

УДК 66.061.34+579.66

В.Е. Кунгурова

**МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЙ И ВЕЩЕСТВЕННЫЙ
СОСТАВ СУЛЬФИДНОЙ РУДЫ, ИСПОЛЬЗОВАННОЙ
В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО БАКТЕРИАЛЬНО-
ХИМИЧЕСКОМУ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЮ
(МЕСТОРОЖДЕНИЕ ШАНУЧ, КАМЧАТКА)**

Выполнены исследования минералогического состава сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч (Камчатка), используемой в экспериментах по изучению процесса бактериально-химического выщелачивания этих руд. Проведен анализ данных минералогического состава исходной руды и твердой фазы пульпы, полученной по окончании эксперимента на момент установления стабильного уровня извлечения металлов.

Ключевые слова: бактериально-химическое выщелачивание, сульфидные минералы, биореактор, исходная руда, твердая фаза.

Для изучения бактериально-химических процессов выщелачивания сульфидных кобальт-медно-никелевых руд месторождения Шануч и с целью последующей разработки технологических схем и регламента проведена серия экспериментов. В данной статье рассмотрены материалы, полученные по экспериментам 5, 6.

Характеристика исходной руды. Для эксперимента 5 [1] использовался материал из рудного склада. Из большеобъемной пробы ТП(БХВ)-37, вес которой составлял 51,2 кг, методом кольца и конуса и квартования отобраны и подготовлены для исследований пробы исходной руды: ИР-5 и ИР-5/1. Проведен минералогический анализ, затем руда была издроблена и истерта до 100 мкм, материал пробы отправлен на химический анализ и подвергнут бактериально-химическому выщелачиванию [2].

Руды преимущественно массивные, брекчиевидные, реже прожилково-вкрапленные и вкрапленные; имеют идиоморфно-зернистую, гипидиоморфнозернистую, интерстициальную структуры, распада твердого раствора [3].

Содержание рудных минералов колеблется от 40 до 75, во вкрапленных рудах – 5–10 %; вмещающие породы – меладiorиты зеленовато-серого цвета.

Под микроскопом в аншлифах, приготовленных из штучных образцов, установлена пирротин-пентландит-халькопиритовая парагенетическая ассоциация. Исходная сульфидная руда относится к комплексной, характеризуются взаимным проращением минералов и присутствием в кристаллической решетке минералов атомов других металлов: в пирротине – никеля, в пентландите – кобальта и меди, в халькопирите – кобальта, в пирите – никеля и кобальта. Главные рудные минералы: пирротин, пентландит, халькопирит, виоларит, пирит. Основным минералом является пирротин, содержание которого колеблется от 40 до 80 % от массовой доли рудных. В основном это его моноклинная разновидность, высокосернистая, обладающая магнитной восприимчивостью. Менее широко развиты пентландит, количество которого составляет 5–10 %, содержание халькопирита колеблется от 4 до 7 %, пирита – до 4 %.

Пирротин – $Fe_{1-x}S$ – образует крупные агрегаты, а также монозерна (до 2,0 мм) – изометричные, таблитчатые кристаллами свежего облика среди нерудных минералов: амфиболов, биотитов, пироксенов, кварца.

Пентландит – $(Fe,Ni)_9S_8$. В основном это выделения, состоящие из крупных, размером 0,5–1,0 мм, идиоморфных кристаллов, пластинчатых включений пентландита в пирротине. В зонах коррозии пирротина встречаются тонкие нитевидные прожилки пентландита. По пентландиту развивается виоларит.

Халькопирит – $CuFeS_2$ – представлен ксеноморфными выделениями, выполняющими интерстиции между зонами пентландита и пирротина.

Пирит – FeS_2 – представлен субгедральными и идиоморфными кристаллами величиной 0,2–1,0 мм. Встречается в виде тонких прожилков.

Минералогический и химический анализы проб исходной руды ИР-5 и ИР-5/1 приведены в табл. 1, 5.

Таблица 1

Содержания основных полезных компонентов в исходной руде (эксперимент 5)

| №.№ проб | Ni, % | Cu, % | Co, % | Fe ₂ O ₃ , % |
|--|-------|-------|-------|------------------------------------|
| ИР-5 | 4,52 | 0,68 | 0,110 | 33,15 |
| ИР-5/1 | 4,20 | 0,63 | 0,114 | 31,23 |
| <i>Примечание.</i> Атомно-абсорбционный анализ; прибор ААС-6300, химико-технологическая лаборатория НИГТЦ ДВО РАН. | | | | |

Для проведения эксперимента 6 использовался материал из большеобъемной пробы ТП(БХВ)-38, вес которой составлял 53,0 кг, для проведения эксперимента 6, методом кольца и конуса и квартования отобраны и подготовлены пробы исходной руды: ИР-6, ИР-6/1, ИР-6/2, ИР-6/3, ИР-6/4. Проведен минералогический анализ, затем руда была издроблена, истерта до 100 мкм, отправлена на химический анализ и на исследования по бактериально-химическому выщелачиванию.

