

зовым оттенком; оптически одноосный, отрицательный; $n_o = 1,616$, $n_e = 1,605 \pm 0,002$. По этим свойствам он напоминает оптически отрицательную разность эвдиалита — эвколита, за который может быть легко принят, но от которого он отличается постоянным наличием полисинтетических двойников и специфическим тусклым блеском покрытой налетом соды поверхности.

Уникальным является обр. 70553 из того же района, представляющий собой полную псевдоморфозу цирсиалита по эвдиалиту. Псевдоморфоза овальной формы размером с кулак имеет варьирующую по концентрическим зонам серовато-розовую окраску. Она сложена плотным мелкозернистым агрегатом цирсиалита, имеющего показатели преломления $n_o = 1,614$, $n_e = 1,604 \pm 0,002$. Реликтов эвдиалита среди цирсиалита не отмечено. С внешней стороны псевдоморфоза окаймлена сплошной оторочкой плотного желтоватого ловозерита толщиной до нескольких миллиметров, вероятно, эндогенного происхождения.

Значительные по размерам выделения цирсиалита обнаружены нами также в образцах пегматитов из отвалов штольни Материальной (гора Юкспор Хибинского массива), собранных в Минералогическом музее ИМГРЭ и в коллекции Ю. С. Кобяшева. Очевидно, что после соответствующей ревизии цирсиалит и другие минералы группы ловозерита будут установлены дополнительно во многих музейных и частных коллекциях. Как следует из приведенных выше данных, для предохранения этих минералов от разрушения должны быть приняты специальные меры, исключающие их непосредственный контакт с воздушной средой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хомяков А. П., Воронков А. А., Казакова М. Е., Власова Е. В., Смольянинова Н. Н. Исследование минералов группы кельдышита. — Новые данные о минералах СССР. 1975, вып. 24, с. 120.
2. Хомяков А. П. Новые данные о минералах группы кельдышита. — Новые данные о минералах СССР. 1976, вып. 25, с. 90.
3. Хомяков А. П. Паракельдышит — новый минерал. — ДАН СССР, 1977, т. 237, № 3.
4. Хомяков А. П. Новое в минералогии группы ловозерита. — ДАН СССР, 1977, т. 237, № 1.
5. Хомяков А. П. Типоморфизм минералов группы ловозерита и их соотношение с эвдиалитом. — В кн.: Новые данные о типоморфизме минералов и минеральных ассоциаций: Тезисы докл. на II совещ. по проблеме «Типоморфизм минералов». М., 1977.
6. Черницова Н. М., Пудовкина З. В., Воронков А. А., Капустин Ю. Л., Пятенко Ю. А. О новом кристаллохимическом семействе ловозерита. — Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1975, ч. 104, вып. 1, с. 18.
7. Капустин Ю. Л., Пудовкина З. В., Быкова А. В. Цирсиалит — новый минерал. — Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1974, ч. 103, вып. 5, с. 551.
8. Хомяков А. П., Семенов Е. И., Еськова Е. М., Воронков А. А. Казаковит — новый минерал из группы ловозерита. — Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1974, ч. 103, вып. 3, с. 342.
9. Буссен И. В., Еськова Е. М., Меньшиков Ю. П., Мерьков А. Н., Сахаров А. С., Семенов Е. И., Хомяков А. П. Основные черты минералогии и геохимии ультращелочных пегматоидов и гидротермалитов. — В кн.: Материалы по минералогии и геохимии щелочных комплексов пород Кольского полуострова. Апатиты, 1975, с. 102.

Л. К. ЯХОНТОВА, Л. Г. НЕСТЕРОВИЧ

МОДЕЛИРОВАНИЕ БАКТЕРИАЛЬНОГО ОКИСЛЕНИЯ ТИПИЧНЫХ ДЛЯ МЕДНОКОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АССОЦИАЦИЙ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ

В практику извлечения металлов из руд в последние годы внедряются более экономичные бактериальные методы, которые в нашей стране и за рубежом используются в промышленном масштабе на ряде место-

рождений цветных металлов (медь, золото и др.). В то же время система управления процессом бактериального извлечения металлов из руд почти не разработана, так как механизм взаимодействия бактериальных клеток (чаще *Thiobacillus ferrooxidans*) с рудными минералами, в результате которого происходит высвобождение металла из структуры минерала, остается изученным весьма слабо.

