

СУЛЬФИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЛЕБЕДИНОЕ (ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЛДАН)

С.Н. Ненашева, В.Ю. Карпенко, Л.А. Паутов

УРАН Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва, nenashevsn@mail.ru

В статье приводятся результаты изучения минералов месторождения Лебедино. Кроме ранее отмечавшихся минеральных видов в рудах установлены дигенит, анилит, спинокопит, ярроуит, пирротин — 5с, минералы из семейства блеклых руд: цинксодержащий тетраэдрит — заңдбергерит, тетраэдрит-теннантит, теннантит.

Обнаружен анизотропный арсеносульванит с полисинтетическими хорошо развитыми двойниками.

В статье 6 рисунков, 3 таблицы, список литературы из 7 названий.

Ключевые слова: дигенит, анилит, спинокопит, ярроуит, блёклые руды, месторождение Лебедино.

Введение

Изучены образцы месторождения Лебедино (залежь Орочонская, отвал шурфа № 7), собранные в 1941 году А.И. Фасталовичем, хранившиеся в коллекции Н.В. Петровской и переданные М.И. Новгородовой для исследования авторам.

Месторождение Лебедино подробно охарактеризовано в статье С.Н. Ненашевой, В.Ю. Карпенко «Особенности арсеносульванита из месторождения Лебедино (Центральный Алдан)», опубликованной в настоящем сборнике. Характеристика месторождения дана по работам А.И. Фасталовича, Н.В. Петровской (1940) и Н.В. Петровской (1973). Приводим очень короткое его описание. В толщу слабо метаморфизованных доломитов кембрия, лежащих на эродированной поверхности гранитных интрузий, прорвавших породы древних толщ, внедрились многочисленные малые интрузии верхнеюрского-нижнемелового возраста. Это штоки, лакколиты, дайки, преимущественно среднего состава и повышенной щелочности. В доломитах вдоль зон горизонтальных нарушений развиваются метасоматические залежи сульфидно-карбонатного состава, местами как ответвления жил (Н.В. Петровская, 1973).

Среди рудных первичных минералов преобладает пирит, присутствует халькопирит, а в отдельных жилах — гематит, реже встречаются галенит, сфалерит, пирротин, галенобисмутит, тетраэдрит, золото, борнит, кобальтин, сульванит. Гипергенные минералы представлены гидроксидами железа, ярозитом, купритом, халькозином, ковеллином, малахитом, азуритом, церусситом, гипсом, мелантеритом (Фасталович, Петровская, 1940).

Методы и результаты исследования

Полированные шлифы изучались под микроскопом OPTON. Химический состав исследовался на электронном микроскопе CamScan-4D с использованием энергодисперсионного спектрометра Link ISIS. Ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 4 нА.

Изученные объекты под микроскопом неоднородны, сложены рудными минералами (основными из которых являются пирит, галенит, борнит) в кварц-карбонат-арсенатной массе. В галените обнаружены зерна блёклых руд, сульванита, арсеносульванита, фаматинита. Кроме того, встречаются выделения пирротина, ковеллина, дигенита, анилита, спинокопита, ярроуита, диагностированные микрорентгеноспектральным анализом.

Блёклые руды в основном сурьмяные. Тетраэдрит с большим количеством Zn — заңдбергерит (табл. 1, ан. 1 — 24) — выделяется в ассоциации с галенитом, фаматинитом, арсеносульванитом, англезитом (рис. 1, 2). Количество Zn в анализах переменное (от 5.14 до 8.07 мас.%, что составляет от 1.32 до 2.04 атома в формуле). Количество Sb меняется от 23.53 до 28.16 мас.%, что превышает 3 атома и составляет 3.25 и 3.85 атомов в формуле. Отчетливой корреляции между Zn и As нет. Наблюдается корреляция содержаний Sb и суммы Zn + Ag. Большому количеству Sb отвечает большее содержание Zn + Ag. Такая корреляция отмечалась раньше для блёклых руд в работе Н.Н. Мозговой и А.И. Цепина (1983). На контактах заңдбергерита и галенита выделяется англезит Pb[SO₄] (рис. 1, 2). Состав англезита: Pb 67.06, S 10.82, O 21.38, сумма 99.26 мас.%. Анализ пересчитывается на формулу.

