

## РАЗНООБРАЗИЕ БЛЕКЛЫХ РУД И ВТОРИЧНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЛЕБЕДИНОЕ (ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЛДАН)

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

УРАН Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва, [nenashevasn@mail.ru](mailto:nenashevasn@mail.ru)

В статье приводятся новые результаты изучения минералов месторождения Лебедино. Кроме ранее описанных блеклых руд: цинк содержащего тетраэдрита — заңдбергерита, тетраэдрит-теннантита и теннантита (Ненашева и др., 2010), обнаружены: теллурсодержащие блёклые руды (голдфилдит-теннантит-тетраэдриты, голдфилдит-теннантиты, теллурсодержащие теннантит-тетраэдриты), тетраэдриты, содержащие значительные количества Ag, анизотропные теннантит-тетраэдриты. Они встречаются в разных ассоциациях, минеральный состав которых позволяет судить об условиях образования руд; составе минералообразующих растворов, температурном режиме, кислотности-щелочности среды. В рудах установлены минералы полисоматической серии халькозина: дигенит, анилит, спинокопит, яроуит, использующиеся в качестве геологического термометра.

В статье 9 таблиц, 9 рисунков, список литературы из 17 названий.

Ключевые слова: блёклые руды, бурнонит, гессит, петцит, анилит, спинокопит, яроуит, байддонит, клинотиролит, страшмирит, леогангит, месторождение Лебедино.

### Введение

Месторождение Лебедино подробно охарактеризовано в статье С.Н. Ненашевой, В.Ю. Карпенко, Л.А. Паутова (2010). 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 гранитов, 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 развиты метасоматические залежи сульфидно-карбонатного состава, местами как ответвления жил (Петровская, 1973). Среди первичных рудных минералов преобладает пирит, присутствует халькопирит, а в отдельных жилах — гематит. Реже в рудах встречаются галенит, сфалерит, пирротин, галенобисмутит, тетраэдрит, золото, борнит, кобальтин, сульванит. Гипергенные минералы представлены гидроксидами железа, ярозитом, купритом, халькозином, ковелином, малахитом, азуритом, церусситом, гипсом, мелантеритом (Фасталович, Петровская, 1940; Ненашева и др., 2010).

### Методы и результаты исследования

Полированные шлифы изучались под микроскопом ОРТОН. Химический состав ис-

следовался на сканирующем электронном микроскопе CamScan-4D с использованием энергодисперсионного спектрометра Link ISIS. Ускоряющее напряжение 20 кВ, поглощенный ток на металлическом Со 4 нА. Дебаграммы получались на рентгеновском аппарате УРС-50 в камере РКД 57.3 мм, FeK $\alpha$ -излучение, Mn-фильтр. Образец готовился путём экстрагирования вещества из шлифа и закатывания его в резиновый шарик.

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, ковелина, дигенита, анилита, спинокопита, яроуита, диагностированные микрорентгеноспектральным анализом.

В статье используются названия блёклых руд, согласно классификации, предложенной Н.Н. Мозговой и А.И. Цепиным (1983). Блёклые руды в основном сурьмяные. Тетраэдрит с большим количеством Zn — заңдбергерит — выделяется в ассоциации с галенитом, фаматинитом, арсеносульванитом, англезитом, арсенатами меди: байддонитом, леогангитом, эвхройтом (Ненашева и др., 2010). Количество Zn в анализах переменное (от 5.14 до 8.07 мас.%, что составляет от 1.32 до 2.04 атомов в формуле). Во всех анализах присутствует Ag в количестве от 0.65 до 4.37 мас.%, что составляет от 0.1 до 0.68 атомов в формуле. Количество Sb меняется от 23.53 до 28.16 мас.%, что превышает 3 атома и составляет от 3.25 до 3.85

Разнообразие блеклых руд  
и вторичная минерализация месторождения Лебединое (Центральный Алдан)

35

Таблица 1. Микрзондовые анализы блеклых руд (мас.%)

№ ан.	Образец	Cu	Ag	Fe	Zn	Pb	Sb	As	Te	S	Se	Σ
1	53/278(уч. 7)	41.58		0.01	6.68	0.56	14.68	7.40	2.59	25.44		98.94
2		46.27			2.69		5.75	8.73	10.77	25.98		100.19
3		45.37			1.61		7.16	5.89	12.83	25.44		98.30
4		47.27			1.62		5.18	6.90	11.83	25.68		98.48
5		47.21			3.36		4.78	9.23	9.48	26.03	0.36	100.45
6	53/278(уч. 6)	41.99			7.56		14.86	8.34	1.70	25.95		100.40
7*		44.73		0.14	3.36		7.66	7.23	9.25	26.00		98.37
8*		44.87			3.66		10.92	5.28	9.71	25.57		100.01
9*	53/278(уч. 4)	46.05			2.13		9.56	4.49	11.11	25.68		99.02
10*		47.26			2.29		8.96	5.91	10.34	26.60		101.36
11*		46.99			0.79		10.99	3.24	13.52	25.81		101.34
12*		46.13			3.12		9.58	4.72	10.26	25.04	0.69	99.54
13*		45.30			3.13		11.32	5.54	9.55	25.97		100.81
14*		45.49			2.86		8.25	7.62	10.26	27.15		101.63
15*		46.04			2.10		6.79	7.63	11.56	26.47		100.59
16*		46.33			2.38		7.99	6.75	11.04	25.30	0.36	100.15
17*		43.96			4.63		9.48	8.06	6.63	25.23	0.46	98.45
18**		42.62			8.74		9.21	12.88	0.77	26.43		100.65
19**		42.35			8.25		10.34	12.71	0.52	27.89		102.06
20**		42.10			7.58		8.61	13.75	0.75	27.44		100.23
21**		43.18			7.74		9.78	13.59	0.17	26.88		101.34
22**		43.46			7.16		8.67	12.18	2.28	26.43		100.18
23**		44.25			5.35		5.98	11.05	5.80	26.58		99.01
24**		44.32			4.67		5.78	11.93	5.52	26.33	0.64	99.19
25**		41.69			9.12		6.84	15.46	0.59	26.59		100.29
26**	53/278(уч. 6)	43.56			5.55		7.52	10.66	5.35	26.66		99.30
27**		44.04			5.45		10.80	7.84	5.30	26.47		99.90
28	2 (уч. 2)	34.89	4.93	4.52	2.92	0.87	27.31			24.33		99.77
29		35.63	4.26	4.02	3.37		27.47			24.62		99.37
30		35.45	4.79	4.84	2.61		27.60			24.49		99.78
31		36.66	3.44	4.58	3.18		23.67	2.31		24.91		98.75
32		35.83	4.87	4.90	2.64		24.94	1.28		24.89		99.35
33		36.15	3.62	4.52	3.50		23.84	2.50		24.87		99.00
34		35.62	3.69	4.72	3.06		24.28	2.07		24.37		97.81
35	2 (уч. 3)	35.46	2.88	4.12	2.99	2.14	25.10	1.30		23.50		97.49
36	242/1-2	41.13		0.62	7.79		18.01	7.20		25.88		100.63
37		41.68		0.43	8.31		18.50	7.07		26.59		102.58
38		41.05		0.38	8.22		18.84	7.26		25.88		101.63
39		41.65		0.32	8.63		18.81	6.87		25.93		102.21
40		41.79		0.47	8.56		13.17	10.37		26.74		101.10
41		41.68		0.40	7.83		15.03	9.44		26.81		101.19
42		41.54		0.33	8.09		16.36	8.59		26.22		101.13
43		39.49		1.42	7.11		18.73	6.00		25.26		98.01

Примечание: \* – светлая зона, \*\* – тёмная зона. Ан. 1–35 выполнены В.Ю. Карпенко, ан. 36–43 – Л.А. Паутовым.

атомов в формуле (Ненашева и др., 2010). Отчетливой корреляции между Zn и As нет. Наблюдается корреляция содержаний Sb и суммы Zn + Ag. Большему количеству Sb отвечает большее содержание Zn + Ag. Такая корреляция отмечалась раньше для блёклых руд в работе Н.Н. Мозговой и А.И. Цепина (1983).

В тетраэдрит-теннантитах и теннантитах, ассоциирующих с сульфанимом, арсеносульфанимом и арсенатом Са и Cu (тиролитом  $\text{Ca}_2\text{Cu}_5^{2+}(\text{OH},\text{O})_4(\text{AsO}_4)_2(\text{CO}_3)\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  или клинотиролитом,  $\text{Ca}_2\text{Cu}_9^{2+}(\text{OH},\text{O})_{10}[(\text{AsO}_4)_4(\text{SO}_4)]_4\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), прослеживаются обратные колебания содержаний As и Sb (Ненашева и др., 2010).

