

Чижишева Т.А.^{1,2,3}, Прокопьев С.А.^{2,3}, Шульгина М. Е.¹,
Прокопьев Е.С.^{1,3} (1 — ООО ПК «Спирит», Иркутск, 2 —
Иркутский государственный университет, 3 — Институт
земной коры СО РАН, Иркутск)

ОСОБЕННОСТИ ПОПУТНОЙ МЕДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ПРАВОУРМИЙСКОГО ОЛОВОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

*В статье содержатся данные комплексного минералогического изучения руд Правоурмийского месторождения оптическими методами и растровой электронной микроскопией с применением рентгеноспектрального микроанализа. Авторами детально изучены состав медносульфидной минерализации и ее попутные ценные компоненты. Полученные данные позволяют считать руды месторождения комплексными и перспективными для добычи редких металлов. **Ключевые слова:** оловянные руды, минералы меди, комплексные руды.*

Chikisheva T.A., Prokopen S.A., Prokopen E.S., Schulgina M.E.
(1 — PC «Spirit», Irkutsk, 2 — Irkutsk State University, 3 — Institute of the earth's crust SB RAS, Irkutsk)

MINERALOGICAL FEATURES OF ASSOCIATED COPPER MINERALIZATION AT PRAVOURMIISKOE TIN ORE DEPOSIT

*The article contains the data from the complex mineralogical study of the ores from the Pravourmiysky deposit using optical methods, scanning electron microscopy and X-ray spectral microanalysis. The authors studied in detail the composition of copper-sulfide mineralization and associated valuable components. The data obtained make it possible to consider the ores of the deposit to be complex and promising for the extraction of rare metals. **Keywords:** tin ores, copper minerals, complex ores.*

Общее количество разведанных запасов олова в России превышает 2,16 млн т, что обеспечивает нашей стране пятое место в мире после Китая, Бразилии, Индонезии и Австралии, при этом доля России в добыче олова крайне мала — 0,2 % [6].

Российская промышленность потребляет около 6,5–7 тыс. т олова в год, при этом около 90 % олова импортируется. Однако в необходимости импорта из-за истощения запасов богатых руд и неразвитости инфраструктуры в районах добычи нет оснований. Главная причина здесь в том, что в стране не применяется технология комплексного извлечения металлов, которая бы сделала их переработку рентабельной [3]. Основные запасы олова сосредоточены на востоке России. Главным оловорудным объектом с

экономической точки зрения выступает Правоурмийское грейзеновое месторождение богатых руд (1,16 % Sn), на сегодняшний день являющееся практически единственным в стране источником оловянного сырья [6]. Руды месторождения являются комплексными, попутно добывается вольфрам. В настоящее время ведутся исследования руд с целью разработки схемы обогащения, позволяющей комплексно получать касситеритовый, вольфрамитовый и медносульфидный концентраты. Руды также содержат висмут, серебро и, что особенно ценно, индий, который применяется в современном высокотехнологичном производстве, что привело к существенному повышению его цен и дефициту на мировом рынке [4].

Целью настоящей работы является минералогическое изучение и оценка медной и редкометалльной минерализаций.

Правоурмийское оловорудное месторождение расположено на территории Верхнебуреинского района Хабаровского края России (рис. 1).

Вмещающие породы месторождения представлены в разной степени метасоматически измененными в процессе грейзенизации вулканитами кислого состава. Породообразующими минералами являются кварц, топаз и, в меньшем количестве, турмалин.



Рис. 1. Местоположение Правоурмийского месторождения

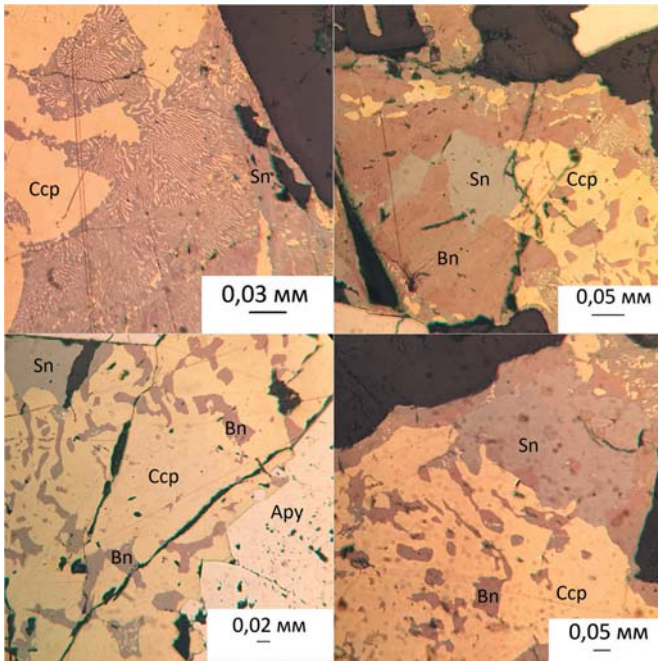


Рис. 2. Структуры распада твердых растворов медных минералов и сульфостаннатов: Sn — станнин, Ccp — халькопирит, Bn — борнит, Apy — арсенопирит. Микрофотографии фрагментов аншлифа. Отраженный свет, николи ||

Главный рудный минерал олова — касситерит. В подчиненном количестве установлены станнин, станноидит и моусонит. Также присутствуют второстепенные рудные минералы — арсенопирит, леллингит и сульфиды меди (халькопирит, борнит, халькозин, ковеллин). Рудные минералы формируют прожилково-вкрапленные и гнездовидные скопления [5]. Среди медных минералов преобладающее значение имеют халькопирит и борнит. При микроскопическом изучении установлено, что халькопирит и борнит с сульфостаннатами железа и меди образуют двух- и многофазные структуры распада твердых растворов — мирмецитовидные (рис. 2), пластинчатые и решетчатые (рис. 3 А). В борните отмечаются эмульсионные вкрапления висмутых минералов (рис. 3 Б).