В последнее время развивается направление, согласно которому взаимодействие тионовой бактерии *Th. ferrooxidans* с сульфидными минералами совершается по законам электрохимии, точнее, по законам коррозионного процесса [1—3]. Эта гипотеза была подтверждена рядом экспериментов [4].

В соответствии с электрохимическим представлением бактериальная клетка при прямом контакте с минеральной частицей стимулирует анодную реакцию окисления минерала. Электроны анодной реакции участвуют в клеточном (катодном) процессе, например в восстановлении кислорода: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$. Примером анодной окислительной реакции может служить реакция окисления халькозина $Cu_2S + 1,75O_2 + 6,5H_2O \rightarrow [CuHSO_4]^+ + Cu(H_2O)_6^{2+} + 3e^-$ [3]. На основе коррозионной модели изучен механизм бактериального окисления мономинеральных проб некоторых сульфидов меди (халькозина, халькопирита, борнита) с использованием в экспериментах бактериальной культуры *Thiobacillus ferrooxidans* [5].

Однако процесс окисления сульфидов значительно усложняется, когда эти минералы образуют полиминеральные ассоциации — руды. Окисление сульфидных руд направляется и контролируется особенностями электрохимических реакций, протекающих между контактирующими минералами [6]. Значительные изменения наблюдались и в скорости бактериального окисления сульфидов в случаях их контактирования друг с другом. Так, скорость окисления сфалерита в смеси с пиритом возрастала почти в 30 раз [7], а молибденит начал окисляться лишь после полного разложения халькопирита [8].

Нами проводились эксперименты по изучению бактериального окисления халькопирита, халькозина, борнита и пирита — типичных рудных минералов медноколчеданных месторождений, приготовленных в следующих сочетаниях, имитирующих главнейшие типы руд: халькопирит — пирит, халькозин — пирит, борнит — пирит, халькопирит — халькозин. Смесь двух сульфидов, растертых до состояния пудры, в весовом соотношении 1 : 1 (по 0,25 г каждого) была засыпана в ячейки, содержащие по 50 мл безжелезистого раствора $9K^1$ с рН 2,8. В полученную суспензию вводилась культура *Th. ferrooxidans* в концентрации 10^5 клеток в 1 мл. Ячейки помещались на качалке в термостат, где поддерживалась температура $+28^\circ$. В каждой ячейке постоянно находились также электроды, изготовленные из соответствующих сульфидов и предварительно проверенные на мономинеральность и однородность.

Опыты продолжались 14 сут. Ежедневно проводились замеры величин рН и окислительного потенциала (ОП) суспензий, а также электродных потенциалов (ЭП) сульфидов, замкнутых во время экспериментов в гальванические пары и моделирующих соответствующие руды медноколчеданных месторождений. Через сутки из ячеек отбирались пробы растворов на количественный химический и спектрофотометрический анализы, с помощью которых в пробах определялось содержание ионов Cu^{2+} , Fe^{2+} и Fe^{3+} . В конце опытов в ячейках контролировалась концентрация *Th. ferrooxidans*. Всюду она составила около 10^7 клеток/мл, свидетельствуя развитие бактерий и протекание бактериального окисления минеральных смесей.

¹ Содержит в 700 мл H_2O 3 г $(NH_4)_2SO_4$; 0,5 г $MgSO_4$; 0,5 г K_2HPO_4 ; 0,1 г KCl ; 0,001 г $Ca(NO_3)_2$.