В ассоциации с галенитом, кварцем, золотом, вторичными медными сульфидами полисоматической серии халькозина  $m\text{Cu}_2\text{S}\cdot n\text{CuS}$ , арсенатами меди встречаются блёклые руды, содержащие теллур: голдфилдит-теннантит-тетраэдриты (табл. 1, 2, ан. 8, 9, 11–13), голдфилдит-тетраэдрит-теннантиты (табл. 1, 2, ан. 2, 5, 7, 10, 14–17, 23, 24, 26, 27), теллурсодержащие-тетраэдрит-теннантиты (табл. 1, 2, ан. 1, 6), теллурсодержащие теннантит-тетраэдриты (табл. 1, 2, ан. 18–22). Выделения блёклых руд ксеноморфные, порой они заполняют промежутки между зёрнами кварца, галенита, пирита, иногда обрастают кристаллы кварца (рис. 1). Количество теллура колеблет-

Таблица 2. Пересчет микрозондовых анализов блеклых руд на формулы из расчета 29 атомов в элементарной ячейке

№ ан.	Образец	Формула	Δ, % - баланс валентности
1	53/278 (уч. 7)	$Cu_{10.00}(Cu_{0.58}Zn_{1.65}Pb_{0.04}2.27(Sb_{1.95}As_{1.60}Te_{0.17})3.72(S_{12.84}Te_{0.16})_{13.00})$	3.0
2		$Cu_{10.21}(Cu_{1.34}Zn_{0.66}2.00(Sb_{0.75}As_{1.85}Te_{1.20})3.80(S_{12.86}Te_{0.14})_{13.00})$	3.0
3		$Cu_{11.10}(Cu_{0.60}Zn_{0.40}1.00(Sb_{0.96}As_{1.28}Te_{1.65})3.96S_{13.00})$	1.7
4		$Cu_{10.41}(Cu_{1.60}Zn_{0.40}2.00(Sb_{0.69}As_{1.49}Te_{1.42})3.60(S_{12.92}Te_{0.08})_{13.00})$	2.4
5		$Cu_{10.47}(Cu_{1.19}Zn_{0.81}2.00(Sb_{0.62}As_{1.95}Te_{0.98})3.53(S_{12.74}Se_{0.07}Te_{0.19})_{13.00})$	0.2
6	53/278 (уч. 6)	$Cu_{10.29}(Cu_{0.17}Zn_{1.83}2.00(Sb_{1.93}As_{1.76}Te_{0.21})3.90S_{12.81})$	2.2
7*		$Cu_{10.21}(Cu_{1.13}Zn_{0.83}Fe_{0.04}2.00(Sb_{1.01}As_{1.55}Te_{1.17})3.73S_{13.06})$	1.7
8*		$Cu_{10.30}(Cu_{1.10}Zn_{0.90}2.00(Sb_{1.45}As_{1.14}Te_{1.11})3.82(S_{12.88}Te_{0.12})_{13.00})$	1.9
9*	53/278 (уч. 4)	$Cu_{10.31}(Cu_{1.47}Zn_{0.53}2.00(Sb_{1.28}As_{0.97}Te_{1.42})3.67S_{13.02})$	2.6
		$Cu_{11.31}(Cu_{0.47}Zn_{0.53}1.00(Sb_{1.28}As_{0.97}Te_{1.42})3.67S_{13.02})$	1.2
10*		$Cu_{10.26}(Cu_{1.45}Zn_{0.55}2.00(Sb_{1.16}As_{1.24}Te_{1.28})3.68S_{13.06})$	1.7
		$Cu_{11.26}(Cu_{0.45}Zn_{0.55}1.00(Sb_{1.16}As_{1.24}Te_{1.28})3.68S_{13.06})$	2.0
11*		$Cu_{10.13}(Cu_{1.81}Zn_{0.19}2.00(Sb_{1.46}As_{0.70}Te_{1.71})3.87S_{13.00})$	5.3
		$Cu_{11.13}(Cu_{0.81}Zn_{0.19}1.00(Sb_{1.46}As_{0.70}Te_{1.71})3.87S_{13.00})$	1.7
12*		$Cu_{10.57}(Cu_{1.22}Zn_{0.78}2.00(Sb_{1.28}As_{1.02}Te_{1.30})3.60(S_{12.68}Se_{0.14})_{12.82})$	3.9
		$Cu_{11.57}(Cu_{0.22}Zn_{0.78}1.00(Sb_{1.28}As_{1.02}Te_{1.30})3.60(S_{12.68}Se_{0.14})_{12.82})$	0.1
13*		$Cu_{10.17}(Cu_{1.24}Zn_{0.76}2.00(Sb_{1.49}As_{1.18}Te_{1.20})3.87S_{12.96})$	3.9
		$Cu_{11.57}(Cu_{0.24}Zn_{0.76}1.00(Sb_{1.49}As_{1.18}Te_{1.20})3.87S_{12.96})$	0.2
14*		$Cu_{10.00}(Cu_{1.16}Zn_{0.68}1.86(Sb_{1.06}As_{1.59}Te_{1.26})3.91S_{13.23})$	0.9
		$Cu_{11.00}(Cu_{0.18}Zn_{0.68}0.86(Sb_{1.06}As_{1.59}Te_{1.26})3.91S_{13.23})$	2.8
15*		$Cu_{10.00}(Cu_{1.48}Zn_{0.51}1.99(Sb_{0.88}As_{1.61}Te_{1.43})3.92S_{13.08})$	3.7
		$Cu_{11.00}(Cu_{0.48}Zn_{0.51}0.99(Sb_{0.88}As_{1.61}Te_{1.43})3.92S_{13.08})$	0.3
16*		$Cu_{10.32}(Cu_{1.42}Zn_{0.58}2.00(Sb_{1.06}As_{1.45}Te_{1.39})3.90(S_{12.70}Se_{0.07})_{12.77})$	6.8
		$Cu_{11.32}(Cu_{0.42}Zn_{0.58}1.00(Sb_{1.06}As_{1.45}Te_{1.39})3.90(S_{12.70}Se_{0.07})_{12.77})$	3.3
17*		$Cu_{11.19}Zn_{1.14}(Sb_{1.26}As_{1.74}Te_{0.84})3.84(S_{12.73}Se_{0.10})_{12.83})$	0.6
18**		$Cu_{10.34}Zn_{2.06}(Sb_{1.16}As_{2.65}Te_{0.09})3.90S_{12.70})$	3.2
		$Cu_{10.34}Zn_{2.06}(Sb_{1.16}As_{2.65})3.81(S_{12.70}Te_{0.09})_{12.79})$	1.2
19**		$Cu_{10.00}(Cu_{0.06}Zn_{1.90}1.96(Sb_{1.28}As_{2.56}Te_{0.06})3.90S_{13.13})$	2.2
20**		$Cu_{10.00}(Cu_{0.14}Zn_{1.77}1.91(Sb_{1.08}As_{2.81}Te_{0.09})3.96S_{13.10})$	1.3
21**		$Cu_{10.19}(Cu_{0.19}Zn_{1.81}2.00(Sb_{1.23}As_{2.77})4.00(S_{12.80}Te_{0.02})_{12.82})$	2.1
		$Cu_{10.19}(Cu_{0.19}Zn_{1.81}2.00(Sb_{1.23}As_{2.77}Te_{0.02})4.00S_{12.80})$	2.6
22**		$Cu_{10.31}(Cu_{0.30}Zn_{1.70}2.00(Sb_{1.10}As_{2.52}Te_{0.28})3.90S_{12.79})$	2.7
		$Cu_{10.31}(Cu_{0.30}Zn_{1.70}2.00(Sb_{1.10}As_{2.52}Te_{0.07})3.69(S_{12.79}Te_{0.21})_{13.00})$	2.4
23**		$Cu_{10.20}(Cu_{0.72}Zn_{1.28}2.00(Sb_{0.77}As_{2.31}Te_{0.71})3.76S_{13.00})$	1.1
24**		$Cu_{10.06}(Cu_{0.88}Zn_{1.12}2.00(Sb_{0.74}As_{2.50}Te_{0.68})3.92(S_{12.88}Se_{0.13})_{13.01})$	1.8
25**		$Cu_{10.06}Zn_{2.14}(Sb_{0.86}As_{3.16})4.00(S_{12.71}Te_{0.07})_{12.78})$	2.9
26**	53/278 (уч. 6)	$Cu_{10.09}(Cu_{0.67}Zn_{1.33}2.00(Sb_{0.97}As_{2.23}Te_{0.66})3.86S_{13.05})$	1.2
27**		$Cu_{10.26}(Cu_{0.68}Zn_{1.32}2.00(Sb_{1.40}As_{1.65}Te_{0.66})3.71S_{13.04})$	0.1
28	2 (уч. 2)	$(Cu_{9.32}Ag_{0.78})_{10.10}(Fe_{1.37}Zn_{0.76}Pb_{0.07})_{2.20}Sb_{3.81}S_{12.88})$	0.6
29		$(Cu_{9.47}Ag_{0.67})_{10.14}(Fe_{1.22}Zn_{0.87}2.09Sb_{3.81}S_{12.96})$	0.6
30		$(Cu_{9.41}Ag_{0.75})_{10.16}(Fe_{1.46}Zn_{0.67}2.15Sb_{3.82}S_{12.88})$	0.5
31		$(Cu_{9.61}Ag_{0.53})_{10.14}(Fe_{1.36}Zn_{0.81}2.17(Sb_{3.24}As_{0.51})_{3.75}S_{12.93})$	0.5
32		$(Cu_{9.42}Ag_{0.75})_{10.17}(Fe_{1.46}Zn_{0.68}2.14(Sb_{3.42}As_{0.29})_{3.71}S_{12.97})$	1.4
33		$(Cu_{9.47}Ag_{0.56})_{10.03}(Fe_{1.35}Zn_{0.89}2.24(Sb_{3.25}As_{0.36})_{3.81}S_{12.91})$	0.5
34		$(Cu_{9.49}Ag_{0.58})_{10.07}(Fe_{1.43}Zn_{0.79}2.22(Sb_{3.38}As_{0.47})_{3.85}S_{12.86})$	1.3
35	2 (уч. 3)	$(Cu_{9.69}Ag_{0.46})_{10.15}(Fe_{1.28}Zn_{0.79}Pb_{0.18}2.25(Sb_{3.58}As_{0.30})_{3.88}S_{12.72})$	3.0
36	242/1-2	$Cu_{10.27}(Zn_{1.89}Fe_{0.18}2.07(Sb_{2.35}As_{1.52})3.87S_{12.80})$	1.6
37		$Cu_{10.19}(Zn_{1.97}Fe_{0.12}2.06(Sb_{2.36}As_{1.46})3.82S_{12.89})$	0.2
38		$Cu_{10.20}(Zn_{1.99}Fe_{0.11}2.10(Sb_{2.44}As_{1.53})3.97S_{12.74})$	3.1
39		$Cu_{10.29}(Zn_{2.07}Fe_{0.09}2.16(Sb_{2.42}As_{1.44})3.86S_{12.69})$	3.0
40		$Cu_{10.15}(Zn_{2.02}Fe_{0.13}2.15(Sb_{1.67}As_{2.14})3.81S_{12.88})$	0.5
41		$Cu_{10.18}(Zn_{1.86}Fe_{0.11}1.97(Sb_{1.92}As_{1.95})3.87S_{12.97})$	0.8
42		$Cu_{10.24}(Zn_{1.94}Fe_{0.09}2.03(Sb_{2.10}As_{1.80})3.90S_{12.82})$	1.4
43		$Cu_{10.14}(Zn_{1.77}Fe_{0.41}2.18(Sb_{2.51}As_{1.31})3.82S_{12.85})$	1.0

Примечание: \* – светлая зона, \*\* – темная зона. Ан. 1, 6 – теллуросодержащие теннантит-тетраэдриты, 18 – 22 теллуросодержащие тетраэдрит-теннантиты, ан. 2–5, 7, 10, 14–17, 23, 24, 26, 27 – голдфилдит-тетраэдрит-теннантиты, ан. 8, 9, 11–13 – голдфилдит-теннантит-тетраэдриты, ан. 25 – теннантит, 28–35 – тетраэдриты, 36–39, 41–43 – анизотропные теннантит-тетраэдриты, 40 – тетраэдрит-теннантит.