Таблица 1. Микронзондовые анализы блеклых руд (мас.%) и их пересчет на формулы из расчета 29 атомов в элементарной ячейке

№ ан.	Обр.	Cu	Ag	Fe	Zn	Cd	Pb	Sb	As	S	Se	Σ
1	242 (уч. 1)	34.90	2.83	0.40	6.91	1.10	0.71	25.70	1.68	23.75		97.98
2		35.80	1.72	0.26	6.41	1.05	0.78	25.54	1.64	24.13		97.33
3		35.77	1.58	0.33	6.44	0.82	0.87	26.62	0.59	24.17		97.34*
4		38.06	1.61	0.32	7.01	0.79	0.90	26.47	1.47	24.59		101.22
5		37.89	1.96	0.14	6.52	0.92	0.85	27.53	0.43	24.80		101.04
6		38.75	1.00	0.18	6.34	0.79	1.29	25.54	1.85	24.18		99.92
7		37.83	1.87	0.33	6.56	1.27	0.06	28.16	0.06	25.03		101.17
8		35.38	4.37	0.50	6.83	0.28	1.25	25.88	1.99	24.92	0.42	101.82
9		37.22	1.68	0.50	6.34	1.28	0.99	27.61	0.34	24.26	0.22	100.44
10		38.85	1.87	0.49	6.43	0.89	1.30	28.23	0.33	24.51	0.05	100.95
11	242 (уч. 4)	35.98	4.11	0.36	6.79	0.74	0.93	27.31	0.23	24.22		100.67
12	242 (уч. 2)	38.16	0.65	0.15	7.21	0.40	0.26	25.21	2.11	25.10		99.25
13		37.66	0.91	0.19	8.06	0.15	1.12	24.79	2.20	24.94	0.41	100.43
14		37.70	0.92	0.19	8.07	0.17	0.00	24.69	2.21	25.12	0.41	99.48
15	242 (уч. 3)	36.02	2.63	0.22	7.09	0.35	0.47	26.96	0.25	24.61	0.37	99.23
16		37.81	1.91	0.31	7.48	0.39	0.78	26.33	0.72	24.99	0.13	100.85
17	242 (уч. 6)	35.53	2.78	0.55	6.68	1.93	1.61	26.84	0.00	23.96		100.31
18		33.86	5.40	0.69	5.73	1.45	0.15	25.33	0.96	23.89		97.96
19		35.41	2.89	0.64	5.66	1.42	1.40	26.49	0.05	23.34	0.18	97.48
20		35.30	2.28	0.65	5.71	1.82	1.60	26.82		23.82		98.0
21		35.09	2.54	0.48	5.77	1.78	1.08	26.06	0.09	23.08	0.13	96.41
22		36.74	2.76	0.91	5.39	2.01	1.37	26.73	0.40	24.80		101.11
23	242 (уч. 5)	37.47	2.35	0.00	5.14	2.23	0.83	23.53	3.02	24.87		99.44
24		35.91	3.38	0.53	5.68	2.10	1.60	25.36	0.93	24.25		99.74
25	242/1 (уч. 1)	41.14	0.18	0.56	7.30	0.27	0.32	15.03	9.45	26.58	100.83	
26		42.07	0.16	0.57	7.67	0.17	0.89	14.09	9.43	26.31		101.36
27	242/6 (уч. 1)	45.64		5.69	0.27			1.89	19.58	28.74	101.81	
28		45.80		6.07				1.36	20.42	28.95		102.60
29		45.20		5.44				1.77	20.39	28.79		101.59
30	242/5 (уч. 1)	45.06		6.79	0.43			1.53	19.18	28.84	101.83	
31		46.61		5.23	0.35			1.47	19.02	28.55		101.23
№ ан.	Обр.	Формула										Баланс валентности Δ, %
1	242 (уч. 1)	$(Cu_{9.51}Ag_{0.45})_{9.96}(Zn_{1.83}Fe_{0.12}Cd_{0.17}Pb_{0.06})_{2.16}(Sb_{3.65}As_{0.39})_{4.04}S_{12.82}$										3.0
2		$(Cu_{9.73}Ag_{0.28})_{10.01}(Zn_{1.69}Cd_{0.16}Fe_{0.06}Pb_{0.06})_{1.99}(Sb_{3.62}As_{0.38})_{4.00}S_{12.99}$										0.1
3		$(Cu_{9.74}Ag_{0.26})_{10.00}(Zn_{1.71}Cd_{0.12}Fe_{0.10}Pb_{0.07})_{2.00}(Sb_{3.78}As_{0.14}Ge_{0.03})_{3.95}S_{13.04}$										0.8
4		$(Cu_{9.97}Ag_{0.25})_{10.22}(Zn_{1.79}Cd_{0.12}Fe_{0.10}Pb_{0.07})_{2.08}(Sb_{3.62}As_{0.33})_{3.95}S_{12.76}$										2.7
5		$(Cu_{9.97}Ag_{0.30})_{10.27}(Zn_{1.67}Cd_{0.14}Fe_{0.04}Pb_{0.07})_{1.92}(Sb_{3.78}As_{0.10})_{3.88}S_{12.93}$										0.3
6		$(Cu_{10.27}Ag_{0.16})_{10.43}(Zn_{1.64}Cd_{0.12}Fe_{0.06}Pb_{0.10})_{1.92}(Sb_{3.53}As_{0.41})_{3.94}S_{12.70}$										2.6
7		$(Cu_{9.90}Ag_{0.29})_{10.19}(Zn_{1.67}Cd_{0.19}Fe_{0.10})_{1.96}(Sb_{3.85}As_{0.01})_{3.86}S_{12.90}$										1.1
8		$(Cu_{9.27}Ag_{0.68})_{9.95}(Zn_{1.74}Fe_{0.15}Cd_{0.04}Pb_{0.10})_{2.03}(Sb_{3.54}As_{0.44})_{3.98}(S_{12.94}Se_{0.09})_{13.03}$										0.4
9		$(Cu_{9.91}Ag_{0.26})_{10.17}(Zn_{1.64}Cd_{0.19}Fe_{0.15}Pb_{0.08})_{2.06}(Sb_{3.84}As_{0.08})_{3.92}(S_{12.89}Se_{0.05})_{12.85}$										1.3
10		$(Cu_{9.78}Ag_{0.29})_{10.07}(Zn_{1.66}Cd_{0.13}Fe_{0.15}Pb_{0.11})_{2.05}(Sb_{3.91}As_{0.08})_{3.99}(S_{12.89}Se_{0.01})_{12.90}$										1.3
11	242 (уч. 4)	$(Cu_{9.61}Ag_{0.65})_{10.26}(Zn_{1.76}Cd_{0.11}Fe_{0.11}Pb_{0.08})_{2.06}(Sb_{3.81}As_{0.05})_{3.86}S_{12.82}$										1.2
12	242 (уч. 2)	$(Cu_{10.00}Ag_{0.10})_{10.10}(Zn_{1.84}Cd_{0.06}Fe_{0.05}Pb_{0.02})_{1.97}(Sb_{3.44}As_{0.47})_{3.91}S_{13.03}$										1.1
13		$(Cu_{9.82}Ag_{0.14})_{9.96}(Zn_{2.04}Fe_{0.06}Cd_{0.02}Pb_{0.09})_{2.21}(Sb_{3.37}As_{0.49})_{3.86}(S_{12.88}Se_{0.09})_{12.97}$										0.1
14		$(Cu_{9.82}Ag_{0.14})_{9.96}(Zn_{2.04}Fe_{0.06}Cd_{0.03})_{2.13}(Sb_{3.36}As_{0.49})_{3.85}(S_{12.97}Se_{0.09})_{13.06}$										1.0