Проба ИР-6. Текстура руд массивная, брекчиевидная, Содержание рудных минералов колеблется от 50 до 90 %. Под микроскопом в аншлифах установлено, что основной рудный минерал – пирротин, содержание его колеблется от 60 до 75 % от массовой доли рудных. Менее широко развиты пентландит, количество которого составляет в руде 20–25 %, виоларит – до 10 %. Халькопирит и пирит в рудах развиты ограниченно: халькопирит колеблется до 5 %, пирит – 3–5 %.

Пирротин представлен скоплениями таблитчатых и изометричных кристаллов размером до 1,5 мм. Кристаллы имеют свежий облик, иногда краевые части корродированы. В этих зонах расположены прожилки виоларита (FeNi_2S_4) мощностью до 0,06 мм. Крупные зерна пирротина содержат включения пентландита. Пентландит представлен трещиноватыми, неправильными зернами размером от 0,05 до 0,5 мм, с мелкими порами, зачастую выделения пентландита имеют оторочку виоларита. Виоларит, развивающийся преимущественно по пентландиту, характеризуется наличием примесей кобальта Халькопирит образует небольшие выделения, тяготеющие к интенсивно корродируемым обломкам вмещающей породы.

Пробы ИР-6/1, ИР-6/2, ИР-6/3, ИР-6/4. Материал представлен кусочками окисленной руды [4], с фрагментами неокисленных сульфидных минералов, вмещающей породы. Практически вся поверхность кусочков руды покрыта «корочкой» мощностью от 0,2 до 1,5 мм, сложенной окислами гидроокислами железа. Это лимонит, гетит, гидрогетит, лепидокрокит, ярозит и др. вторичные минералы. Окислы и гидроокислы железа составляют до 6–7 %.

Сульфидные рудные минералы: пирротин – от 40 до 70 % от массовой доли рудных, пентландит – до 10 %, халькопирит – 5–7 %.

Таблица 2

Содержания основных полезных компонентов в исходной руде (эксперимент 6)

| №№ проб | Ni, % | Cu, % | Co, % | Fe ₂ O ₃ , % |
|---------|-------|-------|-------|------------------------------------|
| ИР-6 | 6,26 | 0,99 | 0,174 | 41,35 |
| ИР-6/1 | 3,90 | 0,75 | 0,107 | 27,20 |
| ИР-6/2 | 3,58 | 0,64 | 0,095 | 25,93 |
| ИР-6/3 | 3,96 | 0,70 | 0,107 | 41,35 |
| ИР-6/4 | 3,93 | 0,61 | 0,102 | 30,38 |

Примечание. Атомно-абсорбционный анализ; прибор ААС-6300, химико-технологическая лаборатория НИГТЦ ДВО РАН.

Пирротин представлен крупными идиоморфными кристаллами. Промежутки между зернами пирротина и трещинки в нем заполнены агрегатом мелких ксеноморфных кристаллов пентландита. Пентландит также встречен в виде пламевидных, пластинчатых и линзовидных включений в кристаллах пирротина; по нему часто развивается виоларит. Халькопирит образует ксеноморфные выделения, цементирующие все ранее выделенные сульфидные минералы; в количественном отношении он уступает пирротину и пентландиту.

Минералогический и химический анализы проб исходной руды ИР-6 и ИР-6/1, ИР-6/2, ИР-6/3, ИР-6/4 приведены в табл. 2, 5.

Из нерудных в подавляющем большинстве во всех пробах, отобранных для 5 и 6 экспериментов, встречены ленточные алюмосиликаты со сдвоенными анионными цепочками, представленные группой амфиболов (роговая обманка, тремолит, актинолит). В несколько меньшем количестве присутствуют плагиоклаз, пироксены, кварц, биотит (табл. 5).