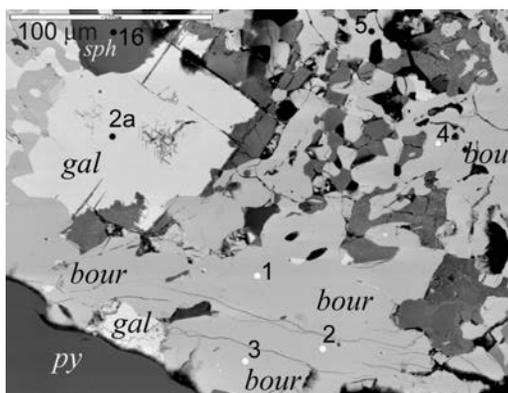
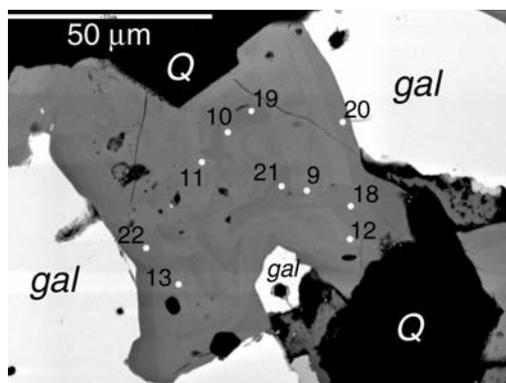
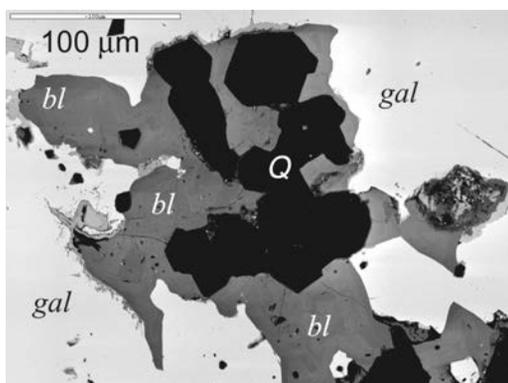


Рис. 1. Теллурсодержащие блёклые руды, обрастающие кристаллы кварца. Черное – кварц, серое – теллурсодержащая блёкляя руда, светло-серое – галенит. В отраженных электронах. Образец 53/278, участок 4.

Рис. 2. Зональность в теллурсодержащих блёклых рудах. Серое – теллурсодержащая блёкляя руда; светлые зоны – голдфилдит-теннантит-тетраэдриты (табл. 1, 2, ан. 2–17), темные зоны – голдфилдит-теннантиты и теллурсодержащие теннантит-тетраэдриты (табл. 1, 2, ан. 1, 18–27), белое – галенит (gal), черное – кварц (Q). Цифрами указаны номера анализов. В отраженных электронах. Образец 53/278, участок 4.

Рис. 3. Заполнение распавшимися зернами халькопирита, бурнонитом и тетраэдритом промежутков между крупными (до 100 мкм) выделениями галенита, сфалерита, пирита. Обозначения минералов: gal – галенит, py – пирит, sph – сфалерит, boиr – бурнонит. Цифрами указаны номера анализов (табл. 6 для сульфидов) и (табл. 7 для бурнонита). В отраженных электронах. Образец 2, участок 3.

ся от 0.17 до 13.52 мас.%, что составляет от 0.02 до 1.71 атомов в формуле. Теллурсодержащие блёклые руды образуют зональные кристаллы (рис. 2). Зоны хорошо выделяются по отражению и по содержанию теллура. Светлые зоны представлены голдфилдит-теннантит-тетраэдритом и голдфилдит-тетраэдрит-теннантитом, с содержанием Te от 6.63 до 13.52 мас.%, темные – голдфилдит-тетраэдрит-теннантитом и теллурсодержащим теннантит-тетраэдритом с меньшим количеством Te (до 6 мас.%). Теллурсодержащие блёклые руды в отраженном свете ярче других блёклых руд, имеют розовато-серый оттенок, обладают слабым двуотражением и едва заметной анизотропией. Интенсивность розового оттенка, вероятно, обусловлена увеличением количества теллура в составе. О двуотражении и анизотропии голдфилдита ранее упоминал П. Рамдор (1962). Баланс валентности в блёклых рудах, содержащих более 10 мас.% Te, рассчитывался с учетом того, что количество одновалентной меди в таких минералах больше, чем 11 атомов, так как компенсация избыточного заряда, возникающего при замещении  $(As, Sb)^{3+} \rightarrow Te^{4+}$ , происходит путём деполяризации за счёт восстановления катиона  $Cu^{3+}$ , заполня-

ющего вакансии в каркасе, до одновалентного состояния. Эта точка зрения высказывалась Н.Н. Мозговой и А.И. Цепиным (1983, с. 156) и подтвердилась исследованием особенностей состава теллурсодержащих блёклых руд из 11 вулканогенных и гидротермальных кварцево-сульфидных жильных месторождений золото-сульфидной формации (Ненашева, 2009). На возможность существования  $Cu^{3+}$  в блёклой руде указывал Н.В. Белов (1952).

Тетраэдрит, содержащий более 4 мас.% Fe (до 4.90) и значительные количества Ag (от 2.88 до 4.87 мас.%), Zn (от 2.61 до 3.37 мас.%), ассоциирует с пиритом, халькопиритом, сфалеритом, бурнонитом, гематитом, медными сульфидами (ковеллином, спионкопитом, яроуитом, анилитом, джиритом), теллуридами (гесситом, петцитом, алтаитом), арсенатами (леогангитом и байлдонитом) (табл. 1, 2, ан. 28 – 35). На одних участках такой тетраэдрит заполняет промежутки между зернами сфалерита, кварца, халькопирита, галенита. На других он вместе с бурнонитом заполняет промежутки между довольно крупными (до 100 мкм) зернами галенита, сфалерита, халькопирита (рис. 3), причем зерна халькопирита оказались неоднородными. В них отчетли-

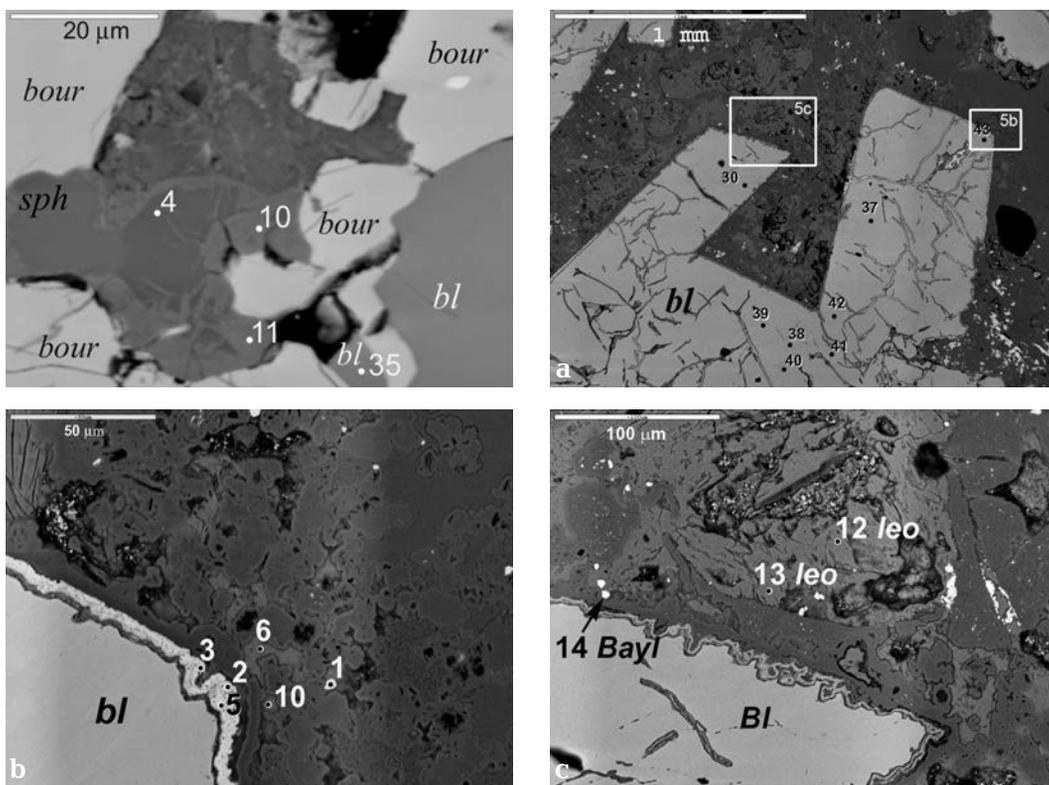


Рис. 4. Неоднородные зерна халькопирита и образовавшиеся по нему медные сульфиды полисоматической серии халькозина. Обозначения минералов: *сп* – халькопирит, *ап* – анилит, *де* – джирит, *сп* – спионкопсит, *уар* – уарроуит, *сов* – ковеллин. Цифрами указаны номера анализов (табл. 6 для сульфидов) и (табл. 1 для блёклой руды). В отраженных электронах. Образец 2, участок 3.

