

УДК 553.08

БЕТЕХТИНИТ ИЗ РУД УДОКАНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕДИСТЫХ ПЕСЧАНИКОВ (ЗАБАЙКАЛЬЕ, РОССИЯ)

К.А. Новосёлов¹, Е.В. Белогуб¹, В.А. Котляров¹, В.В. Шиловских²

¹Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс; const31@yandex.ru

²РЦ «Геомодель», СПбГУ, Санкт-Петербург

BETEKHTINITE FROM THE UDOKAN SANDSTONE-HOSTED COPPER DEPOSIT (TRANSBAIKALIA, RUSSIA)

K.A. Novoselov¹, E.V. Belogub¹, V.A. Kotlyarov¹, V.V. Schilovskich²

¹Institute of Mineralogy UB RAS, Miass

²RC «Geomodel», Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg

Статья содержит первое описание бетехтинита из медистых песчаников Удоканского месторождения. Он встречается как редкий минерал в халькозин-борнитовых рудах. Минеральная ассоциация бетехтинита соответствует его низкотемпературной природе. Для него характерна примесь серебра (до 2.1 мас. %) и варьирующее содержание железа. Дефицит серы в изученном бетехтините, вероятно, связан с частичным изменением минерала.

Илл. 4. Табл. 2. Библи. 22.

Ключевые слова: бетехтинит, Удоканское месторождение, Забайкалье, медистый песчаник.

The paper describes betekhtinite from the Udokan sandstone-hosted copper deposit for the first time, which is a rare mineral of the chalcocite-bornite ores. The mineral assemblage of betekhtinite indicates its low-temperature origin. The mineral contains up to 2.1 wt. % Ag and variable Fe amount. The sulfur deficiency of betekhtinite is probably related to its partial alteration.

Figures 4. Tables 2. References 22.

Key words: betekhtinite, Udokan deposit, Transbaikalia, sandstone-hosted copper deposits.

*Посвящается 120-летию
со дня рождения А.Г. Бетехтина*

Введение

Бетехтинит $(\text{Cu,Fe})_{21}\text{Pb}_2\text{S}_{15}$ – редкий минерал, который был впервые выявлен в медистых сланцах Мансфельда в Германии (Schüller, Wohlmann, 1955), а несколько позднее – в связанных с медистыми песчаниками рудах Джекказгана в Центральном Казахстане (Муқанов и др., 1960; Сатпаева, 1959). Именно из Джекказгана происходят наиболее эффективные образцы с крупными кристаллами бетехтинита. Таким образом, первые находки этого минерала были связаны со стратиформными месторождениями меди. Бетехтинит описан также в стра-

тиформном месторождении Кипуши (ДР Конго), принадлежащем к Центрально-Африканскому поясу (Dunn, 1991; Kampunzu et al., 2009). В целом же формационный ряд руд с бетехтинитом существенно шире и на сегодня включает более 40 месторождений (mindat.org), среди которых:

– колчеданные: Урупское, Северный Кавказ (Качаловская, Хромова, 1970) и Гайское, Южный Урал (Прокин, 2004) в России; Маунт-Лайель, Тасмания, Австралия (Markham, Ottemann, 1968); Фурутобе, Япония (Matsukama, 1971); Майкаин, Казахстан (Baibatsha et al., 2015);

– эпитеральные: Радка, Болгария (Kouzmanov, 2004);

– гидротермальные жилы в гранитах: Ла-Леона, Аргентина (Honnorez-Guerstein, 1971); район Шварцлео, Австрия (Paar, Chen, 1985);

– серпентинизированные скарны: Лангбан, Швеция (Nysten, 1986).

В настоящей статье охарактеризован бетехтинит из медистых песчаников Удоканского месторождения, Забайкалье.

Методы исследования

Образцы руд с бетехтинитом были получены в ходе систематического изучения руд при разведке Удоканского месторождения в 2010–2012 гг., которая проводилась ОАО «Байкальская горная компания». Первоначальная диагностика минерала осуществлена методом рудной микроскопии. В дальнейшем для удоканского бетехтинита были получены спектры отражения (микроспектрофотометр МСФ-Р с ФЭУ Hamamatsu, стандарт Si) и измерена микротвёрдость (ПМТ-3, ЛОМО). Химический состав бетехтинита и сопутствующих сульфидов был охарактеризован при помощи сканирующих электронных микроскопов: 1) РЭММА-202М с энергодисперсионным спектрометром, диаметр электронного пучка 1 μm , ускоряющее напряжение 20 кВ, ток 15 нА, каждый спектр набирался в течение 120 с, в качестве эталонов использованы пирит (S, Fe), галенит (Pb), металлические серебро и медь (эталон MINM-25-53 из ASTIMEX Scientific Limited) аналитик В.А. Котляров, Институт минералогии УрО РАН, Миасс); 2) HITACHI S-3400N с волновым детектором при 20 кВ и 10 нА, расстояние образец – детектор 10 мм, экспозиция 30 с на каждый элемент и 15×2 с на фон, анализируемая площадь 5×5 мкм. В качестве стандартов использованы пирит (S, Fe), галенит (Pb), металлические серебро, медь и селен, применена ХРР коррекция матрицы (аналитик В. В. Шиловских, РЦ «Геомодель», СПбГУ, Санкт-Петербург).