В результате изменения халькопирита образуются ковеллин и халькозин (рис. 4). В парагенезисе с борнитом встречается эндогенный халькозин, который образует структуру распада твердого раствора в матрице борнита (рис. 5).

Запасы меди в рудах Правоурмийского месторождения составляют 165 тыс. т [4]. Нахождение в них сульфидных минералов олова и редких минералов висмута, сурьмы,

серебра и индия могут сыграть ключевую роль в повышении стоимости медносulfидного концентрата. Массовые доли висмута и сурьмы в исходных рудах колеблются в пределах первых сотых долей процента. Содержание серебра в руде варьирует от 2 до 129 г/т, индия — от 5 до 130 г/т, среднее 55 г/т [1] и 10–130 г/т, среднее 55 г/т, подсчитанные запасы индия для всего месторождения составляют 400 т [4]. При этом наиболее высокие концентрации индия (11–130 г/т) наблюдаются в руде с преобладанием халькопирита и борнита, в станнине содержится от 2 до 6 масс. % индия, в халькопирите — 1,4 масс. % По сравнению с этими данными главные рудные минералы — касситерит и вольфрамит — имеют низкие содержания индия, равные 7,2 г/т и 5 г/т соответственно [1].

Редкие минералы попутной медной минерализации Сульфостаннаты железа и меди

Сульфидные минералы олова представлены преимущественно станнином ($\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$) и моусонитом ($\text{Cu}_6\text{Fe}_2\text{Sn}_4\text{S}_8$), реже встречается станноидит ($\text{Cu}_8(\text{Fe,Zn})_3\text{Sn}_2\text{S}_{12}$).

Сульфостаннаты железа и меди вместе с медными минералами занимают межзерновое пространство в грейзенах и заполняют трещины, в результате чего формируются многочисленные прожилки (рис. 6 А). Станнин иногда образует каемки вокруг реликтовых зерен ксеногенного касситерита (рис. 6 Б) и, вероятнее всего, образуется в результате взаимодействия медного расплава с касситеритом, сформировавшимся

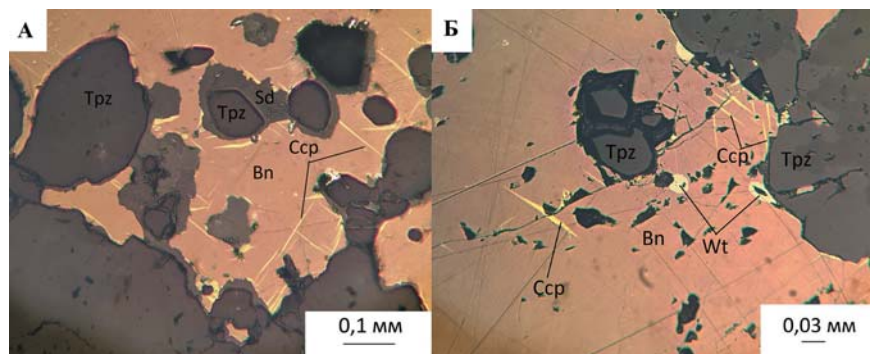


Рис. 3. Структуры распада твердых растворов: Ламели халькопирита (Ccp) в матрице борнита (Bn) с эмульсионными вкраплениями виттихенита (Wt) вокруг зерен топаза (Trpz). По границе зерен топаза — сидерит (Sd). Микрофотографии фрагментов аншлифа. Отраженный свет, николи ||

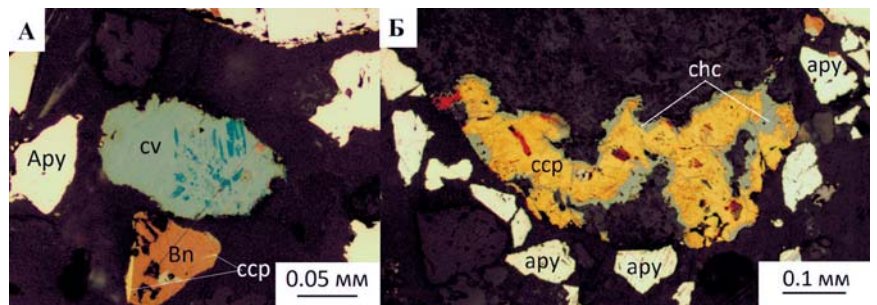


Рис. 4. А — зерно ковеллина, Б — замещение халькопирита халькозином: Ccp — халькопирит, Bn — борнит, Apy — арсенопирит, cv — ковеллин, chc — халькозин. Микрофотографии фрагментов брикетного шлифа. Отраженный свет, николи ||