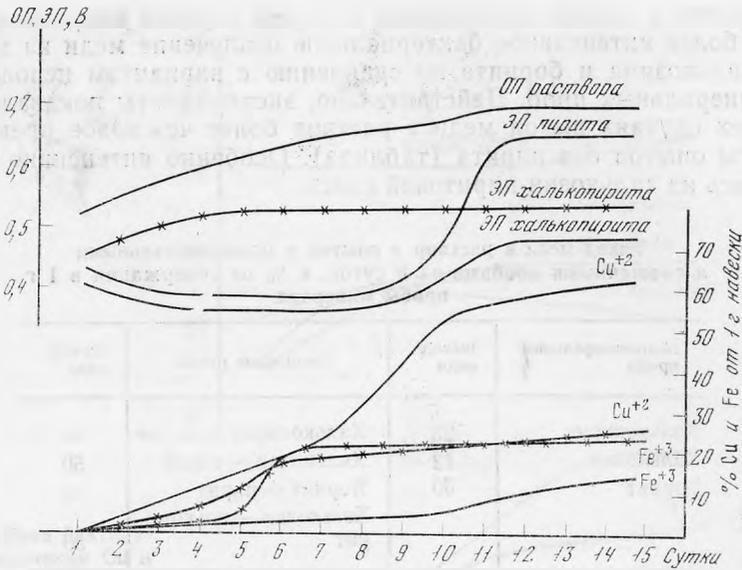


Рис. 1. Графики бактериального извлечения Cu и Fe из смеси халькопирит — пирит

+ — графики для опыта с мономинеральным халькопиритом

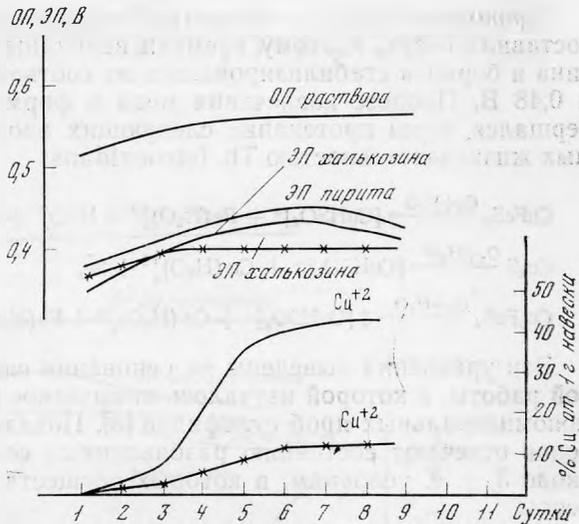


Рис. 2. Графики бактериального извлечения Cu и Fe из смеси халькозин — пирит

+ — графики для опыта с мономинеральным халькозином

При анализе полученных результатов были использованы данные ранее выполненных экспериментов по химическому и бактериальному окислению мономинеральных проб халькопирита, халькозина и борнита [5].

Среди четырех экспериментальных пар сульфидов три были «пиритовыми», содержащими в качестве одного минерала-партнера пирит. Результаты этих трех экспериментов представлены на рис. 1, 2 и 3. Во всех случаях ОП культурального раствора, т. е. раствора с *Th. ferrooxidans*, находился на уровне 0,6—0,7 В, свидетельствующем о высокой окислительной возможности бактериальной среды. Величины ЭП сульфидов были значительно меньше ОП раствора.

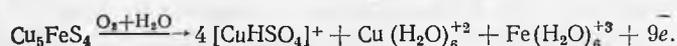
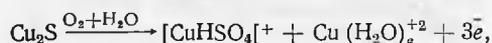
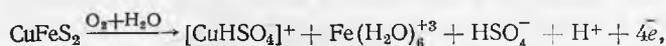
В пиритовых парах ЭП пирита на протяжении опытов был постоянно выше ЭП любого медьсодержащего сульфидного партнера, так что каждая двойная смесь сульфидов представляла собой гальваническую пару с пиритовым катодом. Медный сульфид-партнер в любой из этих пар играл роль анода и подвергался, помимо бактериального окисления, коррозионному (анодному) разложению.

Описанная модель сульфидных пар уже заранее позволяла предполагать более интенсивное бактериальное извлечение меди из халькопирита, халькозина и борнита по сравнению с вариантом использования мономинеральных проб. Действительно, эксперименты показали, что во всех трех случаях выход меди в раствор более чем вдвое превысил результаты опытов без пирита (таблица). Особенно интенсивно медь извлекалась из халькозин-пиритовой смеси.

Выход меди в раствор в опытах с мономинеральными и смешанными пробами за 8 суток, в % от содержания в 1 г пробы минерала

Мономинеральные пробы	Выход меди	Смешанные пробы	Выход меди
Халькопирит	25	Халькопирит — пирит	60
Халькозин	12	Халькозин — пирит	50
Борнит	30	Борнит — пирит	50
		Халькозин—халькопирит	50

Продолжительность экстрагирования меди из сульфидов в среднем составила 8 сут. К этому времени величины ЭП халькопирита, халькозина и борнита стабилизировались на соответственных уровнях 0,45, 0,42 и 0,48 В. Процесс извлечения меди в форме двухвалентных ионов совершался через протекание следующих анодных реакций, стимулируемых жизнедеятельностью *Th. ferrooxidans*:



Эти уравнения выведены на основании специальной экспериментальной работы, в которой изучалось химическое и бактериальное окисление мономинеральных проб сульфидов [5]. Показанные в уравнениях формы ионов отвечают состоянию разбавленных сернокислых растворов с рН около 3, т. е. условиям, в которых осуществлялись настоящие эксперименты.

