

УДК 549.3(470.5)

DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-3-445-458

СУЛЬФОСОЛИ ВИСМУТА БЕРЕЗОВСКОГО РУДНОГО РАЙОНА: ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ И МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ

© 2018 г. С. В. Прибавкин¹, С. Г. Сустанов², И. А. Готтман¹¹Институт геологии и геохимии, УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15,
e-mail: pribavkin@igg.uran.ru²Уральский государственный горный университет, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Поступила в редакцию 25.04.2017 г., принята к печати 18.05.2017 г.

В работе приводятся результаты исследования химического состава сульфосолей висмута из золото-кварц-сульфидных руд Березовского месторождения и одноименного рудного района Среднего Урала. Образцы минералов были получены из кварцевых жил, расположенных в разных частях рудного района. На юге района жилы залегают среди гранитов Шарташского массива и сопровождаются метасоматитами гумбеитовой формации. Жилы в его центральной части, располагаются в дайках гранит-порфиров, вулканогенно-осадочных породах, гипербазитах. На севере, жилы локализованы в габбро, гипербазитах, вулканогенных породах. Здесь, как и в центральной части, они сопровождаются метасоматическими изменениями березит-лиственитовой формации. Минералы висмута образуют мелкие выделения изометричной, призматической или игольчатой формы, а также крупные вытянутые кристаллы, достигающие в длину нескольких сантиметров. Их диагностика и исследование состава выполнено методами рентгеноструктурного и химического микроанализа. Показано широкое распространение среди минералов висмута сульфосолей висмутин-айкинитовой серии, насчитывающей 9 членов: висмутин, пекоит, гладит, зальцбургит, крупкайт, линдстремит, хаммарит, фридрихит и резко преобладающий среди всех сульфосолей это ряда айкинит. В составе минералов павонитовой серии выявлены купропавонит, Си-бенжаминит, бенжаминит. Иные сульфосоли висмута представлены козалитом, нафилдитом, ходрушитом, матильдитом. Взаимоотношения минералов друг с другом и особенности химического состава позволили выделить несколько парагенетических ассоциаций, связанных с различными стадиями минералообразования. С высокотемпературной стадией (360–285°C) связано отложение неупорядоченных твердых растворов висмутин-айкинитовой и павонитовой серий, впоследствии претерпевших распад с образованием упорядоченных фаз висмутина, гладита, крупкайта, линдстремита, хаммарита, бенжаменита. На средне- и низкотемпературной стадии (285–150°C) формировались айкинит, фридрихит, крупкайт, зальцбургит, нафилдит, козалит, матильдит, совместно с Ag-Bi-галенином, тетрадимитом, гесситом, золотом. С низкотемпературной стадией связано образование айкинита совместно с галенином и золотом. Установленная на примере сульфосолей висмута последовательность минералообразования отражает не только последовательную эволюцию минералообразующих флюидов, но и импульсный характер гидротермальной активности на отдельных месторождениях и на рудном поле в целом.

Ключевые слова: висмутин-айкинитовая серия, павонитовая серия, козалит, нафилдит, Березовское месторождение

BISMUTH SULFOSALTS FROM BEREZOVSK ORE REGION: CHEMICAL COMPOSITION AND MINERAL ASSOCIATIONS

Sergei V. Pribavkin¹, Sergei G. Sustavov², Irina A. Gottman¹¹A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB of RAS, 15 Akad. Vonsovsky st., Ekaterinburg, 620016, Russia,
e-mail: pribavkin@igg.uran.ru²Ural State Mining University, 30 Kuibysheva st., Ekaterinburg, 620016, Russia

Received 25.04.2017, accepted 18.05.2017

The paper presents the results of a study of the chemical composition of the sulfosalts of bismuth from the gold-quartz-sulphide ore Berezovsky Deposit and the eponymous ore district of the Middle Urals. Samples of minerals were obtained from quartz veins located in different parts of the ore area. In the South of the district the veins occur among the granites of the Shartash massif and accompanied by the metasomatic gumbeyite formation. Veins in its Central part are located into the dikes of granite porphyry, volcanic-sedimentary rocks, hyperbasites. In the North, the veins are localized in gabbro, hyperbasites, volcanic rocks. Here, as in the Central part, they are accompanied by metasomatic changes of the beresite-listwanite formation. The minerals of bismuth form small isometric, prismatic or needle-shaped secretions, as well as large elongated crystals reaching a length of several centimeters. Their diagnosis and study of the composition was performed by X-ray structural and chemical microanalysis. It is shown widespread among minerals of bismuth sulfosalts of the bismuthinite-

Для цитирования: Прибавкин С.В., Сустанов С.Г., Готтман И.А. (2018) Сульфосоли висмута Березовского рудного района: химический состав и минеральные ассоциации. *Литосфера*, **18**(3), 445–458. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-3-445-458

For citation: Pribavkin S.V., Sustavov S.G., Gottman I.A. (2018) Bismuth sulfosalts from Berezovsk ore region: Chemical composition and mineral associations. *Lithosfera*, **18**(3), 445–458. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-3-445-458

aikinite series, consisting of 9 members: bismuthine, pecoite, gladite, stroking, salzburger, krupkaite, lindströmite, khammarite, fridrikhite and dramatically prevalent among sulfosalts that number aikinite. In mineral composition pavonite series revealed cuprapawonite, Cu-benjaminite, benjaminite. Other sulphosalts of bismuth are presented kosolite, nafildite, hodrushite, matildite. The relationship of minerals with each other and the peculiarities of the chemical composition allowed to distinguish several paragenetic associations conform with different stages of mineral formation. With high-temperature stage (360–285°C) connects the deposition of disordered solid solutions bismuthine-aikinite and pavonite series, subsequently undergone to disintegration with the formation of ordered phases of bismuthine, gladite, krupkaite, lindströmite, khammarite, benjaminite. For medium and low temperature stage (285–150°C) was formed aikinite, fridrikhite, krupkaite, salzburgite, nuffieldite, cozalite, matildite, together with the Ag-Bi-Galena, tetradymite, hessite and gold. The low-temperature stage is associated with the formation of aikinite together with Galena and gold. Established on the example of the sulfosalts of bismuth sequence of mineral formation reflects not only the consistent evolution of mineral-forming fluids, but the pulsed nature of the hydrothermal activity at individual deposits and at ore field in general.

Keywords: *bismuthinite-aikinite series, pavonite series, cosalite, nuffieldite, gold, quartz veins, Berezovskoe deposit*

Acknowledgements

The authors are grateful to the employees of the center for collective use of "Geoanalyst" T.Ya. Gulyaeva, O.L. Galakhova, D.A. Zamyatin, A.V. Mikheeva for conducting X-ray structural and microprobe studies, as well as V.A. Gubin for samples provided for study.

The work was supported by the RFBR grant No. 15-05-00576a.

ВВЕДЕНИЕ

Висмутовые сульфосоли не образуют крупных скоплений, тем не менее они широко распространены в природе и служат основным источником висмута и значительной доли серебра. Им посвящена обширная литература [Годовиков, 1972; Мозгова, 1985; Moelo et al., 2008 и др.], затрагивающая вопросы систематики, кристаллохимии, парагенетических ассоциаций, минералообразования. В рудах старейшего в России Березовского месторождения золота, по оценкам Л.Н. Овчинникова [1998], запасы висмута оценены более чем в 1000 т. Он присутствует в самородной форме, в форме сульфосолей, сульфидов, изоморфной примеси в галените, блеклых рудах [Бородаевский, Бородаевская, 1947; Вертушков и др., 1972; Чесноков и др., 1975; Бушмакин и др., 1978; Прибавкин и др., 1997; Спиридонов и др., 1998; Филимонов, 1999а; Викентьева и др., 2008; Прибавкин, 2014, 2015]. Однако его минералогия в контексте минеральных ассоциаций и их распределения в пространстве рудного поля, связи с условиями и этапами минералообразования, сопряженности с теми или иными формационными типами метасоматических преобразований изучены недостаточно.

Задачами нашего исследования выступают демонстрация разнообразия видового и химического состава сульфосолей висмута, выявление парагенетических ассоциаций, стадийности и закономерностей их появления на площади Березовского месторождения и рудного района на основе авторских материалов и литературных данных.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РУДНОГО РАЙОНА

Помимо крупного Березовского месторождения золота в состав рудного района входят многочис-

ленные месторождения и рудопроявления Au и W: Шульгинское, Кремлевское, Пышминское, Шеелитовый рудник, Шарташское, Шпанчевское, Становлянское и др. Месторождения рудного района сосредоточены в породах кровли полого падающего на север Шарташского гранитного массива, реже внутри массива [Бородаевский, Бородаевская, 1947]. Здесь широко развиты дайковые рои гранит-порфиров, образующие пучки, расходящиеся веером в северном и северо-восточном направлениях от массива (рис. 1). В центральной части рудного района (Березовское месторождение) рудные тела представлены малосульфидными жилами кварц-золоторудной формации, детально охарактеризованными в работах [Бородаевский, Бородаевская, 1947; Кутюхин, 1948]. В 90% случаев они имеют широтное простирание и крутое падение на юг, выполняя поперечные трещины разрывов в дайках гранит-порфиров и вмещающих породах вулканогенной толщи. Жилы, локализованные по периферии рудного района, как и жилы месторождения, сформированы в едином деформационном поле [Бородаевский, Бородаевская, 1947; Сомов и др., 2009], но их количество гораздо меньше, а золотосодержание минимально.

Продуктивные на золото жилы сопряжены с метасоматитами березит-лиственитовой формации [Бородаевский, Бородаевская, 1947; Сазонов, 1984]. Бедные золотом жилы, иногда несущие шеелитовую минерализацию, связаны с березитами или метасоматитами гумбеитовой и эйситовой формаций [Грабежев, 1970; Спиридонов и др., 1998, 2014; Сазонов и др., 2001; Сустанов, Нохрина, 2003; Сустанов, 2013]. Последние развиты на южном фланге рудного района, реже встречаются в его центральных частях.