Рис. 5. Структура распада твердого раствора борнита (Bn) и халькозина (chc) между зернами арсенипирита (Apy). Изображение в обратно рассеянных электронах

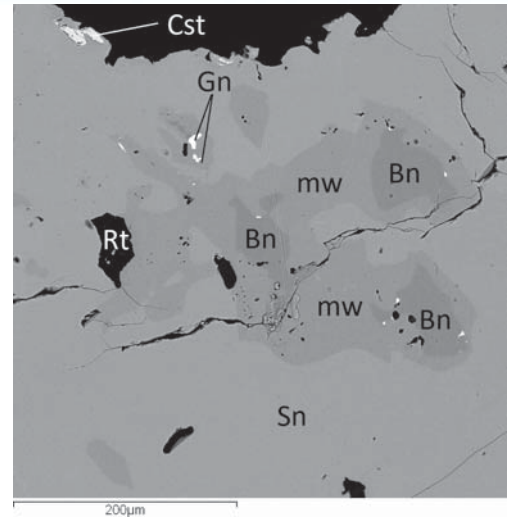


Рис. 8. Трехфазная структура распада станнина (Sn), моусонита (mw) и борнита (Bn). Отмечаются включения галенита (Gn), реликтовых зерен акцессорного рутила (Rt) и ксеноморфного касситерита (Cst). Изображение в обратно рассеянных электронах

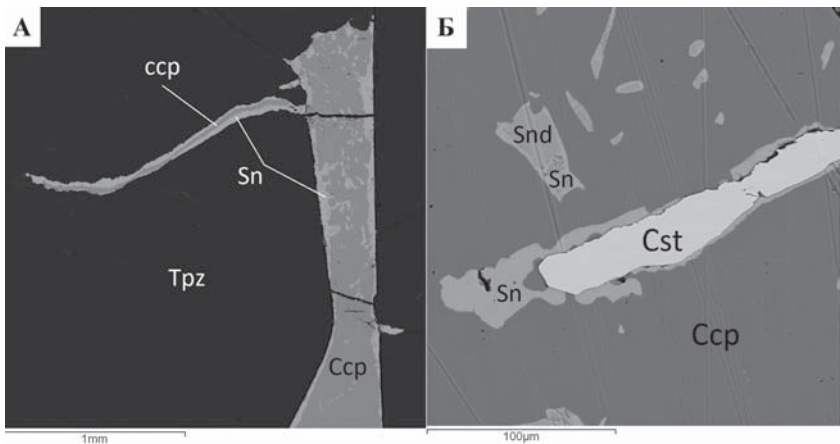


Рис. 6. А — прожилок халькопирита (Ccp) и станнина (Sn) в топазе (Trpz); Б — станнин (Sn) вокруг реликта касситерита (Cst) в халькопирите (Ccp). Отмечается распад твердого раствора станнина и станноидита (Snd) в матрице халькопирита. Изображения в обратно рассеянных электронах

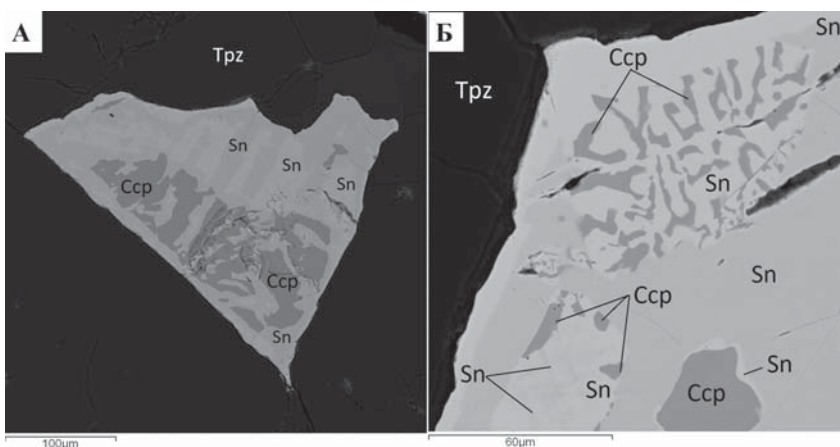


Рис. 7. А — станнин (Sn) с халькопиритом (Ccp) в топазе (Trpz). Б — мirmekитовидная структура распада в сочетании с решетчатой и каймы станнина вокруг зерен халькопирита: Ccp — халькопирит, Sn — станнин, Trpz — топаз. Изображения в обратно рассеянных электронах

на предыдущей стадии формирования месторождения. Редко в структуре распада станнина можно наблюдать станноидит (рис. 6 Б).

Состав станнина весьма непостоянен. Это связано с выделением фаз разного состава по мере охлаждения твердого раствора, что четко прослеживается при исследовании методами растровой электронной микроскопии. Фазы станнина имеют разные оттенки серого цвета (рис. 7). Составы фаз приведены в табл. 1.

Реальные формулы станнина (табл. 1) часто отличаются от стехиометрической Cu_2FeSnS_4 из-за колебаний содержаний олова и меди. В качестве примеси в некоторых выделениях станнина обнаружен цинк. Цинк в структуре станнина изоморфно замещает железо.