Рис. 5. Крупное выделение анизотропного теннантит-тетраэдрита, (а) разбитого извилистыми трещинами (светло-серое), по которым выделяются вторичные минералы – арсенаты меди (более тёмные оттенки серого цвета); б и с – увеличенные фрагменты выделенных участков. Обозначения минералов: *bayl* – байлдонит, *leo* – леогангит. Цифрами указаны номера анализов (табл. 1, 4). В отраженных электронах. Образец 242/1-2.

во видны тонкие каймы, мелкие пластинки (их ширина 1–2 мкм), точечные выделения медных сульфидов полисоматической серии халькозина (рис. 4).

От описанных выше тетраэдритов, теллуродержащих тетраэдрит-теннантитов и теннантитов отличается высокоцинкистый теннантит-тетраэдрит – зандбергерит, обладающий более ярким отражением, близким к отражению галенита, видимым двуотражением и ясной анизотропией (табл. 1, 2, ан. 36–43). В скрещенных николях хорошо видно, что довольно крупные выделения распадаются на разноориентированные ксеноморфные мелкие зерна, имеющие вследствие разной ориентировки различное отражение, что позволяет увидеть эффект двуотражения. В скрещенных николях наблюдаются немногочисленные красные внутренние рефлекссы. Крупные выделения этой блёклой руды разбиты извилистыми трещинами, по которым

выделяются вторичные минералы (рис. 5), предположительно арсенаты, что подтвердилось присутствием рефлекссов эвхроита и леогангита в рентгенограмме блёклой руды (табл. 3). Химический состав анизотропной блёклой руды соответствует составу высокоцинкистого тетраэдрит-теннантита – зандбергерита. Анизотропный зандбергерит (табл. 1, 2, ан. 36–43) отличается от изотропного зандбергерита (Ненашева и др., 2010, табл. 1, ан. 25, 26) отсутствием примесей Ag, Cd, Pb. В анизотропном зандбергерите отсутствует теллур, наличие которого в теллуродержащих блёклых рудах делает их слабо анизотропными. Дебаеграмма анизотропного теннантит-тетраэдрита – зандбергерита (табл. 3) хорошо согласуется с дебаеграммой теннантита, приведенной в атласе Пикока (Berry, Thompson, 1962). Параметр элементарной ячейки, рассчитанный по 12 рефлекссам (табл. 3, рефлекссы №№ 5, 7, 8–13, 15–17, 19,

Разнообразие блеклых руд  
и вторичная минерализация месторождения Лебедино (Центральный Алдан)

Таблица 3. Рентгенограмма анизотропного высокоцинкистого теннантит-тетраэдрита

Образец 242/ 1-2 $a = 10.1886 \text{ \AA}$ , $V = 1057.5 \text{ \AA}^3$			Теннантит $T_d^3 - I43m$ , $a = 10.21 \text{ \AA}$			Бурнонит $a = 8.15$ , $b = 8.70$ , $c = 7.80 \text{ \AA}$			Эвхроит $a = 10.05$ , $b = 11.50$ , $c = 6.11 \text{ \AA}$		Леогангит $a = 21.77$ , $b = 12.327$ , $c = 10.72 \text{ \AA}$ , $\beta = 92.85^\circ$	
			Berry, Thompson, 1962						Михеев, 1957		Lengauer <i>et al.</i> , 2004	
№	<i>I</i>	$d_a(\text{узм.})$	$d_a(\text{рас.})$	<i>hkl</i>	<i>hkl</i>	<i>I</i>	$d_a(\text{узм.})$	$d_a(\text{рас.})$	$d_a(\text{узм.})$ ( <i>l</i> )	$d_a(\text{узм.})$ ( <i>l</i> )	$d_a(\text{узм.})$ ( <i>l</i> )	$d_a(\text{узм.})$ ( <i>l</i> )
				011						7.2 (10)		10.85(10)
1	1	7.21	7.204							5.8 (4)		5.44 (0.5)
2	0.5	5.46								5.2 (10)		
3	0.5	5.16	5.094?	002?								4.9 (0.3)
4	3	4.43							4.37 (4)	5.00 (8)		
5	1	4.15	4.159	112	112	1	4.15	4.17	4.08 (3)	4.14 (4)		
6	3	3.90							3.90 (8)			3.728 (0.3)
7	2	3.62	3.602	022	022	0.5	3.60	3.61	3.68(2)	3.73 (8)		3.625 (0.5)
8	7	3.24	3.22	013	013	0.5	3.23	3.23	3.27(2)	3.29 (2)		
9	10	2.94	2.941	222	222	10	2.94	2.95	2.99(4)	2.94 (7)		3.09 (0.4)
10	1	2.82	2.826	023					2.82 (2)	2.81 (8)		
11	2	2.71	2.723	123	123	1	2.71	2.73	2.74 (10)	2.63 (7)		2.672 (0.4)
									2.69 (4)			2.63 (0.6)
12	7	2.54	2.547	004	004	3	2.55	2.55	2.59 (5)	2.55 (7)		
13	4	2.40	2.401	033	114,033	2	2.40	2.41	2.37 (1)	2.34 (6)		
14	1	2.29	2.278	024					2.30 (1)	2.26 (6)		
15	1	2.17	2.172	233	233	0.5	2.17	2.18	2.16 (0.5)	2.21 (5)		
16	2	2.08	2.080	224	224	0.5	2.07	2.08	2.09 (2)	2.07 (6)		
17	4	1.994	1.998	015,134	015,134	2	1.994	2.00	2.02 (0.5)	1.95 (7)		
									1.985 (3)			
18	2	1.907								1.90 (6)		
19	4	1.861	1.860	125	125	2	1.855	1.865	1.848 (4)	1.84 (6)		
20	8	1.803	1.801	044	044	8	1.801	1.807		1.78 (4)		
21	1	1.745	1.747	035,334	035,334	0.5	1.746	1.751	1.765 (6)	1.74 (4)		
22	2	1.696	1.698	006,244	006,244	0.5	1.695	1.702		1.71 (6)		
23	3	1.655	1.653	116,235	116,235	2	1.653	1.656	1.664 (2)	1.65 (7)		
24	1	1.612	1.611	026	026	0.5	1.608	1.615	1.631 (2)	1.61 (4)		1.618 (0.3)
25	0.5	1.590	1.591	045,344						1.562(5)		
26	1	1.569	1.572	154,145	145	0.5	1.568	1.576	1.556 (2)			
27	7	1.535	1.536	226	226	7	1.535	1.540		1.524 (4)		
28	0.5	1.516	1.519	036,245						1.513 (8)		
29	1	1.494	1.502	136								
30	2	1.473	1.471	444	444	1	1.467	1.475	1.480 (1)			
31	2	1.444	1.441	055,345,017	017,055,345	1	1.439	1.445		1.451 (7)		
32	0.5	1.425	1.427						1.427 (2)			
33	0.5	1.409	1.413	046						1.409 (4)		
34	1	1.386	1.386	127,255	336,255,127	0.5	1.386	1.390	1.389 (1)	1.385 (2)		
35	1	1.365	1.362	246	246	0.5	1.358	1.365	1.365 (1)			
36	1	1.297	1.294	156	237,156	0.5	1.296	1.297				
37	2	1.275	1.274	008	008	2	1.274	1.276				
38	1	1.258	1.254	018,147, 455	118,147, 455	0.5	1.254	1.257				
39	0.5	1.236	1.139	446,028								
40	2	1.220	1.218	356	356	1	1.217	1.220				
41	1	1.202	1.201	066								
42	3	1.185	1.184	057,347	138,057, 347	2	1.185	1.186				
43	4	1.169	1.169	266	266	3	1.169	1.171				
44	1	1.157	1.154	257								
45	1	1.142	1.139	048	048	1	1.139	1.141				
46	1	1.126	1.125	338,019	019,338, 129	0.5	1.126	1.128				
48	3	1.099	1.099	129,556,167	129,167, 556	1	1.100	1.101				
49	0.5	1.088	1.086	466	466	0.5	1.086	1.089				
50	1	1.077	1.074	158, 457	039,158,457	0.5	1.074	1.076				
51	0.5	1.068	1.068	139								
52	2	1.054	1.051	239, 367	239,367	0.5	1.052	1.054				
53	6	1.043	1.040	448	448	3	1.041	1.043				
54	2	1.032	1.034	566, 049								
55	1	1.024	1.024	177								
56	1	1.013	1.014	186,467,168								
57	1	1.003	0.999	268								
58	4	0.985	0.985	377, 666		2	0.980					
59	2	0.983										
60	4	0.976				1	0.970					
61	1	0.975										

Примечание: условие существования отражения –  $h+k+l = 2n$ .