Краткие сведения о геологии Удоканского месторождения

Удоканское месторождение меди расположено в центральной части Кодаро-Удоканской структурно-формационной зоны среди карбонатно-терригенных отложений удоканской серии нижнего протерозоя (рис. 1). Медное оруденение приурочено к верхней подсвите сакуканской свиты, мощность рудоносных отложений достигает 450 м (Чечёткин

и др., 1995). Метаморфизм пород соответствует зеленосланцевой фации.

Магматические образования распространены в районе месторождения довольно широко (см. рис. 1). Северная часть района прорвана Кеменским массивом гранитоидов Кодарского комплекса. Южнее Удоканского месторождения располагается Ингамакитский гранитоидный массив. На месторождении и за его пределами распространены дайки габбро-диабазов, габбро-диоритов и диоритов мощностью от 2–3 до 150 м и протяжённостью до 8 км. Дайки принадлежат Каларскому габбро-анортозитовому комплексу и синхронны расположенному в 5–6 км южнее месторождения крупному Чинейскому габбро-диоритовому стратифицированному лополиту, возраст которого оценивается в 1.81–1.86 млрд лет (Гонгальский, 2015).

Руды Удоканского месторождения являются стратиформными. Наряду с преобладающими полосчатыми (слоистыми) рудами широко распространены жилы кварцевого и карбонат-кварцевого состава с гнездовым и прожилковым распределением сульфидов.

Руды имеют сложный минеральный состав: наряду с сульфидами здесь широко развиты сульфаты и карбонаты меди (антлерит, брошантит, малахит). Среди сульфидов преобладают борнит и халькозин, подчинённое значение имеют ковеллин, халькопирит, пирит и целый ряд редких минералов (Чечёткин и др., 1995). Повсеместно присутствуют магнетит и гематит, причём последний распространён, помимо слоистых руд, также и в прожилковых. Возраст оруденения оценен в 1.9 млрд лет (Perelló et al., в печати) и коррелирует с региональным метаморфизмом в ходе коллизионной орогении.

Бетехтинит Удоканского месторождения

Бетехтинит ранее на месторождении известен не был. Он найден нами в пяти образцах борнит-халькозиновых руд, отобранных из разных участков месторождения (см. рис. 1): из поверхностных горных выработок (SRK-M7-4), штольни (70593) и скважин (глубины 45, 121 и 624 м от поверхности).

Бетехтинит образует зёрна неправильной формы в борните и на границе халькозина с борнитом в прожилково-вкрапленной руде, где сульфидный агрегат цементирует обломки пород (обр. SRK-M7-4). Зёрна бетехтинита в сечении достигают 0.5 мм по длинной оси (рис. 2а). В замещающем

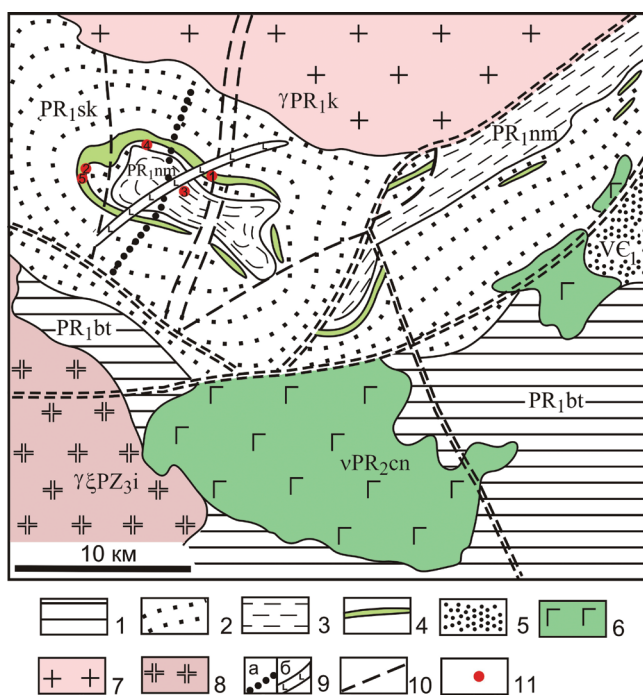


Рис. 1. Геологическая схема района Удоканского месторождения (по Володину и др., 1982*ф*, с упрощениями).

1–3 – терригенные и терригенно-карбонатные породы нижнего протерозоя, свиты: 1 – бутунская, 2 – сакуканская, 3 – намингинская; 4 – меденосный горизонт; 5 – терригенно-карбонатные пестроцветные породы венда – нижнего кембрия; 6 – габбро чинейского комплекса; 7 – граниты кеменского комплекса, 8 – граниты ингамакитского комплекса; 9 – дайки: а – лампрофиры, б – габброиды; 10 – разломы; 11 – проекция точек отбора образцов с бетехтинитом: 1 – SRK-M7-4, 2 – IFDH89b/121, 3 – 70593, 4 – IFDH200/45.6, 5 – IFDH263/624.