Моусонит чаще всего наблюдается в ассоциации с борнитом и станнином, реже с халькопиритом, образуя с ними сложные многофазные структуры распада (рис. 8).

Самородный висмут

Самородный висмут образует эмульсионную вкрапленность в борните. Часто вокруг зерен самородного висмута наблюдаются каймы виттихенита (рис. 9). Из-за низкой твердости (2–2,5 по шкале Мооса) самородный висмут часто разрушается при полировке шлифов, поэтому иногда можно наблюдать только каймы виттихенита вокруг пустых углублений (рис. 9 Б).

Таблица 1
Элементный состав станнина

№ измерения	Cu	Fe	Zn	Sn	S	Сумма	Формула
1	39,43	12,96		18,99	30,12	101,5	$Cu_{2,5}Fe_{1,0}Sn_{0,7}S_{3,9}$
2	30,35	12,13		25,98	29,11	97,58	$Cu_{2,1}Fe_{1,0}Sn_{1,0}S_{4,0}$
3	39,00	12,5		19,41	28,98	99,89	$Cu_{2,6}Fe_{0,9}Sn_{0,7}S_{3,8}$
4	31,75	12,99		24,94	28,62	98,31	$Cu_{2,2}Fe_{1,0}Sn_{0,9}S_{3,9}$
5	33,91	12,61		22,56	29,00	98,09	$Cu_{2,3}Fe_{1,0}Sn_{0,8}S_{3,9}$
6	30,18	12,30		28,17	29,43	100,08	$Cu_{2,1}Fe_{1,0}Sn_{1,0}S_{4,0}$
7	31,65	13,52		24,00	29,30	98,46	$Cu_{2,1}Fe_{1,0}Sn_{0,9}S_{3,9}$
8	30,61	12,24	1,48	28,74	30,78	103,86	$Cu_{2,0}Fe_{0,9}Zn_{0,1}Sn_{1,0}S_{4,0}$
9	29,22	11,90	1,35	27,54	28,67	98,67	$Cu_{2,0}Fe_{0,9}Zn_{0,1}Sn_{1,0}S_{3,9}$
10	30,03	12,23		29,22	29,70	101,18	$Cu_{2,0}Fe_{0,9}Sn_{1,1}S_{4,0}$

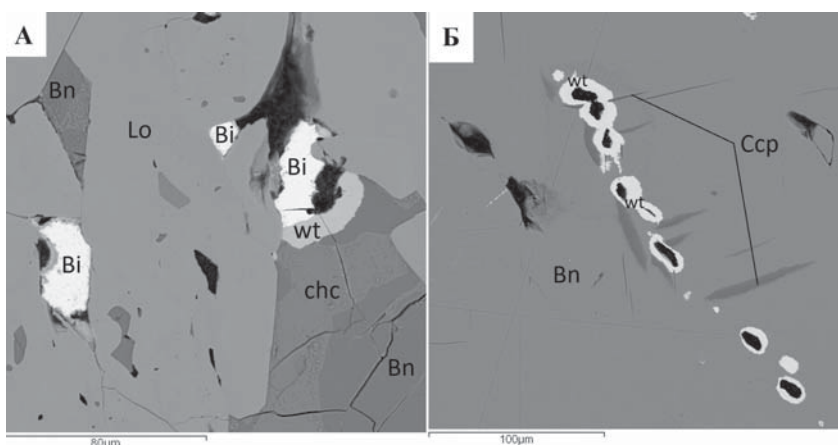


Рис. 9. А — самородный висмут (Bi) с каймой обрастания виттихенитом (wt) в ассоциации с борнитом (Bn), халькозином (chc) и леллингитом (Lo). **Б** — виттихенит (wt) — каймы обрастания. Минералы висмута заключены в матрице борнита (Bn) с ламелями и выделениями халькопирита (Ccp). Изображения в обратно рассеянных электронах

Каймы обрастания виттихенита возникают при распаде высокотемпературных растворов на основе борнита [7]. Самородный висмут может иметь примесь серебра, что отмечено в единственном зерне (рис. 10).

Минералы индия

Индий в рудах установлен как в виде примеси (0,82 %) в станнине и в халькопирите (0,46 %), так и в виде собственной минеральной формы — рокезита ($CuInS_2$) с примесью железа. Рокезит относится к группе халькопирита и тесно ассоциирует с самородным висмутом и виттихенитом и почти всегда встречается вместе с ними в структуре распада в матрице борнита. Самородный висмут образует эмульсионную вкрапленность и вытянутые, палочковидные зерна, которые ориентированы в одном направлении. Очевидно, самородный висмут заполнял микротрещины в борните (рис. 11) по направлениям спайности. Примечательно, что каймы обрастания виттихенитом вокруг палочковидных зерен висмута образуются очень редко, при этом эмульсионные вкрапления висмута практически всегда окружены каймой виттихенита. Часто в структуре распада твердого раствора совместно с рокезитом присутствует моусонит (рис. 12 А).