20), равен 10.1886 Å. В рентгенограмме присутствуют отражения, индицирующиеся в элементарной ячейке теннантита, но отсутствующие в дебаеграмме, приведенной в атласе Пикока (табл. 3, рефлексы: №№ 14, 29, 39, 41, 44, 47, 57). Следует отметить, что многие отражения анизотропного теннантит-тетраэдрита имеют более сильные интенсивности по сравнению с интенсивностями рефлексов в рентгенограмме теннантита, приведенной в атласе Пикока. Это объясняется наложением сильных рефлексов эвхроита  $\text{Cu}_2(\text{OH})[\text{AsO}_4] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (табл. 3, отражения №№ 3, 5, 7, 9, 11–13, 15–17, 19, 21–24, 31). Судя по присутствию рефлексов эвхроита в рентгенограмме анизотропного теннантит-тетраэдрита, эвхроит попал в препарат из извилистых трещин, разбивших блёклую руду. В рентгенограмме присутствуют рефлексы (табл. 3, №№ 2, 7, 11, 24), которые можно объяснить примесью леогангита  $\text{Cu}_{10}^{2+}(\text{OH})_6[\text{AsO}_4]_4[\text{SO}_4] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ . Кроме того, 12 отражений проиндицировать в параметрах теннантита не удалось (табл. 3, отражения №№ 4, 6, 10, 18, 25, 28, 32, 51, 55, 56, 59, 61). Из них рефлексы 10, 18, 25, 28 являются отражениями эвхроита, а рефлексы 4, 6, 32 – бурнонита  $\text{CuPbSbS}_3$ . Пока не ясно к чему относятся рефлексы на дальних углах (№№ 51, 55, 56, 59, 61). Микронзондового анализа фаз, выделяющихся в этих трещинах, сделать не удалось, так как трещины очень узкие (порядка 1–2 мкм, рис. 6) и выполяющее их вещество неоднородно. По оптическим свойствам, по крайней мере, две фазы похожи на арсенаты, непосредственно контактирующие с анизотропным теннантит-тетраэдритом. Эти две фазы выделяются в более крупных зернах. В отраженном свете одна фаза светло-серая с чуть голубоватым оттенком, в тонких сколах просвечивает зеленовато-желтым или желтовато-оранжевым, другая – темно-серая с зеленоватым оттенком. В скрещенных николях первая фаза желто-оранжевая до бурого, вторая – изумрудно-зеленая. По результатам микронзондового анализа оказалось, что светло-серая фаза с голубоватым оттенком является байлдонитом  $\text{PbCu}_3(\text{OH})_2[\text{AsO}_4]_2$  (табл. 4, ан. 1–5, рис. 6а), а темно-серая с зеленоватым оттенком – леогангитом  $\text{Cu}_{10}^{2+}(\text{OH})_6[\text{AsO}_4]_4[\text{SO}_4] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  (табл. 4, ан. 12–13, рис. 6б). Таким образом, в узких трещинах, разбивших зерна анизотропного теннантит-тетраэдрита, установлены бурнонит и три арсената: байлдонит, леогангит и эвхроит  $\text{Cu}_2(\text{OH})[\text{AsO}_4] \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . Кроме того, в этом же образце микронзондоспектральным анализом диагностированы и другие арсенаты меди (дуфтит, клинотиро-

лит, страшимирит, клиноклаз, корнваллит), карбонаты меди (азурит, малахит) и гематит (табл. 4).

Объяснить феномен анизотропии теннантит-тетраэдрита можно воздействием давления, в результате которого появились извилистые трещины, заполненные позднее арсенатами меди, но, возможно, существуют и другие варианты объяснения.

### Минералы, ассоциирующие с блёклыми рудами

Как уже отмечалось выше, изученные блёклые руды ассоциируют с разными минералами (табл. 5). Анализы и характеристики некоторых из них: борнита, фаматинита, сульванита, арсеносульванита, англезита, тиролита, клинотиролита, а также нескольких минералов полисоматической серии халькозина даны в работе С.Н. Ненашевой, В.Ю. Карпенко, Л.А. Паутова (2010). Остальные фазы кратко охарактеризуем ниже.

Микронзондовые анализы галенита, пирита, халькопирита, сфалерита, кубанита и медных сульфидов полисоматической серии халькозина (анилита, джирита, спионкопита, ярроуита) представлены в таблице 6. Во второй строке каждого анализа галенита, пирита, халькопирита и кубанита представлены результаты, приведенные к 100%, для удобства сопоставления с теоретическим составом. Как видно из таблицы, анализы галенита и пирита близки к своим теоретическим составам. Анализы халькопирита и кубанита выполнены на хорошо образованном кристалле (рис. 6), расположенном среди выделений леогангита  $\text{Cu}_{10}^{2+}(\text{OH})_6[\text{AsO}_4]_4[\text{SO}_4] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ . Оказалось, что кристалл неоднородный. Выявлены участки халькопирита и кубанита. Халькопирит в пределах кристалла разный, содержащий меньшее (табл. 6, ан. 5, 6, 7) количество серы, по сравнению с теоретическим составом. Состав кубанита близок к теоретическому (табл. 6, ан. 8, 9). Наличие тесных сростаний халькопирита и кубанита говорит о том, что первоначальный состав кристалла соответствовал составу высокотемпературного твердого раствора халькопирита (iss), установленного экспериментально при температуре 350–300°C (Sugaki *et al.*, 1975). Его распад при температуре 250–300°C (Рамдор, 1962) привёл к образованию халькопирита разного состава и кубанита.

Халькопирит, сульфиды меди полисоматической серии халькозина в ассоциации с ковеллином и гематитом заполняют промежутки между зернами бурнонита, галенита,

Разнообразие блеклых руд  
и вторичная минерализация месторождения Лебединое (Центральный Алдан)

41

Таблица 4. Микронзондовые анализы арсенатов (мас.%)

№ ан.	Образец	Cu	Ag	Fe	Zn	Pb	As	Sb	V	S	Σ
1	242/1-2	25.00	0.00	4.35	0.40	24.49	20,68	1.05		0.21	76.18
2		24.96	0.81	1.92	0.75	26.87	19.13	1.92		0.44	76.80
3		26.12	0.34	1.85	0.62	26.67	19.83	1.13		0.35	71.02
4		26.34	0.77	2.00	0.79	25.78	18.49	1.86		0.42	76.45
5		27.17	0.10	3.51	0.26	26.44	19.32	0.60		0.15	77.55
6		40.59		2.46	0.74		20.78	2.42		0.74	67.73
7	242/5 (уч. 1)	37.25					19.05		0.26	0.91	62.12
8		33.34		7.80			16.86		0.68	0.33	59.88
9		36.36		5.17			15.36		0.79	0.09	58.94
10	242/1-2	34.16	0.08	11.00	1.22	0.73	19.59	3.13		0.49	70.49
11		14.33		3.60	0.85	27.09	12.35				58.22
12		39.66	0.12	0.47	0.69	0.29	19,45	1.20		1.00	62.94
13		39.56	0.04	1.23	0.65	0.20	20.90	1.39		1.09	65.10
14	242/6 (уч. 1)	35.24		7.72			21.47	0.81	0.27	3.28	69.73
№ ан.	Образец	Минерал или смесь минералов ,						Δ, % - баланс валентности			
1	242/1-2	Байлдонит + гематит + артурит						3.4			
2		Байлдонит + гематит +						0.8			
3		Байлдонит + гематит +						1.6			
4		Байлдонит + гематит +						0.1			
5		Байлдонит + гематит +						1.7			
6		Страшимирит + гематит						0.3			
7	242/5 (уч.1)	Клинотиролит						1.6			
8		Клинотиролит + страшимирит + гематит						0.9			
9		Клинотиролит + корнвалит + гематит						1.1			
10	242/1-2	Оливенит + гематит						0.8			
11		Дуфтит + клиноклаз						1.7			
12		Леогангит						0.6			
13		Леогангит						0.7			
14	242/6 (уч. 1)	Леогангит + гематит						0.4			

Примечание: в том числе Са (мас. %): ан. 7 – 0,94, ан. 10 – 4,65, ан. 11 – 0,87, ан. 12 – 1,17; и Мп (мас. %): ан. 8 – 0,06, ан. 9 – 0,04, ан. 13 – 0,09. Аналитик Л.А. Паутов, пересчет анализов выполнил В.Ю. Карпенко.

Таблица 5. Характеристика блеклых руд и ассоциаций, в которых они встречаются

№	Блѣкляя руда	Ассоциация
1	Изотропный тетраэдрит с большим количеством цинка Zn – зандбергерит	Галенит, халькопирит, пирит, фаматинит, сульванит, англезит, арсенаты меди: байлдонит, леогангит, эвхронит.
2	Тетраэдрит-теннантиты и теннантиты	Галенит, халькопирит, пирит, сульванит, арсеносульванит и арсенаты Са и Cu – тиролит $\text{Ca}_2\text{Cu}_3^{2+}(\text{OH},\text{O})_4(\text{AsO}_4)_2(\text{CO}_3) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ или клинотиролит $\text{Ca}_2\text{Cu}_3^{2+}(\text{OH},\text{O})_{10}[(\text{AsO}_4)_1(\text{SO}_4)]_1 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ .
3	Анизотропный теннантит-тетраэдрит с большим количеством цинка Zn – зандбергерит	Халькопирит, кубанит, выделения пирита и галенита, подвергшиеся частичному замещению вторичными продуктами, гематитом, арсенатами меди: байлдонитом, леогангитом, эвхронитом, дуфтитом, клинотиролитом, страшимиритом, клиноклазом, корнваллитом. В образцах наблюдаются прожилки азурита, малахита.
4	Тетраэдрит, содержащий более 4 мас.% Fe (до 4.90) и значительные количества Ag (до 4.87 мас.%), Zn (до 3.37 мас.%)	Пирит, галенит, халькопирит, сфалерит, бурнонит, гематит, медные сульфиды полисоматической серии халькозина $m\text{Cu}_2\text{S} \cdot n\text{CuS}$ , теллуриды (гессит, петцит, алтаит), арсенаты (леогангит и байлдонит).
5	Голдфиддит-теннантит-тетраэдриты	Галенит, пирит, кварц, золото, англезит, вторичные медные сульфиды полисоматической серии халькозина $m\text{Cu}_2\text{S} \cdot n\text{CuS}$ (джарлеит, дигенит, роксбиит, анилит, джирит, спинокопит, ковеллин).
6	Голдфиддит-теннантиты	
7	Теллуросодержащие теннантит-тетраэдриты	