Исследуемые образцы сульфосолей висмута отобраны нами в южной, центральной и северной

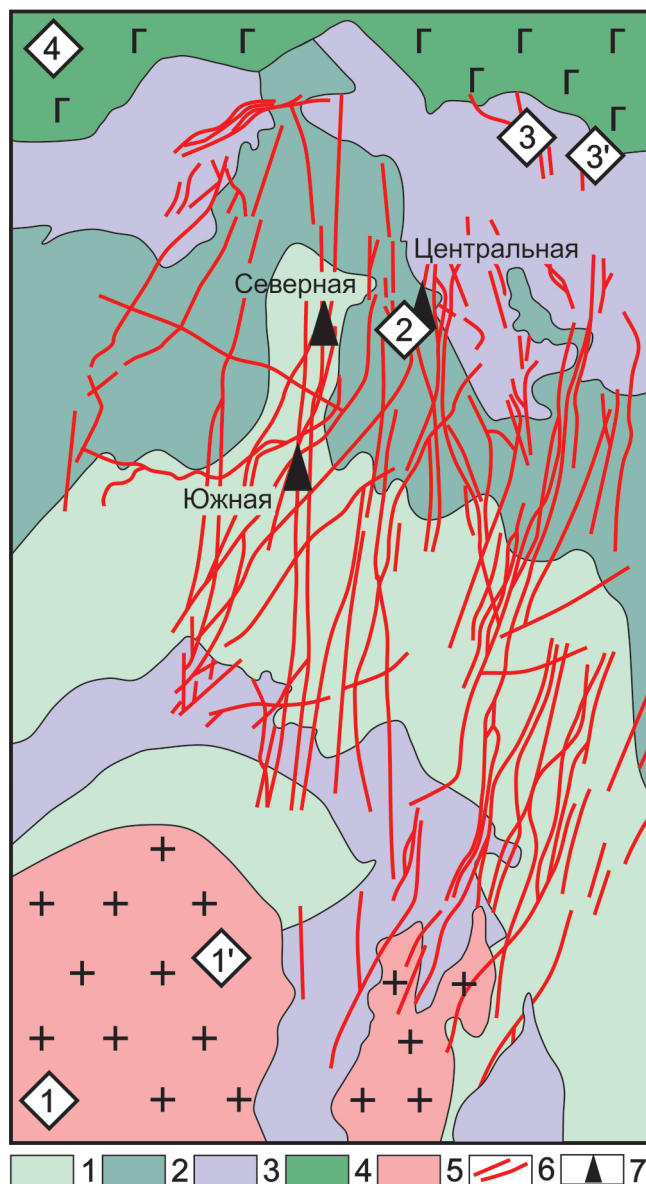


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Березовского рудного поля по М. Бородаевской и Н. Бородаевскому [Рудные месторождения..., 1978, с упрощениями].

1 – вулканогенно-осадочные породы, 2 – базальты и диабазы, 3 – серпентиниты и тальк-карбонатные породы, 4 – габбро, 5 – граниты, 6 – дайки гранит-порфиров, 7 – действующие шахты Березовского рудника. Цифрами в ромбах обозначены места отбора образцов: 1, 1' – щебеночные карьеры Шарташский (56.8401° с. ш., 60.7078° в. д.) и Урочище (56.8637° с. ш., 60.7484° в. д.); 2 – шахта Центральная Березовского рудника (56.9286° с. ш., 0.8023° в. д.); 3, 3' – карьер Ушаковский (56.9435° с. ш., 60.8233° в. д.) и карьер на Золотой горке (56.9416° с. ш., 60.8312° в. д.); 4 – Шулгинский рудник (56.9541° с. ш., 60.7130° в. д.).

Fig. 1. Simplified geological scheme of Berezovsk ore region according to M. Borodaevsky and N. Borodaevskaya [Ore deposits..., 1978].

1 – volcanogenic-sedimentary rocks, 2 – basalts and diabases, 3 – serpentinites and talc-carbonate rocks, 4 – gabbro, 5 – granites, 6 – dykes of granite-porphry, 7 – operating mines of Berezovsk. Numbers in yellow diamonds are sampling locations: 1, 1' – Shartash (56.8401° N, 60.7078° E) and Urochishche (56.8637° N, 60.7484° E) quarries; 2 – Berezovsk bal, Central mine (56.9286° N, 0.8023° E); 3, 3' – Ushakovsk quarry (56.9435° N, 60.8233° E) and Zolotaya gorka quarry (56.9416° N, 60.8312° E); 4 – Shulginsk mine (56.9541° N, 60.7130° E).

частях рудного района из жил, залегающих среди гранитов массива, гранит-порфиров дайкового комплекса и вулканогенной толщи. Позиция и координаты мест отбора образцов указаны на рис. 1.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Диагностика минералов включала рентгеноструктурный анализ порошкового образца на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 (Shimadzu) в области углов 2θ 4–70° со скоростью 1 град/мин, напряжением 40 кВ, током 30 мА, излучением $\text{CuK}\alpha$ и рентгеновской установки УРС-55 с камерой Дебая 57.3 мм, нефильтрованным излучением $\text{FeK}\alpha + \beta$, напряжение 30 кВ, сила тока 10 мА. Для этого предварительно проанализированные на микрозонде зерна минерала извлекали под микроскопом из полированной шайбы эпоксидной смолы.

Химический анализ минералов проводили на рентгеновском микроанализаторе Самеса SX-100 при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе электронного зонда 40 нА. В качестве стандартных образцов использовали Ag, CuFeS_2 , ZnS, PbS, InAs, GaSb, HgTe. Концентрацию элементов определяли по характеристическим линиям As – K α , Pb – M α , Hg – M β , Sb – L α , Ag – L α , S – K α , Zn – K α , Cu – K α , Fe – K α , Te – L α , Bi – M α . Стандартные отклонения, мас. %: Cu – 0.10–0.38, Ag – 0.00–0.30, Pb – 1.20–2.00, Bi – 0.30–1.20, Sb – 0.10–0.20, Te – 0.02–0.08, S – 0.32–0.50. Микрофотографии образцов получены на сканирующем электронном микроскопе JSM-6390LV при ускоряющем напряжении 20 кВ.

МИНЕРАЛЫ ВИСМУТИН-АЙКИНИТОВОЙ СЕРИИ

Сульфосоли висмутин-айкинитовой серии (ВАС) являются неотъемлемой частью минеральных ассоциаций Березовского месторождения и рудного района. Они образуют крупные призматические кристаллы в кварце и мелкие зерна совместно с другими сульфидами: пиритом, галенитом, блеклыми рудами, халькопиритом. Долгое время на месторождении были известны лишь крайние члены серии – айкинит и висмутин, первые упоминания о находках которых присутствуют в работах [Hermann, 1789; Колобов, 1836] под названием игольчатой руды и висмутового блеска. Со-

гласно оценкам [Чесноков и др., 1975], на их долю приходится более 50% всех эндогенных висмутсодержащих минералов рудного района. С конца 90-х гг. XX в. появились работы, показывающие более широкое разнообразие минералов ВАС: были диагностированы фридрихит, хаммарит, линдстремит, гладит, пекоит [Прибавкин и др., 1997; Прибавкин, 2001, 2014]. Новые и ранее полученные данные состава минералов серии приведены в табл. 1.

Исследование образцов сульфосолей демонстрирует резкое преобладание в составе ВАС высокомедистых разностей (айкинита, фридрихита),

образующих несколько парагенетических ассоциаций, завершающих сульфидное минералообразование. Среди них может быть выделена ассоциация айкинита $N_{aik} = 96-100$ с галенитом (рис. 2а), бурнонитом, тетраэдритом, тетрадимитом, алтаитом, высокопробным золотом, преобладающая в южной части [Куруленко, 1982; Спиридонов и др., 1997], и ассоциация айкинита $N_{aik} = 90-100$ с галенитом, блеклыми рудами, золотом, висмутом в центральной и северной частях рудного района [Бородаевский, Бородаевская, 1947; Сазонов и др., 2001]. Размеры выделений айкинита и его количество меня-

Таблица 1. Химический состав минералов висмутин-айкинитовой серии, мас. %

Table 1. The chemical composition of the minerals bismuthinite-aiikinite series, wt %

№	Локация	Cu	Ag	Pb	Bi	Sb	Te	S	Сумма	N_{aik} , %
Висмутин										
1	1	0.46	0.54	—	75.79	—	0.69	17.09	94.57	0.0
2	1	0.65	0.10	0.28	76.70	0.10	0.05	17.35	95.23	0.7
3	1	0.71	0.65	0.97	75.02	—	0.22	17.27	94.84	2.6
4	1	0.84	1.76	1.66	72.72	—	0.07	17.37	94.42	4.5
5	1	0.90	0.21	1.93	74.87	0.07	0.07	17.27	95.32	5.1
6	2	1.14	—	2.84	76.51	0.45	0.05	18.89	99.88	7.2
7	2	1.31	0.04	3.25	76.60	0.37	0.06	18.84	100.47	8.2
Пекоит										
8	2	1.74	—	6.57	73.31	0.06	0.06	17.52	99.26	16.6
Гладит										
9	2	4.62	0.02	13.21	64.27	0.35	0.12	18.64	101.23	34.3
Зальцбургит										
10	2	4.79	0.02	14.40	62.04	—	0.09	18.38	98.14	37.9
11	2	4.93	0.15	14.37	60.67	—	0.05	17.97	99.72	38.6
Крупкаит										
15	1	6.89	—	19.07	56.10	—	0.10	17.84	100.00	51.1
16	1	6.98	—	19.78	56.45	0.15	0.18	18.49	102.03	52.2
17	1	6.88	—	19.86	55.98	0.14	—	18.53	101.39	52.7
18	1	6.66	—	20.10	55.56	0.15	0.01	17.63	100.11	53.5
19	1	6.81	0.05	19.98	54.55	0.25	0.02	18.04	99.70	54.0
20	1	6.55	0.06	20.65	54.58	0.23	0.08	17.72	99.87	55.2
21	1	6.73	—	20.52	54.12	0.16	0.06	17.88	99.47	55.3
22	1	7.25	—	21.45	54.02	—	0.11	16.83	99.66	57.2
23	1	7.42	—	21.00	52.24	—	0.13	17.49	98.28	57.7
12	2	5.89	0.09	18.86	57.52	—	0.03	17.82	100.21	49.7
13	2	6.14	—	18.87	56.74	—	0.11	17.60	99.46	50.2
14	2	5.94	0.30	19.03	56.12	—	0.06	17.97	99.42	51.0
Линдстремит										
24	1	7.36	—	23.01	53.08	—	0.18	14.82	98.45	60.8
25	1	7.49	—	23.73	52.32	—	0.10	15.33	98.97	62.8
26	1	7.73	—	23.74	52.01	—	0.09	15.31	98.88	63.0
Хаммарит										
27	1	8.29	—	25.39	49.76	—	0.11	15.96	99.51	68.0
28	1	8.41	—	25.92	49.11	—	0.13	16.00	99.57	69.5
29	1	8.53	—	25.79	49.05	—	0.08	16.02	99.47	69.3
30	1	8.90	—	26.07	48.30	—	—	16.10	99.37	70.5
Фридрихит										
31	1'	8.28	—	28.72	46.55	—	—	17.11	100.66	76.7
32	1'	8.08	—	28.52	45.28	0.07	—	16.67	98.62	77.7
33	2	9.83	—	30.14	42.38	0.29	0.07	17.48	100.19	83.0
34	2	9.63	—	30.07	42.53	0.32	0.09	17.40	100.04	83.3
35	2	10.03	—	30.21	42.22	0.26	0.04	17.56	100.32	83.8

