

СУЛЬФИДНЫЕ МИНЕРАЛЫ ИЗ РУДОПРОЯВЛЕНИЙ МЕДИСТЫХ ПЕСЧАНИКОВ ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ

Комарова А. Г.^{1,3}, Чикишева Т. А.^{1,2,3}, Прокопьев Е. С.^{1,2}, Прокопьев С. А.^{1,2}

¹ ООО НПК «Спирит», Иркутск

² Институт земной коры СО РАН, Иркутск

³ Иркутский государственный университет, Иркутск

Введение

Медистые песчаники являются одним из десяти типов промышленных месторождений меди, который имеет высокое значение в общем балансе запасов меди не только в России, но и за рубежом. Забайкальский край является единственным субъектом в РФ, на территории которого выделяется геолого-промышленный тип месторождений медистых песчаников. Запасы меди Забайкальского края составляют почти четверть от общих российских запасов [5]. Также кроме крупных запасов меди в них сосредоточены запасы золота и серебра.

Изучение взаимоотношений породообразующих и рудных минералов имеет большое значение при проведении поисково-оценочных работ, предварительной разведки и для создания технологии разработки месторождения. Текстурно-структурные характеристики руды и характер вкрапленности определяют технологические типы сростков и динамику раскрытия минералов при измельчении руды [6], поэтому изучение структурных взаимоотношений минералов способствует разработке эффективной технологии переработки минерального сырья.

Материалы и методы

Объектом исследований в данной работе послужила усредненная технологическая проба руды, относящаяся к промышленному типу медистых песчаников и алевролитов [4], в которой попутными ценными компонентами выступают золото и серебро.

Минералого-технологическое изучение руды проведено в минералогическом отделе ООО НПК «Спирит». Работа осуществлялась в соответствии с методическими руководствами Научного совета по методам минералогических исследований (НСОММИ) [1, 2, 3] с применением бинокулярного стереомикроскопа Микромед MC-2-ZOOM 2CR, сканирующего электронного микроскопа

MIRA3 LMN TESCAN в центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» ИГХ СО РАН и поляризационного микроскопа Olympus BX53-F в научно-учебной лаборатории экспериментальной геологии геологического факультета ИГУ. Рентгенографический анализ выполнялся в центре коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН на дифрактометре ДРОН-3.0.

Результаты и обсуждение

При визуальном анализе образцов руды было установлено, что они представлены изменёнными осадочными образованиями, рассеченными кварцевыми прожилками, с которыми ассоциирует медно-сульфидная минерализация. Сульфиды меди – борнит и халькопирит находятся в тесном сростании друг с другом и визуализируются в виде вкраплений, гнёзд и прожилков.

Оптико-микроскопические исследования показали, что вмещающие породы представлены мелкозернистыми аркозовыми метапесчаниками – однородными массивными или слабо сланцеватыми, иногда слоистыми (рис. 1). В минеральном составе преобладают кварц и измененный калиевый полевой шпат, замещённый мусковитом и глинистыми минералами. Плагиоклазы, мусковит и хлорит имеют второстепенное значение. Зёрна главных минералов имеют сложный характер границ. Хлорит обнаружен в образцах в виде редко встречающихся отдельных чешуй и листоватых агрегатов. Порода пронизана кварцевыми жилами – в основном они сложены среднезернистым гранобластовым кварцем. Кальцит наблюдается в зонах контакта метапесчаника с кварцевыми жилами и в самих жилах (рис. 2). Редко обнаруживается гидротермальный халцедон.

Сульфидная минерализация связана с прожилками кварцевого состава, а также проявлена в виде рассеянных гнёзд и вкраплений