Условия проведения экспериментов. При проведении экспериментов 5,6 по бактериально-химическому выщелачиванию сульфидной руды была использована установка проточного типа [1], изготовленная в НИГТЦ ДВО РАН, состоящая из контактного чана, четырех последовательно соединенных биореакторов объемом 4,5 л каждый и приемной емкости. Использована мезофильная ассоциация бактерий; соотношение твердой фазы пульпы к жидкой – 1:5 по массе. В контактный чан загружена руда (измельчена до 100 мкм) и добавлена ми-

неральная среда Сильвермана-Люндгрена (9к) без железа, с рН=2,3. Эксперименты проходили при постоянной температуре 29–30°C, осуществлялась аэрация со скоростью 2 л/мин, перемешивание пульпы со скоростью 90–100 об/мин. Скорость подачи пульпы в каскад реакторов составляла 20,3 мл/мин, скорость протока в эксперименте 5 – 2700 мл/сут, в эксперименте 6–2000 мл/сут.

При описанных выше условиях экспериментов стабильный уровень извлечения никеля, меди, кобальта (по результатам атомно-абсорбционного анализа) фиксируется на на 27–28 сутки в эксперименте 5 и на 50 в эксперименте 6. Проведен минералогический анализ твердой фазы (кека) проб, отобранных в период до начала стабилизации, после , а в эксперименте 6 и в конце. Это пробы 17.08.15; 27.08.15 (эксперимент 5); пробы 24; 55; 81 (эксперимент 6).

Характеристика твердой фазы, выделенной из пульпы по окончании экспериментов. Перед началом детального изучения минерального состава твердой фазы (кека) была проведена подготовка ее к анализу. Она включала разделение пульпы, полученной по окончании экспериментов, на жидкую и твердую части. Затем был проведен седиментационный анализ твердой фазы (разделение по плотности и размеру), а в последующем магнитная сепарация полученной тяжелой фракции.

Твердая минеральная фаза после выщелачивания представляет собой продукт, в котором содержатся частицы рудных, нерудных минералов и продуктов их разложения. Плотность основных минералов, которые присутствуют в пробах, приведена в табл. 3.

Таблица 3

Значения плотности минералов

| Минералы | Плотность ρ (г/см ³) |
|-------------|---------------------------------------|
| Пирротин | 4,58–4,65 |
| Пирит | 4,9–5,2 |
| Халькопирит | 4,1–4,3 |
| Пентландит | 4,5–5,0 |
| Пироксены | 3,15–3,9 |
| Амфиболы | 2,8–3,42 |
| Кварц | 2,65 |
| Плагиоклазы | 2,5–2,75 |

Таблица 4

Результаты седиментационного анализа и магнитной сепарации проб, выделенных из твердой фазы пульпы по окончании экспериментов

| №.№ п/п | №.№ проб | Результаты анализов | | | | Сумма |
|----------------------|----------|-------------------------|------------------------|-------|------------------------|-------|
| | | Тяжелая фракция, вес. % | | | Легкая фракция, вес. % | |
| | | Фракции по магнитности | | | | |
| | | Магнитная | Эл/магнит+ немагнитная | Всего | | |
| <i>Эксперимент 5</i> | | | | | | |
| 1 | 17.08.15 | 38,4 | 48,6 | 87,0 | 13,0 | 100,0 |
| 2 | 27.08.15 | 35,1 | 45,0 | 80,1 | 19,9 | 100,0 |
| <i>Эксперимент 5</i> | | | | | | |
| 3 | 6-24 | 46,1 | 33,5 | 80,7 | 19,3 | 100,0 |
| 4 | 6-55 | 24,6 | 50,8 | 75,4 | 24,6 | 100,0 |
| 5 | 6-81 | 23,6 | 58,3 | 79,9 | 19,1 | 100,0 |

Магнитная сепарация проведена с помощью магнита Сочнева. Результаты приведены в табл. 4.

Изучение минерального состава проб, выделенных из твердой фазы пульпы по окончании экспериментов, показало, что магнитная фракция нацело представлена пирротином (табл. 5). Очертания зерен пирротина часто неровные, зазубренные. Поверхность кристаллов окислена; покрыта слоем окислов-гидроокислов железа. В электромагнитной фракции доминируют лимонит, амфиболы, пироксены, слюды (биотит, флогопит), самородная сера; из рудных сульфидных минералов встречены единично, либо до 1 %, пентландит, халькопирит, немагнитный гексагональный пирротин. Лимонит представляет собой не чистый минерал лимонит, а смесь минералов железа – оксидов и гидроксидов: лимонит + гетит + гидрогетит + лепидокрокит + ярозит. Встречен в форме рыхлых комочков неправильной формы, легко рассыпающихся при нажатии иглой на неравномерно окрашенные частицы желтого, бурого, коричнево-красного цвета; а также в виде плоских корочек, пластинок неправильной формы темно-вишневого, коричневого цвета, со стекловидной ровной поверхностью с одной стороны и натечной, шероховатой, неровной, с другой. К ним,