Таблица 1. Окончание

Table 1. Ending

№	Локация	Cu	Ag	Pb	Bi	Sb	Te	S	Сумма	N _{aik} , %
Айкинит										
36	1	10.32	—	33.91	39.18	0.17	—	15.30	98.88	93.2
37	1'	11.09	—	34.07	38.11	0.35	0.08	17.00	100.70	94.8
38	1	10.45	—	32.80	35.63	0.33	—	16.94	96.15	96.3
39	1'	11.62	—	33.76	36.00	0.28	—	17.85	99.51	97.2
40	1	10.52	—	33.40	35.24	0.25	0.07	16.58	96.06	97.7
41	1	10.48	—	33.80	35.12	0.23	0.11	16.53	96.27	98.5
42	1	10.76	—	33.80	34.87	0.17	0.06	16.80	96.46	98.9
43	1	11.48	—	35.23	35.95	0.27	—	17.25	100.18	99.4
44*	1'	11.70	—	35.93	35.92	0.33	—	17.04	100.92	100.4
45*	1'	11.11	0.03	35.99	35.94	0.19	0.07	16.86	100.19	100.5
46	2	9.85	0.05	31.14	42.78	0.06	0.05	17.10	101.03	84.7
47	2	9.99	0.01	31.13	42.01	0.04	0.02	17.42	100.62	85.5
48	2	9.83	—	32.27	41.82	0.21	0.06	17.44	101.63	87.5
49	2	11.28	—	31.23	39.98	—	—	16.86	99.35	88.1
50	2	10.60	0.53	32.65	40.17	—	—	16.65	100.60	90.1
51	2	10.56	—	32.43	40.55	0.26	0.08	17.21	101.09	89.3
52	2	10.76	0.02	32.68	40.18	0.22	—	17.56	101.42	90.1
53	2	10.76	0.11	33.60	40.07	0.27	0.04	17.62	102.47	91.6
54	2	11.01	—	33.19	39.52	0.25	0.06	17.27	101.30	91.7
55	2	10.81	—	33.52	38.98	0.03	—	17.25	100.59	92.9
56	2	10.77	—	33.48	38.37	0.13	0.10	16.67	99.52	93.6
57	2	10.93	—	34.09	39.04	—	—	17.38	101.44	93.7
58	2	11.50	—	33.64	36.92	0.04	—	16.80	98.90	95.7
59	2	11.27	0.06	35.05	37.16	0.88	0.03	17.09	101.54	97.5
60	2	11.78	—	35.88	35.56	0.98	—	16.75	100.95	100.9
61	3	11.11	0.05	33.40	37.99	0.45	0.03	16.62	99.65	94.0
62	3'	11.04	—	34.04	38.58	—	—	16.21	99.87	94.2
63	3	11.02	0.12	34.29	38.47	0.31	0.01	16.81	101.03	94.7
64	4	10.82	0.06	31.91	39.45	0.46	0.02	16.90	99.62	89.9

*Составы минералов по [Викентьева и др., 2008].

Примечание. Доля айкинита в висмутин-айкинитовой серии выражена величиной $N_{aik} = [2Pb/(Pb + Bi)] \times 100$ [Makovicky E., Makovicky M., 1978]. Номера локаций см. на рис. 1. Прочерк – элемент не обнаружен.

*Mineral composition according to [Vikentjeva et al., 2008].

Note. The proportion of aikinite in the bismuthin-aikinite serie is expressed by the value $N_{aik} = [2Pb/(Pb + Bi)] \times 100$ [Makovicky E., Makovicky M., 1978]. Location numbers see at Fig. 1. Dash – element not found.

ются с юга на север: от долей миллиметра до 5 см и более и от единичных зерен до крупных скоплений. Химический состав минерала этой ассоциации наиболее близок стехиометрии айкинита.

Предшествующие им парагенетические ассоциации ВАС с Ag-Bi-галенитом, теннантитом, козалитом, нафилдитом, тетрадимитом, гесситом, золотом развиты столь же широко. Например, в центральной осевой части рудного района, области так называемого “теннантитового максимума”, в которой золотоносность сульфидов максимальна [Чесноков, 1973], встречаются ассоциации фаз состава $N_{aik} = 90$ либо более упорядоченных фаз айкинита и фридрихита с козалитом и нафилдитом (рис. 2б, в). Кристаллы айкинита здесь широко варьируют по размеру и форме: от долей миллиметра изометричной формы до длиннопризматических кристаллов, достигающих 2 см и более. На юге ассоци-

ация айкинита $N_{aik} = 93-100$ с Ag-Bi-галенитом, нафилдитом, тетрадимитом, гесситом, золотом установлена в Шарташском карьере (рис. 2г). Различие заключается лишь в том, что козалит здесь полностью вытеснен нафилдитом, а состав айкинита близок теоретическому. Преобладающей формой айкинита являются зерна и идиоморфные кристаллы длиной не более 3 мм. Подобные ассоциации рассмотрены в работах [Бушмакин и др., 1978; Филимонов, 1999а; Викентьева и др., 2008], согласно которым айкинит $N_{aik} = 88-90$ сопровождается Ag-Bi-содержащим галенитом, козалитом, матильдитом, тетрадимитом, гесситом, самородным золотом.

Умеренно-медистые члены ВАС (линдстремит, крупкайт, зальцбургит) присутствуют наравне или в качестве реликтов (?) среди описанных парагенетических ассоциаций. Например, микрозерна линдстремита $N_{aik} = 63$ и крупкаита $N_{aik} = 54$ встречаются

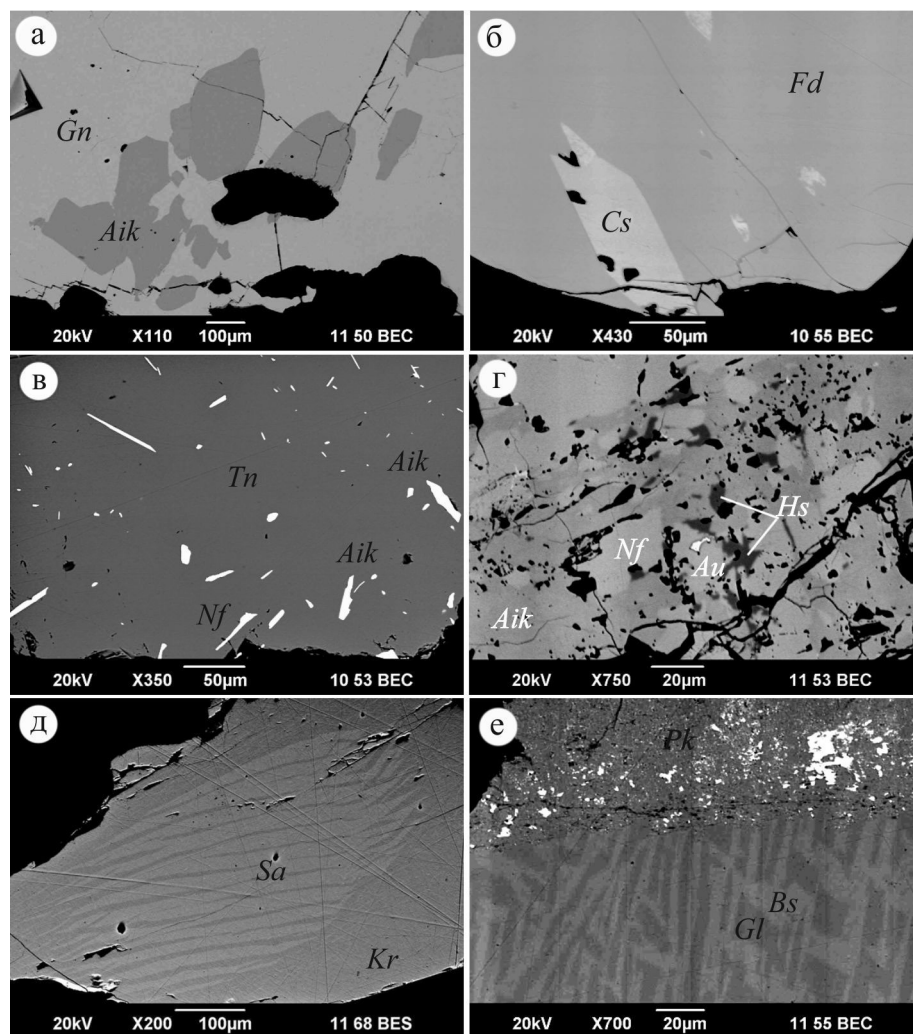


Рис. 2. Микрофотографии сульфосолей висмута в отраженных электронах.