Fig. 1. Geological scheme of an area of the Udokan deposit (simplified after Volodin et al., 1982*ф*).

1–3 – Lower Proterozoic terrigenous and terrigenous-carbonate rocks, formations: 1 – Butun, 2 – Sakukan, 3 – Namingin, 4 – copper ore horizon; 5 – Vendian to Lower Cambrian terrigenous-carbonate rocks; 6 – gabbro (Chiney complex); 7 – granites (Kamensky complex); 8 – granites (Ingamakit complex); 9 – dikes: a – lamprophyres, б – gabbros; 10 – faults; 11 – location of samples with betekhtinite: 1 – SRK-M7-4, 2 – IFDH89b/121, 3 – 70593, 4 – IFDH200/45.6, 5 – IFDH263/624.

бетехтинит халькозине наблюдаются тонкие ламеллы вторичного халькопирита (см. рис. 2б)

В образце IFDH89b/121 бетехтинит найден среди прожилковидных скоплений борнит-халькозинового состава в кварцевой жиле. Преобладающим сульфидом здесь является белый халькозин, который содержит реликты борнита с ламеллами халькопирита. Гнездо бетехтинита имеет размер 2 мм и сильно замещено халькозином и антлеритом (см. рис. 2в, г).

В жильном кварце с борнит-халькозиновыми прожилковидными скоплениями и гнездами бетехтинит даёт ксеноморфные включения размером до 0.5 мм в голубоватом халькозине, образующем ангедральные и прожилковидные скопления в борните (обр. 70593). На контакте халькозина и бетехтинита наблюдаются очень тонкие выделения галенита. Соотношение борнита и халькозина в образце составляет ~ 1 : 1.

Бетехтинит в виде зерна размером около 0.1 мм в сростке с борнитом найден в неравномерно-вкрапленных борнитовых рудах в песчанике (IFDH263/624). Борнит в этом образце насыщен ламеллами халькопирита и халькозина (см. рис. 2е).

Выделение бетехтинита размером 0.3–0.4 мм встречено на границе халькозина и реликтового борнита в борнит-халькозиновом гнезде в кар-

бонат-кварцевой жиле (обр. IFDH200/45.6) (см. рис. 2д). Гнездо размером около 2 см имеет сложную изрезанную форму. Соотношение борнита и халькозина составляет 1 : 5.

Таким образом, на Удоканском месторождении бетехтинит чаще встречается в составе жильной и прожилковой минерализации, но отмечен и во вкрапленных рудах. Он присутствует в различных частях рудного поля как на глубоких (IFDH263/624), так и на приповерхностных горизонтах месторождения (SRK-M7-4). Ассоциирующими минералами являются борнит и халькозин, причём халькозин в ряде случаев замещает бетехтинит. Размеры выделений бетехтинита обычно не превышают 1 мм.

В отражённом свете бетехтинит имеет коричневато-розовый цвет, анизотропен. Спектры отражения минерала были получены в диапазоне 400–700 нм на случайных сечениях зёрен, поэтому могут дать только приблизительную характеристику отражательной способности (рис. 3). Тем не менее, видно, что спектры отражения имеют слабо выраженную дисперсию нормального типа. Минимальные значения отражательной способности наблюдаются в области 500–580 нм.

Бетехтинит хорошо полируется, микротвёрдость минерала для нагрузки 50 г варьирует от 169 до 186 кг/мм².