Таблица 5
Результаты минералогического анализа исходной руды и твердой фазы, выделенной из пульпы по окончании экспериментов

| Минералы | Содержание, масс. % | | | | | | | | | | |
|---|----------------------------|--------|---------------------------|----------|----------------------------|------|---------------------------|---------------|------|------|------|
| | Исходная руда, номер пробы | | Твердая фаза, номер пробы | | Исходная руда, номер пробы | | Твердая фаза, номер пробы | | | | |
| | ИР-5 | ИР-5/1 | Эксперимент 5 | 17.08.15 | 27.08.15 | ИР-6 | ИР-6/1,2,3,4 | Эксперимент 6 | 6-24 | 6-55 | 6-81 |
| Пирротин | 44,5 | 42,2 | 36,5 | ед. | 33,2 | 53,1 | 39,4 | 43,2 | 22,3 | 19,3 | ед. |
| Пентландит+виоларит | 6,3 | 5,0 | ед. | ед. | ед. | 7,2 | 4,3 | 0,5 | 0,1 | ед. | |
| Халькопирит | 6,1 | 4,3 | <1 | ед. | ед. | 5,2 | 4,7 | 0,5 | 0,2 | до 1 | |
| Пирит+марказит | 3,9 | 3,8 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 4,4 | 3,6 | ед. | ед. | ед. | |
| Герсдорфит | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | |
| Арсенопирит | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | |
| Амфиболы | 13,4 | 14,1 | 13,7 | 18,5 | 18,5 | 10,2 | 19,0 | 14,1 | 18,9 | 24,6 | |
| Пироксены | 6,1 | 5,7 | 6,0 | 6,5 | 6,5 | 3,7 | 7,3 | 6,1 | 6,2 | 5,5 | |
| Плагиоклазы | 10,4 | 12,3 | 7,8 | 4,9 | 4,9 | 9,1 | 15,3 | 7,1 | 10,4 | 8,7 | |
| Бистит + флогопит | 3,7 | 4,1 | 4,5 | 5,3 | 5,3 | 2,9 | 3,6 | 2,0 | 3,7 | 2,9 | |
| Кварц | 3,2 | 4,4 | 4,2 | 4,7 | 4,7 | 1,1 | 7,1 | 4,9 | 5,3 | 7,0 | |
| Тальк | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | |
| Сфен | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | |
| Рутил | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | |
| Хлорит | 2,6 | 2,9 | 1,5 | 0,7 | 0,7 | 2,1 | 1,5 | ед. | ед. | 1,9 | |
| Циркон | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | |
| Апатит | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | |
| Лимонит* | ед. | 1,2 | 23,6 | 25,7 | 25,7 | ед. | 6,2 | 18,5 | 29,4 | 25,6 | |
| Ковеллин+халькозин | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | |
| Аннабергит | ед. | ед. | 0,5 | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | |
| Малахит | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | |
| Моренозит | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | |
| Сера самородная | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | |
| Примечание. * | ед. | ед. | 1,2 | 2,0 | 2,0 | ед. | ед. | 3,1 | 2,5 | 3,5 | |
| Лимонит+гетит+гидрогетит+лепидокрокит+ярозит. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | ед. | |

как правило, «прилеплены» рыхлые лимонитовые массы. Лимонит первого типа (рыхлая комковатая масса) преобладает в пробах твердой фазы, выделенной из пульпы в 6 эксперименте (6-24, 6-55, 6-81).

Немагнитная фракция состоит из плагиоклазов, кварца. Сюда же попало некоторое количество более мелких по размеру, чем основная часть пробы, амфиболов, слюды, немагнитный гексагональный пирротин.

Выводы. В ходе проведения экспериментов сульфидные минералы под действием бактерий окисляются. Процесс их разрушения зафиксирован в изменении минералогического состава проб. Количество пирротина, который является доминирующим в этих рудах, уменьшается в 2,8 раза к окончанию эксперимента. При этом увеличивается содержание окислов и гидроокислов железа с нуля до 25,7 % в 5 эксперименте и с первых процентов до 29,4 % в 6 эксперименте. Появляются в минеральном составе твердой фазы пульпы такие минералы, как лимонит, гетит, гидрогетит, лепидокрокит, ярозит и др. Пентландит и халькопирит входят в состав исходной руды в незначительных количествах, всегда менее 10 % и хоть являются более упорными и трудно выщелачиваемыми сульфидными минералами (по сравнению с пирротином) при помощи бактерий, в конце эксперимента их остается менее 1 %. На поверхностях всех оставшихся после бактериально-химического процесса сульфидных минералов наблюдается слой перечисленных выше окислов-гидроокислов железа в виде рыхлых налетов, пленок, корочек разной мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киореску А.В., Мусихин В.О., Хомченкова А.С., Балыков А.А. Исследование чанового бактериально-химического выщелачивания сульфидных медно-никелевых руд месторождения Шануч (Камчатка) в проточном режиме. ГИАБ. «Камчатка-2» (специальный выпуск). 2015. С. 360–365.