а – субэдрические зерна айкинита в галените; б – включение идиоморфного кристалла козалиита в зерне фридрихита; в – игольчатые кристаллы нафилдита и айкинита в теннантите; г – субэдрические кристаллы нафилдита в айкинитах с интерстициальным гесситом; д – ламели зальцбургита в кристалле крупкаита; е – структура распада висмутин-гладитового состава и метасоматически развивающийся пекцит с включениями самородного висмута. Индексы минералов: *Aik* – айкинит, *Au* – золото, *Bs* – висмутин, *Cs* – козалиит, *Fd* – фридрихит, *Gl* – гладит, *Gn* – галенит, *Hs* – гессит, *Nf* – нафилдит, *Pk* – пекцит.

Fig. 2. Back-scattered electron images of bismuth sulfosalts.

а – subhedral aikinite grains in galena; б – anhedral inclusion of cosalite crystal in friedrichite grain; в – nuffeldite and aikinite acicular crystals in tennantite; г – subhedral nuffeldite crystals in aikinite with interstitial hessite grains; д – lamellae of the salzburgite in a krupkaite crystal; е – bismuthinite-gladite exsolution pairs and metasomatic pekoite with native bismuth inclusions. Mineral abbreviation: *Aik* – aikinite, *Au* – aurum, *Bs* – bismuthinite, *Cs* – cosalite, *Fd* – friedrichite, *Gl* – gladite, *Gn* – galena, *Hs* – gessite, *Nf* – nuffeldite, *Pk* – pekoite.

совместно с айкинитом, нафилдитом, тетрадимитом, золотом в Шарташском карьере. К ним, вероятно, относится и фаза состава $N_{aik} = 76-78$, приуроченная к ранним генерациям жильного кварца в гранитном массиве [Прибавкин, 2001]. В Березовском руднике они также присутствуют. В частности, мы установили достигающие 15 мм в длину кристаллы крупкаита $N_{aik} = 50-51$, содержащие ламели зальцбургита $N_{aik} = 38$ (рис. 2д). Они обрастают кристал-

лы пирита, содержат включения тетрадимита и ассоциируют с самородным золотом. Однако, ввиду отсутствия наблюдений генетических взаимоотношений этих фаз с галенитом и айкинитом, мы отнесли их к ассоциации умеренно- и высокомедистых членов ВАС с Ag-Vi-галенитом, козалиитом, нафилдитом, тетрадимитом, золотом условно.

Ранее в Шарташском карьере в связи с высокотемпературными кварцевыми жилами, содержащи-

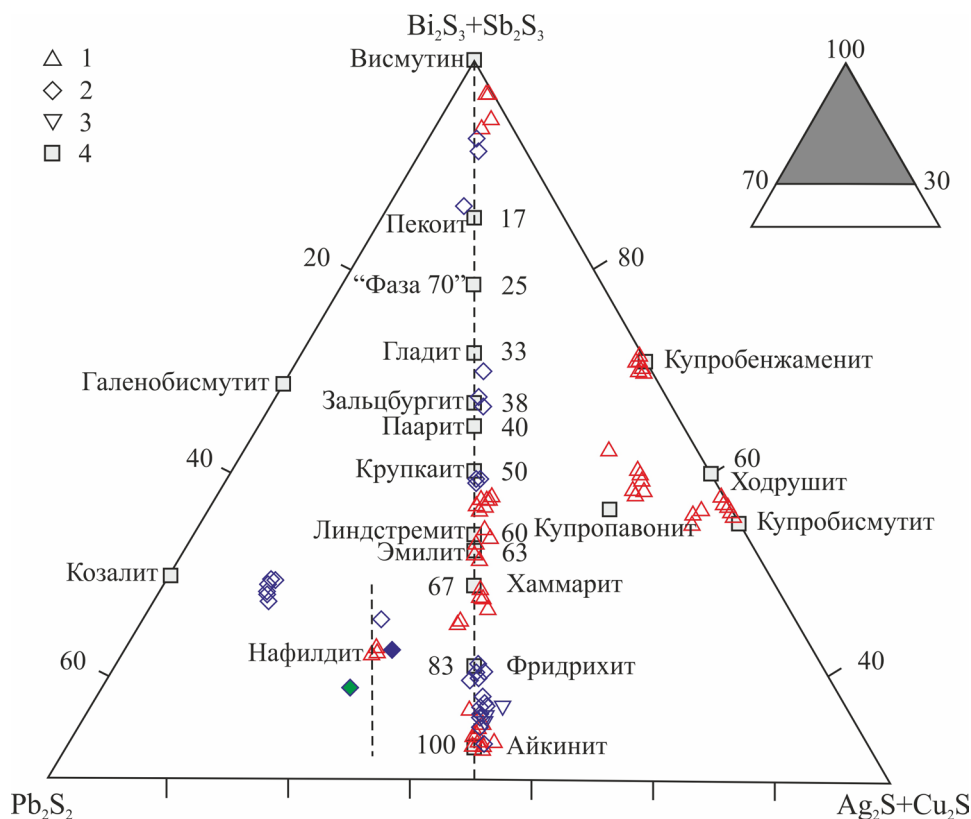


Рис. 3. Проекция составов Cu–Pb–Bi сульфосолей в системе $M^+-M^{2+}-M^{3+}$.

1 – минералы южной, 2 – центральной, 3 – северной частей рудного района; 4 – идеальные составы [Makovicky E., Makovicky M., 1978]. Залитыми значками обозначены составы, требующие подтверждения (пояснения см. в тексте). Цифры около наименований минералов висмутин-айкинитовой серии характеризуют значение $N_{aik} = [2Pb/(Pb + Bi)] \times 100$.

Fig. 3. Projection in the system $M^+-M^{2+}-M^{3+}$ of analytical results for the Cu–Pb–Bi sulfosalts.

1 – minerals from the southern part of the ore region, 2 – central part, 3 – northern part, 4 – ideal compositions [Makovicky E., Makovicky M., 1978]. Filled icons denote composition that require confirmation (see remarks in the text). Numbers near the names of minerals in the bismuthinite-aiikinite series characterize the value of $N_{aik} = [2Pb/(Pb + Bi)] \times 100$.

ми молибденит и шеелит, была описана иная ассоциация, в которой умеренно-медистые члены ВАС сопровождаются минералами павонитовой серии [Прибавкин и др., 1997, Спиридонов и др., 1998]. Она представляет собой тончайшие срастания промежуточных составов твердых растворов павонитовой и висмутин-айкинитовой серий, замещаемых мелкозернистыми агрегатами Cu-бенжаменита (матрица с ламелями распада купропавонита), крупкаита-линдстремита $N_{aik} = 51-63$ и хаммарита $N_{aik} = 68-70$, на которые в свою очередь нарастают гомогенные по составу зерна купропавонита, Cu-бенжаменита, бенжаменита, ходрушита, икунолита (?), замещаемые висмутином $N_{aik} = 0-5$.

Ассоциация, являющаяся результатом распада твердого раствора первичных кристаллов ВАС низкомедистого состава, установлена нами в Березовском руднике. Микронзондовое исследование показало, что такие кристаллы представляют собой структуры распада (рис. 2е), сложенные фазой $N_{aik} = 7-8$ (висмутином или минера-

лом “фаза 88.6” согласно [Ciobanu, Cook, 2000]) и гладитом $N_{aik} = 34$ в отношении 1 : 1, что позволяет высказать предположение об их образовании вследствие распада протофазы состава $N_{aik} = 25$ (рис. 3). Подобный распад может быть записан как $CuPbBi_7S_{12} \rightarrow CuPbBi_5S_9 + Bi_2S_3$. Аналогичные структуры распада фазы $N_{aik} = 24$ описаны в месторождении Фелберталь, Австрия [Тора et al., 2002], а гомогенная фаза состава $N_{aik} = 30$ (“фаза 70”) ранее была установлена в скарновом месторождении Осна де Фиер в Румынии [Ciobanu, Cook, 2000]. В свою очередь протофаза метасоматически замещается пекоитом $N_{aik} = 16$, содержащим обильные включения самородного висмута, и сопровождается Ag-Vi-содержащим галенитом, халькопиритом.

ДРУГИЕ СУЛЬФОСОЛИ ВИСМУТА

Сопровождающие ВАС сульфосоли висмута представлены козалитом, нафилдитом (табл. 2), минералами павонитовой серии (купропавонитом,

Таблица 2. Химический состав козалита и нафилдита, мас. %**Table 2.** The chemical composition of cosalite and nuffieldite, wt %

№	Локация	Cu	Ag	Pb	Bi	Sb	As	Te	S	Сумма
Козалит										
1	2	2.50	0.30	38.23	41.30	0.48	—	0.05	16.30	99.16
2	2	2.28	0.37	38.05	41.97	0.46	—	0.09	16.40	99.62
3	2	2.21	0.47	37.65	40.54	1.37	—	0.09	16.77	99.10
4	2	2.21	0.39	37.70	39.71	1.45	—	0.08	16.56	98.10
5	2	1.91	0.64	39.69	38.85	1.89	—	0.18	16.82	99.98
6	2	1.52	1.29	37.18	39.77	1.84	0.82	—	16.62	99.04
7	2	1.58	1.54	36.75	39.90	1.98	0.78	—	16.82	99.35
8	3	1.17	0.47	39.37	42.06	0.23	—	—	16.65	99.95
9	3	2.01	1.15	37.84	42.62	0.33	0.07	0.07	17.04	101.13
Нафилдит										
10	1	6.40	—	36.62	37.91	3.09	—	—	15.85	99.87
11	1	6.45	—	37.33	37.62	2.91	—	—	15.59	99.90
12	1	6.46	—	36.33	37.35	2.95	—	—	15.51	98.60
13	2	6.01	0.03	34.29	41.25	2.30	—	0.02	16.88	100.78
14	2	6.62	0.14	34.58	41.21	0.18	0.20	0.06	17.13	100.12
15	2	3.40	4.10	38.00	39.00	0.00	0.00	0.00	15.50	100.00

Прочерк – элемент не обнаружен.