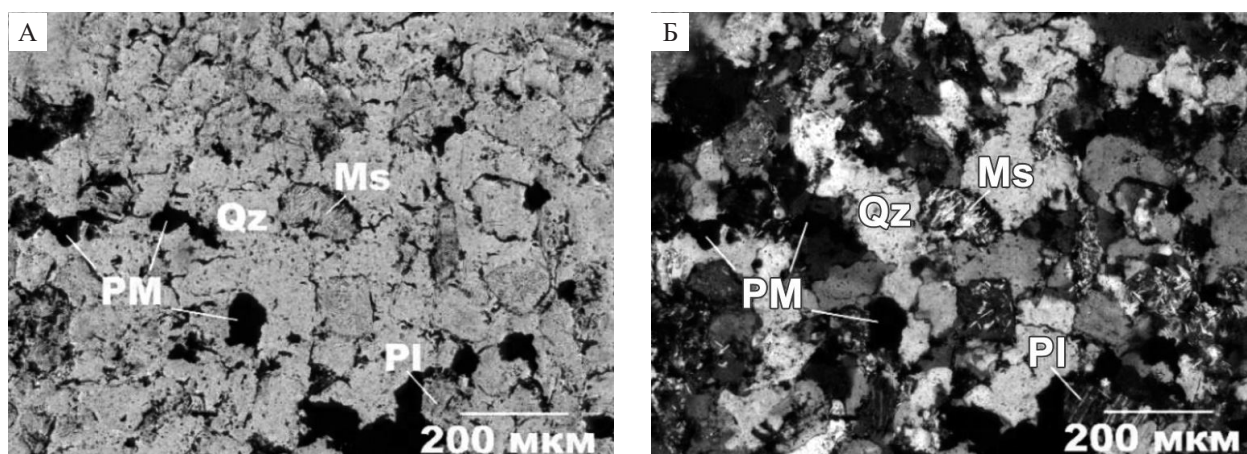


Рис. 1. Микрофотографии фрагмента кварцевого песчаника с массивной текстурой в проходящем свете. А – анализатор выключен, Б – анализатор включен. Qz – кварц, Pl – плагиоклаз, Ms – мусковит, PM – рудный минерал

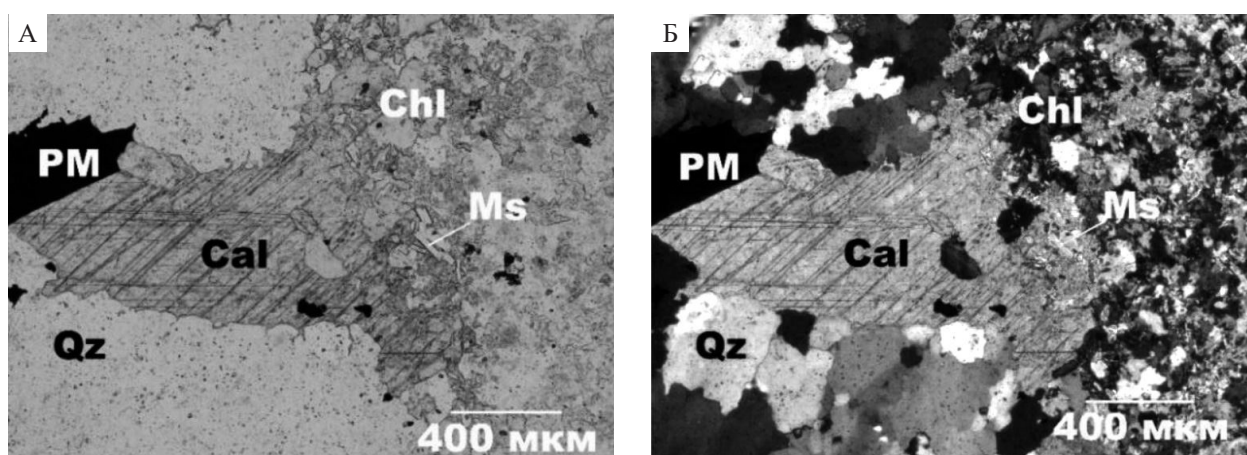


Рис. 2. Микрофотографии фрагмента зоны контакта метапесчаника с кварцевым прожилком в проходящем свете. А – анализатор выключен, Б – анализатор включен. Qz – кварц, Cal – кальцит, Chl – хлорит, Ms – мусковит, PM – рудный минерал

в метапесчанике. Рудные минералы представлены в основном халькопиритом и борнитом, в подчинённом количестве – халькозином, ковеллином, сфалеритом и галенитом.

Халькопирит и борнит заполняют интерстиции нерудных минералов и трещины в кварцевых жилах и находятся в тесном срастании друг с другом. Также халькопирит образует тонкую ламеллярную решётку в борните и эмульсионную вкрапленность в сфалерите (рис. 3 В). Иногда вокруг зёрен халькопирита и борнита, а также по зонам деформации наблюдается тонкая ковеллиновая кайма (рис. 3 А). У борнита помимо ковеллиновых кайм прослеживаются халькозиновые каймы (рис. 3 Б). Редко в борните визуализируются включения галенита. Зачастую внутри выделений халькопирита и борнита присутствуют обособления породообразующих минералов (рис. 3 Г).

Описанные выше структурные взаимоотношения и формы выделения минералов руды позволяют предположить, что при ее измельчении будут образовываться различные по качеству сростки рудных минералов с породообразующими, а достичь селективного раскрытия рудных минералов можно только при проведении операций тонкого измельчения.