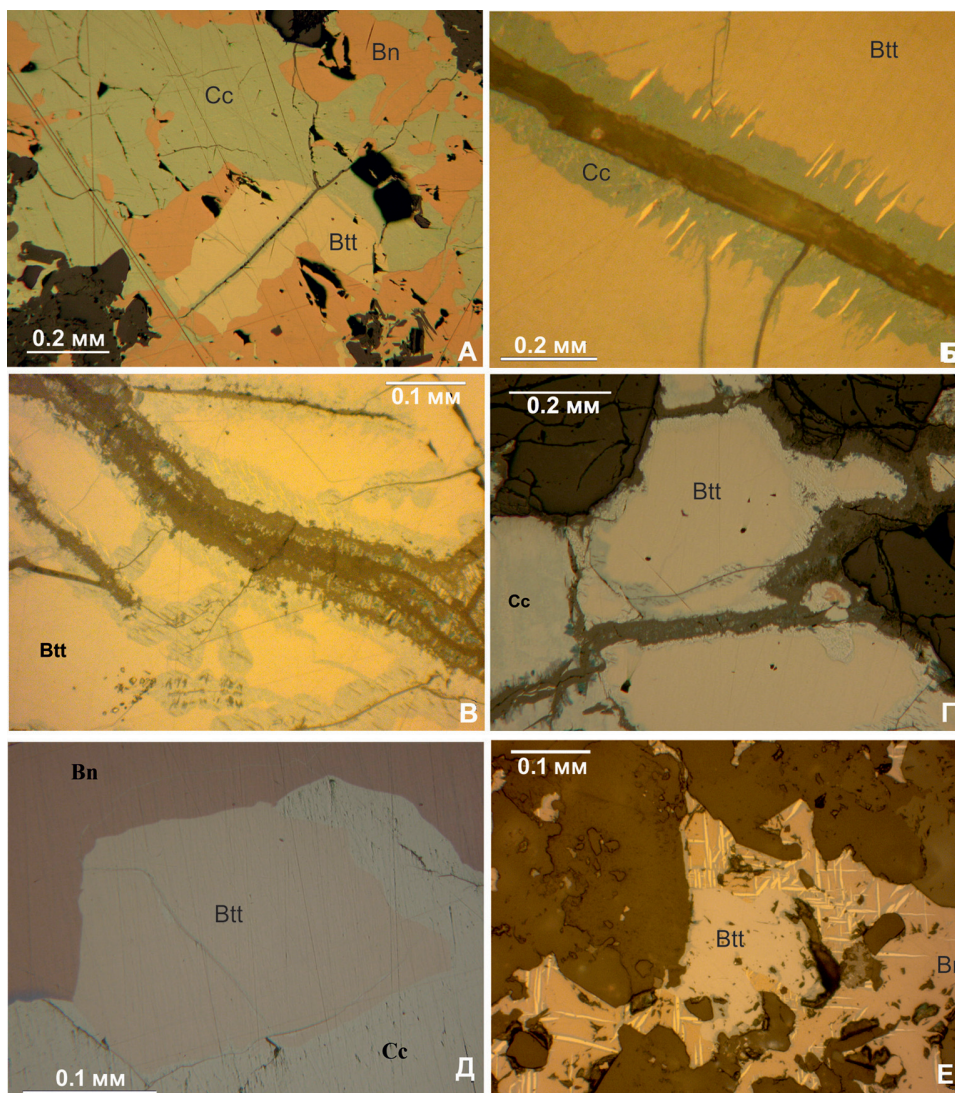


Рис. 2. Форма выделений бетехтинита.

А – выделение неправильной формы в борнит-халькозиновом агрегате (SRK-M7-4); Б – замещение бетехтинита вдоль трещины халькозином с тонкими ламеллями халькопирита (масляная иммерсия, SRK-M7-4); В-Г – халькозин и сульфаты меди развиваются вдоль трещин в бетехтините (IFDH89b/121); Д – выделение бетехтинита на границе борнита и халькозина (IFDH200/45.6); Е – зерно бетехтинита в борните с халькопиритовой решёткой (IFDH263/624). Отражённый свет. Btt – бетехтинит, Cc – халькозин, Bn – борнит.

Fig. 2. Morphology of betekhtinite:

А – anhedral grain in bornite-chalcocite aggregate (SRK-M7-4), Б – replacement of betekhtinite by chalcocite along the crack with thin chalcopyrite lamellae (oil immersion, SRK-M7-4), В-Г – chalcocite and copper sulfates developed along the cracks of betekhtinite (IFDH89b/121), Д – betekhtinite grain at the border of bornite and chalcocite (IFDH200/45.6), Е – betekhtinite grain in bornite with chalcopyrite lamellae. Reflected light. Btt – betekhtinite, Cc – chalcocite, Bn – bornite.

В химическом составе бетехтинита Удоканского месторождения наблюдается устойчивый избыток в позиции меди; часто присутствует примесь серебра с содержанием до 0.83 мас. % (табл. 1). Сопутствующие борнит и халькозин также могут содержать примесь серебра (табл. 2).

Обсуждение результатов

Бетехтинит на Удоканском месторождении ассоциирует с борнитом и халькозином и приурочен к прожилковой минерализации, хотя встречен и во вкрапленных рудах.

На других месторождениях медистых песчаников бетехтинит был выявлен в секущих и по-

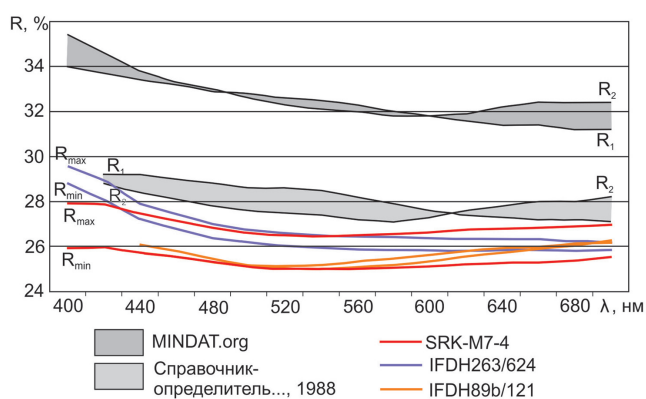


Рис. 3. Спектры отражения бетехтинита.

Fig. 3. Reflectance spectra of betekhtinite.

слоистых зонах с кальцитом. В медистых сланцах Мансфельда он найден в прожилках кальцита совместно с борнитом, галенитом, халькозином, самородным серебром, реже – с никелином, маухеритом, раммельсбергитом (Schüller, Wohlmann, 1966). На Джезказганских месторождениях бетехтинит был обнаружен в крупных (1–2 м) полостях и внутрипластовых трещинах, расположенных в сближенных зонах борнит-галенитовых и халькозиновых руд (Сатпаева, 1959; Муканов и др., 1960). Стенки трещин были выполнены кристаллами кальцита, на гранях которого находились игольчатые выделения бетехтинита длиной до 6–7 см (обычно 1–1.5 см), грубо исштрихованные по удлинению. Бетехтинит ассоциировал с борнитом, халькозином, галенитом и самородным серебром.