Реальная формула рокезита в целом соответствует стехиометрической $CuInS_2$ (табл. 2). Во всех проанализи-

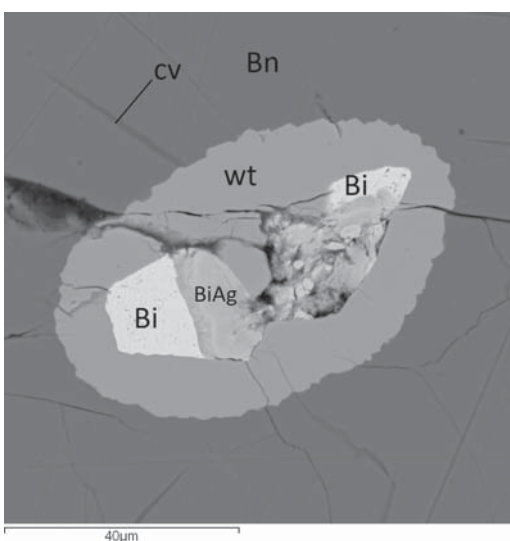


Рис. 10. Самородный висмут (Bi) и висмут с примесью серебра (BiAg) с каймой обрастания виттихенитом (wt) в борните (Bn) с ковеллином (cv). Изображение в обратно рассеянных электронах

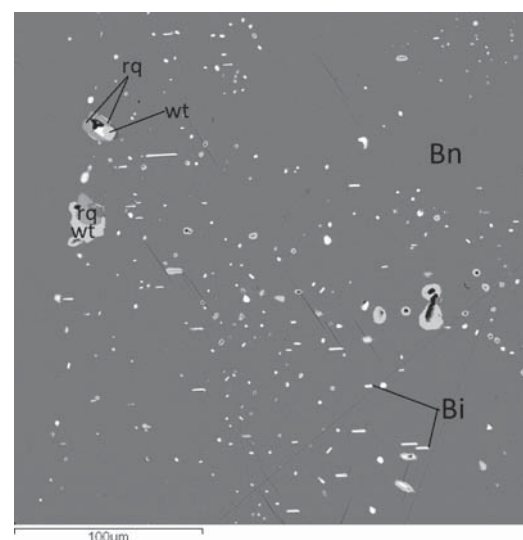


Рис. 11. Рокезит (rq) с виттихенитом (wt) и самородным висмутом (Bi) в матрице борнита (Bn). Изображение в обратно рассеянных электронах

Таблица 2
Элементный состав рокезита

№ п/п	Fe	Cu	In	S	Сумма	Формула
1	2,28	30,98	41,38	24,93	99,57	$Cu_{1,17}Fe_{0,10}In_{0,87}S_{1,87}$
2	1,49	28,82	48,31	26,42	105,03	$Cu_{1,05}Fe_{0,06}In_{0,98}S_{1,91}$
3	0,00	26,89	50,10	25,55	102,54	$Cu_{1,02}In_{1,05}S_{1,92}$
4	1,00	28,51	48,79	26,01	101,89	$Cu_{1,07}Fe_{0,03}In_{1,01}S_{1,89}$
5	0,60	28,34	49,04	26,54	104,52	$Cu_{1,04}Fe_{0,03}In_{1,00}S_{1,93}$

Таблица 3
Элементный состав скиннерита

№ измерения	Fe	Cu	Ag	Sb	S	Сумма	Формула
1	5,86	36,49	1,38	29,00	24,11	96,83	$Cu_{2,4}(Fe_{0,4}Ag_{0,1})Sb_{1,0}S_{3,1}$
2	5,66	36,84	1,92	28,78	24,00	97,20	$Cu_{2,4}(Fe_{0,4}Ag_{0,1})Sb_{1,0}S_{3,1}$
3	5,62	37,32	1,22	29,98	24,61	97,75	$Cu_{2,4}(Fe_{0,4}Ag_{0,05})Sb_{0,9}S_{3,1}$
4	6,05	36,90	1,70	27,19	24,04	95,87	$Cu_{2,4}(Fe_{0,5}Ag_{0,1})Sb_{1,0}S_{3,1}$
5	6,04	37,39	1,22	28,73	24,35	97,73	$Cu_{2,4}(Fe_{0,45}Ag_{0,05})Sb_{1,0}S_{3,15}$

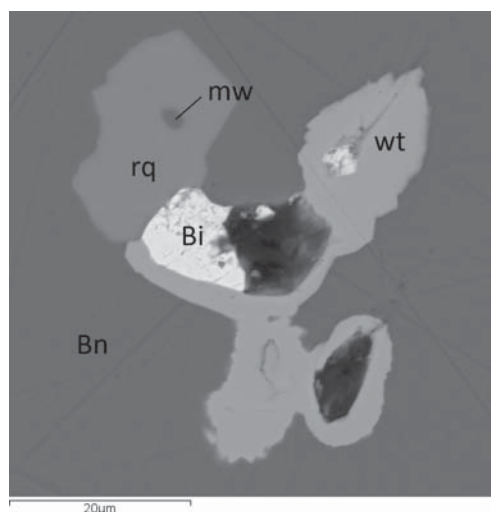


Рис. 12. Рокезит (rq) с включением моусонита (mw) на контакте с виттихенитом (wt) и самородным висмутом (Bi) в борните (Bn). Изображение в обратно рассеянных электронах

рованных зернах рокезита в качестве примеси присутствует железо.