Электронно-микроскопические и микрозондовые исследования подтвердили данные оптико-минералогического анализа, а также позволили оценить элементные составы основных рудных минералов. Как видно из таблицы 1, содержания элементов в халькопирите и борните выдержанны и близки к стехиометрическим показателям. В халькопирите были установлены редкие включения молибденита размером около 3 мкм.

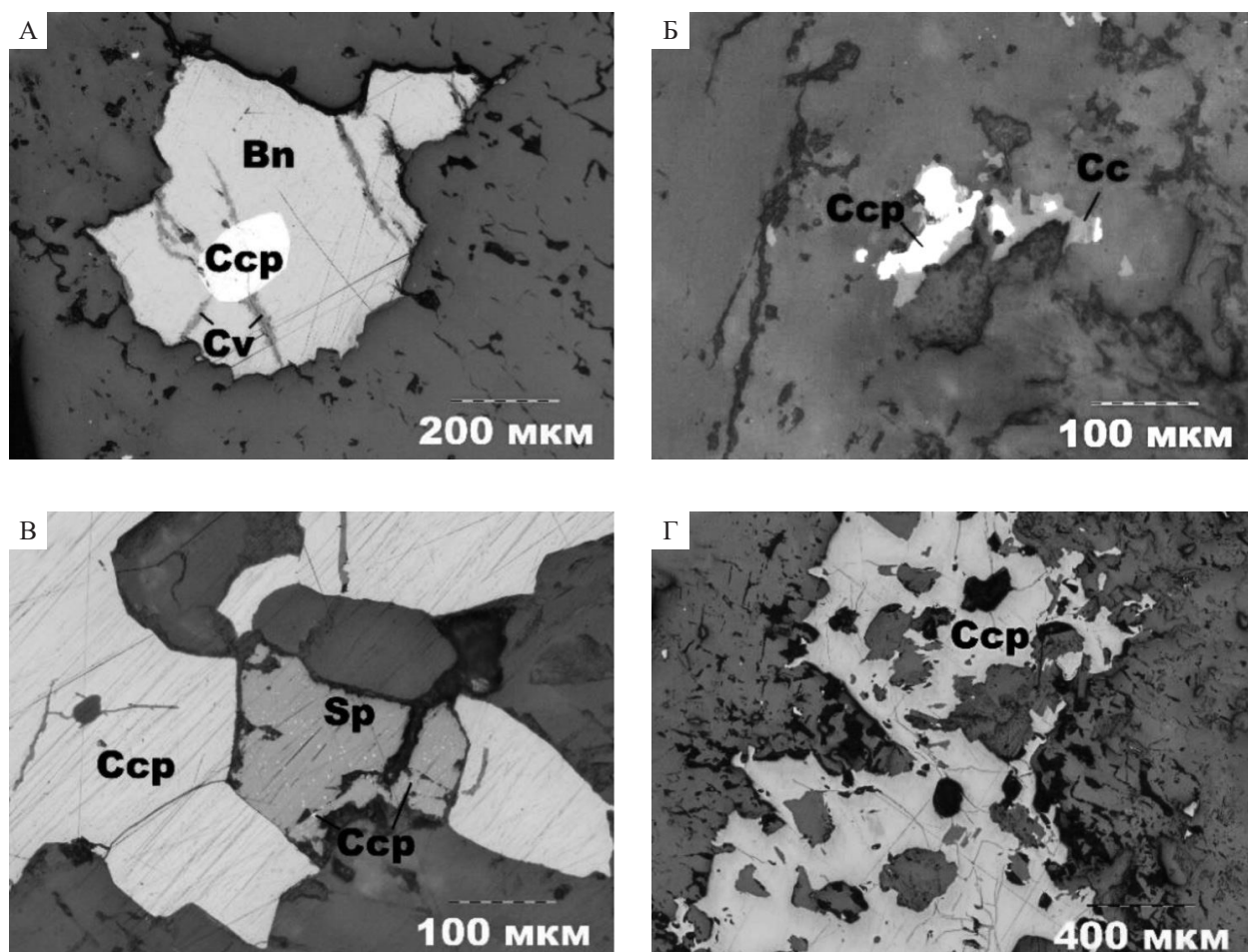


Рис. 3. Микрофотографии выделений рудных минералов. Отражённый свет, анализатор выключен. А – развитие халькозина по халькопириту, Б – срастания борнита с халькопиритом и ковеллином, В – обособления порообразующих минералов в халькопирите, Г – эмульсионная вкрапленность халькопирита в сфалерите. Вн – борнит, Сср – халькопирит, Св – ковеллин, Сс – халькозин, Ср – сфалерит