Прожилковая минерализация на Удоканском месторождении, в целом, редко выходит за пределы горизонта вкрапленных (слоистых) руд (Чечёткин и др., 1995), и, по-видимому, синхронна им (Perelló et al., в печати), т.е. является продуктом локального переотложения сульфидов в ходе процессов литогенеза и метаморфизма погружения.

В рудах Удоканского месторождения бетехтинит находится в равновесии с борнитом и замещается халькозином. Среди продуктов замещения присутствуют халькопирит и галенит. Пирит в бетехтинит-содержащих ассоциациях не отмечен. Во вкрапленных рудах образца IFDH263/624 присутствует магнетит, образующий рассеянную вкрапленность в песчаниках.

А.И. Славская с соавторами (1963), изучая термическую стабильность джезказганского бетехтинита, пришли к выводу, что образование минерала происходило при температурах не выше 150 °С. При более высоких температурах бетехтинит разлагается на дигенит и галенит.

Химический состав бетехтинита Удоканского месторождения отличается стабильной примесью серебра, содержания которого превышают установленные для этого минерала из других мест. Ранее примесь серебра в бетехтините была отмечена в Гайском колчеданном месторождении (0.95 мас. % Ag) (Прокин, 2004) и эпитермальном месторождении Радка (до 0.27 мас. %) (Kouzmanov, 2004). Содержание серебра отрицательно коррелирует с содержанием свинца (рис. 4), что косвенно ука-

Таблица 1

Химический состав бетехтинита Удоканского месторождения (мас. %)

Table 1

Chemical composition of betekhtinite from the Udokan deposit (wt. %)

№ п/п	Проба	№ лаб.	Cu	Fe	Pb	Ag	S	Se	Сумма	Формула (на S = 15)
1	SRK-M7-4	429	59.44	2.32	17.61	0.32	20.30	–	100.00	$Cu_{22.17}Fe_{0.99}Ag_{0.07}Pb_{2.01}S_{15.00}$
2		430	59.76	2.38	18.03	0.22	20.18	–	100.56	$Cu_{22.42}Fe_{1.02}Ag_{0.05}Pb_{2.07}S_{15.00}$
3	IFDH263/624	419	59.73	2.47	17.71	0.17	20.40	–	100.47	$Cu_{22.17}Fe_{1.04}Ag_{0.04}Pb_{2.02}S_{15.00}$
4		420	59.38	2.33	17.90	0.13	20.19	–	99.93	$Cu_{22.27}Fe_{0.99}Ag_{0.03}Pb_{2.06}S_{15.00}$
5		421	59.38	2.44	17.65	0.20	20.65	–	100.32	$Cu_{21.76}Fe_{1.02}Ag_{0.04}Pb_{1.98}S_{15.00}$
6	IFDH89b/121	5	59.71	2.57	17.39	0.83	19.97	0.04	100.50	$Cu_{22.41}Fe_{1.10}Ag_{0.18}Pb_{2.02}(S_{14.99}Se_{0.01})_{15.00}$
7		9	60.23	2.47	16.39	0.78	19.93	0.05	99.85	$Cu_{22.64}Fe_{1.06}Ag_{0.17}Pb_{1.91}(S_{14.98}Se_{0.02})_{15.00}$
8		10	59.55	2.43	16.32	0.72	19.91	0.03	98.95	$Cu_{22.43}Fe_{1.05}Ag_{0.16}Pb_{1.90}(S_{14.99}Se_{0.01})_{15.00}$
9		11	59.21	2.54	16.90	0.66	19.75	0.05	99.11	$Cu_{22.46}Fe_{1.10}Ag_{0.15}Pb_{1.98}(S_{14.98}Se_{0.02})_{15.00}$
10		12	59.42	2.58	16.03	0.69	19.44	0.03	98.19	$Cu_{22.91}Fe_{1.14}Ag_{0.16}Pb_{1.91}(S_{14.99}Se_{0.01})_{15.00}$
11		13	59.27	2.51	16.90	0.66	19.83	0.05	99.21	$Cu_{22.40}Fe_{1.09}Ag_{0.15}Pb_{1.97}(S_{14.99}Se_{0.01})_{15.00}$

Примечание. Электронный микроскоп HITACHI S-3400N с волновым детектором. Прочерк – элемент не обнаружен.

Note. HITACHI S-3400N SEM equipped with WDS. Dash – below detection limit.