Dash – element not found.

бенжаменитом, Си-бенжаменитом), ходрушитом, матильдитом [Вертушков и др., 1972; Прибавкин и др., 1997; Спиридонов и др., 1998; Филимонов, 1999а; Викеньева и др., 2008]. Указанные в минеральном кадастре месторождения [Сустанов, 2002] виттихенит, эмплектит, галенобисмутит требуют подтверждения.

Козалит на Березовском месторождении впервые диагностировала Л.В. Михайлова в 1967 г. по оптическим свойствам. Впоследствии он подтвержден данными рентгеноструктурного анализа [Вертушков и др., 1972]. Нами козалит установлен в образцах из центральной и северной частей рудного района, где образует широко варьирующие по размеру игольчатые кристаллы, а также изометричные выделения, не превышающие 0.5 мм (см. рис. 2б). В ассоциации с ним отмечены Ag-Bi-содержащий галенит, айкинит, фридрихит, нафилдит, серебристое золото пробностью 860–900. Он характеризуется достаточно устойчивым составом, в котором постоянно присутствуют примеси Си до 2.5 мас. % и Ag до 1.2 мас. %, находящиеся в структурной позиции Pb, а также Sb до 2.0% в позиции Bi (см. табл. 2). Его состав отклоняется от идеального в сторону умеренно-медистых разностей козалита (см. рис. 3). По данным рентгеноструктурного анализа козалит обладает орторомбической сингонией с параметрами элементарной ячейки: $a = 19.09 \text{ \AA}$, $b = 23.89 \text{ \AA}$, $c = 4.06 \text{ \AA}$. Основные линии на дифрактограмме: 3.45(100), 2.95(90), 3.37(80), 2.03(50), 2.81(40).

Нафилдит – редкий минерал, по составу промежуточный между козалитом и высокомедистыми

ми членами ВАС. Он встречен нами в ассоциации с айкинитом (см. рис. 2г) в южной части рудного района, а также с айкинитом и козалитом – в центральной. Образует призматические кристаллы размером менее 0.5 мм, близкие по отражательной способности айкиниту и обладающие слабой анизотропией с цветовым эффектом от голубовато-серого до коричневатого. Основные линии на рентгенограмме 3.66(100), 3.16(100), 4.02(80), 2.02(70), 3.53(60), 2.98(50), 2.87(50) соответствуют нафилдиту. Рассчитанные параметры элементарной ячейки: $a_0 = 14.485(8) \text{ \AA}$, $b_0 = 21.367(12) \text{ \AA}$, $c_0 = 4.045(2) \text{ \AA}$. Соответствие структурной формуле нафилдита демонстрирует и средний химический состав минерала $\text{Cu}_{1.24}\text{Pb}_2\text{Bi}_2(\text{Pb}_{0.17}\text{Sb}_{0.25}\text{Bi}_{0.58})\text{S}_{6.9}$ из расчета $\text{Bi} + \text{Pb} + \text{Sb} = 5 \text{ ф. к.}$ На диаграмме (см. рис. 3) его составы вытягиваются параллельно минералам ВАС, характеризуясь изоморфизмом по схеме $\text{Pb}^{2+} + \text{Cu}^+ \leftrightarrow \text{Bi}^{3+}$. Важной композиционной составляющей нафилдита, согласно [Maurel, Moelo, 1990], является примесь сурьмы, стабилизирующая его кристаллическую структуру. Эксперименты по синтезу минерала показывают, что ее содержание обычно варьирует от 1.6 до 4.2 мас. %. Такой нафилдит описан в Малеевском [Mozgova et al., 1994], Акчатау [Ефимов и др., 1990] и многих других месторождениях [Prsek et al., 2006]. Наш минерал содержит от 2 до 3 мас. % Sb, и этот факт может служить еще одним доказательством его принадлежности нафилдиту.

Минерал, близкий по составу нафилдиту, обнаружен в другом образце из Березовского рудника (см. табл. 2, ан. 14), где находится совместно с кри-

сталлами айкинита в тенантите (см. рис. 2в). Несмотря на то что его размер не позволил получить корректный состав, тем не менее он вынесен на диаграмму (см. рис. 3) залитым синим ромбом. Располагаясь в области нафилдита, он отличается от описанных составов отсутствием значимой примеси сурьмы. Существование бессурьмянистых разновидностей нафилдита обсуждается в работе [Cinobanu, Cook, 2000], согласно которой наличие Sb в структуре минерала не обязательно и определяется лишь ее концентрацией в системе.

Сульфосоли, в составе которой присутствует 4 мас. % серебра, мы встретили в качестве игольчатого кристалла толщиной 5 мкм в тенантите совместно с иголками айкинита и нафилдита. Ее химический состав, с одной стороны, близок серебро-содержащему нафилдиту (см. табл. 2, ан. 15, рис. 3, зеленый ромб), с другой – может отвечать медистым разностям минералов групп лиллианита, хейровскита. Надежная диагностика фазы в отсутствие рентгеноструктурных данных невозможна.

Купропавонит, купробенжаменит, ходрушит установлены в парагенетической ассоциации с крупкайтом, линдстремитом, хаммаритом в жилах, сопряженных с ранними наиболее высокотемпературными фациями гумбеитов Шарташского массива. В их составе отмечается до 8 мас. % примесного Pb, а в ходрушите – до 3 мас. % Ag [Спиридонов и др., 1998].

Находка матильдита в жилах Березовского рудника описана в работе [Викентьева и др., 2008]. Этот минерал встречен совместно с Ag-Bi-галенитом, тетрадимитом, айкинитом $n_{aik} = 88-90$, золотом и кристаллизовался при температуре менее 220°C.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Широкий спектр составов ВАС характерен для медьсодержащих месторождений Sn-Mo-W (Акчатау, Кара-Оба, Харбейское, Фелбертал и др.), Cu-Pb-Zn (Малеевское, Ходруша и др.), Cu-Au-Fe (Моравица, Funiushan и др.), принадлежащих главным образом грейзеновой, скарновой, гидротермальной группам, в которых устанавливается значительный диапазон физико-химических условий формирования кварцево-жильных образований [Ефимов и др., 1990; Lowry et al., 1994; Mozgova et al., 1994; Ciobanu, Cook, 2000; Xiang-Ping et al., 2001; Tora et al., 2002; Jelen et al., 2012; Астахова, Шевчук, 2013]. По-видимому, эти черты в полной мере присущи и Березовскому золоторудному району, в котором предшествующими исследованиями [Бородаевская, 1944; Лайпанов, 1977; Спиридонов и др., 1998; Филимонов и др., 1999; Сазонов и др., 2001] показано наличие доминирующей наравне с метасоматитами березит-лиственитовой формации грейзеноподобных пород, гумбеитов, эйситов и аргиллизитов. Установлено, что ранние грейзено-

подобные метасоматиты и связанные с ними кварцевые жилы содержат высокотемпературную Sn-W-минерализацию: вольфрамит, касситерит, апатит, шеелит, турмалин [Бородаевская, 1944; Филимонов, 1999б]. С метасоматитами ранней гумбеитовой и эйситовой формаций связано Mo-W и полиметаллическое оруденение: молибденит, шеелит, минералы павонитовой серии, ВАС, а также сфалерит, халькопирит, бурнонит, менегинит, блеклые руды, галенит, золото [Прибавкин и др., 1997; Спиридонов и др., 1998]. С поздними фациями гумбеитов и березит-лиственитами связана основная масса полиметаллического, золотого оруденения: халькопирит, галенит, сфалерит, блеклые руды, айкинит, золото. Таким образом, оруденение на Березовском месторождении является многостадийным и полиформационным, формирующимся поэтапно вследствие вариаций температурного режима, состава, кислотности–щелочности минералообразующих флюидов. Тем не менее, состав минералов, минеральные ассоциации и их связь с теми или иными метасоматическими преобразованиями пород в пространстве рудного района изучены недостаточно.

Обобщение данных состава и парагенетических ассоциаций сульфосолей висмута (табл. 3) показывает их образование в широком диапазоне температур в связи с метасоматитами как гумбеитовой формации, так и березит-лиственитовой, подтверждая представления многих исследователей [Бородаевская, 1944; Лайпанов, 1977; Спиридонов и др., 1998, 2012, 2014; Филимонов и др., 1999; Сазонов и др., 2001] о многостадийном и полиформационном характере месторождений рудного района. Мы установили, что с высокотемпературными ассоциациями пирит-кварцевой стадии формирования жил (в терминологии [Самарцев и др., 1973]), отлагающимися при 360–285°C, связаны минералы висмутин-айкинитовой, павонитовой серии. Слагающие их фазы ВАС образуются при температуре свыше 300°C как неупорядоченные твердые растворы, что подтверждено экспериментально [Springer, 1971; Wu, 1987], которые впоследствии стремятся к упорядочению. Им соответствуют умеренно-медистые разности, близкие по составу крупкайту, хаммариту, линдстремиту, и низкомедистые, такие как фаза $N_{aik} = 25$, претерпевшая распад с образованием висмута и галита. Структуры распада в минералах ВАС Березовского месторождения, показанные на рис. 2, по-видимому, не редкость. Например, они продемонстрированы в работе [Рамдор, 1962, фиг. 181], но находки таких высокотемпературных минеральных ассоциаций остаются единичными.