Таблица 6. Микронзондовые анализы сульфидов и сульфатов (мас.%)

№ ан. Образец	Минерал	Pb	Fe	Cu	Zn	S	Σ	Формула	Δ, %
1	53/278 (уч. 7)	gal	85.40			13.19	98.59	Pb <sub>0,99</sub> S <sub>1,01</sub>	0.1
2	2 (уч. 3)	gal	86.36			13.28	99.64	Pb <sub>1,00</sub> S <sub>1,00</sub>	0.0
3	53/278 (уч. 7)	py	46.81			53.91	100.72	FeS <sub>2,00</sub>	0.0
Халькопирит теоретический			30.43	34.63		34.94	100.00	CuFeS <sub>2</sub>	
4	2 (уч. 3)	ср	27.91	33.51	2.03	33.65	97.10	Cu <sub>1,00</sub> Fe <sub>0,95</sub> Zn <sub>0,06</sub> S <sub>1,99</sub>	0.2
			28.74	34.51	2.09	34.65	100.00		
5	127/1	ср	28.90	32.37		33.85	95.12	Cu <sub>0,98</sub> Fe <sub>0,99</sub> S <sub>2,03</sub>	2.7
			30.38	34.03		35.59	100.00		
6			30.04	32.54		34.083	96.66	Cu <sub>0,97</sub> Fe <sub>1,02</sub> S <sub>2,01</sub>	0.2
			31.07	33.66		35.25	100.00		
7			29.50	33.10		34.33	96.93	Cu <sub>0,98</sub> Fe <sub>1,00</sub> S <sub>2,02</sub>	1.5
			30.43	34.14		35.41	100.00		
Кубанит теоретический			41.20	23.40		35.40	100.00	CuFe <sup>2+</sup> Fe <sup>3+</sup> S <sub>3,00</sub>	
8	127/1.		39.03	21.81		34.53	95.37	Cu <sub>0,97</sub> Fe <sub>0,99</sub> <sup>2+</sup> Fe <sub>0,99</sub> <sup>3+</sup> S <sub>3,05</sub>	2.9
			40.92	22.87		36.21	100.00		
9			41.32	23.98		34.70	100.00	Cu <sub>1,03</sub> Fe <sub>1,01</sub> <sup>2+</sup> Fe <sub>1,01</sub> <sup>3+</sup> S <sub>2,95</sub>	3.0
10	2 (уч. 3)	yar + sp	0.79	64.45		27.73	95.10	(Cu <sub>16,53</sub> Ag <sub>0,32</sub> Pb <sub>0,06</sub> ) <sub>16,91</sub> S <sub>14,09</sub> или (Cu <sub>7,22</sub> Ag <sub>0,32</sub> Pb <sub>0,06</sub> Cu <sub>5,31</sub> S <sub>14,09</sub> ) <sup>2+</sup>	
11	2 (уч. 3)	an + ge		2.00	72.58	23.40	97.97	(Cu <sub>4,79</sub> Fe <sub>0,15</sub> ) <sub>4,94</sub> S <sub>3,06</sub> или Cu <sub>3,94</sub> <sup>+</sup> (Cu <sub>0,85</sub> <sup>2+</sup> Fe <sub>0,15</sub> ) <sub>1,00</sub> S <sub>3,06</sub>	2.9
12	2 (уч. 2)	yar	2.89	63.43		30.94	97.75	Cu <sub>8,40</sub> <sup>+</sup> Ag <sub>0,04</sub> Fe <sub>0,44</sub> S <sub>8,12</sub> → (Cu <sub>1,96</sub> <sup>+</sup> Ag <sub>0,04</sub> ) <sub>2,00</sub> (Cu <sub>6,44</sub> <sup>2+</sup> Fe <sub>0,44</sub> ) <sub>6,88</sub> S <sub>8,12</sub>	2.9
13	2 (уч. 2)	kov		65.23		32.98	98.22	Cu <sub>0,999</sub> S <sub>1,001</sub>	0.2
14				64.11		32.20	96.31	Cu <sub>1,002</sub> S <sub>0,998</sub>	0.4
15	2 (уч. 3)	sph	4.12		61.93	32.98	99.03	(Zn <sub>0,92</sub> Fe <sub>0,07</sub> ) <sub>0,99</sub> S <sub>1,00</sub>	1.0
16	2 (уч. бл. рудн.)	sph	3.74	0.63	61.60	33.45	99.42	(Zn <sub>0,91</sub> Fe <sub>0,06</sub> <sup>2+</sup> Cu <sub>0,01</sub> ) <sub>0,98</sub> S <sub>1,01</sub>	3.0
17	53/278 (уч. 6)	angl	68.08			10.39	99.28	Pb <sub>2,02</sub> S <sub>1,99</sub> O <sub>8,00</sub> или PbSO <sub>4</sub>	0.5

Примечание: Δ, % – баланс валентности. \* – в том числе Ag (мас. %): ан. 10 – 2.13, ан. 12 – 0.49 %. Кислорода в ан. 17 – 20.81 мас. %. Ан. 2 – средний из 2 анализов. Ан. 10 относится к образцу, представляющему смесь 72 % ярроуита и 28 % спионкопита. Условные обозначения: gal – галенит, py – пирит, ср – халькопирит, сб – кубанит, сп – спионкопит, yar – ярроуит, an – анилит, ge – джирит, cov – ковеллин, sph – сфалерит, angl – англезит. Аналист В.Ю. Карпенко.

сфалерита, блёклой руды, причем в некоторых зернах халькопирита отчетливо видны тонкие каймы, мелкие пластинки (их ширина 1–2 мкм), точечные выделения медных сульфидов полисоматической серии халькозина (рис. 3, 4). Микронзондовый анализ (табл. 6, ан. 10–14) показал неоднородность этих участков. Анализы 10 и 11 рассчитываются на электронейтральную формулу только при предположении, что анализируемые зерна представляют собой смеси: ярроуита и спионкопита (ан. 10), анилита и джирита (ан. 11). Анализы 12–14 оказались анализами ярроуита (ан. 12) и ковеллина (ан. 13 и 14). Микронзондовый анализ гематита (49.97 мас.% Fe, 22.66 мас.% O, 1.05 мас.% S, сумма 73.42) пересчитывается на формулу Fe<sub>1,92</sub>S<sub>0,05</sub>O<sub>3,03</sub>. Наличие S в анализе можно объяснить примесью любого сульфата Fe<sup>3+</sup>[SO<sub>4</sub>]<sub>3</sub>·nH<sub>2</sub>O. Расчет показал, что в этом случае на образование 0.05 молекул Fe<sup>3+</sup>[SO<sub>4</sub>]<sub>3</sub>·nH<sub>2</sub>O необходимо 0.1

атома Fe<sup>3+</sup> и 0.3 атома кислорода. После вычета этих количеств Fe<sup>3+</sup> и S формула гематита будет электронейтральной – Fe<sub>1,82</sub>O<sub>2,73</sub> (баланс валентности – Δ, % = 0).

В этом же образце на соседнем участке наблюдается еще более сложная ассоциация галенита, сфалерита, бурнонита, гессита, петцита, алтаита, кварца (рис. 7). Изображение этого участка шлифа в характеристическом рентгеновском излучении представлено на рисунке 8, где очень хорошо выделяются зерна гессита (AgL<sub>α1</sub>), бурнонита (SbL<sub>α1</sub>). Микронзондовые анализы сульфосоей и теллуридов представлены в таблице 7, 8. Бурнонит в отраженном свете очень похож на блеклую руду. Он светлосерый с зеленоватым оттенком. Двухотражение и анизотропия отсутствуют, или очень слабые, такие, что невозможно зафиксировать. Состав бурнонита PbCuSbS<sub>3</sub> в рудах месторождения Лебединское Pb 41.09–42.44, Cu

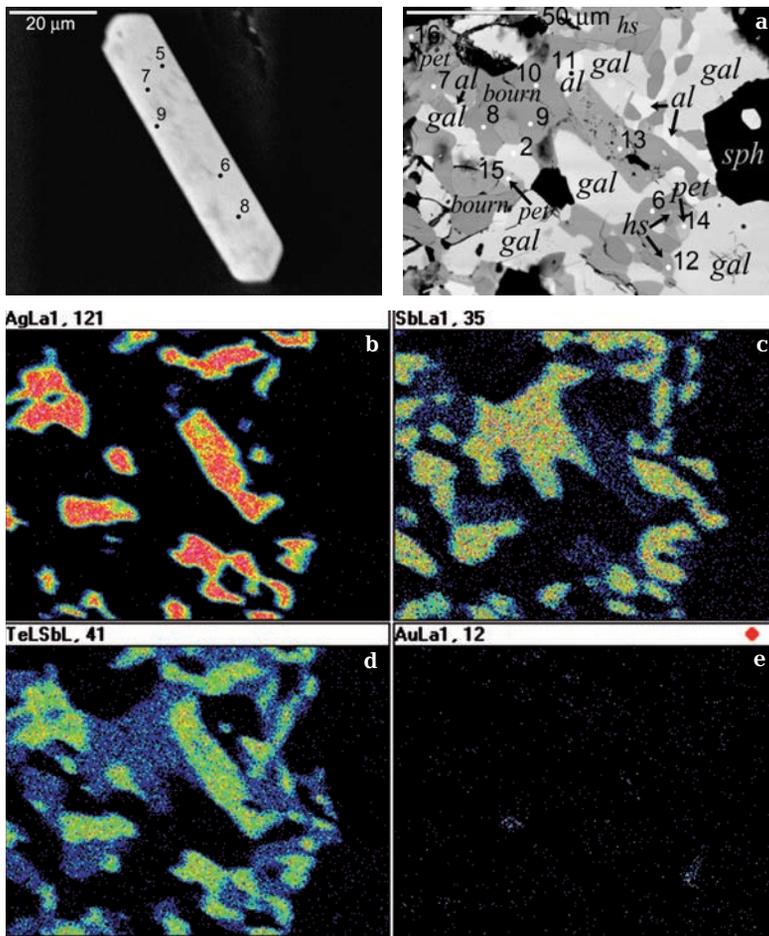


Рис. 6. Кристалл халькопирита, распавшийся с выделением кубанита. Цифрами указаны номера анализов (табл. 6). В отраженных электронах. Образец 127/1.