Электроны анодных реакций в каждом опыте распределялись на два катода: пирит и бактериальные клетки, очевидно, при преимущественной направленности их в сферу более активного «живого катода».

С помощью последнего (четвертого) эксперимента изучалось бактериальное извлечение меди из халькозин-халькопиритовой смеси (рис. 4). Оба сульфида в отдельности характеризуются умеренным выходом меди в раствор (соответственно 12 и 25% от содержания меди в 1 г минерала — см. таблицу). Когда же халькозин и халькопирит были смешаны друг с другом, выход меди в раствор возрос до 50% от ее содержания в 1 г смешанной пробы.

Как и в предыдущих опытах, в парной смеси халькопирит — халькозин роль катода частично выполнял более высокопотенциальный халькопирит, хотя значение бактерий было ощутимее, так как в ходе эксперимента разрушались оба сульфида. На окисление халькопирита указывало накопление в растворе ионов Fe^{3+} , источником которых был только халькопирит. Количество железа, накопившегося в культуральной жидкости, позволило произвести ориентировочный расчет содержания в ней халькопиритовой меди. Этот расчет показал, что в бактери-

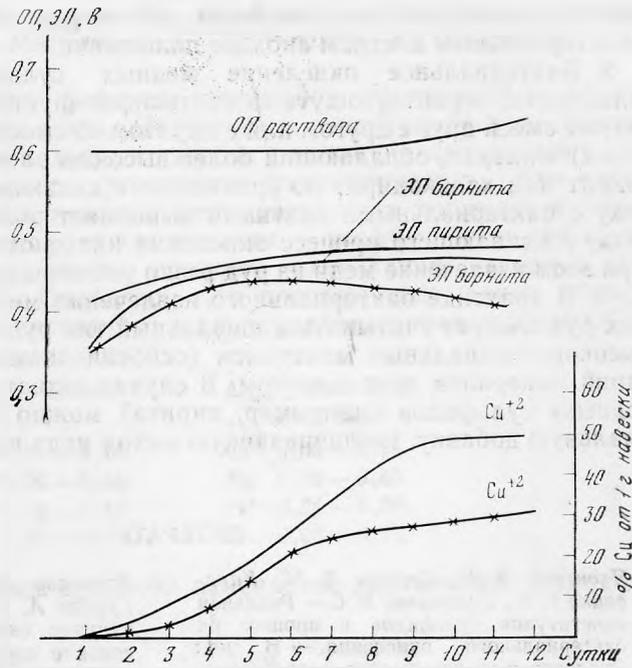


Рис. 3. Графики бактериального извлечения Си и Fe из смеси борнит — пирит

+ — графики для опыта с мономинеральным борнитом

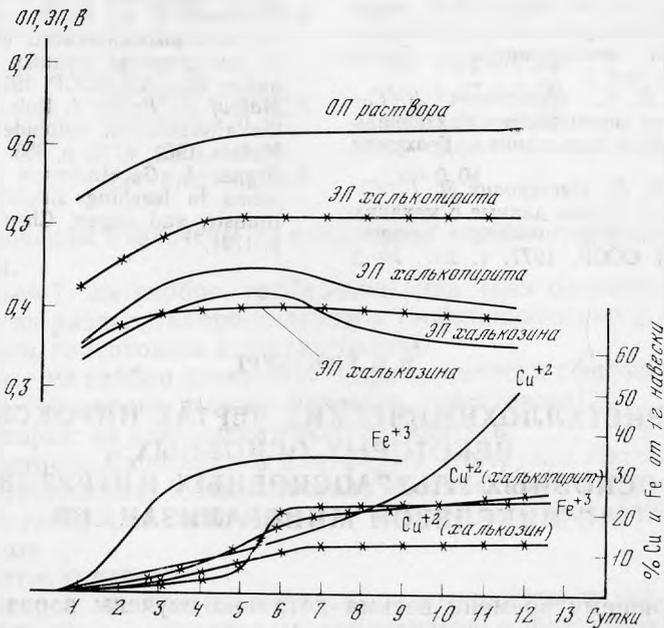


Рис. 4. Графики бактериального извлечения Си и Fe из смеси халькозин — халькопирит

+ — графики для опытов с мономинеральными сульфидами

альном растворе несколько преобладала халькозиновая медь. Следовательно, с помощью *Th. ferrooxidans* халькозин окисляется значительно интенсивнее, если он смешан с халькопиритом.