Минералы серебра и сурьмы

Серебро в рудах находится в тесном парагенезисе с сурьмой и ассоциирует с минералами меди. Серебро выявлено в качестве примеси в тетраэдрите и, в установленном впервые в рудах данного месторождения, скиннерите (рис. 13). Серебро в тетраэдрите по данным РЭМ содержится в количестве 1,7–1,8 %, сурьма — 28–29 %.

Серебросодержащий скиннерит (Cu_3SbS_3) сходен с виттихенитом (Cu_3BiS_3), который является его висмутовым аналогом [9]. Скиннерит образует ксеноморфные выделения в

структуре распада твердого раствора халькопирита и станнина. Характер границ микровостков скиннерита и низкая температура его образования [8] позволяют сделать вывод, что он выделяется при медленном охлаждении твердого раствора медносульфидных минералов. В скиннерите в качестве постоянной примеси помимо серебра содержится железо. Элементный состав скиннерита и реальные формулы представлены в табл. 3.

В структурах распада твердых растворов на основе борнита и халькопирита также обнаружены фазы, содержащие большое количество

(34,21 и 26,3 %) серебра (рис. 14 А и Б соответственно).

В зерне халькопирита, представленного на рис. 14 Б, диагностирована примесь серебра. Составы халькопирита с примесью серебра и серебросодержащих фаз приведены в табл. 4.

Согласно полученным данным, примесь серебра в халькопирите составила 5,41 %. В работе К.А. Новоселова [10] описываются структуры распада твердых растворов на основе халькопирита, в которых выделяется

Таблица 4
Элементный состав серебросодержащих фаз

№ п/п	Фаза	Ti	Fe	Cu	Ag	S	Всего
1	Халькопирит	1,65	23,6	33,7	5,41	35,7	100,06
2	Cu-Fe-Ag-S	—	10,07	36,78	34,21	21,54	102,6
3	Cu-Fe-Ag-S	1,08	10,6	33,0	26,30	29,0	99,98

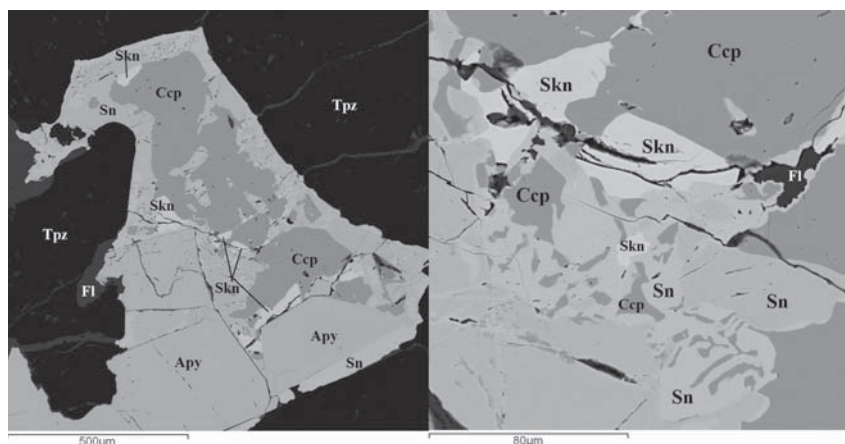


Рис. 13. Скиннерит (Skn) в структуре распада твердого раствора с халькопиритом (Ccp) и станнином (Sn) на контакте с арсенопиритом (Apy) в топазе (Tpz) с флюоритом (Fl). Изображение в обратно рассеянных электронах

Таблица 5
Стехиометрические формулы минералов медносульфидной минерализации

Минерал	Формула	Типичные примеси
Халькопирит	$CuFeS_2$	Ni, Ag, Au, Te, Se
Борнит	Cu_5FeS_4	Ag, Co, Ni
Станнин	Cu_2FeSnS_4	Zn, Sb, Cd, Pb, Ag
Станноидит	$Cu_8(Fe, Zn)_3Sn_2S_{12}$	Ag
Моусонит	$Cu_6Fe_2Sn_4S_8$	Zn, Se
Рокезит	$CuInS_2$	Fe
Фаматинит	Cu_3SbS_4	Fe, As, Bi
Скиннерит	Cu_3SbS_3	Ag
Виттихенит	Cu_3BiS_3	As, Ag, Se, Pb, Sb

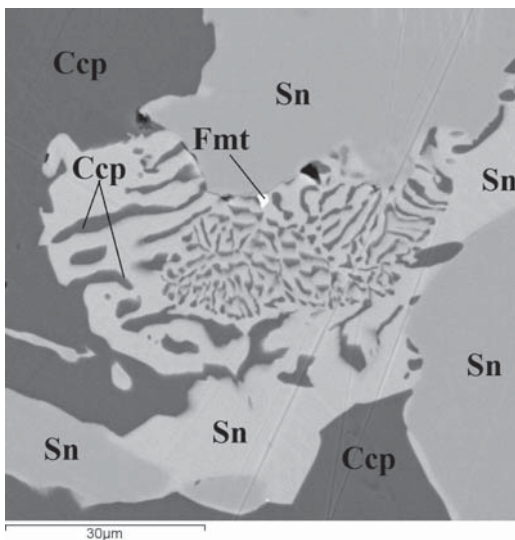


Рис. 14. Фазы состава $Cu-Ag-Fe-S$. А — в структуре распада твердого раствора халькопирита (Ccp), борнита (Bn) и станина (Sn) с галенитом (Gn) и виттихенитом (wt), Б — в сростании с рутилом (Rt) и халькопиритом (Ccp). Изображения в обратно рассеянных электронах

серебросодержащий халькопирит — аргентохалькопирит. Содержание серебра в нем по данным авторов находится на уровне 2,42–3,25 %, однако содержание серебра в исследуемых фазах намного выше и не позволяет отнести их к аргентохалькопириту.