Рис. 7. Ассоциация галенита (gal), сфалерита (sph), бурнонита (bour), гессита (ges), петцита (pet), алтаита (alt), кварца (Q): а – в отраженных электронах; б–е – в характеристическом рентгеновском излучении. Хорошо выделяются зерна гессита ( $AgLa_1$ ), бурнонита ( $SbLa_1$ ), гессита и бурнонита ( $TeL SbL$ ). Цифрами указаны номера анализов (табл. 6 для сульфидов) и (табл. 7 для бурнонита). Образец 2, уч. 3.

13.19 – 14.47, Sb 22.68 – 24.78, S 18.59 – 19.65 мас.% (табл. 7, 8, ан. 1 – 10) мало отличается от теоретического (Pb 42.54, Cu 13.04, Sb 24.65, S 19.77 мас.%).

Среди теллуридов установлены: алтаит  $PbTe$ , гессит  $Ag_2Te$ , петцит  $Ag_3AuTe_2$ . Алтаит в отраженном свете белый, изотропный. Микронзондовый анализ показал, что минерал содержит 3.32 мас.% Ag (табл. 7, 8, ан. 11). В справочнике под редакцией Э.М. Бонштедт-Куплетской говорится, что небольшие количества Ag в алтаите содержатся, по-видимому, в виде примесей. Серебро в алтаите из золоторудного месторождения Степняк (Казахстан) представлено примесями самородного серебра (Минералы, 1960). Носителем серебра в алтаите из Калгурли является агвиларит  $Ag_4SeS$  (Рамдор, 1962). Выделения алтаита в месторождении Лебедино имеют размер порядка 5 – 10 мкм и даже при увеличении в 825 раз под микроскопом выглядят однородными, ассоциация такая же, как в ме-

сторождении Степняк, в анализе нет ни Se, ни S, поэтому можно предположить, что, скорее всего, наличие Ag в алтаите обусловлено примесью мельчайших включений самородного серебра. Этим, вероятно, объясняется неэлектронейтральность формулы алтаита при хорошей сумме элементов 99.90 мас.%. Если исключить Ag, то формула становится электронейтральной (баланс валентности равен 0.4%).

Гессит выделяется в виде мелких часто вытянутых зерен (рис. 8, 9). Отражение высокое, как у галенита. Двухотражение очень слабое, анизотропия от светло-серого с кремовым оттенком до светло-серого с синеватым оттенком. Составы образцов (табл. 7, 8, ан. 12, 13) близки к теоретическим значениям (Ag 62.86, Te 37.14 мас.%), но в них обнаружены примеси Sb в количестве чуть больше 1 мас.% и Se – 0.2 мас.%.

Составы образцов петцита  $Ag_3AuTe_2$  также близки к теоретическому (табл. 7, 8,

Таблица 7. Микронзондовые анализы сульфосолей и теллуридов (мас.%)

№ ан.	Минерал	Образец	Cu	Ag	Au	Zn	Sb	Pb	Te	S	Σ
1	Бурнонит	2 (уч. 3)	14.47				23.76	41.74		19.00	98.96
2			13.62			0.19	23.20	41.09		18.59	96.69
3			14.36			0.92	22.68	41.27		19.16	98.39
4			13.82				23.36	43.70		18.81	99.69
5			14.47			0.75	23.41	42.44		19.65	100.96
6			13.19				23.26	42.00		18.74	97.19
7			13.42				23.49	41.65		18.92	97.48
8			14.02				24.35	42.71		19.23	100.31
9			13.60				24.78	42.27		19.32	100.33
10			14.30				24.20	41.97		19.62	100.09
11	Алтаит	2 (уч. 3)		3.32				59.84	36.74		99.90
								61.96*	38.04*		100.00*
12	Гессит	2 (уч. 3)		60.31			1.21		35.94		97.65
13				60.07			1.30		36.37		97.74
14	Петцит	2 (уч. 3)		42.53	21.87			1.10	32.66		98.00
15				41.13	22.53			1,08	32.48		97.22
16			0.66	40.44	22.78				31.39		95.27
Теоретический состав петцита			41.71	25.42				32.87		100.00	

Примечание: \* – после исключения серебра и приведения анализа к 100%. В том числе Se (мас. %): ан. 9 – 0.36, ан. 12 – 0.20. В ан. 5 – 0.24 мас. % As. Аналитик В.Ю. Карпенко.

Таблица 8. Пересчет микронзондовых анализов сульфосолей и теллуридов на формулы

№ ан.	Минерал	Образец	Формула	Δ, % - баланс валентности
1	Бурнонит	2 (уч. 3)	$Cu_{1,13}Pb_{0,95}Sb_{0,95}S_{2,92}$	2.5
2			$Cu_{1,08}Pb_{1,00}Sb_{0,96}S_{2,93}$	2.3
3			$Cu_{1,11}Zn_{0,07}Pb_{0,97}Sb_{0,91}S_{2,93}$	1.0
4			$Cu_{1,08}Pb_{1,05}Sb_{0,95}S_{2,92}$	3.0
5			$Cu_{1,09}(Pb_{0,98}Zn_{0,06})_{1,04}(Sb_{0,92}As_{0,02})_{0,94}S_{2,94}$	1.8
6			$Cu_{1,05}Pb_{1,05}Sb_{0,96}S_{2,96}$	1.3
7			$Cu_{1,06}Pb_{1,01}Sb_{0,95}S_{2,96}$	0.7
8			$Cu_{1,08}Pb_{1,01}Sb_{0,98}S_{2,93}$	2.8
9			$Cu_{1,04}Pb_{1,00}Sb_{0,99}(S_{2,94}Se_{0,02})_{2,96}$	1.5
10			$Cu_{1,09}Pb_{0,98}Sb_{0,96}S_{2,96}$	0.2
11	Алтаит	2 (уч. 3)	$Pb_{0,95}Ag_{0,10}Te_{0,95}$	5.0
			или $Pb_{1,002}Te_{0,998}$ *	0.4*
12	Гессит	2 (уч. 3)	$(Ag_{1,96}Sb_{0,03})_{0,99}(Te_{0,99}Se_{0,02})_{1,01}$	1.5
13			$Ag_{1,96}Sb_{0,03}Te_{1,00}$	2.4
14	Петцит	2 (уч. 3)	$Ag_{3,09}Au_{0,87}Pb_{0,04}Te_{2,00}$	1.0
15			$Ag_{3,03}Au_{0,91}Pb_{0,04}Te_{2,02}$	0.5
16			$Ag_{3,01}Au_{0,93}Cu_{0,08}Te_{1,98}$	1.5

Примечание: \* – после исключения серебра и приведения анализа к 100%.

Таблица 9. Минералы системы медь-сера

Минерал	Сингония	Годовиков, Ненашева, 2007		Габлина, 2008		
		Состав	Cu/S	Состав	Температурн. предел устойчив., °C	Продукты фазовых переходов
Халькозин выс. ↓ синтетический	Гекс.	Cu <sub>2</sub> S	2.000	Cu <sub>2</sub> S	435	Дигенит выс.
Халькозин низ. ↓	Мон.	Cu <sub>2</sub> S	1.993–2.001	Cu <sub>1.993-2.001</sub> S	80–103	Халькозин выс.
Тетрахалькозин ↓	Тетр.	Cu <sub>49</sub> S <sub>25</sub> → Cu <sub>48</sub> <sup>+</sup> Cu <sup>2+</sup> S <sub>25</sub>	1.960	Cu <sub>1.96-2.0</sub> S	?	Дигенит выс.
Джарлеит ↓	Мон.	Cu <sub>31</sub> S <sub>16</sub> → Cu <sub>30</sub> <sup>+</sup> Cu <sup>2+</sup> S <sub>16</sub>	1.938	Cu <sub>1.93-1.96</sub> S	93 ± 2	Халькозин низ. + дигенит низ.
Роксбиит ↓	Мон.	Cu <sub>9</sub> S <sub>5</sub> → Cu <sub>8</sub> <sup>+</sup> Cu <sup>2+</sup> S <sub>5</sub>	1.800	Cu <sub>1.72-1.82</sub> S	50–90	
Дигенит выс. ↓	Куб.	Cu <sub>2</sub> S	2.000	Cu <sub>2</sub> S	>1000	Расплав
Дигенит низ. ↓	Триг. псевдо- куб.	Cu <sub>9</sub> S <sub>5</sub> → Cu <sub>8</sub> <sup>+</sup> Cu <sup>2+</sup> S <sub>5</sub>	1.800	Cu <sub>1.75-1.78</sub> S	75–83	Дигенит выс.
Анилит ↓	Ромб.	Cu <sub>7</sub> S <sub>4</sub> → Cu <sub>6</sub> <sup>+</sup> Cu <sup>2+</sup> S <sub>4</sub>	1.750	Cu <sub>1.75</sub> S	30–75	Дигенит низ.
Джирит ↓	Триг.	Cu <sub>3</sub> S <sub>2</sub> → Cu <sub>2</sub> <sup>+</sup> Cu <sup>2+</sup> S <sub>2</sub>	1.500	Cu <sub>1.5-1.6</sub> S	?	?
Спионкопит ↓	Гекс.	Cu <sub>39</sub> S <sub>28</sub> → Cu <sub>22</sub> <sup>+</sup> Cu <sup>2+</sup> S <sub>28</sub>	1.393	Cu <sub>1.4</sub> S	157	Ковеллин
Ярроуит ↓	Гекс.	Cu <sub>9</sub> S <sub>8</sub> → Cu <sub>2</sub> <sup>+</sup> Cu <sup>2+</sup> S <sub>8</sub>	1.125	Cu <sub>1.1</sub> S	157	Ковеллин
Ковеллин ↓	Гекс.	3CuS → Cu <sub>2</sub> <sup>+</sup> S • Cu <sup>2+</sup> [S <sub>2</sub> ]	1.000	CuS	507	Дигенит
Х-борнит				Cu <sub>5-x</sub> FeS <sub>4</sub>	75–140	Халькопирит + борнит

Примечание: направление вертикальных стрелок указывает направление повышения кислотности среды минералообразования, вынос меди и повышение роли двухвалентной меди.