Таблица 2

Химический состав борнита и халькозина, ассоциирующих с бетехтинитом (мас. %)

Table 2

Chemical composition of bornite and chalcocite associated with betekhtinite (wt. %)

Проба	№ лаб.	Cu	Fe	S	Ag	Сумма	Формула (на S = 4)
Борнит							
SRK M7-4	1828b	63.66	11.18	25.17		100.1	Cu _{5.10} Fe _{1.02} S ₄
IFDH89b/121	19155g	63.53	10	25.23	0.51	99.27	Cu _{5.08} Fe _{0.91} Ag _{0.02} S ₄
IFDH263/624	20310f	63.41	10.93	25.07		99.41	Cu _{5.10} Fe _{1.00} S ₄
IFDH263/624	20310e	64.29	10.77	24.99		100.05	Cu _{5.19} Fe _{0.99} S ₄
IFDH263/624	20310d	64.36	10.35	25.19		99.9	Cu _{5.16} Fe _{0.94} S ₄
Халькозин							
70593	1976e	79.46	0.03	20.35		99.84	Cu _{1.97} S
IFDH89b/121	19155i	79.2	0.28	19.95	0.35	99.78	Cu _{2.00} Fe _{0.01} Ag _{0.01} S
IFDH89b/121	19155f	78.64	0.04	20.24	0.81	99.73	Cu _{1.96} Ag _{0.01} S

Примечание. Электронный микроскоп РЭММА-202М с ЭДС. Пустая клетка – элемент не определялся. Формулы борнита рассчитаны на S = 4, халькозина – на S = 1.

Notes. РЭММА-202М SEM with EDAX. Empty cell – not detected. Bornite and chalcocite formula are recalculated to sulfur atoms of 4 and 1, respectively.

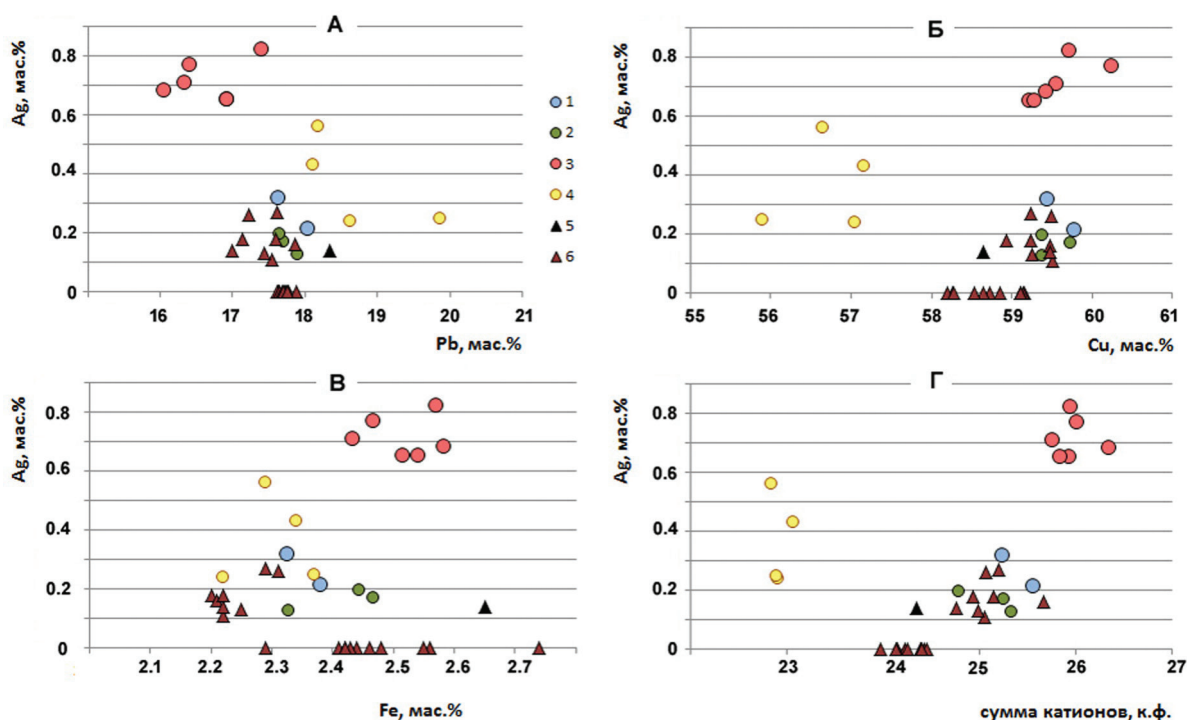


Рис. 4. Соотношение содержаний Ag, Pb, Fe и Cu в бетехтините различных месторождений. 1–5 – Удоканское месторождение: 1 – SRK-M7-4, 2 – IFDH263/672, 3 – IFDH89b/121 (данные ВДС), 4 – IFDH89b/121 (данные ЭДС), 5 – 70593; 6 – Харкой (Akinci, 1976); 7 – Радка (Kouzmanov, 2004).

Fig. 4. Correlation between Ag, Pb, Fe and Cu contents of betekhtinite from various deposits: 1-5 Udokan deposit: 1 – SRK-M7-4, 2 – IFDH263/672, 3 – IFDH89b/121 (WDS data), 4 – IFDH89b/121 (EDS data), 5 – 70593; 6 – Harköy (Akinci, 1976), 7 – Radka (Kouzmanov, 2004).

зывает на вхождение серебра в кристаллохимическую позицию свинца. Содержания меди и серебра не связаны сколь-либо закономерно, а меди и железа – обнаруживают тенденцию к положительной корреляции.