Кристаллохимические формулы редких минералов обнаруживают схожесть с кристаллохимическими формулами медносульфидных минералов (табл. 5).

В результате детального изучения минералов низкотемпературной медной минерализации можно сделать вывод, что связанные с ней редкие минералы (рокезит, скиннерит) образовались в процессе распада твердого раствора, содержащего сульфостаннаты меди и железа (станнин, станноидит,

Таблица 6
Минеральный состав продуктов обогащения

Минерал	Сульфидный продукт флотации
Свободные зерна касситерита	0,08
Бедные сростки	0,03
Включения	0,08
Свободные зерна арсенопирита и леллингита	61,59
Богатые сростки	0,10
Рядовые сростки	0,10
Бедные сростки	0,43
Включения	0,40
Халькопирит, борнит	5,60
Халькозин, ковеллин	Единичные зерна
Породообразующие минералы (кварц, топаз, турмалин)	31,59
Всего:	100,00

моусонит) путем замещения атомов олова на индий, сурьму и серебро, которые имеют близкие атомные радиусы. Самородный висмут появляется в структуре распада в виде эмульсионных выделений неправильной формы и при взаимодействии с вмещающими медными минералами «обрастает» каймой виттихенита.

Известно, что при переработке оловянных руд на ряде объектов в Якутии успешно получают кондиционные медно-серебряные и цинково-станный концентраты, применяя селективную флотацию [2].

В рамках проведения дополнительных лабораторных исследований технологической пробы в 2018 г. было выполнено изучение минерального состава сульфидных хвостов оловянного цикла обогащения, с целью принципиальной оценки возможности получения медного концентрата. Содержание меди в исходной руде составляло 0,29 %, в сульфидных хвостах обогащения пробы — 1,98 %. Минеральный состав пробы хвостов приведен в табл. 6.

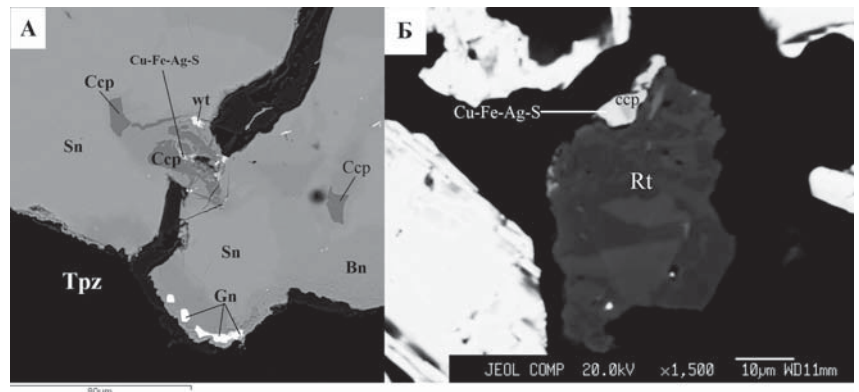


Рис. 15. Сростания арсенопирита (Apy) с халькопиритом (Ccp), борнитом (Bn) и станнином (Sn) закрытого типа. Микрофотография фрагмента брикетного шлифа. Отраженный свет, николи ||

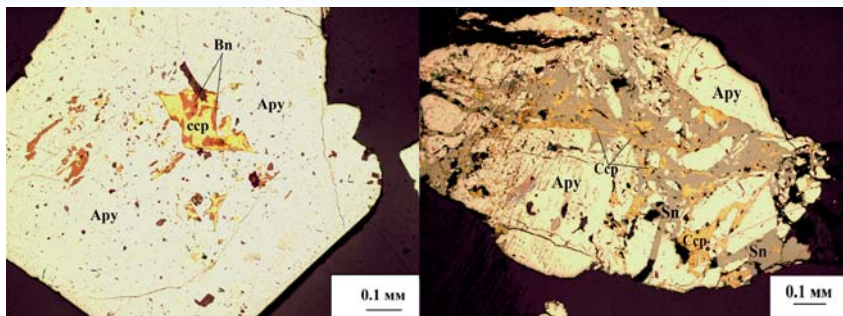


Рис. 16. Зерна арсенопирита (Apy), халькопирита (Ccp) и борнита (Bn) в сростании со станнином (Sn) и моусонитом (mw). Микрофотография фрагмента брикетного шлифа. Отраженный свет, николи ||

При исследовании классифицированного материала сульфидных хвостов в искусственных шлифах (брикетах) выявлено, что преобладающее количество минералов меди в диапазоне крупности $-2+0,5$ мм находятся в сростаниях, преимущественно закрытого типа, с арсенопиритом (рис. 15). Свободные зерна медных минералов появляются в крупности менее $0,5-0,25$ мм. Их количество увеличивается с уменьшением крупности материала, достигая максимума в материале крупностью менее $0,1-0,07$ мм. Однако по причине тесной ассоциации халькопирита и борнита, и их совместного нахождения в твердом растворе со станнином и моусонитом, селективного раскрытия медных минералов и сульфостаннатов железа и меди не наблюдается (рис. 16).