ан. 14–16). При хорошем соотношении компонентов (электронейтральность формул < 1.5) анализы имеют немного заниженные суммы (заниженное количество золота), что объясняется, вероятно, мелкими размерами зерен ~ 3–5 мкм. Петцит в отраженном свете чуть-чуть ярче гессита, изотропный, цвет серовато-белый.

### Обсуждение результатов

Таким образом, блёклые руды месторождения Лебединое весьма разнообразны: 1) по характеру одновалентных металлов (кроме чисто медных встречаются и медно-серебряные); 2) по элементному составу двухвалентных металлов (цинкистые, цинкисто-железистые, железисто-цинкистые, медно-железистые, медно-цинкистые); 3) по характеру полуметаллов (существенно сурьмяные, сурьмяно-мышьяковые, мышьяково-сурьмяные, сурьмяно-мышьяково-теллуры). Встречаются они также в разных ассоциациях (табл. 5). Во всех ассоциациях наблюдаются галенит, халькопирит, пирит, арсенаты меди.

Кроме того, в ассоциации № 1 (табл. 5) изотропный зандбергерит ассоциирует с фатинитом, сульванитом, англезитом, арсенатами меди: байддонитом, эвхроитом, леогангитом. По данным А.Г. Бетехтина (1950), англезит образуется, главным образом, в зоне вторичного сульфидного обогащения в месторождениях, содержащих, кроме сульфидов свинца и цинка, сульфиды меди, а также в зоне окисления свинцово-цинковых сульфидных месторождений. Температура образования этой ассоциации может быть выше 250–300°C.

Следующей ассоциацией (табл. 5, № 2) является ассоциация тетраэдрит-теннантита и теннантита с сульванитом, арсеносульванитом, арсенатами Са и Cu (тиролитом и клинотиролитом). Появление арсеносульванита свидетельствует о привносе мышьяка в минералообразующую среду.

Анизотропный теннантит-тетраэдрит (табл. 5, № 3) ассоциирует с халькопиритом, кубанитом, выделениями пирита и галенита, частично замещенными арсенатами: байддонитом, леогангитом, эвхроитом, дуфтитом, клинотиролитом, страшимитом, клинокла-

зом, корнваллитом. Наличие тесных сростаний халькопирита и кубанита говорит о распаде высокотемпературного твердого раствора халькопирита при температуре 250–300°C (Рамдор, 1962), что свидетельствует о понижении температуры образования описываемых руд.

Ассоциация тетраэдрита (табл. 5, № 4), содержащего более 4 мас.% Fe (до 4.90) и значительные количества Ag (до 4.87 мас.%), Zn (до 3.37 мас.%), с бурнонитом, теллуридами (гесситом, петцитом, алтаитом), гематитом, медными сульфидами полисоматической серии халькозина  $mCu_2S \cdot nCuS$ , арсенатами (леонгангитом и байлдонитом) образовалась при очередном изменении условий минералообразования, привнесении серебра, железа, теллура в минералообразующую среду и дальнейшем понижении температуры ниже 155°C, о чём свидетельствует наличие анізотропного гессита  $AgTe$ , который при 155°C переходит в кубическую модификацию (Минералы, 1960). Интересно отметить, что тетраэдрит в этой ассоциации не содержит Te. Вероятно, весь Te расходуется при образовании гессита, петцита и алтаита.

Более поздняя генерация блёклой руды содержит большое количество теллура. В месторождении Лебединое теллурсодержащие блёклые руды встречаются в ассоциации с сульфидами меди полисоматической серии халькозина, при этом теллуриды (гессит, петцит, алтаит) отсутствуют. Происходит изменение формы нахождения теллура, на что ранее указывал В.А. Коваленкер с соавторами (1980) для ассоциаций Кочбулакского месторождения.

Непосредственный контакт яроуита (табл. 6, ан. 15) и ковеллина (табл. 6, ан. 13, 14), самых бедных медью сульфидов меди, свидетельствует о кислой среде минералообразования, поскольку яроуит и ковеллин образуются в кислой среде (Габлина, 1997). Об этом же говорят высокие активности меди и мышьяка и присутствие в рудах арсенатов меди, которые становятся устойчивыми в кислой, нейтральной и слабощелочной среде (интервал pH от 2.5 до 8.7). При фоновых активностях меди и мышьяка арсенаты меди не образуются (Чарыкова и др., 2010). Яроуит и спинопит устойчивы до температуры 157°C (табл. 9). Находка смеси анилита и джирита (табл. 6, ан. 11) свидетельствует о температуре образования ниже 75°C, поскольку при этой температуре анилит переходит в низкотемпературный дигенит (табл. 9). К сожалению, данные об области устойчивости джирита отсутствуют.

Интересен факт обнаружения гематита в ассоциации с сульфидами меди, анізотропным тетраэдрит-теннантитом, что противоречит утверждению А.И. Фасталовича и Н.В. Петровской, что «гематит никогда не встречается с минералами полиметаллической ассоциации» (Фасталович, Петровская, 1940).

Таким образом, в рудах месторождения Лебединое установлено, согласно номенклатуре блёклых руд, предложенной Н.Н. Мозговой и А.И. Цепиным (1984), по крайней мере, 2 минеральных вида (теннантит и тетраэдрит), в которых выделено 5 междувидовых разновидностей (теннантит-тетраэдрит, голдфилдит-теннантит-тетраэдрит, голдфилдит-тетраэдрит-теннантит, теллурсодержащий теннантит-тетраэдрит и теллурсодержащий тетраэдрит-теннантит) блёклых руд. Такое разнообразие обусловлено изменением условий минералообразования — изменением состава рудообразующих гидротермальных растворов, понижением температуры образования, изменением окислительно-восстановительного потенциала и кислотности-щелочности среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Минобрнауки № 16.518.11.7101.

## Литература

- Белов Н.В. Очерки по структурной минералогии III // Минералогический сборник Львовского геологического общества. **1952**. № 6. С. 21–34.
- Бетехтин А.Г. Минералогия. М.: Госгеолиздат. **1950**. 956 с.
- Габлина И.Ф. Сульфиды меди как индикаторы среды рудообразования руд // ДАН. **1997**. Т. 356. № 5. С. 657–661.
- Габлина И.Ф. Сульфиды меди и меди — железа как индикаторы условий образования и преобразования руд. RMS DPI 2008-2-10-0, [www.minsoc.ru/FilesBase/2008-2-10-0](http://www.minsoc.ru/FilesBase/2008-2-10-0).
- Коваленкер В.А., Тронева Н.В., Доброниченко В.В. Особенности состава главных рудообразующих минералов трубообразных рудных тел Кочбулакского месторождения // Методы исследования рудообразующих минералов и их парагенезисов. М.: Наука. **1980**. С. 140–164.
- Минералы. М.: Изд-во Академии Наук СССР. **1960**. Т. 1. 617 с.
- Михеев В.И. Рентгенометрический определитель минералов. М.: Госгеолтехиздат. **1957**. 868 с.
- Мозгова Н.Н., Цепин А.И. Блеклые руды. М.: Наука. **1983**. 280 с.

- Ненашева С.Н.* Особенности состава теллур-содержащих блеклых руд // Новые данные о минералах. **2009**. Вып. 44. С. 34–44.
- Ненашева С.Н., Карпенко В.Ю., Паутов Л.А.* Сульфидная минерализация месторождения Лебединое (Центральный Алдан) // Новые данные о минералах. **2010**. Вып. 45. С. 60–66.
- Петровская Н.В.* Самородное золото. М.: Наука. **1973**. 347 с.
- Рамгор П.* Рудные минералы и их сростания. М.: Изд-во Иностран. Лит. **1962**. 1132 с.
- Фасталович А.И., Петровская Н.В.* Характер оруденения Лебединого золоторудного месторождения (Алдан) // Советская геология. **1940**. № 2–3. С. 54–65.
- Чарыкова С.В., Кривовичев В.Г., Яковенко В.С., Деммайер В.* Термодинамика арсенатов, селенитов и сульфатов в зоне окисления сульфидных руд. III. Диаграммы Eh – pH для систем Me-As-H<sub>2</sub>O (Me = Co, Ni, Fe, Cu, Zn, Pb) // ЗРМО. **2010**. № 3. С. 1–14.
- Berry L.G., Thompson R.M.* X-ray powder data for ore minerals: the Peacock atlas. New York. **1962**. 313 p.
- Lengauer C. L., Giester G., Kirchner E.* Leogangite, Cu<sub>10</sub>(AsO<sub>4</sub>)<sub>4</sub>(SO<sub>4</sub>)(OH)<sub>6</sub>·8H<sub>2</sub>O, a new mineral from the Leogang mining district, Salzburg province, Austria // Mineralogy and Petrology. **2004**. 81. P. 187–201.
- Sugaki A., Sgima H., Kitakaze A., Harada H.* Isothermal phase relations in the system Cu-Fe-S unger hydrothermal conditions at 350°C and 300°C // Econ. Geol. 1975. V. 70. P. 806–823.