Результаты, полученные на основании проделанной экспериментальной работы, позволяют сделать следующие выводы:

1. Окисление сульфидных минералов с помощью *Th. ferrooxidans* происходит по законам электродных (коррозионных) процессов, в которых

сульфид, отдающий при окислении электроны, занимает по отношению к бактериальным клеткам анодное положение.

2. Бактериальное окисление медных сульфидов (халькопирита, халькозина, борнита) ощутимо интенсифицируется, когда минералы образуют смеси друг с другом или с пиритом. В смесях (в полиминеральных рудах) минерал, обладающий более высоким электродным потенциалом (пирит или халькопирит по сравнению с халькозином и борнитом), наряду с бактериальными клетками выполняет роль дополнительного катада, усиливающего процесс окисления низкопотенциального минерала. При этом извлечение меди из руд резко увеличивается.

3. В практике бактериального извлечения меди из медных сульфидных руд следует учитывать минеральный тип руды, наличие в ее составе высокопотенциальных минералов (особенно немедных), характер сочетаний минералов друг с другом. В случае нехватки в составе руды «катодных» сульфидов (например, пирита) можно рекомендовать их специальную добавку, увеличивающую выход меди в раствор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яхонтова Л. К., Сергеев В. М., Каравайко Г. И., Суханцева В. С.— Реальная конституция сульфидов и процесс их бактериального окисления.— В кн.: Экология и геохимическая деятельность микроорганизмов. Пущино, 1976.
2. Яхонтова Л. К., Каравайко Г. И. Геохимическая деятельность микроорганизмов на рудных месторождениях.— Вестн. МГУ, 1977, вып. 1.
3. Яхонтова Л. К., Нестерович Л. Г.— О механизме химического и бактериального окисления халькозина.— Геохимия, в. 8, 1978.
4. Яхонтова Л. К., Нестерович Л. Г., Суханцева В. С. Новые данные о механизме бактериального окисления минералов.— ДАН СССР, 1977, т. 237, № 2.
5. Яхонтова Л. К., Нестерович Л. Г., Грудев А. П., Суханцева В. С. О механизме окисления сульфидов меди в связи с проблемой бактериального выщелачивания руд.— Изв. вузов. Сер. геол. и разведка, 1979, № 2.
6. Яхонтова Л. К., Грудев А. П. Проблема электрохимического фактора в зоне гипергенеза рудных месторождений.— Изв. АН СССР, 1974, № 6.
7. Malouf E., Prater I. Role of bacteria in the alteration of sulphide minerals.— J. Metals, 1961, v. 13, p. 353.
8. Bryner L. G., Anderson R. Mikroorganisms in leaching sulphide minerals.— Industr. and engen. Chem., 1957, v. 49, p. 1721.

И. В. ГИНЗБУРГ

О КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКИХ ЧЕРТАХ ПИРОКСЕНОВ НЕКОТОРЫХ ОСНОВНЫХ И ОСНОВНЫХ-УЛЬТРАОСНОВНЫХ ИНТРУЗИВОВ С НИКЕЛЕВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИЕЙ

К настоящему времени весьма детально изучены в разной степени дифференцированные («расслоенные») интрузивы, сложенные горными породами, основного или основного-ультраосновного рядов (по химической классификации), сопровождаемые сульфидно-медно-никелевой минерализацией.

Преобладающими и петрогенетически наиболее важными минералами этих горных пород и образованных ими интрузивов являются пироксены, переменный состав которых дает весьма существенные и разнообразные сведения о вероятных ($P-T$)-условиях и связанных с ними возможных путях формирования горных пород и интрузивов в целом.

Ниже обсуждаются пределы содержания катионов в формулах пироксенов из нескольких никеленосных интрузивов трех районов СССР: