
МИНЕРАЛЫ И МИНЕРАЛЬНЫЕ ПАРАГЕНЕЗИСЫ

ВИСМУТИН В СОСТАВЕ Au–Bi И ПОСЛЕЗОЛОТОРУДНОЙ Sb МИНЕРАЛИЗАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДАРАСУН В ВОСТОЧНОМ ЗАБАЙКАЛЬЕ

© 2023 г. Почетный член Э. М. Спиридонов^{1, *}, д. чл. Н. Н. Кривицкая¹, К. Н. Кочетова¹,
д. чл. И. А. Брызгалов¹, Н. Н. Коротаева¹

¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Воробьевы горы, 1, Москва ГСП-1, 119991 Россия

*e-mail: ernstspiridon@gmail.com

Поступила в редакцию 26.09.2022 г.

После доработки 31.12.2022 г.

Принята к публикации 16.02.2023 г.

Позднеюрское позднеорогенное вулканогенно-плутоногенное месторождение золота Дарасун золото-сульфидно-кварцевой формации включает Au–Bi и послезолоторудную Sb минерализацию. Карбонат-кварц-сульфидные жилы Западного участка Дарасуна окружены ореолами лиственитов. Их золотые руды сформированы при пониженной активности S_2 и содержат пирротин, арсенопирит, халькопирит, кубанит, пирит, висмутин I состава $(\text{Bi}_{1.89-1.98}\text{Sb}_{0.11-0.02})_2\text{S}_3$, галеновисмутит, гнезда самородного висмута и икунолита $\text{Bi}_{3.99-4.00}\text{S}_{3.01-3.00}$. Икунолит испытал распад на самородный висмут $(\text{Bi}_{0.98-1}\text{Sb}_{0.02-0})$ и висмутин II. Состав висмута II в центре агрегатов с самородным висмутом – $(\text{Bi}_{1.96-1.97}\text{Sb}_{0.04-0.03})_2\text{S}_3$, на их периферии более сурьмянистый – $(\text{Bi}_{1.91-1.92}\text{Sb}_{0.09-0.08})_2\text{S}_3$. Под действием золотоносных гидротерм возникло высокопробное золото (970–935 ‰), самородный висмут был частично замещен мальдонитом. Более поздние образования этих руд – джонасонит, сульфосоли Pb–Bi (преимущественно козалин). При наложении на эти руды сурьмяной минерализации с самородной сурьмой возник не антимонит (стибнит), а сульфосоли Pb–Sb (моелонит и др.), псевдоморфозы халькостибита по халькопириту, псевдоморфозы ауристибита по минералам золота. При замещении мальдонита ауристибитом возник висмутин III. Вероятная реакция этого замещения: $2\text{Au}_2\text{Bi} + 6\text{Sb p-p} + \text{Sb}_2\text{S}_3 \text{ p-p} \rightarrow 4\text{AuSb}_2 + \text{Bi}_2\text{S}_3$. Висмутин III – продукт замещения мальдонита ауристибитом – содержит 1–12 мас. % Sb, его состав – $(\text{Bi}_{1.72-1.96}\text{Sb}_{0.29-0.94})_2(\text{S}_{2.98-3}\text{Se}_{0-0.02})_3$. При наложении сурьмяной минерализации на руды с козалином возникли моелонит и сурьмянистый висмутин III. Вероятная реакция замещения: $3\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{S}_5 + 3\text{Sb}_2\text{S}_3 \text{ p-p} \rightarrow \text{Pb}_6\text{Sb}_6\text{S}_{15} + 3\text{Bi}_2\text{S}_3$. Этот висмутин III содержит 4–17 мас. % Sb, его состав – $(\text{Bi}_{1.36-1.71}\text{Sb}_{0.64-0.29})_2\text{S}_3$. Развитие висмута в составе сурьмяной минерализации там, где она наложена на руды с самородным висмутом, мальдонитом, сульфосолями Pb–Bi, является свидетельством ведущей роли закона действующих масс в процессах минералообразования.