Таблица 1. Продолжение

15	242 (уч. 3)	$(\text{Cu}_{0,62}\text{Ag}_{0,41})_{10,03}(\text{Zn}_{1,84}\text{Fe}_{0,07}\text{Cd}_{0,05}\text{Pb}_{0,04})_{2,00}(\text{Sb}_{3,76}\text{As}_{0,06}\text{Te}_{0,03})_{3,83}(\text{S}_{13,03}\text{Se}_{0,07})_{13,10}$	2.2
16		$(\text{Cu}_{0,88}\text{Ag}_{0,30})_{10,18}(\text{Zn}_{1,90}\text{Fe}_{0,09}\text{Cd}_{0,06}\text{Pb}_{0,06})_{2,11}(\text{Sb}_{3,59}\text{As}_{0,16})_{3,75}(\text{S}_{12,94}\text{Se}_{0,03})_{12,97}$	1.0
17	242 (уч. 6)	$(\text{Cu}_{0,58}\text{Ag}_{0,44})_{10,02}(\text{Zn}_{1,75}\text{Fe}_{0,17}\text{Cd}_{0,29})_{2,21}(\text{Sb}_{3,78}\text{Te}_{0,06})_{3,84}\text{S}_{12,80}$	1.6
18		$(\text{Cu}_{0,28}\text{Ag}_{0,87})_{10,15}(\text{Zn}_{1,52}\text{Cd}_{0,23}\text{Fe}_{0,21}\text{Pb}_{0,01})_{1,97}(\text{Sb}_{3,62}\text{As}_{0,22}\text{Bi}_{0,14})_{3,98}\text{S}_{12,98}$	0.3
19		$(\text{Cu}_{0,80}\text{Ag}_{0,47})_{10,27}(\text{Zn}_{1,52}\text{Cd}_{0,22}\text{Fe}_{0,20}\text{Pb}_{0,12})_{2,06}(\text{Sb}_{3,82}\text{As}_{0,01})_{3,83}(\text{S}_{12,79}\text{Se}_{0,03})_{12,81}$	1.0
20		$(\text{Cu}_{0,69}\text{Ag}_{0,37})_{10,06}(\text{Zn}_{1,57}\text{Cd}_{0,26}\text{Fe}_{0,20}\text{Pb}_{0,11})_{2,06}\text{Sb}_{3,84}\text{S}_{12,95}$	0.2
21		$(\text{Cu}_{0,81}\text{Ag}_{0,42})_{10,23}(\text{Zn}_{1,57}\text{Cd}_{0,26}\text{Fe}_{0,15}\text{Pb}_{0,09})_{2,05}(\text{Sb}_{3,80}\text{As}_{0,02}\text{Bi}_{0,02}\text{Te}_{0,02})_{3,86}(\text{S}_{12,79}\text{Se}_{0,03})_{12,82}$	1.4
22		$(\text{Cu}_{0,72}\text{Ag}_{0,43})_{10,15}(\text{Zn}_{1,39}\text{Fe}_{0,28}\text{Cd}_{0,30}\text{Pb}_{0,11})_{2,06}(\text{Sb}_{3,69}\text{As}_{0,09})_{3,78}\text{S}_{13,00}$	1.3
23	242 (уч. 5)	$(\text{Cu}_{0,92}\text{Ag}_{0,37})_{10,29}(\text{Zn}_{1,32}\text{Cd}_{0,33}\text{Pb}_{0,07})_{1,72}(\text{Sb}_{3,25}\text{As}_{0,68})_{3,93}\text{S}_{13,05}$	2.2
24		$(\text{Cu}_{0,66}\text{Ag}_{0,54})_{10,20}(\text{Zn}_{1,49}\text{Cd}_{0,32}\text{Fe}_{0,16}\text{Pb}_{0,13})_{2,10}(\text{Sb}_{3,56}\text{As}_{0,21})_{3,77}\text{S}_{12,93}$	0.6
25	242/1	$(\text{Cu}_{10,13}\text{Ag}_{0,03})_{10,16}(\text{Zn}_{1,74}\text{Fe}_{0,16}\text{Cd}_{0,04}\text{Pb}_{0,02})_{1,96}(\text{As}_{1,97}\text{Sb}_{1,93})_{3,90}\text{S}_{12,97}$	0.6
26		$(\text{Cu}_{10,33}\text{Ag}_{0,02})_{10,35}(\text{Zn}_{1,83}\text{Fe}_{0,16}\text{Cd}_{0,02}\text{Pb}_{0,07})_{2,08}(\text{As}_{1,96}\text{Sb}_{1,81})_{3,77}\text{S}_{12,80}$	0.8
27	242/6 (уч. 1)	$\text{Cu}_{10,00}(\text{Cu}_{0,43}^{2+}\text{Fe}_{1,48}\text{Zn}_{0,06})_{1,97}(\text{As}_{3,79}\text{Sb}_{0,23})_{4,02}\text{S}_{13,01}$	0.8
28		$\text{Cu}_{10,00}(\text{Cu}_{0,37}^{2+}\text{Fe}_{1,56})_{1,93}(\text{As}_{3,92}\text{Sb}_{0,16})_{4,02}\text{S}_{12,99}$	0.5
29		$\text{Cu}_{10,00}(\text{Cu}_{0,35}^{2+}\text{Fe}_{1,42})_{1,77}(\text{As}_{3,96}\text{Sb}_{0,21})_{4,17}\text{S}_{13,06}$	0.3
30	242/5 (уч. 1)	$\text{Cu}_{10,00}(\text{Cu}_{0,25}^{2+}\text{Fe}_{1,76}\text{Zn}_{0,10})_{2,11}(\text{As}_{3,70}\text{Sb}_{0,18})_{3,88}\text{S}_{13,01}$	0.6
31		$\text{Cu}_{10,00}(\text{Cu}_{0,70}^{2+}\text{Fe}_{1,36}\text{Zn}_{0,08})_{2,14}(\text{As}_{3,70}\text{Sb}_{0,18})_{3,88}\text{S}_{12,98}$	0.2

Примечание: цинксогержащие тетраэдриты-зандбергериты (1–24), теннантит-тетраэдриты (25, 26), теннантиты (27–31). В том числе в мас. %: Ge 0.15 в ан. 3; Te 0.26 в ан. 15; 0.43 в ан. 17; 0.12 в ан. 21; Bi 0.50 в ан. 18; 0.19 в ан. 21.