Методами селективной флотации в лаборатории ООО ПК «Спирит» был получен кондиционный медный концентрат. Выход концентрата, полученного при проведении селективной флотации сульфидных хвостов, составил $0,26$ % от исходной руды. Малый выход концентрата позволил провести только химический анализ материала.

В результате проведенных исследований показана возможность получения из сульфидных хвостов оловянного цикла обогащения кондиционного по содержанию меди концентрата с ее массовой долей $34,93$ %. Содержание серебра в медном концентрате составило 651 г/т, висмута — $0,21$ %. Наличие редких металлов в медном концентрате объясняется тесной ассоциацией халькопирита и борнита с их минералами-носителями: Вi — висмут самородный, виттихенит, Ag — тетраэдрит, скиннерит, серебросодержащий халькопирит и фаза состава Cu-Ag-Fe-S.

Кроме того, с медными минералами ассоциируют сульфостаннаты железа и меди — станнин, моусонит, станноидит, которые могут служить дополнительным источником олова.

С медными минералами также связана индиевая минерализация. Однако индий не был обнаружен в пробе медного концентрата. Это объясняется низкими концентрациями данного элемента и методическими проблемами его обнаружения в горных породах и минералах.

Индий, серебро, висмут и сульфидное олово находятся в структуре распада твердого раствора с медны-

ми минералами и имеют размеры менее $0,1$ мм, чаще всего первые микрометры до первых десятков микрометров, что указывает на то, что извлечь их из руд можно только при проведении операции тонкого измельчения медного концентрата и последующей селективной сульфидной флотации, либо при его дальнейшем металлургическом переработке.

Широкий спектр продукции, которую можно получить при комплексной переработке оловянных руд может существенно повысить стоимость товарных концентратов и решить проблему

дефицита редких металлов в условиях быстро развивающейся промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаськов, И.В. Особенности распределения индия в рудах некоторых полиметаллических и оловосульфидных месторождений Сибири и Дальнего Востока России / И.В. Гаськов и др. // Геология рудных месторождений. — 2017. — Т. 59. — № 1. — С. 62–74.
2. Матвеев, А.И. Технологическая оценка месторождений олова Якутии / А.И. Матвеев, Н.Г. Еремеева; Отв. ред. С.М. Ткач. — Новосибирск: «Гео», 2011. — 119 с.
3. Митрофанов, Н.П. Геодинамические режимы в северо-западном секторе Тихоокеанского рудного пояса на рудном этапе формирования месторождений олова / Н.П. Митрофанов // Тихоокеанская геология. — 2005. — Т. 24. — № 1. — С. 59–72.
4. Павлова, Г.Г. Индиенность олово-сульфидной минерализации в оловорудных месторождениях Дальнего Востока России / Г.Г. Павлова и др. // Доклады академии наук. — 2016. — Т. 471. — № 1. — С. 71–76.
5. Чижишева, Т.А. Минералогические исследования попутной медной минерализации на Правоурмийском оловорудном месторождении (Хабаровский край) / Т.А. Чижишева, С.А. Прокопьев, Е.С. Прокопьев, А.Г. Карпова, В.И. Тукусер // Матер. междунар. конф. «Проблемы и перспективы эффективной переработки минерального сырья в XXI веке (Плаксинские чтения-2019)», ИРНТУ — Иркутск, 2019. — С. 56–58.
6. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 и 2017 годах: государственный доклад / Гл. ред. Е.А. Киселев http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/2017_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/?special_version=Y (дата обращения 5.08.2019).
7. Amcoff, Orjan Mechanism of formation of wittichenite rims around native bismuth in chalcosite and bornite from Langban, Sweden / Orjan Amcoff, Per Nysten // Geol. foren. Stockholm forhandl. — 1990. — Vol. 112. — N 1. — P. 45–50.
8. Harlov, Daniel E. Ag-Cu exchange equilibria between pyrrargyrite, high-skinerite, and polybasite solutions / Daniel E. Harlov, Richard O. Sack // Geochim. et Cosmochim. Acta. — 1995. — Vol. 59. — N 5. — P. 867–874.
9. Makovicky, E. The crystal structure of skinnerite, P21/c-Cu3SbS3, from powder data / Emil Makovicky, Tonci Balic-Zunic // Can. Miner. — 1995. — Vol. 33. — N 3. — С. 655–663.
10. Novoselov, K. Ore mineralogy and formations of the Pirunkoukku gold occurrence (Finland) / K. Novoselov, E. Belogub, V. Kotlyarov and A. Mikhailov // Eur. J. Mineral. — 2015. — V. 27. — P. 639–649.

© Коллектив авторов, 2020

Чижишева Татьяна Александровна // cta@spirit-irk.ru
 Прокопьев Сергей Амперович // psa@spirit-irk.ru
 Шульгина Мария Евгеньевна // sme@spirit-irk.ru
 Прокопьев Евгений Сергеевич // pes@spirit-irk.ru