

УДК 549.353 (571.55)

Э.М. Спиридонов¹, Н.Н. Кривицкая², И.А. Брызгалов³, Н.Н. Коротаева⁴,
К.Н. Кочетова⁵**ФЮЛЁППИТ $Pb_3Sb_8S_{15}$ ВУЛКАНОГЕННО-ПЛУТОНОГЕННОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА ДАРАСУН (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)***ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1**Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1*

Позднеюрское орогенное вулканогенно-плутоногенное месторождение золота Дарасун (Восточно-Забайкальский сегмент Монголо-Охотского складчатого пояса) включает послезолоторудную сурьмяную минерализацию. Ее более ранние образования — агрегаты рисовидного кварца и минералов ряда иорданит–геокронит–шульцит, а также сфалерита, галенита, арсенопирита, теннантита–тетраэдрита, кальцита, Mn-Mg сидерита; более поздние образования — агрегаты рисовидного кварца, маложелезистого сфалерита, сульфосолей Pb-Sb, антимонита, бертьерита, кальцита. Дарасунский тренд последовательности сульфосолей Pb-Sb от буланжерита до фюлёппита типичен для послемагматических гидротермальных месторождений золота и отличен от телетермальных. В рудах Дарасуна развиты два типа фюлёппита — обогащенный мышьяком (до 7,5 масс.%), продукт замещения минералов ряда геокронита и блеклой руды, и не содержащий мышьяка, который ассоциирует с антимонитом, клейофаном и кальцитом. Состав мышьяксодержащего фюлёппита ($Pb_{2.90}Ag_{0.06}Cu_{0.05})_{3.01}(Sb_{7.05}As_{0.91}Bi_{0.04})_{8.00}S_{14.99}$ и состав фюлёппита без мышьяка ($Pb_{2.83}Cu_{0.18})_{3.01}Sb_{7.98}S_{15.01}$ близки к стехиометричному. Для дарасунского фюлёппита характерна положительная корреляция содержания As, Bi и Ag; медью обогащен фюлёппит без мышьяка.

Ключевые слова: месторождение Дарасун, послезолоторудная сурьмяная минерализация, фюлёппит.

The Late Jurassic orogenic volcanogenic–plutonogenic gold deposit Darasun (the Eastern Transbaikalian segment of Mongolo-Okhotsk folded zone) includes postgold ore antimony mineralization. Aggregates of rice-like quartz, minerals of jordanite–geocronite–schultzeite, sphalerite, galena, arsenopyrite, tennantite–tetrahedrite, calcite and Mn-Mg siderite are its earlier formations; aggregates of rice-like quartz, low-iron sphalerite, Pb-Sb sulphosalts, antimonite and berthierite are its late formations. The Darasun trend of Pb-Sb sulphosalts sequence from bulangerite to fülöppite is typical for post-magmatic hydrothermal gold deposits and differs from telethermal ones. There are two fülöppite types in Darasun ores: fülöppite enriched in arsenic (up to 7.5 %wt), which is probably the product of replacement of geocronite and fahl ore row minerals and fülöppite without arsenic associating with antimonite and calcite. The arsenic-bearing fülöppite composition is $Pb_{2.90}Ag_{0.06}Cu_{0.05})_{3.01}(Sb_{7.05}As_{0.91}Bi_{0.04})_{8.00}S_{14.99}$ and the composition of fülöppite without arsenic is $(Pb_{2.83}Cu_{0.18})_{3.01}Sb_{7.98}S_{15.01}$, which are close to stoichiometry. Darasun fülöppite is characterized by positive correlation of As, Bi and Ag; fülöppite without arsenic is enriched in copper.

Key words: Darasun deposit, postgold ore antimonite mineralization, fülöppite.