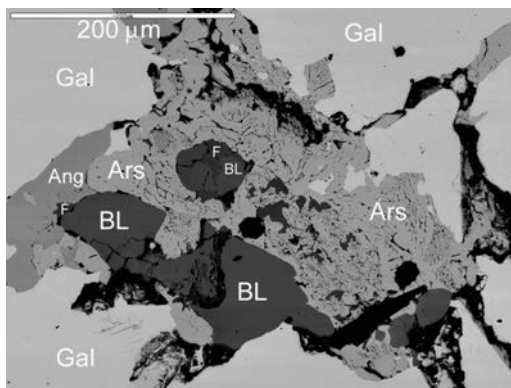
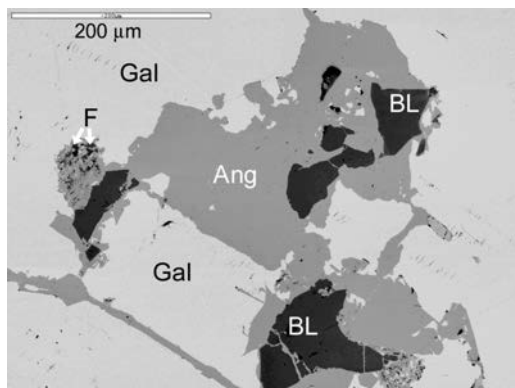


Рис. 1. Выделения блеклой руды (зандбергерита – BL), фаматинита (F) среди галенита (Gal) и англезита (Ang). В отраженных электронах.

Рис. 2. Зерна блеклой руды (зандбергерита – BL), фаматинита (F) и англезита (Ang) в матрице галенита (Gal), арсеносульванита (Ars). В отраженных электронах.

Таблица 2. Микронзондовые анализы фаматинита (мас.%) и их пересчет на формулы из расчета 64 атомов в элементарной ячейке

№ ан.	Образец	Cu	Ag	Zn	Cd	Sb	Pb	S	Σ
1	242 (уч. 1)	42.71	0.58		0.42	26.26	0.88	28.65	99.56*
2	242 (уч. 6)	42.56	0.28	0.10	0.02	24.95	2.39	29.10	99.65**
3		41.00	0.38	0.11		24.56	3.78	28.21	98.04
№ ан.	Образец	Формула							Баланс валентности Δ, %
1	242 (уч. 1)	$(\text{Cu}_{7,81}^{+}\text{Ag}_{0,19})_{8,00}(\text{Cu}_{1,15}^{2+}\text{Fe}_{0,04}\text{Cd}_{0,13}\text{Pb}_{0,15})_{16,47}\text{Sb}_{7,68}\text{S}_{31,85}$							0.4
2	242 (уч. 6)	$(\text{Cu}_{7,91}^{+}\text{Ag}_{0,09})_{8,00}(\text{Cu}_{1,88}^{2+}\text{Zn}_{0,06}\text{Cd}_{0,01}\text{Pb}_{0,41})_{16,37}\text{Sb}_{7,28}\text{S}_{32,25}\text{Se}_{0,10}$							3.3
3		$(\text{Cu}_{7,87}^{+}\text{Ag}_{0,13})_{8,00}(\text{Cu}_{1,73}^{2+}\text{Zn}_{0,06}\text{Pb}_{0,66})_{16,45}\text{Sb}_{7,37}\text{S}_{32,17}$							2.1

Примечание: в том числе: * Fe – 0.06, ** Se – 0.25.

Тетраэдрит-теннантиты и теннантиты (табл. 1, ан. 25–31) встречаются в ассоциации с сульванитом, арсеносульванитом и арсенатом Ca и Cu (предположительно, тиролитом или клинотиролитом, то есть $\text{Ca}_2\text{Cu}_5^{2+}(\text{OH},\text{O})_4(\text{AsO}_4)_2(\text{CO}_3)\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ или $\text{Ca}_2\text{Cu}_5^{2+}(\text{OH},\text{O})_{10}[(\text{AsO}_4)_4(\text{SO}_4)]_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$) (рис. 3). В тетраэдрит-теннантитах и теннанритах прослеживаются обратные колебания содержания As и Sb. Арсенат развивается по арсеносульваниту, иногда образует жилки, в которых обнаружены зерна теннанрита. А.Г. Бетехтин – первооткрыватель арсеносульванита в своё время указывал на возможность присутствия тиролита в рудах месторождения Лебедино (Бетехтин, 1941). Он считал, что ярко-зеленые порошковые налёты – продукты окисления арсеносульванита являются какой-то промежуточной разновидью между ванадатами меди, туранином $\text{Cu}_5(\text{VO}_4)_2(\text{OH})_4$ или фольбортитом $(\text{Cu},\text{Zn},\text{Ni})_3\text{V}_2\text{O}_7(\text{OH})_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, и арсенатами, тиролитом $\text{CaCu}_5^{2+}(\text{AsO}_4)_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_4\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ или эритрином $\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$.