Ключевые слова: висмутин, икунолит, самородный висмут, Au–Bi минерализация, после золоторудная Sb минерализация, вулканогенно-плутоногенное месторождение золота Дарасун, мезозойды Восточного Забайкалья

DOI: 10.31857/S0869605523020089, **EDN:** TCIIRQ

Одно из крупнейших в Забайкалье, гидротермальное месторождение золота Дарасун со сложной историей формирования и минеральным разнообразием изучается около столетия (Болдырев и др., 1936; Крейтер, 1940; Зенков, 1946; Фогельман, 1962;

Филимонова, 1964; Сахарова, Кривицкая, 1970а, 1970б; Сахарова, 1972; Тимофеевский, 1972; Ляхов, Дмитриев, 1975; Зорина, 1987; Чвилёва и др., 1988; Прокофьев, Зорина, 1996; Брызгалов и др., 2007; Чернышов и др., 2014; Спиридонов и др., 2020, 2022, и др.). В предыдущих работах авторов был дан краткий очерк геологического строения месторождения (Спиридонов и др., 2022). Настоящая статья содержит результаты исследования руд Западного участка с различным по составу висмутином, который развит как в составе Au–Bi минерализации, так и в составе послезолоторудной Sb минерализации.

Висмутин — наиболее распространенный минерал висмута (Болдырев и др., 1936). Этот ромбический сульфид при повышенных температурах образует непрерывный ряд твердых растворов с айкинитом CuPbBiS_3 , широкие ряды твердых растворов с гуанахуатитом (до 67% Bi_2Se_3), аурипигментом (до 60% As_2S_3), антимонитом (до 42% Sb_2S_3), растворяет до 0.1% CuS . Наиболее распространенной примесью в висмутине выступает сурьма (Чвилёва и др., 1988).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучена серия образцов богатых руд Западного участка месторождения Дарасун, собранных в шахтных выработках М.С. Сахаровой, Н.Н. Кривицкой, В.Г. Демидовым. Химический состав минералов определен с помощью аналитического комплекса с комбинированной системой микроанализа на базе СЭМ Jeol JSM-6480 LV в лаборатории локальных методов исследований кафедры петрологии геологического факультета МГУ, аналитик-исследователь Н.Н. Коротаева; ею же получены электронные фотографии.

ВИСМУТИН В СОСТАВЕ Au–Bi МИНЕРАЛИЗАЦИИ

Висмутин в ассоциации с галеновисмутитом. Руды жилы 5 Электрическая Западного участка месторождения Дарасун содержат мелкие гнезда висмутин I, нередко в сростаниях с галеновисмутитом. Обычно это неправильной формы метасоматические вросстки и небольшие гнезда в карбонате и халькопирите, реже в пирротине и кубаните. Висмутин I из внутренних частей гнезд содержит <1 мас. % Sb, его состав отвечает формуле $(\text{Bi}_{1.97-1.98}\text{Sb}_{0.03-0.02})_2\text{S}_3$ (табл. 1, ан. 1–3). Висмутин I из внешних частей гнезд содержит 1–3 мас. % Sb, его состав отвечает формуле $(\text{Bi}_{1.89-1.96}\text{Sb}_{0.11-0.04})_2\text{S}_3$ (табл. 1, ан. 4–8). Возможно, это результат воздействия поздних гидротерм, в которых произошло некоторое накопление сурьмы.

Висмутин — продукт распада икунолита. В отдельных участках золоторудной жилы 5 Электрическая содержатся скопления пластин икунолита, заполнившие промежутки между кристаллами кварца, арсенопирита и пирита. Состав дарасунского икунолита близок к теоретическому (ан. 9, 10, мас. %): Bi 89.31 и 88.43, S 10.26 и 10.23, сумма 99.53 и 98.66; формулы минерала — $\text{Bi}_{4.002}\text{S}_{2.998}$ и $\text{Bi}_{3.990}\text{S}_{3.010}$. Икунолит не содержит сурьму. Икунолит устойчив при низкой активности S_2 (Barton, Skinner, 1979). Даже небольшой рост активности сульфидной серы вызывает распад икунолита на самородный висмут и висмутин. Очевидно, по этой причине преобладающая часть икунолита дарасунских руд превращена в мелкокристаллические сростания висмута и висмутин II (рис. 1). Содержание сурьмы в самородном висмуте из продуктов распада икунолита варьирует от 0 до 0.86 мас. % Sb; средний состав минерала, мас. %: Bi 99.47, Sb 0.35 ($n = 10$). Висмутин II — продукт распада икунолита в центре агрегатов с самородным висмутом содержит <1 мас. % Sb, его состав — $(\text{Bi}_{1.96-1.97}\text{Sb}_{0.04-0.03})_2\text{S}_3$ (табл. 2, ан. 11–13). На периферии этих агрегатов висмутин II более сурьмянистый, содержит >2 мас. % Sb, его состав отвечает формуле $(\text{Bi}_{1.91-1.92}\text{Sb}_{0.09-0.08})_2\text{S}_3$ (табл. 2, ан. 14–18).

Таблица 1. Химический состав (мас. %) висмутита I из сростаний с галеновисмутитом. Жила 5 Электрическая. Западный участок месторождения Дарасун**Table 1.** Chemical composition (wt %) of bismuthite I in intergrowths with galena-bismuthite. Vein 5 Electric. Western part of Darasun gold deposit

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8
Bi	80.36	80.96	81.03	80.29	79.06	78.22	78.57	76.464
Sb	0.61	0.66	0.83	1.04	1.69	2.06	2.40	2.72
S	18.70	18.96	18.94	18.81	18.93	18.82	18.97	18.69
Сумма	99.67	100.58	100.80	100.14	99.68	99.10	99.94	98.05
Число атомов в формуле								
Bi	1.976	1.969	1.968	1.961	1.925	1.913	1.904	1.886
Sb	0.026	0.027	0.034	0.044	0.071	0.086	0.100	0.115
Сумма	2.002	1.996	2.002	2.005	1.996	1.999	2.004	2.001
S	2.998	3.004	2.998	2.995	3.004	3.001	2.996	2.999

Примечание. Pb, Ag, Cu, Se – не обнаружены.

Таблица 2. Химический состав (мас. %) висмутита II – продукта распада икунолита (ан. 11–13 – из внутренних участков, ан. 14–18 – из внешних участков сростаний с висмутом). Жила 5 Электрическая. Западный участок месторождения Дарасун**Table 2.** Chemical composition (wt %) of bismuthite II – a product of the ikunolite decay (an. 11–13 – from internal parts, an. 14–18 – from outer parts of intergrowths with bismuth). Vein 5 Electric. Western part of Darasun gold deposit

Компоненты	11	12	13	14	15	16	17	18
Bi	81.93	80.27	80.14	78.07	78.67	78.64	78.65	78.47
Sb	0.75	0.81	0.84	2.03	2.04	2.20	2.24	2.42
S	19.01	18.79	18.78	18.72	18.91	18.97	18.99	18.87
Сумма	100.95	99.87	99.76	98.82	99.62	99.81	99.88	99.76
Число атомов в формуле								
Bi	1.968	1.966	1.964	1.918	1.915	1.908	1.907	1.910
Sb	0.031	0.034	0.035	0.086	0.086	0.091	0.094	0.097
Сумма	1.999	2.000	1.999	2.004	2.001	1.999	2.001	2.007
S	3.001	3.000	3.001	2.996	2.999	3.001	2.999	2.993

Примечание. Pb, Ag, Cu, Se – не обнаружены.

Под действием золотоносных гидротерм возникло высокопробное золото (970–935 ‰), самородный висмут был частично замещен мальдонитом Au_2Bi (Спиридонов и др., 2022), а в дальнейшем – джонасонитом. Еще более поздние образования этих руд – сурьма-содержащие сульфосоли Pb–Bi (преимущественно козалиит $\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{S}_5$), теллуриды Bi, низкопробное золото (до электрума), гессит. В описываемых рудах был довольно широко проявлен процесс эндогенного окисления. При этом, часть пирротина была превращена в сростания пирита и магнетита, заметная часть козалиита – в галенит с червеобразными вростками самородного висмута. Подобные минеральные взаимоотношения свидетельствуют о резкой изменчивости условий рудообразования.



Рис. 1. Жила 5 Электрическая. Висмутин II и самородный висмут — продукты распада икунолита в жильном кварце. Изображение в отраженных электронах.

Fig. 1. Vein of 5 Electric. Bismuthite II and native bismuth as products destruction of ikunolite in quartz. BSE image.

ВИСМУТИН В СОСТАВЕ ПОСЛЕЗОЛОТОРУДНОЙ Sb МИНЕРАЛИЗАЦИИ

Интерметаллид золота и сурьмы — ауристибит AuSb_2 — образуется при наложении сурьмянистых гидротерм, откладывающих самородную сурьму, на самородное золото (Спиридонов, 1995). В дарасунских рудах установлен ауристибит, богатый Bi — продукт замещения интерметаллида золота и висмута — мальдонита (Спиридонов и др., 2022).

Руды жилы 5 Электрическая Западного участка содержат пирротин, арсенопирит, халькопирит, кубанит, галеновисмутит, самородное золото, а также сульфосоли Pb–Bi (козалиит, кобеллит и иные), мальдонит, самородный висмут, джонасонит, галенит, теллуриды висмута. При наложении на эти руды сурьмяной минерализации с самородной сурьмой возникли висмут-содержащие сульфосоли Pb–Sb (семсейит, моелоит, плагионит, гетероморфит), в том числе псевдоморфозы моелоита по козалииту, псевдоморфозы халькостибита по халькопириту и кубаниту, псевдоморфозы ауристибита AuSb_2 по самородному золоту и мальдониту (Спиридонов и др., 2022). При замещении мальдонита ауристибитом возник висмутин III; вероятная реакция замещения: $2\text{Au}_2\text{Bi} + 6\text{Sb p-p} + \text{Sb}_2\text{S}_3 \text{ p-p} \rightarrow 4\text{AuSb}_2 + \text{Bi}_2\text{S}_3$. Новообразованный висмутин окружает псевдоморфозы ауристибита по мальдониту (рис. 2), Висмутин III содержит 1–12 мас. % Sb, представительные анализы приведены в табл. 3; состав этих кристаллов отвечает формуле $(\text{Bi}_{1.72-1.96}\text{Sb}_{0.29-0.94})_2(\text{S}_{2.98-3}\text{Se}_{0-0.02})_3$ (табл. 3, ан. 19–26). Малая примесь селена установлена только в этом висмутине. При воздействии сурьмянистых

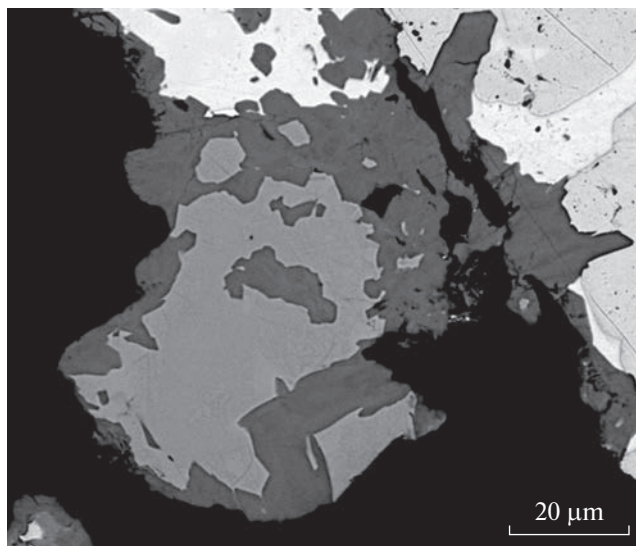


Рис. 2. Жила 5 Электрическая. Висмутин III (темно-серый) окружает богатый висмутом ауростибит — продукт замещения мальдонита. Изображение в отраженных электронах.

Fig. 2. Vein of 5 Electric. Bismuthite III (dark-grey) around Bi-aurostibite as product replacing of maldonite. BSE image.

гидротерм на руды с козалитом, которые находятся на периферии гнезд с самородным висмутом, возник не антимонит (стибнит), а моелоит и в различной степени сурьмянистый висмутин III. Вероятная реакция замещения козалита моелоитом: $3\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{S}_5 + 3\text{Sb}_2\text{S}_3 \text{ p-p} \rightarrow \text{Pb}_6\text{Sb}_6\text{S}_{15} + 3\text{Bi}_2\text{S}_3$. Данный висмутин обогащен сурьмой, содержит от 4 до 17 мас. % Sb; типичные анализы этого минерала приведены в табл. 4 (ан. 27–34), состав отвечает формуле $(\text{Bi}_{1.36-1.71}\text{Sb}_{0.65-0.30})_2\text{S}_3$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Орогенное вулканогенно-плутоногенное золото — сульфидно-кварцевое месторождение Дарасун включает золото-висмутовую и послезолоторудную сурьмяную минерализацию. В рудах жилы 5 Электрическая Западного участка месторождения, сформированных при пониженной активности S_2 , установлены три генерации висмутита. Висмутин I с составом $(\text{Bi}_{1.89-1.98}\text{Sb}_{0.11-0.02})_2\text{S}_3$ — типичное образование в составе Au—Bi минерализации, ассоциирует с галеновисмутитом. Висмутин II с составом $(\text{Bi}_{1.91-1.97}\text{Sb}_{0.09-0.03})_2\text{S}_3$ — продукт распада икунолита, образует зернистые срастания с самородным висмутом. При наложении золотоносных гидротерм возникло обильное самородное золото, часть самородного висмута была замещена мальдонитом. Более молодые образования Au—Bi минерализации — джонасонит, сульфосоли Pb—Bi (в основном — козалит), теллуриды Bi.

При наложении на золотые руды сурьмяной минерализации с самородной сурьмой были образованы халькостибит, сульфосоли Pb—Sb (в основном — моелоит), псевдоморфозы ауростибита по минералам золота. Висмутин III возник при замещении мальдонита ауростибитом и при замещении козалита моелоитом. Вероятная реакция замещения мальдонита: $2\text{Au}_2\text{Bi} + 6\text{Sb p-p} + \text{Sb}_2\text{S}_3 \text{ p-p} \rightarrow 4\text{AuSb}_2 + \text{Bi}_2\text{S}_3$. Вероятная реакция замещения козалита: $3\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{S}_5 + 3\text{Sb}_2\text{S}_3 \text{ p-p} \rightarrow \text{Pb}_6\text{Sb}_6\text{S}_{15} + 3\text{Bi}_2\text{S}_3$. Висмутин III

Таблица 3. Химический состав (мас. %) висмутита III сурьмяной минерализации, продукт замещения мальдонита ауристибитом. Жила 5 Электрическая. Западный участок месторождения Дарасун

Table 3. Chemical composition (wt %) of bismuthite III related to the Sb mineralization – a product of the maldonite replacement by aurostibite. Vein 5 Electric. Western part of Darasun gold deposit

Компоненты	19	20	21	22	23	24	25	26
Bi	79.37	77.73	76.12	75.38	75.87	76.50	75.69	73.03
Sb	1.03	1.75	3.09	4.58	4.62	4.256	5.33	7.07
S	18.65	18.62	18.73	19.16	19.31	19.49	19.56	19.52
Se	нпо	нпо	нпо	нпо	0.22	нпо	нпо	нпо
Сумма	100.95	98.10	97.794	99.12	99.80	100.55	100.58	99.62
Число атомов в формуле								
Bi	1.958	1.923	1.873	1.811	1.810	1.810	1.782	1.719
Sb	0.044	0.074	0.131	0.189	0.189	0.185	0.216	0.286
Сумма	2.002	1.997	2.004	2.000	1.999	1.995	1.998	2.005
S	2.998	3.003	2.996	3.000	2.984	3.005	3.002	2.995
Se	—	—	—	—	0.017	—	—	—

Примечание. нпо – ниже предела обнаружения. Pb, Ag, Cu – не обнаружены.

Таблица 4. Химический состав (мас. %) сурьмянистого висмутита III сурьмяной минерализации. Жила 5 Электрическая. Западный участок месторождения Дарасун

Table 4. Chemical composition (wt %) of Sb-bearing bismuthite III related to the Sb mineralization. Vein 5 Electric. Western part of Darasun gold deposit

Компоненты	27	28	29	30	31	32	33	34
Bi	61.94	63.04	64.58	65.56	67.40	67.01	70.33	72.17
Sb	17.17	15.62	14.41	12.96	12.54	11.74	9.72	7.34
S	20.98	20.67	20.65	21.20	20.42	20.08	19.98	19.46
Сумма	100.09	99.33	99.64	99.72	100.36	98.83	100.03	98.97
Число атомов в формуле								
Bi	1.358	1.404	1.442	1.494	1.518	1.537	1.619	1.706
Sb	0.646	0.597	0.552	0.507	0.485	0.462	0.384	0.298
Сумма	2.004	2.001	1.994	2.001	2.003	1.999	2.003	2.004
S	2.996	2.999	3.006	2.999	2.997	3.001	2.997	2.996

Примечание. Pb, Ag, Cu, Se – не обнаружены.

содержит от 1 до 17 мас. % Sb, небольшую примесь Se. Его состав отвечает формуле $(\text{Bi}_{1.36-1.96}\text{Sb}_{0.64-0.04})_2(\text{S}_{2.98-3}\text{Se}_{0.02-0})_3$.

Образование висмутита в составе сурьмяной минерализации там, где она наложена на руды с самородным висмутом, мальдонитом, сульфосолями Pb–Bi – свидетельство ведущей роли закона действующих масс в процессах минералообразования.

Работа выполнена по плану научно-исследовательских работ кафедры минералогии МГУ с использованием оборудования, приобретенного по программе развития Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болдырев А.К., Бетехтин А.Г., Годлевский М.Н., Григорьев Д.П., Киселёв А.И., Левицкий О.Д., Разумовский Н.К., Смирнов А.А., Соболев В.С., Успенский Н.М., Черных В.В., Шафрановский И.И. Курс минералогии. М.—Л.: ОНТИ, 1936. 1056 с.
- Брызгалов И.А., Кривицкая Н.Н., Спиридонов Э.М. Первая находка нисбита и аурустибита в Восточном Забайкалье // Докл. РАН. 2007. Т. 417. № 2. С. 229–231.
- Зенков Д.А. Рудничная геология на Дарасунском золото-мышьяковом месторождении В кн.: Рудничная геология. Госгеолиздат, 1946. С. 112–134.
- Зорина Л.Д. Рудно-магматические системы Забайкалья с латитовым магматизмом. В кн.: Современные проблемы теоретической и прикладной геохимии. Новосибирск: Наука, 1987. С. 93–100.
- Крейтер В.М. Поиски и разведки полезных ископаемых. М.—Л.: Госгеолиздат, 1940. 790 с.
- Ляхов Ю.В., Дмитриев Л.К. Физико-химические условия минералообразования на Дарасунском месторождении золота (Восточное Забайкалье) по включениям в минералах. Ч. 1 и 2 // Минерал. сб. Львов. ун-та. 1975. № 29. Вып. 3. С. 48–56. Вып. 4. С. 17–22.
- Сахарова М.С. Стадийность процессов рудообразования и вопрос зональности на Дарасунском золоторудном месторождении. В кн.: Рудообразование и его связь с магматизмом. М.: Наука, 1972. С. 213–222.
- Сахарова М.С., Кривицкая Н.Н. О находке виллиамита и брейтгауптита в Забайкалье // Докл. АН СССР. 1970а. Т. 193. № 3. С. 687–689.
- Сахарова М.С., Кривицкая Н.Н. О халькостибите Дарасунского месторождения // ЗВМО. 1970б. Ч. 99. Вып. 3. С. 340–344.
- Спиридонов Э.М. Инверсионная плутоногенная золото-кварцевая формация каледонид севера Центрального Казахстана // Геология рудн. месторожд. 1995. Т. 37. № 3. С. 179–207.
- Спиридонов Э.М., Брызгалов И.А., Кривицкая Н.Н., Назьмова Г.Н., Ряховская С.К., Филимонов С.В. Минеральные ассоциации гидротермальных плутоногенных, вулканогенно-плутоногенных, вулканогенных, телетермальных месторождений золота. В кн.: Золото северного обрамления Пацифика. Магадан: 2008. С. 155–158.
- Спиридонов Э.М., Кривицкая Н.Н., Брызгалов И.А., Коротаева Н.Н., Кочетова К.Н. Фюлэппит $Pb_3Sb_8S_{15}$ из вулканогенно-плутоногенного месторождения золота Дарасун, Восточное Забайкалье // Вестник МГУ. Геология. 2020. № 5. С. 71–76.
- Спиридонов Э.М., Кривицкая Н.Н., Кочетова К.Н., Брызгалов И.А., Коротаева Н.Н. Мальдонит Au_2Bi и продукты его замещения — беспримесное золото, джонасонит $AuBi_5S_4$, висмутистый аурустибит $Au(Sb,Bi)_2$ в золотых рудах месторождения Дарасун в мезозоидах Восточного Забайкалья // ЗРМО. 2022. Ч. 151. Вып. 2. С. 1–22.
- Тимофеевский Д.А. Геология и минералогия Дарасунского золоторудного региона. М.: Недра, 1972. 260 с.
- Филимонова А.А. Описание Дарасунского месторождения. В кн.: Структурно-текстурные особенности эндогенных руд. М.: Недра, 1964. С. 419–437.
- Фогельман Н.А. Тектоника мезозойского сводового поднятия Забайкалья и закономерности размещения в его пределах золоторудных месторождений // Тр. ЦНИГРИ. 1962. Вып. 84. С. 81–93.
- Чилёва Т.Н., Безсмертная М.С., Спиридонов Э.М., Агроскин А.С., Папаян Г.В., Виноградова Р.А., Лебедева С.И., Завьялов Е.Н., Филимонова А.А., Петров В.К., Раутиан Л.П., Свешикова О.Л. Справочник-определитель рудных минералов в отраженном свете. М.: Недра, 1988. 505 с.
- Чернышов И.В., Прокофьев В.Ю., Бортников Н.С., Чугаев А.В., Гольцман Ю.В., Лебедев В.А., Ларионова О.О., Зорина Л.Д. Возраст гранодиорит-порфиров и березитов Дарасунского золоторудного поля (Восточное Забайкалье, Россия) // Геология рудн. месторожд. 2014. Т. 56. № 1. С. 3–18.

Bismuthite from Au–Bi and Post-Gold Sb Mineralizations within the Darasun Deposit, Eastern Transbaikalya

**E. M. Spiridonov^a, *, N. N. Krivitskaya^a, I. A. Brysgalov^a,
K. N. Kochetova^a, and N. N. Korotaeva^a**

^aMoscow State University, Moscow, Russia

*e-mail: ernstspiridon@gmail.com

The Late Jurassic late-orogenic volcanogenic-plutonogenic Darasun deposit of the gold-sulphide-quartz formation holds Au–Bi and post-gold Sb mineralizations. Carbonate-quartz-sulfide veins in Western part of the deposit are surrounded by listvenite rims. Their

golden ores were formed under conditions of low activity of S_2 , they contain pyrrhotine, arsenopyrite, chalcopyrite, pyrite, bismuthate I ($Bi_{1.89-1.98}Sb_{0.11-0.02}S_3$), galenobismuthite, nests of bismuth and ikonolite Bi_4S_3 . There is observed exsolution of ikonolite mainly into the native bismuth ($Bi_{0.98-1}Sb_{0.02-0}$) and bismuthite-II; the composition of bismuthite-II in center of aggregates with the bismuth is ($Bi_{1.96-1.97}Sb_{0.04-0.03}S_3$), whereas the composition on their periphery is an more antimonian one is ($Bi_{1.91-1.92}Sb_{0.09-0.08}S_3$). While the high fineness gold (970–935 ‰) arose there by the action of gold-bearing hydrothermal solutions, the native bismuth has been partly replaced with maldonite. Jonassonite and Pb–Bi sulphosalts (mainly, cosalite $Pb_2Bi_2S_5$) were formed later in these ores. The overlaying Sb mineralization has given formation not of antimonite (stibnite), but of Pb–Sb sulphosalts (moeloite $Pb_6Sb_6S_{15}$, etc.), pseudomorphs of chalcostibite after chalcopyrite, as well as aurostibite $AuSb_2$ after minerals of gold. The replacement of maldonite by aurostibite was resulted in appearance of bismuthite III. The probable replacement reaction is: $2Au_2Bi + 6Sb\ solv. + 3Sb_2S_3\ solv. \rightarrow 4AuSb_2 + Bi_2S_3$. Bismuthite III ($Bi_{1.72-1.96}Sb_{0.29-0.94}S_3$), containing 1–7 wt % of Sb, is a product of the maldonite replacement by aurostibite. Moeloite and stibian bismuthate III arose by the Sb mineralization overlaying ores with cosalite. The probable replacement reaction is: $3Pb_2Bi_2S_5 + 3Sb_2S_3\ solv. \rightarrow Pb_6Sb_6S_{15} + 3Bi_2S_3$. Stibian bismuthite-III contains 4–17 wt % of Sb in its composition ($Bi_{1.36-1.71}Sb_{0.64-0.29}S_3$). Appearance of bismuthite with the Sb mineralization where it was developed over ores with native bismuth, maldonite and Pb–Bi sulphosalts is the evidence of key role of the mass action law in mineral-forming processes.

Keywords: bismuthite, ikonolite, bismuth, Au–Bi mineralization, post-gold Sb mineralization, volcanogenic-plutonogenic Darasun gold deposit, Mezozoides of Eastern Transbaikalya

REFERENCES

- Barton P.B., Skinner B.J. Sulfide mineral stabilities. In: *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. New York: John Wiley and Sons, **1979**. P. 278–403.
- Boldyrev A.K., Betekhtin A.G., Godlevsky M.N., Grigor'ev D.P., Kiselev A.I., Levitsky O.D., Razumovsky I.K., Smirnov A.A., Sobolev V.S., Uspensky N.M., Chernykh V.V., Shavranovsky I.I. Course of mineralogy. Moscow, Leningrad: ONTI, **1936**. 1056 p. (in Russian).
- Bryzgalov I.A., Krivitskaya N.N., Spiridonov E.M. First find of nisbite and aurostibite at Eastern Transbaikalia. *Doklady Earth Sci.* **2007**. Vol. 417. N 2. P. 229–231.
- Chvileva T.N., Bezsmertnaya V.S., Spiridonov E.M., Agroskin A.S., Papayan G.V., Vinogradova R.A., Lebedeva S.I., Zavalov E.N., Filimonova A.A., Petrov V.K., Rautian L.P., Sveschnikova O.L. Reference guide for minerals in reflected light. Moscow: Nedra, **1988**. 505 p.
- Chernyschov I.V., Prokofiev V.Yu., Bortnikov N.S., Chugaev A.V., Gol'zman Yu.V., Lebedev V.A., Larionova O.O., Zorina L.D. Age of granodiorite porphyre and beresite at the Darasun gold deposit (East Transbaikalia, Russia). *Geol. Ore Deposits*. **2014**. Vol. 56. N 1. P. 3–18.
- Filimonova A.A. Description of the Darasun deposit. In: *Structure and texture of the endogenic ores*. Moscow: Nedra, **1964**. P. 419–437 (in Russian).
- Fogel'man N.A. Tectonic of the Mesozoic Arched Uplift at Transbaikalia and regularity of placement of gold deposits within it. *Proc. TSNIGRI*. **1962**. Vol. 84. P. 81–93 (in Russian).
- Kreiter V.M. Search and prospecting of the useful minerals. Moscow, Leningrad: Gosgeolizdat, **1940**. 790 p. (in Russian).
- Lyakhov Yu.V., Dmitriev L.K. Physical and chemistry conditions of genesis of the minerals at the Darasun gold deposit (Eastern Transbaikalia) after inclusions of minerals. Part 1 and 2. *Mineral. Coll. Lviv Univers.* **1975**. Vol. 29. N 3. P. 48–56. N 4. P. 17–22 (in Russian).
- Sakharova M.S. Stages of processes of the ore genesis and the problem of zoning in Darasun gold deposit. In: *Ore genesis and its relations with magmatism*. Moscow: Nauka, **1972**. P. 213–222 (in Russian).
- Sakharova M.S., Krivitskaya N.N., About find of the willyamite and breithauptite in Transbaikalia. *Doklady Earth Sci.* **1970a**. Vol. 193. N 3. P. 687–689.
- Sakharova M.S., Krivitskaya N.N., About chalcostibite at the Darasun deposit. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1970b**. Vol. 99. N 3. P. 340–344 (in Russian).

Spiridonov E.M. Inversion plutonogenic gold-quartz formation in Caledonides of north part of Central Kazakhstan. *Geol. Ore Deposits*. **1995**. Vol. 37. N 3. P. 179–207 (*in Russian*).

Spiridonov E.M., Krivitskaya N.N., Bryzgalov I.A., Korotaeva N.N., Kochetova K.N. Fülöppite $Pb_3Sb_8S_{15}$ from volcanogenic and plutonogenic Darasun gold deposit, East Transbaikalia. *Vestnik Lomonosov Moscow University. Geology*. **2020**. N 5. P. 71–76 (*in Russian*).

Spiridonov E.M., Krivitskaya N.N., Kochetova K.N., Bryzgalov I.A., Korotaeva N.N. Maldonite and products of its replacement: pure native gold, jonassonite, bismuthic aurostibite in gold ores of the Darasun (Eastern Transbaikalia). *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **2022**. Vol. 151. N 2. P. 1–22 (*in Russian*).

Timofeevsky D.A. Geology and mineralogy of the Darasun gold bearing region. Moscow: Nedra. **1972**. 260 p. (*in Russian*).

Zenkov D.A. Mine geology of the Darasun gold-arsenicum deposit. In: *Mine geology*. Gosgeolizdat, **1946**. P. 112–134 (*in Russian*).

Zorina L.D. Ore-magmatic systems of the Transbaikalia with latite magmatism. In: Actual problems of theoretical and applied geochemistry. Novosibirsk: Nauka, **1987**. P. 93–100 (*in Russian*).