Введение. Сульфосоли Pb-Sb — сульфоантимониды свинца — распространенные минералы разнообразных относительно низкотемпературных гидротермальных месторождений Sb, Hg, Sb-Hg, Ag, Ag-Pb-Zn, Au, Au-Ag, как магматогенных (вулканогенных от убогосульфидных — эпитептермальных до колчеданных; малоглубинных плутоно-

генных; вулканогенно-плутоногенных), так и амагматических — телетермальных. Для магматогенных месторождений характерна эволюция сульфоантимонидов свинца с накоплением сурьмы — от галенита через буланжерит, семсейит, гетероморфит, плагионит, робинсонит, джемсонит, цинкениит до фюлёппита и далее до антимонита [Jambor, 1969;

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, профессор; *e-mail:* ernstspiridon@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, ст. науч. с.; *e-mail:* nnkriv@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, ст. науч. с.; *e-mail:* bryz@geol.msu.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии, вед. инженер; *e-mail:* nata.korotaeva2013@yandex.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, бакалавр; *e-mail:* co4etova.c@yandex.ru

Moëlo, 1983; Чвилёва и др., 1988; Спиридонов и др., 2008]. Для телетермальных месторождений нередко характерен обратный тренд — от антимонита до цинкениита, иногда до галенита [Moëlo, 1983; Fortey et al., 1984; Antony et al., 1990].

Фюлёппит $Pb_3Sb_8S_{15}$ был открыт в рудах вулканогенного золото-серебряного месторождения Бая-Маре в Западных Карпатах, в Венгрии [DeFinaly, Koch, 1929]; в настоящее время это территория Румынии. Фюлёппит — относительно редкий сульфоантимонид свинца, наиболее сурьмянистый член ряда галенит—антимонит. Описания фюлёппита редки, так как его легко пропустить из-за сходства с другими сульфоантимонидами свинца и с антимонитом. Фюлёппит описан в телетермальных месторождениях Sb, Sb—Pb, Hg [Вершковская и др., 1982; Moëlo, 1983; Fortey et al., 1984; Чвилёва и др., 1988; Seikoga et al., 2017], в вулканогенных Au—Ag месторождениях Карпат и Северо-Востока России [DeFinaly, Koch, 1929; Чвилёва и др., 1988; Cook, Damian, 1997; Савва, 2018], в плутоногенном золото-антимонитовом месторождении Северного Казахстана [Спиридонов и др., 1990], в скарново-полиметаллическом месторождении Центральной Азии с наложенной сурьмяной минерализацией [Клемперт и др., 1979]. Во многих из этих месторождений фюлёппит ассоциирует с антимонитом и/или богатыми сурьмой сульфоантимонидами свинца.

Фюлёппит в рудах Дарасунского месторождения золота в Восточном Забайкалье установлен Н.Н. Кривицкой и И.А. Брызгаловым.

Материалы и методы исследований. Образцы руд, содержащие фюлёппит, собраны М.С. Сахаровой, Н.Н. Кривицкой, В.Г. Демидовым с сотрудниками в подземных шахтных выработках на участках Центральный и Восточный месторождения Дарасун. Методы изучения руд стандартные. Химический состав минералов определен в лаборатории микронзондового анализа кафедры минералогии (микронзонд «Camebax SX-56», аналитик-исследователь И.А. Брызгалов) и с помощью аналитического комплекса с комбинированной системой микроанализа на базе СЭМ «Jeol JSM-6480 LV» (лаборатория локальных методов исследований кафедры петрологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, аналитик-исследователь Н.Н. Коротаева; ею же получены электронные фотографии).