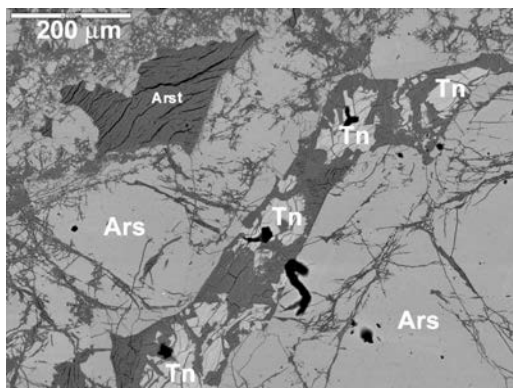
Фаматинит, как отмечалось выше, находится в ассоциации с зандбергеритом, галенитом. Выделяется в виде мелких зерен размером до 10 мкм. В отраженном свете он имеет слабый розовый оттенок по сравнению с зандбергеритом, анизотропный (рис. 1, 2, табл. 2).

Описания сульванита и арсеносульванита подробно даны в статье С.Н. Ненашевой, В.Ю. Карпенко (2010), опубликованной в настоящем сборнике.

Анализы галенита (рис. 1, 2) близки к теоретическим. Содержание Pb 87.44 и 86.30, серы 13.82 и 13.46 мас.%, суммы 101.26 и 99.76 мас.%. Баланс валентности 2.0 и 0.9% соответственно. Анализы пересчитываются на формулы $\text{PbS}_{1.02}$ и $\text{PbS}_{1.01}$.

Рис. 3. Выделения блеклой руды-теннанрита (Tn) в жилке арсената Cu и Ca (Arst), вероятно, тиролита среди арсеносульванита (Ars). В отраженных электронах.

Рис. 4. Борнит (Bn), пирит (Py) и дигенит (D) среди карбонатов Cu и арсенатов Cu и Ca. В отраженных электронах.

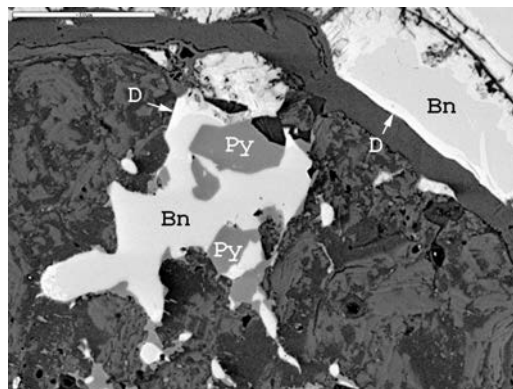


Четыре анализа пирита (рис. 4–6, табл. 3, ан. 1–4) практически не отличаются друг от друга, за исключением анализов 2 и 3, в которых содержится небольшое количество Cu (0.87 и 0.71 мас.%) соответственно, что составляет 0.02 и 0.01 атомов в формуле. Хотя еще П. Рамдор (1962) отмечал, что примеси меди в пирите, скорее всего, связаны с механическими загрязнениями, в нашем случае это микропримеси.

В ассоциации с арсеносульванитом, пиритом, халькопиритом и арсенатом меди, вероятно тиролитом, обнаружено зерно пирротина-5C $\text{Fe}_7^{2+}\text{Fe}_2^{3+}\text{S}_{10}$ (табл. 3, ан. 5), содержащего примеси меди. Анализ этого зерна пересчитывается на формулу $\text{Fe}_{8.67}\text{Cu}_{0.31}\text{S}_{10.01}$ или $(\text{Fe}_{6.67}\text{Cu}_{0.31})_2^{2+}\text{Fe}_{2.00}^{3+}\text{S}_{10.01}$, что почти идеально соответствует теоретическому составу.

Анализ борнита близки к теоретическому составу этого минерала $\text{Cu}_{5+x}\text{FeS}_{4-x}$, Cu_5FeS_4 или $\text{Cu}_{5-x}\text{FeS}_{4+x}$ (табл. 3, ан. 6–8, рис. 4–6).

Интересны результаты анализа материала, который в отраженном свете выглядит как ковеллин. Крупные участки (до 300 x 200 мкм), разбиты плоскостями спайности на пластины шириной до 10–15 мкм (рис. 5, 6). В отраженном свете минерал голубой, двуотражение от светло-серого с голубоватым оттенком до ярко-голубого, анизотропия от светло-серого до розового, ярко-синего, оранжевого. Анализы разных пластин (рис. 6) пересчитываются на формулы, соответствующие разным минералам системы Cu-S, а именно: анализы 13, 14, (табл. 3) пересчитываются на формулу, отвечающую анилиту $\text{Cu}_7\text{S}_4 \rightarrow \text{Cu}_6^+\text{Cu}^{2+}\text{S}_4$; анализ 15 (табл. 3) – смеси спионкопита $\text{Cu}_{39}\text{S}_{28}$.