2. Хайнасова Т.С., Кунгурова В.Е. Позолотина Л.А., Балыков А.А., Левенец О.О. Биовыщелачивание сульфидной кобальт-медно-никелевой руды месторождения Шануч различными культурами аборигенных микроорганизмов // ГИАБ № 11, Специальный выпуск № 63 «Камчатка-2». 2015. С. 297–304.

3. Трухин Ю.П., Степанов В.А., Сидоров М.Д., Кунгурова В.Е. Шанучское медно-никелевое месторождение: геолого-геофизическая модель, состав и геохимия руд // Руды и металлы. 2009. № 5. С. 75–81.

4. Кунгурова В.Е., Трухин Ю.П., Алискеров А.А. Структурно-текстурные и минералогические особенности зоны окисления рудного тела № 1 месторождения Шануч (Камчатка) // ГИАБ № 11, Специальный выпуск № 31 «Камчатка-3». 2016. С. 56–71. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Кунгурова Валентина Егоровна – кандидат геолого-минералогических наук, заведующая лабораторией геохимии и геотехнологии, kunwe@rambler.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН.



UDC 66.061.34+579.66

MINERALOGICAL AND MINERAL COMPOSITION OF SULFIDE ORE USED IN THE EXPERIMENTS OF BACTERIAL-CHEMICAL LEACHING (SHANUCH DEPOSIT, KAMCHATKA)

Kungurova V.Ye., Candidate of Geological-Mineralogical Sciences, Leading Researcher, kunwe@rambler.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy Sciences, Russia.

The investigations of mineralogical composition of the sulfide cobalt-copper-nickel ore from Shanuch deposit (Kamchatka) used in the experiments to study the process of bacterial-chemical leaching of these ores were done. Data analysis of the mineralogical composition of head ore and solid phase of the pulp obtained at the end of the experiment at the time of the establishment of a stable level of metals extraction was carried out.

Key words: bacterial-chemical leaching, sulfide minerals, bioreactor, head ore, solid phase.

REFERENCES

1. Kioresku A.V., Musihin V.O., Homchenkova A.S., Balykov A.A. *Issledovanie chanovogo bakterial'no-himicheskogo vyshchelachivaniya sul'fidnyh medno-nikelevykh rud mestorozhdeniya SHanuch (Kamchatka) v protochnom rezhime* (Study heaps bacterial-chemical leaching of sulfide copper-Nickel ore deposits chanoch (Kamchatka) in flow-through mode). *GIAB. «Kamchatka-2» (special'nyj vypusk)*. 2015. pp. 360–365.
2. Hajnasova T.S., Kungurova V.E. Pozolotina L.A., Balykov A.A., Levenec O.O. *Biovyshchelachivanie sul'fidnoj kobalt-medno-nikelevoj rudy mestorozhdeniya SHanuch razlichnymi kul'turami aborigennyh mikroorganizmov* (Bioleaching of sulphide cobalt-copper-Nickel ore deposits Sanus different cultures of indigenous microorganisms) // *GIAB No 11, Special'nyj vypusk No 63 «Kamchatka-2»*. 2015. pp. 297–304.
3. Truhin Yu.P., Stepanov V.A., Sidorov M.D., Kungurova V.E. *SHanuchskoe medno-nikelevoe mestorozhdenie: geologo-geofizicheskaya model', sostav i geohimiya rud* (Shanuchskoye copper-Nickel Deposit: geological-geophysical model, the composition and Geochemistry of ores) // *Rudy i metally*. 2009. No 5. pp. 75–81.
4. Kungurova V.E., Truhin Yu.P., Aliskеров А.А. *Strukturno-teksturnye i mineralogicheskie osobennosti zony okisleniya rudnogo tela № 1 mestorozhdeniya SHanuch (Kamchatka)* (Structural-textural and mineralogical features of the oxidation zone of ore body No. 1 field chanoch (Kamchatka)) // *GIAB No 11, Special'nyj vypusk No 31 «Kamchatka-3»*. 2016. pp. 56–71.