Нужно отметить, что во всех рассчитанных кристаллохимических формулах наблюдается относительный дефицит серы по отношению к сумме металлов. В формуле стехиометричного бетехтинита $(\text{Cu}, \text{Fe})_{21}\text{Pb}_2\text{S}_{15}$ отношение суммы металлов к сере должно составлять 23 : 15, в то время как в наших анализах, вне зависимости от способа их получения, это соотношение составляет (24–27) : 15 (см. табл. 1). Этот факт можно объяснить частичным изменением бетехтинита, при котором происходит «удаление» части серы с формированием халькозина с соотношением суммы металлов (Cu, Fe, Ag) и серы около 2 : 1.

Изучение кристаллической структуры бетехтинита без примеси серебра из Мансфельда показало существование двух позиций, занятых свинцом, и трёх неполностью заселённых позиций меди, в которых примесное железо распределено равномерно (Dornberger, Hohnе, 1959).

Нужно отметить, что дефицит серы (или избыток металлов) наблюдается практически во всех опубликованных анализах бетехтинита. Наблюдается тенденция увеличения суммы металлов при росте содержания серебра (см. рис. 4).

Имеющиеся измерения отражательной способности бетехтинита несколько противоречивы. К.М. Мукановым с соавторами (1960) измерения для образцов Джезказганского месторождения проводились на микроскопе-фотометре Берека в натриевом свете (оранжево-жёлтом). В результате было получено значение $R = 36.5\%$. Для бетехтинита из руд месторождения Ла-Леона (Аргентина) на случайных сечениях были получены максимальные величины отражения 30–32 % (MPV Leitz, стандарт SrTiO_3) (Honnorez-Guerstein, 1971). Эти значения близки к приведённым в базах данных MINDAT и WEBMINERAL (31.2–35.4 %). Между тем, Т.Н. Чвилёвой с соавторами (1988) на материале из Джезказганского месторождения приведены значения R в случайных сечениях 27.1–29.2 %, причём кривые $R1$ и $R2$ пересекаются в области 620 нм. Полученные нами характеристики отражения ещё более низкие, что, вероятно, связано с частичным изменением минерала.

Заключение

Бетехтинит на Удоканском месторождении встречается как редкий минерал в халькозин-борнитовых рудах. Минеральная ассоциация бетехтинита соответствует его низкотемпературной природе. Для него характерна примесь серебра и варьирующее содержание железа. Дефицит серы в изученном бетехтините, вероятно, связан с частичным изменением минерала. Отражательная способность минерала ниже, чем табличная, что также может быть связано с некоторой его изменённостью.

Лабораторные работы выполнены в рамках госбюджетной темы (проект АААА-А16-116021010244-О). Авторы благодарны сотрудникам ООО «Байкальская горная компания» за содействие в проведении полевых работ. Особую благодарность авторы выражают И.В. Пекову за скрупулезную ревизию статьи.

Литература

- Володин Р.Н., Савченко А.А., Федотова В.М., Кичигин А.И. (1982*ф*) Разработка критериев прогнозирования проявлений медного оруденения в Удоканском рудном районе с целью обоснования направления геологоразведочных работ. Отчёт по теме 41-1/5. М.: ЦНИГРИ, 305 с.
- Гонгальский Б.И. (2015) Месторождения уникальной металлогенической провинции Северного Забайкалья. М.: ВИМС, 248 с.
- Качаловская В.М., Хромова М.М. (1970) О бетехтините, гёссите, штрмейерите из борнитовых руд месторождения Уруп. *Геология рудных месторождений*, (1), 93–97.
- Муканов К.М., Наркелюн Л.Ф., Яковлевская Т.А. (1960) О находке бетехтинита на Джезказганском месторождении. *Доклады Академии наук СССР*, 130(2), 404–407.
- Прокин В.А., ред. (2004) Гайский ГОК: геология Гайского и Подольского медно-цинковых колчеданных месторождений на Урале. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 148 с.
- Сатпаева Т.А. (1959) Бетехтинит в рудах Джезказганского месторождения. *Известия АН КазССР*, 34(1), 95–103.
- Славская А.И., Рудниченко В.Е., Богословская Е.И. (1963) О разложении бетехтинита при нагревании. *Геология рудных месторождений*, (3), 97–100.
- Чвилёва Т.Н., Безсмертная М.С., Спиридонов Э.М., Агроскин А.С., Папаян Г.В., Виноградова Р.А., Лебедева С.И., Завьялов Е.Н., Филимоно-

ва А.А., Петров В.К., Раутиан Л.П., Свешникова О.Л. (1988) Справочник-определитель рудных минералов в отражённом свете. М.: Недра, 504 с.

Чечёткин В.С., Володин Р.Н., Наркелюн Л.Ф., Трубачёв А.И., Быков Ю.В., Маркевич Г.Е. (1995) Удоканское месторождение медистых песчаников. *Месторождения Забайкалья* (под ред. Н.П. Лавёрова). М.: Геоинформмарк, 1(кн. 1), 10–19.

Akinci O.T. (1976) On the discovery of betekhtinikte in the Bulancak (Giresun, Turkey) sulphide veins. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 86, 51–56.

Baibatsha A., Dyussebayeva K., Kassenova A. (2015) Microparagenetic associations of gold in ore-forming minerals from deposits of different geological and industrial types of Kazakhstan. *Proceedings of the 11th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM)*. Springer International Publishing, 1–8.

Dornberger Schiff K., Hohne E. (1959) Die Kristallstruktur des Betehtinit $Pb_2(Cu,Fe)_{21}S_{15}$. *Acta Crystallographica*, 12, 646–651.

Dunn P.J. (1991) Rare minerals of the Kombat Mine. *Mineralogical Record*, 22(6), 421–425.

Honnorez-Guerstein B.M. (1971) Betehtinite and Bisulfosalts from the copper mine of «La Leona» (Argentina). *Mineralium Deposita*, 6(2), 111–121.

Kampunzu A.B., Cailteux J.L.H., Kamona A.F., Intiomale M.M., Melcher F. (2009) Sediment-hosted Zn–Pb–Cu deposits in the Central African Copperbelt. *Ore Geology Reviews*, 35(3–4), 263–297.

Kouzmanov K. (2004) Galena-bearing myrmekitic intergrowths from the Radka deposit, Bulgaria: Origin and mechanisms of formation. *Geochemistry, mineralogy and petrology*, 41, 17–30.

Markham N.L., Ottemann J. (1968) Betehtinite from Mt. Lyell, Tasmania. *Mineralium Deposita*, 3(2), 171–173.

Matsukama T. (1971) Betehtinite from the Kuroko deposits of the Furotobe Mine, Akita Prefecture, Japan. *Mineral Soc. Japan Spec. Paper* 1, 191–195.

Nysten P. (1986) Textural relations of betekhtinite and cobalt pentlandite from Langban, Sweden. *Geologiska Foreningen i Stockholm Forhandlingar*, 108(2), 135–138.

Paar W.H., Chen T.T. (1985) Zur Mineralogie von Cu–Ni(Co)–Pb–Ag–Hg–Erzen im Revier Schwarzleo bei Leogang, Salzburg, Österreich. *Mitt. österr. geol.*, 78, 125–148.

Perelló J., Sillitoe R., Yakubchuk A., Valencia V., Comejo P. Age and tectonic setting of the Udokan sediment-hosted copper-silver deposit, Transbaikalia, Russia. *Ore geology reviews*. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.11.004.

Schüller A., Wohlmann E. (1966) Betehtinit, ein neues blei-kupfer-sulfid aus den Mansfelder Rücken. *Geologie*, 4, 535–555.

References

Volodin R.N., Savchenko A.A., Fedotova V.M., Kichigin A.I. (1982*φ*) [Development of criteria for predicting the manifestations of copper mineralization in the Udokan ore district in order to justify the direction of geological exploration. Report 41-1/5]. Moscow, CNIGRI, 305 p. (in Russian)

Gongalsky B.I. (2015) [The ore occurrences of the unique metallogenic province of Northern Transbaikalia]. Moscow, VIMS, 248 p. (in Russian)

Kachalovskaya V.M., Chromova M.M. (1970) [About betekhtinite, hessite, stromeyerite from bornite ores of the Urup deposit]. *Geologia rudnykh mestorozhdeny [Geology of the ore deposits]*, (1), 93–97. (in Russian)

Mukanov K.M., Narkelyun L.F., Yakovlevskaya T.A. (1960) About finding of betekhtinite on the Dzhezkazgan deposit. *Doklady Akademii Nauk SSSR [Doklady Academy of Sciences USSR]*, 130(2), 404–407. (in Russian)

Prokin V.A., ed. (2004) [Gaysky GOK; geology of Gay and Podol Cu–Zn massive sulphide deposits on Ural]. Ekaterinburg, IGG UrO RAN, 148 p. (in Russian)

Satpaeva T.A. (1959) Betehtinite in the ores of Dzhezkazgan deposit. *Izvestia AN KazSSR [Proceedings of the AS KazSSR]*, 34(1), 95–103. (in Russian)

Slavskaya A.I., Rudnichenko V.E., Bogoslovskaya E.I. (1963) About decomposition of betekhtinite under heating. *Geologia rudnykh mestorozhdeny [Geology of the ore deposits]*, (3), 97–100. (in Russian)

Chvileva T.N., Bezmertnaya M.S., Spiridonov E.M., Agroskin A.S., Papayan G.V., Vinogradova R.A., Lebedeva S.I., Zav'alov E.N., Filimonova A.A., Petrov V.K., Rautian L.P., Svешnikova O.L. (1988) [Reference book of ore minerals in the reflected light]. Moscow, Nedra, 504 p. (in Russian)

Chechetkin V.S., Bolodin R.N., Narkelyun L.F., Trubachev A.I., Bykov Yu.V., Markevich G.E. (1995) [Udokan sediment-hosted copper deposit]. *Mestorozhdenia Zabaykal'a [Ore deposits of Transbaikalia]*. Moscow: Geoinformmark, 1, 10–19. (in Russian).

Поступила в редакцию 28 марта 2017 г.