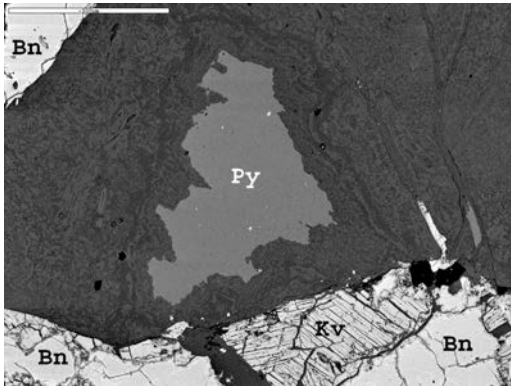


Рис. 5. Пирит (Py), ковеллин (Kv), борнит (Bn) среди прорастаний карбонатов Cu и арсенатов Cu и Ca. В отраженных электронах.

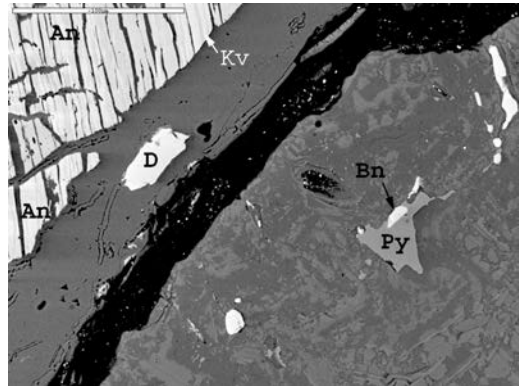


Рис. 6. Ковелин (Kv), анилит (An), борнит (Bn), дигенит (D), пирит (Py) в матрице гипергенных минералов. В отраженных электронах.

Таблица 3. Микророзондовые анализы сульфидов (мас. %)

№	Образец	Fe	Cu	S	Σ	Формула	Баланс валентности Δ, %
1	245/1 (уч. 1)	45.92		51.87	97.79	FeS _{1.97}	
2	245/1 (уч. 3)	45.72	0.87	52.08	98.67	FeCu _{0.02} S _{1.98}	
3		44.91	0.71	52.23	97.85	FeCu _{0.01} S _{2.02}	
4	245/1 (уч. 5)	46.38		52.41	98.79	FeS _{1.97}	
5	242/6 (уч. 3)	57.41	2.32	38.04	97.77	Fe _{8.67} Cu _{0.31} S _{10.01} ИЛИ (Fe _{6.67} Cu _{0.31}) ²⁺ Fe _{2.00} ³⁺ S _{10.01}	0.2
6	245/1 (уч. 3)	12.63	60.27	25.75	98.65	Cu _{4.80} Fe _{1.14} S _{4.06}	1.2
7	245/1 (уч. 5)	11.00	63.80	25.45	100.25	Cu _{5.03} Fe _{0.98} S _{3.98}	0.4
8		11.28	62.48	25.46	99.22	Cu _{4.97} Fe _{1.02} S _{4.01}	0.1
9	245/1 (уч. 5)		71.22	29.79	101.01	Cu _{1.09} S _{0.91}	
10			71.91	28.47	100.38	Cu _{1.12} S _{0.88}	
11	245/1 (уч. 1)	0.76	78.35	21.79	100.90	Cu _{7.96} Cu _{1.00} ²⁺ Fe _{0.10} S _{4.94}	2.8
12		0.66	78.21	22.20	101.07	Cu _{7.90} Cu _{1.00} ²⁺ Fe _{0.08} S _{5.01}	0.4
13	245/1 (уч. 1)	77.37	22.29	99.66		Cu _{6.00} Cu _{1.00} ²⁺ S _{4.00}	0.0
14		77.50	23.18	100.68		Cu _{5.91} Cu _{1.00} ²⁺ S _{4.09}	3.0
15		72.27	27.78	100.05		Cu _{12.00} Cu _{11.84} ²⁺ S _{18.16} *	1.8

Примечание: пирит (1–4), пирротин-5С (5), борнит (6–8), ковелин (9, 10), дигенит (11, 12), анилит (13–14) и анализ смешанного состава между спионкопитом Cu₃₉S₂₈ → Cu₂₂Cu₇²⁺S₂₈ и ярроуитом Cu₉S₈ → Cu₃Cu₇²⁺S₈ (15). *Последний (ан. 15) пересчитан на состав средний между спионкопитом и ярроуитом.

→ Cu₂₂Cu₇²⁺S₂₈ и ярроуита Cu₉S₈ → Cu₂Cu₇²⁺S₈; анализы 9, 10 (табл. 3) — ковелин CuS или 3CuS → Cu₂⁺S·Cu²⁺[S₂] (рис. 5, 6). Нетрудно заметить, что количество двухвалентной меди в этом ряду увеличивается по направлению к ковелину, что говорит об изменении кислотности — щелочности среды в процессе минералообразования в сторону усиления её кислотности. Экспериментально установлено, что с ростом кислотности среды устойчивыми становятся сульфиды, содержащие меньшее количество (суммарно Cu⁺ и Cu²⁺) меди. Их электронейтральность достигается за счет окисле-

ния части меди до двухвалентного состояния. Д.Т. Рикард (Rickard, 1973) при синтезе сульфидов меди в низкотемпературных условиях, близ зоны окисления, за счет взаимодействия Na₂S и Cu₂O получил в щелочной среде (pH > 7.5) джарлеит Cu₃₁S₁₆ → Cu₃₀⁺Cu²⁺S₁₆, а в кислой (pH < 7) — ковелин. Экспериментальная работа Л. Уайтсайда и Р. Гобла (Whiteside, Goble, 1986) по выщелачиванию меди из синтетических халькозина и дигенита кислым раствором сульфата железа показала, что при воздействии указанного реагента на дигенит образуется сначала анилит, а затем — спионкопит, ярроуит и

ковеллин. Вывод об изменении кислотности-щелочности среды в сторону увеличения кислотности с понижением температуры подтверждается и присутствием реликтов дигенита в виде мелких, размером до 20–30 микрон, идиоморфных зерен среди гипергенных минералов — карбонатов, арсенатов меди, сульфатов железа (рис. 6, табл. 3, ан. 11, 12). Иногда дигенит выделяется в виде каёмки вокруг борнита (рис. 4). В дигените присутствуют примеси Fe в количестве 0.76 и 0.66 мас.% соответственно в ан. 10 и 11, что составляет 0.10 и 0.08 атомов в формуле. Дигенит устойчив в щелочной обстановке.

Выводы

На месторождении Лебедино установлен ряд минералов, не известных ранее. Это обедненные медью, по сравнению с халькозином, минералы полисоматической серии халькозина: дигенит; анилит; смесь (вероятно, тончайшие сростания) спионкопита и ярроуита. Кроме того, описаны анизотропный арсеносульфаниит и англезит.

Обнаруженные минералы — дигенит, анилит, спионкопит и ярроуит — свидетельствуют об изменениях кислотности-щелочности среды в процессе минералообразования. С падением температуры щелочная обстановка сменяется кислой. Дигенит устойчив в широком интервале температур и в щелочной среде, в то время как, устойчивые в узком интервале температур анилит (от 0 до 30°C), спионкопит и ярроуит (от 0 до 157°C) образуются в кислой обста-

новке. Ковеллин устойчив при температурах 0–507°C, но в кислой среде.

Блёклые руды месторождения Лебедино представлены в основном сурьмяными разностями: цинксодержащими тетраэдритами — зандбергеритами, ассоциирующими с галенитом, англезитом, арсеносульфаниитом, фаматинитом; тетраэдрит-теннантитами и теннантитами, встречающимися в ассоциации с сульфаниитом, арсеносульфаниитом и арсенатом Ca и Cu (предположительно, тиролитом или клинотиролитом).

Литература

- Бетехтин В.Г.* О новом минерале арсеносульфаниите // ЗВМО. **1941**. Ч. 70. № 2. С. 161–164.
- Мозгова Н.Н., Цепин А.И.* Блёклые руды. **1983**. М.: Наука. 280 с.
- Петровская Н.В.* Самородное золото. **1973**. М.: Наука. 347 с.
- Рамгор П.* Рудные минералы и их сростания. **1962**. М.: Изд-во Иностран. Лит. 1132 с.
- Фасталович А.И., Петровская Н.В.* Характер оруденения Лебедино золоторудного месторождения (Алдан) // Советская геология. **1940**. № 2–3. С. 54–65.
- Rickard D.J.* Copper sulphides formation chemistry at low temperatures // Tschermaks Mineral. Petrogr. Mag. **1973**. V. 19. № 1. P. 60–75.
- Whiteside L.S., Goble R.Y.* Structural and compositional changes in copper sulfides during leaching and dissolution // Canad. Min. **1986**. V. 24. P. 247–258.