С главной полиметаллической стадией рудообразования, протекавшей при температурах 285–150°C [Колтун, 1957; Самарцев и др., 1973; Бакшеев и др., 1998; Спиридонов и др., 1998; Викентьева,

Таблица 3. Стадии образования и парагенетические ассоциации сульфосолей висмута**Table 3.** The stages of formation and paragenetic associations of bismuth sulfosalts

Стадия [Самарцев и др., 1973]	Температура образования, °С [Бакшеев и др., 1998; Спиридонов и др., 1998; Викентьева, 2000],	Парагенетическая ассоциация
Пирит-кварцевая	360–290 (кварц-I, шеелит)	1. Крупкаит-хаммарит $s.s.$ ($CuPbBi_3S_6-Cu_2Pb_2Bi_4S_9$), купропавонит-бенжаминит $s.s.$ ($AgCu_2PbBi_5S_{10}-(Cu,Ag)_3Bi_7S_{12}$), ходрушит ($Cu_8Bi_{12}S_{22}$), пирит, молибденит, шеелит, икунолит (?), висмутин 2. Висмутин-гладит $s.s.$ ($Bi_2S_3-CuPbBi_5S_9$), пирит, Bi-галенит
Полиметаллическая	300–275 (кварц-II) 285–150 (сульфиды)	1. Зальцбургит-крупкаит $s.s.$ ($Cu_{1.6}Pb_{1.6}Bi_{6.4}S_{12}-CuPbBi_3S_6$), пирит, тетрадимит, золото 2. Айкинит ($CuPbBiS_3$), фридрихит ($Cu_5Pb_5Bi_7S_{18}$), козалит ($Pb_2Bi_2S_5$), нафилдит ($Cu_{1.4}Pb_{2.4}Bi_{2.4}Sb_{0.2}S_7$), матильдит ($AgBiS_2$), Ag-Bi-галенит, пирит, халькопирит, блеклые руды, тетрадимит, гессит, золото 3. Айкинит, галенит, бурнонит, блеклые руды, тетрадимит, алтаит, золото, висмут

2000], связано отложение ассоциаций зальцбургита, крупкаита, фридрихита, айкинита совместно с Ag-Bi-галенитом, нафилдитом, козалитом, матильдитом, тетрадимитом, золотом. Ассоциация айкинита $N_{aik} = 90-100$ с бедным или не содержащим Ag и Bi галенитом, золотом и висмутом, по-видимому, отражает завершение полиметаллической стадии минералообразования.

В результате исследования в сульфидно-кварцевых жилах Березовского рудного района установлено наличие сульфосолей висмута висмутин-айкинитовой серии в составе как высокотемпературных парагенетических ассоциаций, так и средне- и низкотемпературных. Высокотемпературные ассоциации представлены протофазой состава $N_{aik} = 25$ и неупорядоченными фазами ВАС совместно с минералами павонитовой серии, ходрушитом. Они формируют реликтовые парагенезисы кварц-пиритовой стадии, включенные в состав средне- и низкотемпературных ассоциаций полиметаллической стадии. В составе последней присутствуют зальцбургит, крупкаит, линдстремит, сменяемые при понижении температуры фридрихитом и айкинитом, совместно с Ag-Bi-галенитом, козалитом, нафилдитом, матильдитом, тетрадимитом, золотом. Преобладающая ассоциация айкинита, максимально приближенного к идеальному составу, совместно с беспримесным галенитом, золотом, завершает основной этап рудообразования продуктивной полиметаллической стадии. Представленная последовательность минералообразования на примере сульфосолей висмута, вероятно, отражает не только последовательную эволюцию минералообразующих флюидов, но и импульсный характер гидротермальной активности.

Данное исследование позволяет по-новому взглянуть на минералогию старейшего в России Березовского месторождения золота и демонстрирует пробелы в исследовании рудных ассоциаций и парагенезисов с точки зрения этапов и условий ми-

нералообразования. Намечается необходимость системного подхода к изучению рудных парагенезисов в согласии с исследованием флюидных включений и околорудных метасоматитов, что предстоит выполнить в будущем.

Авторы выражают благодарность сотрудникам центра коллективного пользования “Геоаналитик” Т.Я. Гуляевой, О.Л. Галаховой, Д.А. Замятину, А.В. Михеевой за проведение рентгеноструктурных и микронзондовых исследований, а также В.А. Губину за предоставленные для изучения образцы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-05-00576а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Астахова И.С., Шевчук С.С. (2013) Висмутовая минерализация Харбейского вольфрам-молибденового месторождения (Полярный Урал). ЗРМО, (5), 63-75.
- Бакшеев И.А., Прокофьев В.Ю., Устинов В.И. (1998) Условия формирования жильного кварца Березовского золоторудного поля, Средний Урал, по данным изучения флюидных включений и изотопным данным. Уральская летняя минералогическая школа-98. Екатеринбург: УГГА, 41-49.
- Бородаевская М.Б. (1944) О происхождении березитов и некоторых других метасоматических пород Березовского золоторудного месторождения на Среднем Урале. ЗВМО, 73(2-3), 123-141.
- Бородаевский Н.И., Бородаевская М.Б. (1947) Березовское рудное поле. М.: Металлургиздат, 247 с.
- Бушмакин А.Ф., Аронский В.П., Чесноков Б.В. (1978) Галенит с октаэдрической отдельностью из сульфидно-кварцевых жил Березовского месторождения на Среднем Урале. Минералогия и петрография Урала. Вып. I. Свердловск: УПИ, 42-48.
- Вертушков Г.Н., Кайнов В.И., Чесноков Б.И. (1972) Козалит из Березовского и Кочкарского золоторудных месторождений. Минералогия и петрография Урала.

- Вып. 86. Свердловск: СГИ, 106-109.
- Викентьева О.В. (2000) Березовское золоторудное месторождение на Урале: геологическое строение, минералого-геохимические особенности и условия образования. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ, 184 с.
- Викентьева О.В., Сергеева Н.Е., Еремин Н.И. (2008) О находке матильдита в жилах Березовского золоторудного месторождения, Урал. Докл. АН, **418**(1), 70-73.
- Годовиков А.А. (1972) Висмутовые сульфосоли. М.: Наука, 303 с.
- Грабежев А.И. (1970) Особенности березитизации гранитоидов Шарташского массива на Среднем Урале. Тр. ИГГ УФААН СССР, (86), 10-14.
- Ефимов А.В., Бородаев Ю.С., Мозгова Н.Н., Ненашева С.Н. (1990) Особенности висмутовой минерализации молибден-вольфрамового месторождения Акчау (Центр. Казахстан). Геология рудных месторождений, **32**(4), 64-75.
- Колобов Г. (1836) Геогностическое описание Преображенского золотого рудника. Горн. журн. Кн. 2. СПб., 209-222.
- Колтун Л.И. (1957) Применение минералотермометрического анализа для изучения генезиса некоторых золоторудных месторождений Урала. Тр. ВНИИП, **1**(2), 63-88.
- Куруленко Р.С. (1982) Кварцево-сульфидные жилы в Шарташском амагматическом массиве на Среднем Урале. Ежегодник-1981. Свердловск: ИГГ УНЦ АН СССР, 95-96.
- Кутюхин П.И. (1948) Условия локализации оруденения в жилах Березовского месторождения. 200 лет золотой промышленности Урала. Свердловск: УФААН СССР, 249-275.
- Лайпанов Х.Х. (1977) Околорудные метасоматиты Березовского рудного поля. Вопросы геохимии и рудообразования. Свердловск: УНЦ АН СССР, 65-68.
- Мозгова Н.Н. (1985) Нестехиометрия и гомологические ряды сульфосолей. М.: Наука, 264 с.
- Овчинников Л.Н. (1998) Полезные ископаемые и металлогения Урала. М.: Геоинформмарк, 412 с.
- Прибавкин С.В. (2001) Фридрихит из Шарташского массива, Средний Урал. Урал. геол. журн., (5), 155-158.
- Прибавкин С.В. (2014) Новые данные к минералогии Березовского золоторудного поля. Вестн. УрО РМО, (11), 83-89.
- Прибавкин С.В. (2015) Новые данные к минералогии кварцевых жил Шарташского карьера. Вестн. УрО РМО, (12), 114-120.
- Прибавкин С.В., Середкин С.В., Кононкова Н.Н. (1997) Минералогия ранних кварцевых жил Шарташского массива, Средний Урал. Уральская летняя минералогическая школа-97. Екатеринбург: УГГГА, 198-203.
- Рамдор П. (1962) Рудные минералы и их сростания. М.: Иностран. лит-ра, 1132 с.
- Рудные месторождения СССР. Т. 3. Под ред. В.И. Смирнова. М.: Недра, 1978. 496 с.
- Самарцев И.Т., Захваткин В.А., Казимирский В.Ф., Михайлова Л.В., Бирюков В.Ф. (1973) О зональности Березовского золоторудного месторождения на Среднем Урале. Геология рудных месторождений, (1), 110-117.
- Сазонов В.Н. (1984) Березит-лиственитовая формация и сопутствующее ей оруденение. Свердловск: УрО АН СССР, 208 с.
- Сазонов В.Н., Огородников В.Н., Коротеев В.А., Поленов Ю.А. (2001) Месторождения золота Урала. Екатеринбург: УГГГА, 622 с.
- Сомов В.Ф., Кадышева Е.В., Филатов В.В. (2009) Тектонофизический анализ гравитационного поля Березовского золоторудного месторождения и прогнозно-поисковые критерии золотого оруденения, связанного с гранитоидными массивами. Литосфера, (1), 94-102.
- Спиридонов Э.М., Бакшеев И.А., Середкин М.В., Куруленко Р.С., Прокофьев В.Ю., Прибавкин С.В., Устинов В.И., Филимонов С.В. (1997) Гумбеитовая формация Урала. М.: МГУ, 97 с.
- Спиридонов Э.М., Бакшеев И.А., Середкин М.В., Прокофьев В.Ю., Устинов В.И., Филимонов С.В. (1998) Гумбеиты Урала и сопряженная рудная минерализация, параметры их образования. Геология рудных месторождений, **39**(2), 171-190.
- Спиридонов Э.М., Нурмухаметов Ф.М., Поленов Ю.А., Прошкина А.П., Куликова И.М., Сидорова Н.В., Филимонов С.В. (2012) Высокотемпературная минерализация гумбеитовой формации в Березовском рудном поле (Средний Урал). Минералогия во всем пространстве сего слова: Проблемы укрепления минерально-сырьевой базы и рационального использования минерального сырья СПб., 252-254.
- Спиридонов Э.М., Сидорова Н.В., Нурмухаметов Ф.М., Коротаева Н.Н., Куликова И.М., Поленов Ю.А., Трошкина А.Н. (2014) Лиственитоподобные апопикритовые флогопит-магнезитовые гумбеиты Березовского месторождения золота с цирконом, монацитом, ксенотимом, фторапатитом, турмалином, реликтовым цинкохромитом. Урал. геол. журн., (1), 20-67.
- Суставов С.Г. (2002) Минералы Березовского месторождения. Уральская минералогическая школа-2001. Екатеринбург: УГГГА, 80-94.
- Суставов О.А. (2013) Околожилные фенгитовые гумбеиты центральной части Шарташского гранитного массива: детали строения метасоматических колон. Изв. УГГУ, **31**(3), 18-23.
- Суставов О.А., Нохрина Н.Н. (2003) Эйситизация гранитов в контактах мусковит-карбонатных прожилков в центральной части Шарташского гранитного массива. Изв. УГГГА, (18), 74-78.
- Филимонов С.В. (1999а) Висмутовая и теллуровая минерализация гумбеитовой формации на северном фланге Березовского золоторудного месторождения (Витеннантит, Ag-Bi-галенит, айкинит, тетрадимит, Рb-тетрадимит, гессит). Уральская летняя минералогическая школа-99: Екатеринбург: УГГГА, 292-294.
- Филимонов С.В. (1999б) Первая находка кестерита $Cu_2(Zn, Fe)SnS_4$ и других In-содержащих минералов в Березовском золоторудном месторождении. Уральская летняя минералогическая школа-99, Екатеринбург: УГГГА, 291-292.
- Филимонов С.В., Спиридонов Э.М., Бакшеев И.А., Куруленко Р.С., Кудрявцева О.Е. (1999) Типоморфизм минералов и минеральных ассоциаций полихронных рудно-метасоматических образований Березовского золоторудного поля (Средний Урал). Минералогическое общество и минералогическая наука на пороге XXI в. СПб.: ВМО, 127-129.

