Timofeeva have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

AUTHORS' INDEX

Valentina A. Verkhovina ✉
Dr. Sci. (Engineering)
Irkutsk National Research Technical University
e-mail: verhval@mail.ru

Верхозина Елена Владимировна,

к.б.н., ведущий инженер
Институт земной коры СО РАН
e-mail: verhel@ crust.ru

Elena V. Verkhozina

Ph.D. (Biology), Engineer
Institute of the Earth's Crust SB RAS
e-mail: verhel@crust.irk.ru

Шкетова Людмила Евгеньевна,

к.т.н., старший научный сотрудник
Иркутский научно-исследовательский институт
благородных и редких металлов и алмазов
e-mail: lusish.56@mail.ru

Ludmila E. Shketova

Ph.D. (Engineering), Senior Researcher
Irkutsk research institute
of precious and rare metals and diamonds
e-mail: lusish.56@mail.ru

Тимофеева Светлана Семеновна,

д.т.н., профессор, заведующая кафедрой
Иркутский национальный исследовательский
технический университет
e-mail: timofeeva@istu.edu

Svetlana S. Timofeeva

Dr. Sci. (Engineering)
Head of the Department
Irkutsk National Research Technical University
e-mail: timofeeva@istu.edu