Таблица 1

Элементный состав борнита и халькопирита, мас. %

№ измерения	Cu	Fe	S	Сумма	Формула
Борнит					
1	61.90	11.06	25.70	98.66	$\text{Cu}_{4.86}\text{Fe}_{0.99}\text{S}_4$
2	62.21	11.02	25.60	98.83	$\text{Cu}_{4.90}\text{Fe}_{0.99}\text{S}_4$
3	61.41	10.59	25.72	97.72	$\text{Cu}_{4.82}\text{Fe}_{0.95}\text{S}_4$
4	61.62	10.74	25.67	98.03	$\text{Cu}_{4.84}\text{Fe}_{0.96}\text{S}_4$
5	59.39	12.68	26.85	98.92	$\text{Cu}_{4.46}\text{Fe}_{1.08}\text{S}_4$
6	60.39	12.53	26.51	99.43	$\text{Cu}_{4.60}\text{Fe}_{1.09}\text{S}_4$
Халькопирит					
7	33.97	30.23	34.71	98.91	$\text{Cu}_{0.99}\text{Fe}_{1.00}\text{S}_2$
8	34.11	30.56	33.86	98.53	$\text{Cu}_{1.02}\text{Fe}_{1.04}\text{S}_2$
9	33.75	29.81	34.25	97.81	$\text{Cu}_{0.99}\text{Fe}_{1.00}\text{S}_2$
10	33.84	29.80	34.15	97.79	$\text{Cu}_{1.00}\text{Fe}_{1.00}\text{S}_2$
11	33.49	29.30	33.43	96.22	$\text{Cu}_{1.01}\text{Fe}_{1.01}\text{S}_2$

Оптико-минералогический анализ дроблёной руды показал, что породообразующие минералы (кварц, полевые шпаты, карбонаты и слюды) составляют основную массу пробы – 90.9%. Преобладающими рудными минералами являются халькопирит (2.4%) и борнит (5.5%), в подчинённом количестве находятся галенит, сфалерит и арсенопирит. Вторичные минералы меди представлены халькозином, ковеллином и малахитом. В единичных зёрнах отмечено присутствие самородного золота. При проведении минералогических исследований минералы серебра в изучаемой навеске не обнаружены. Однако рациональный (фазовый) анализ руды на золото и серебро показал, что содержание золота в пробе составляет 0.27 г/т, а содержание серебра – 111.62 г/т. Серебро в данной руде может содержаться форме сульфосолей или в виде примеси в самородном золоте и в сульфидных минералах. Для диагностики форм нахождения серебра необходимо более детальное изучение руды.

После измельчения руды также была проведена классификация сростков основных минералов меди (халькопирита и борнита) открытого типа – разделение выполнялось путём визуального определения их сростаний между собой и с породообразующими минералами.

Сростковый анализ показал (таблица 2), что основная масса сульфидов меди находится в сростании с породообразующими минералами. Чаще всего сростки сульфидов меди представляют собой полиминеральные сростания со слюда-полевошпат-кварцевыми агрегатами. В меньшей количестве обнаружены биминеральные сростки с кварцем, слюдами и малахитом. Сростки рудных минералов (халькопирита и борнита) с породообразующими, в которых доля последних в зерне составляет более 80% распределяются в материал лёгкой фракции ($\rho < 2.89\%$). Такого типа сростания будут извлекаться в хвостовую часть при проведении операций гравитационного обогащения.

Таблица 2
Сростковый анализ минералов меди

Класс крупности, мм	Свободные зёрна, % отн		Типы сростков, % отн.									
	Сср	Вн	Сср+ Qz	Сср+ агр.	Сср+ Вн+агр.	Сср+ Вн+Qz	Сср+ слюда	Вн+ агр.	Сср+ Вн	Вн+ Qz	Вн+ Млс	Итого
–2+1	0.2	–	–	16.9	8.0	–	–	74.8	–	–	–	100
–1+0.5	2.3	–	–	6.6	7.9	0.4	0.2	82.7	–	–	–	100
–0.5+0.25	2.6	1.6	0.3	–	2.7	–	–	91.4	0.5	0.6	0.2	100
–0.25+0.125	3.1	2.7	1.4	–	2.6	0.5	–	81.9	3.3	4.5	–	100
–0.125+0.071	9.6	21.1	1.0	–	0.7	0.3	–	61.0	0.7	5.5	–	100
–0.071+0.040	17.4	31.1	0.9	–	–	–	–	49.6	–	1.0	–	100

Примечание: Сср – халькопирит; Вн – борнит; Qz – кварц; Млс – малахит; агр. – слюда-полевошпат-кварцевые агрегаты.