- Чесноков Б.В. (1973) Эндогенная зональность Березовского рудного поля на Среднем Урале. Докл. АН СССР, **210**(4), 915-917.
- Чесноков Б.В., Котыбаева Н.Н., Бушмакин А.Ф. (1975) Эндогенные минералы висмута и никеля Березовского золоторудного месторождения на Среднем Урале. Минералогия и петрография Урала. Вып. 106. Свердловск: СГИ, 123-126.
- Чесноков Б.В., Покровский П.В., Сандлер Г.А. (1976) Вариации содержаний серебра в золотинах из Березовского рудного района в связи с его эндогенной зональностью. Минералогия и петрография Урала. Вып. 124. Свердловск: СГИ, 108-111.
- Ciobanu C.L., Cook N.J. (2000) Intergrowths of bismuth sulphosalts from Ocna de Fier Fe-skarn deposit, Banat, Southwest Romania. *Eur. J. Miner.*, (12), 899-917.
- Hermann B.F. (1789) Versuch einer mineralogischen Beschreibung des Uralischen Erzgebirges. Bd 1, 2. Berlin.
- Jeleň S., Pršek J., Kovalenker V.A., Topa D., Sejkora J., Števkó M., Ozdín D. (2012) Bismuth sulfosalts of the cuprobismutite, pavonite and aikinite series from the Rozália mine, Hodrúsa-Hámre, Slovakia. *Can. Miner.*, **50**, 325-340.
- Lowry D., Stephens W.E., Herd D.A., Stanley C.J. (1994) Bismuth sulphosalts within quartz veining hosted by the Loch Shin monzogranite, Scotland. *Miner. Mag.*, **58**, 39-47.
- Makovicky E., Makovicky M. (1978) Representation of compositions in the bismuthinite-aikinite series. *Can. Miner.*, **16**, 405-409.
- Maurel C., Moelo Y. (1990) Synthèse de la nuffieldite dans le système Bi-Pb-Sb-Cu-S. *Can. Miner.*, **28**, 745-749.
- Moelo Y., Makovicky E., Mozgova N.N., Jambor J.L., Cook N. et al. (2008) Sulfosalt systematics: a review. Report of the sulfosalt sub-committee of the IMA Commission on Ore Mineralogy. *Eur. J. Miner.*, **20**, 7-46.
- Mozgova N.N., Nenasheva S.N., Borodayev Yu.S., Yudovskaya M.A. (1994) Nuffieldite from the Maleevskoe massive sulfide deposit, Russia. *Can. Miner.*, **32**, 359-364.
- Pršek J., Makovicky E., Chovan M., Smirnov A. (2006) A note on the chemical composition of nuffieldite solid-solution from sulphide mineralizations in the Western Carpathians, Slovakia. *Miner. Polonica*, **37**(1), 51-59.
- Springer G. (1971) The synthetic solid-solution series Bi_2S_3 - BiCuPbS_3 (bismuthinite-aikinite). *Neues Jahrb. Miner., Monatsh.*, 19-27.
- Topa D., Makovicky E., Paar W.H. (2002) Composition ranges and exsolution pairs for the members of the bismuthinite-aikinite series from Felbertal, Austria. *Can. Miner.*, **40**, 849-869.
- Wu D. (1987) Phase relations in the systems Cu_2S - PbS - Bi_2S_3 and Ag_2S - PbS - Bi_2S_3 and their mineral assemblages. *Chinese J. Geochem.*, **6**(3), 225-233.
- Xiang-Ping G., Watanabe M., Ohkawa M., Hoshino K., Shibata Y. (2001) Felbertalite and related bismuth sulfosalts from the Funiushan copper skarn deposit, Nanjing, China. *Can. Miner.*, **39**, 1641-1652.
- Baksheev I.A., Prokofev V.Yu., Ustinov V.I. (1998) Conditions for the formation of vein quartz of the Berezovsk gold ore field, Middle Urals, according to the study of fluid inclusions and isotopic data. Ural'skaja letnjaja mineralogicheskaja shkola-98 [Uralian Summer Mineralogical School-98]. Ekaterinburg, UGGGA Publ., 41-49. (In Russian)
- Borodaevskaya M.B. (1944) On the origin of berezites and some other metasomatic rocks of the Berezovsk gold deposit in the Middle Urals. *Zapiski VMO*, **73**(2-3), 123-141. (In Russian)
- Borodaevskiy N.I., Borodaevskaya M.B. (1947) *Berezovskoe rudnoe pole* [Berezovsk ore field]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 247 p. (In Russian)
- Bushmakina A.F., Aronskiy V.P., Chesnokov B.V. (1978) Galenite with an octahedral parting from sulphide-quartz veins of the Berezovsk deposit in the Middle Urals. *Mineralogija i petrografija Urala*. Vyp. I. [Mineralogy and Petrography of the Urals] Sverdlovsk, UPI Publ., 42-48. (In Russian)
- Ciobanu C.L., Cook N.J. (2000) Intergrowths of bismuth sulphosalts from Ocna de Fier Fe-skarn deposit, Banat, Southwest Romania. *Eur. J. Miner.*, (12), 899-917.
- Chesnokov B.V. (1973) Endogenous zonation of the Berezovsk ore field in the Middle Urals. *Dokl. AN SSSR*, **210**(4), 915-917. (In Russian)
- Chesnokov B.V., Kotybaeva N.N., Bushmakina A.F. (1975) Endogenic minerals of bismuth and nickel from the Berezovsk gold deposit, Middle Urals. *Mineralogiya i petrografija Urala*. Vyp. 106. [Mineralogy and Petrography of the Urals, V. 106] Sverdlovsk, SGI Publ., 123-126. (In Russian)
- Chesnokov B.V., Pokrovskiy P.V., Sandler G.A. (1976) Variation of silver content in gold from the Berezovsk ore region in connection with its endogenous zoning. *Mineralogija i petrografija Urala*. Vyp. 124. [Mineralogy and Petrography of the Urals, V. 106] Sverdlovsk, SGI Publ., 108-111. (In Russian)
- Efimov A.V., Borodaev Yu.S., Mozgova N.N., Nenasheva S.N. (1990) Features of the bismuth mineralization of the molybdenum-tungsten deposit Akchatau (Central Kazakhstan). *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **32**(4), 64-75. (In Russian)
- Filimonov S.V. (1999a) Bismuth and tellurium mineralization of the gumbeite formation on the northern flank of the Berezovsk gold deposit (Bi-tenantite, Ag-Bi-galenite, aikinite, tetradimite, Pb-tetradimite, hessite). *Ural'skaja letnyaya mineralogicheskaja shkola-99*. [Uralian Summer Mineralogical School-99] Ekaterinburg, UGGGA Publ., 292-294. (In Russian)
- Filimonov S.V. (1999b) The first discovery of kesterite $\text{Cu}_2(\text{Zn}, \text{Fe})\text{SnS}_4$ and other In-containing minerals in the Berezovsk gold deposit. *Ural'skaja letnjaja mineralogicheskaja shkola - 99*. [Uralian Summer Mineralogical School-99] Ekaterinburg, UGGGA, 291-292. (In Russian)
- Filimonov S.V., Spiridonov E.M., Baksheev I.A., Kurulenko R.S., Kudrjavtseva O.E. (1999) Typomorphism of minerals and mineral associations of polychronous ore-metasomatic formations of the Berezovsk gold ore field (Middle Urals). *Mineralogicheskoe obshchestvo i mineralogicheskaja nauka na poroge XXI v.* [Mineralogical Society and Mineralogical Science on the XXI s. threshold]. St.Petersburg, VMO Publ., 127-129. (In Russian)
- Godovikov A.A. (1972) *Vismutovye sulfosoli* [Bismuth sul-

REFERENCES

Astakhova I.S., Shevchuk S.S. (2013) Bismuth mineralization in Kharbeyevskoe tungsten-molybdenum deposit (The Polar Urals). *Zapiski RMO*, (5), 63-75. (In Russian)

- phosalts]. Moscow, Nauka Publ., 303 p. (In Russian)
- Grabezhev A.I. (1970) Features of the beresitization of granitoids of the Shartash Massif in the Middle Urals. *Trudy In-ta geologii i geokhimii UFAN SSSR*, (86), 10-14. (In Russian)
- Hermann B.F. (1789) Versuch einer mineralogischen Beschreibung des Uralischen Erzgebirges. Bd 1, 2. Berlin.
- Jelen S., Prsek J., Kovalenker V.A., Topa D., Sejkora J. et al. (2012) Bismuth sulfosalts of the cuprobismutite, pavonite and aikinite series from the Rozália mine, Hodrusa-Hámre, Slovakia. *Can. Miner.*, **50**, 325-340.
- Kolobov G. (1836) Geognostic description of the Preobrazhensky gold mine. *Gorn. Zhurn.* Kn. 2. SPb., 209-222. (In Russian)
- Koltun L.I. (1957) Application of mineralothermometric analysis to study the genesis of some gold deposits of the Urals. *Trudy VNIIP*, **1**(2), 63-88. (In Russian)
- Kurulenko R.S. (1982) Quartz-sulphide veins in the Shartash adamellite massif in the Middle Urals. *Ezhegodnik-1981*. Sverdlovsk: IGG UNTs AN SSSR, 95-96. (In Russian)
- Kutyukhin P.I. (1948) Conditions for the localization of mineralization in the veins of the Berezovsk deposit. *200 let zolotoy promyshlennosti Urala* [200 years of Uralian Gold industry]. Sverdlovsk, UF AN SSSR, 249-275. (In Russian)
- Laypanov Kh.Kh. (1977) Near ores metasomatites of the Berezovsky ore field. *Voprosy geokhimii i rudoobrazovaniya* [Problems of geochemistry and mineral formation]. Sverdlovsk, UNTs AN SSSR, 65-68. (In Russian)
- Lowry D., Stephens W.E., Herd D.A., Stanley C.J. (1994) Bismuth sulphosalts within quartz veining hosted by the Loch Shin monzogranite, Scotland. *Miner. Mag.*, **58**, 39-47.
- Makovicky E., Makovicky M. (1978) Representation of compositions in the bismuthinite-aikinite series. *Can. Miner.*, **16**, 405-409.
- Maurel C., Moelo Y. (1990) Synthèse de la nuffieldite dans le système Bi–Pb–Sb–Cu–S. *Can. Miner.*, **28**, 745-749.
- Moelo Y., Makovicky E., Mozgova N.N., Jambor J.L., Cook N. et al. (2008) Sulfosalt systematics: a review. Report of the sulfosalt sub-committee of the IMA Commission on Ore Mineralogy. *Eur. J. Miner.*, **20**, 7-46.
- Mozgova N.N. (1985) *Nestekhiometriya i gomologicheskie ryady sul'fosoley* [Nonstoichiometry and homologous series of sulfosalts]. Moscow, Nauka Publ., 264 p. (In Russian)
- Mozgova N.N., Nenasheva S.N., Borodayev Yu.S., Yudovskaya M.A. (1994) Nuffieldite from the Maleevskoe massive sulfide deposit, Russia. *Can. Miner.*, **32**, 359-364.
- Ovchinnikov L.N. (1998) *Poleznye iskopaemye i metallogeniya Urala* [Minerals and metallogeny of the Urals]. Moscow, Geoinformmark Publ., 412 p. (In Russian)
- Pribavkin S.V. (2001) Friedrichite from the Shartash massif, Middle Urals. *Ural. Geol. Zhurn.*, (5), 155-158. (In Russian)
- Pribavkin S.V. (2014) New data on the mineralogy of the Berezovsk gold ore field. *Vestn. UrO RMO*, (11), 83-89. (In Russian)
- Pribavkin S.V. (2015) New data on the mineralogy of quartz veins of the Shartash quarry. *Vestn. UrO RMO*, (12), 114-120. (In Russian)
- Pribavkin S.V., Seredkin S.V., Kononkova N.N. (1997) Mineralogy of the early quartz veins of the Shartash Massif, the Middle Urals. *Ural'skaja letnjaja mineralogicheskaja shkola-97*. Ekaterinburg, UGGGA Publ., 198-203. (In Russian)
- Prsek J., Makovicky E., Chovan M., Smirnov A. (2006) A note on the chemical composition of nuffieldite solid-solution from sulphide mineralizations in the Western Carpathians, Slovakia. *Miner. Polonica*, **37**(1), 51-59.
- Ramdor P. (1962) *Rudnye mineraly i ikh srastaniya* [Ore Minerals and their Intergrowths]. Moscow, "Inostr. literatura" Publ., 1132 p. (In Russian)
- Rudnye mestorozhdeniya SSSR* [Ore deposits of the USSR]. T. 3. Pod red. V.I. Smirnova. Moscow, Nedra Publ., 1978. 496 p. (In Russian)
- Samartsev I.T., Zakhvatkin V.A., Kazimirskiy V.F., Mikhaylova L.V., Biryukov V.F. (1973) About the zonation of the Berezovsk gold ore region in the Middle Urals. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, (1), 110-117. (In Russian)
- Sazonov V.N. (1984) *Berezit-listvenitovaya formatsiya i soputstvuyushchee ee orudenenie* [The beresite-listvenitic formation and related mineralization]. Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 208 p. (In Russian)
- Sazonov V.N., Ogorodnikov V.N., Koroteev V.A., Polenov Yu.A. (2001) *Mestorozhdeniya zolota Urala* [Gold deposits of the Urals]. Ekaterinburg, UGGGA Publ., 622 p. (In Russian)
- Somov V.F., Kadyшева E.V., Filatov V.V. (2009) Tectonophysical analyses of Berezovsk gold deposit gravitational field and prospecting criteria of the gold ore formation, connected with granitoid massifs. *Litosfera*, (1), 94-102. (In Russian)
- Spiridonov E.M., Baksheev I.A., Seredkin M.V., Kurulenko R.S., Prokofev V.Yu., Pribavkin S.V., Ustinov V.I., Filimonov S.V. (1997) *Gumbeitovaya formatsiya Urala* [Gumbeite formation on the Urals]. Moscow, MGU Publ., 97 p. (In Russian)
- Spiridonov E.M., Baksheev I.A., Seredkin M.V., Prokofev V.Yu., Ustinov V.I., Filimonov S.V. (1998) Gumbeites and associated ore mineralization of the Urals (Russia). *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **39**(2), 171-190. (In Russian)
- Spiridonov E.M., Nurmukhametov F.M., Polenov Yu.A., Proshkina A.P., Kulikova I.M., Sidorova N.V., Filimonov S.V. (2012) High-temperature mineralization of the gumbeite formation in the Berezovsk ore field (Middle Urals). *Mineralogiya vo vsem prostranstve sego slova: Problemy ukrepleniya mineral'nogo syr'ya i ratsional'nogo ispol'zovaniya mineral'nogo syr'ya* [Mineralogy in the whole space of this word: Problems of strengthening the mineral and raw materials base and rational use of mineral raw materials]. St.Petersburg, 252-254. (In Russian)
- Spiridonov E.M., Sidorova N.V., Nurmukhametov F.M., Korotaeva N.N., Kulikova I.M., Polenov Yu.A., Troshkina A.N. (2014) Close-Listvenite apocryptic phlogopite-magnesite gumbeites of the Beryozovsk gold deposit with zircon, monazite, xenotime, fluorapatite, tourmaline, relict Zn-chromite. *Ural. geol. zhurn.*, (1), 20-67. (In Russian)
- Springer G. (1971) The synthetic solid-solution series Bi₂S₃–BiCuPbS₃ (bismuthinite–aikinite). *Neues Jahrb. Miner., Monatsh.*, 19-27.
- Sustavov S.G. (2002) Minerals of Berezovsk deposit. *Ural'skaja mineralogicheskaja shkola – 2001*. [Uralian Mineralogical School-2001] Ekaterinburg, UGGGA Publ., 80-94. (In Russian)

- Sustavov O.A. (2013) Around vein phengite gumbeyites of the central part of Shartash granite massif: structural details of metasomatic columns. *Izv. UGGU*, **31**(3), 18-23. (In Russian)
- Sustavov O.A., Nokhrina N.N. (2003) Granites accretion in contacts of muscovite-carbonate veins in the central part of Shartash massif. *Izv. UGGGA*, (18), 74-78. (In Russian)
- Topa D., Makovicky E., Paar W.H. (2002) Composition ranges and exsolution pairs for the members of the bismuthinite-aikinite series from Felbertal, Austria. *Can. Miner.*, **40**, 849-869.
- Vertushkov G.N., Kainov V.I., Chesnokov B.I. (1972) Kozalit from Berezovsk and Kochkar gold deposits]. *Mineralogija i petrografija Urala*. V. 86. Sverdlovsk: SGI Publ., 106-109. (In Russian)
- Vikent'eva O.V. (2000) *Berezovskoe zolotorudnoe mestorozhdenie na Urale: geologicheskoe stroenie, mineralogo-geokhimicheskie osobennosti i uslovija obrazovaniya* Dis. dokt. geol-min nauk [Berezovsk gold deposit in the Urals: geological structure, mineralogical and geochemical features and conditions of formation Dr geol. and min. sci. diss.]. Moscju, IGM, 184 p. (In Russian)
- Vikent'eva O.V., Sergeeva N.E., Eremin N.I. (2008) Finding of matildite in veins of the Berezovsk gold deposit, Urals mountains]. *Dokl. Akad. Nauk*, **418**(1), 70-73. (In Russian)
- Wu D. (1987) Phase relations in the systems Cu_2S - PbS - Bi_2S_3 and Ag_2S - PbS - Bi_2S_3 and their mineral assemblages. *Chinese J. Geochem.*, **6**(3), 225-233.
- Xiang-Ping G., Watanabe M., Ohkawa M., Hoshino K., Shibata Y. (2001) Felbertalite and related bismuth sulfosalts from the Funiushan copper skarn deposit, Nanjing, China. *Can. Miner.*, **39**, 1641-1652.