Анализ распределения рудных минералов (борнита и халькопирита) пробы по классам крупности показал (рис. 4), что сульфиды меди в основном распределяются в материал крупностью от 2 до 0.125 мм. Однако в этом диапазоне крупности основная масса сульфидов меди находится в виде сростков с породообразующими

минералами. Такого вида сростания в зависимости от качества будут распределяться в различные продукты при проведении гравитационного обогащения:

– Сростки, относящиеся к богатому и рядовому типам, преимущественно будут распределяться в материал тяжёлой фракции, что может

привести к разубоживанию получаемого концентрата при проведении операций гравитационного обогащения;

– Сростки, относящиеся к бедному типу и включениям, в основном сосредоточатся в мате-

риале лёгкой фракции – это понесёт за собой потерю ценных компонентов с хвостами гравитации.

Этот факт необходимо учесть при подборе технологической схемы обогащения исследуемого материала.

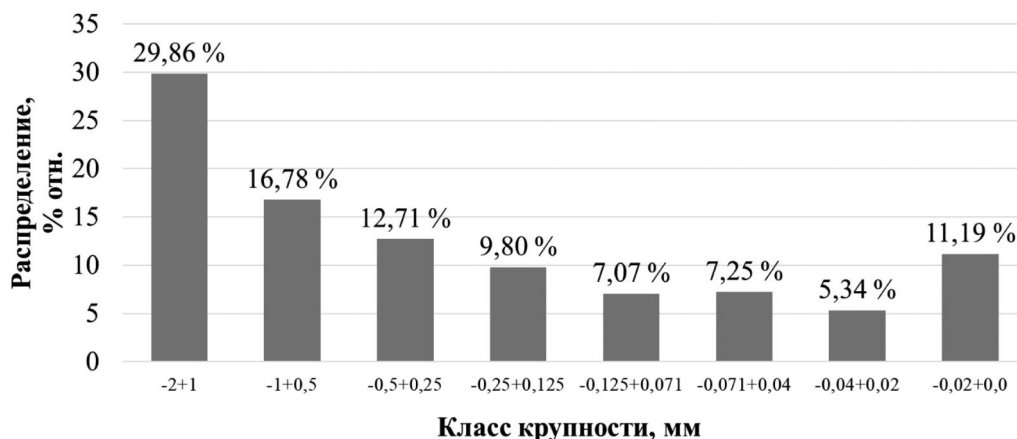


Рис. 4. Диаграмма суммарного распределения сульфидов меди по классам крупности

Заключение

Данные, полученные при проведении оптико-минералогических исследований, позволили оценить минералого-технологические характеристики руд медистых песчаников:

- исследуемые руды по содержанию меди относятся к типу весьма богатых комплексных сульфидных руд и являются сложными для обогащения в связи с поликомпонентным минеральным и сложным морфоструктурным составами;
- структурные взаимоотношения и формы выделений минералов руды определяют тот факт, что при проведении операций измельчения руды будут образовываться различные по каче-

ству сростки рудных минералов с породообразующими;

- по данным анализа качества сростков сульфидов меди с породообразующими минералами спрогнозировано их распределение по продуктам обогащения.

Полученные результаты исследований помогли отрегулировать режимы рудоподготовки и обогатительных процессов, спрогнозировать распределение минералов по продуктам обогащения и обосновать причины неизбежных потерь, что в свою очередь, позволило инженерам-технологам разработать оптимальную схему обогащения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методические указания НСОММИ № 31. Виды и последовательность минералогических исследований для обеспечения технологических работ. М.: ВИМС, 1990.
2. Методические рекомендации НСОММИ № 162. Оптико-минералогический анализ шлиховых и дробленых проб. М.: ВИМС, 2012.
3. Методические рекомендации НСОММИ № 194. Минераграфическое изучение руд. М.: ВИМС, 2018.
4. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Медные руды. М.: ФГУ ГКЗ, 2007.
5. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году: государственный доклад / гл. ред. Петров Е. И. Тетенькин Д. Д. Государственные доклады – Минприроды России URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_2020/. Дата обращения: 31.10.2022.
6. Смольяков А. Р. Раскрытие минералов при измельчении руды // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Горная книга. М., 2007. № 8. С. 224–234.