Результаты исследований и их обсуждение.
Месторождение Дарасун. Месторождение Дарасун расположено в Восточно-Забайкальском сегменте Монголо-Охотского складчатого пояса [Тимофеевский, 1972]. Дарасун — типичный представитель орогенной гидротермальной вулканогенно-плутоногенной золото-сульфидно-кварцевой березит-лиственитовой формации [Спиридонов

и др., 2008]. Возраст месторождения позднеюрский [Чернышов и др., 2014]. Месторождение связано с амуджиканским вулкано-плутоническим монцонит-латит-трахириолитовым комплексом, характерный элемент которого — трубки взрыва. Рудные тела и залежи месторождения слагают минеральные агрегаты трех главных стадий: 1) кварц-турмалиновой, 2) золото-сульфидно-кварцевой, 3) послезолоторудной сурьмяной [Зенков, 1946; Филимонова, 1967; Сахарова, 1972; Тимофеевский, 1972; Брызгалов и др., 2015]. По нашим данным, кварц-турмалиновая формация Дарасуна генетически связана с малыми интрузивными телами монцонитов и трубками взрывных брекчий; две другие формации — золоторудная березит-лиственитовая и сурьмяная джаспероидная — связаны с амуджиканским рудоносным комплексом парагенетически. Изотопный состав свинца золоторудной минерализации и сурьмяной минерализации идентичен и близок к составу свинца рудовмещающих гранитоидов пермского возраста [Кривицкая и др., 2019].

Сурьмяная минерализация относительно широко развита на Центральном и Восточном участках месторождения Дарасун, где она представлена жилами и прожилками мощностью от нескольких миллиметров до нескольких десятков сантиметров, секущими под различными углами золото-сульфидно-кварцевые и кварц-турмалиновые жилы, нередко вдоль зальбандов этих жил, а также слагает цемент брекчий из обломков золоторудных жил.

Более ранние образования сурьмяной минерализации представлены агрегатами мелких рисовидных кристаллов кварца, промежутки между которыми заполнили кристаллы маложелезистого сфалерита, галенита, Pb-As-Sb сульфосолей ряда иорданит—геокронит—шульцит, а также теннантита—тетраэдрита, арсенопирита, кальцита и Mn-Mg сидерита [Брызгалов и др., 2011; Кривицкая и др., 2019].

Более поздние образования сурьмяной минерализации представлены агрегатами мелких рисовидных кристаллов кварца, промежутки между которыми заполнены игольчатыми сульфосолями Pb-Sb от буланжерита до фюлёппита и/или антимонитом, кальцитом и/или Mn-Mg сидеритом, бертьеритом [Брызгалов и др., 2015; Кривицкая и др., 2019]. Наиболее широко развиты агрегаты тонкоигольчатых кристаллов буланжерита, полностью заместившие или проросшие галенит. Почти столь же широко распространены агрегаты тонкоигольчатых кристаллов джемсонита (до войлокоподобных), которые заместили галенит и арсенопирит, местами и более ранний буланжерит. Нередко наблюдается картина последовательного замещения галенита все более сурьмянистыми сульфосолями свинца — сначала гетероморфитом,

Рис. 1. Последовательное замещение галенита (Gal) гетероморфитом (Htr), цинкенимом (Znk) и фюлëппитом (Ful). В отраженных электронах

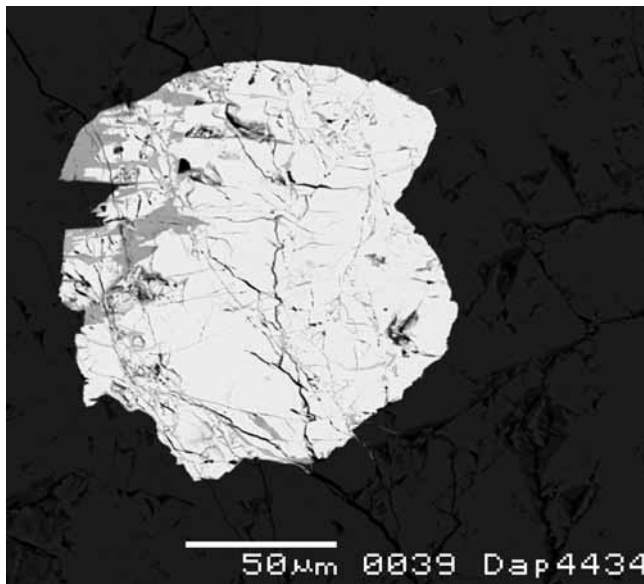
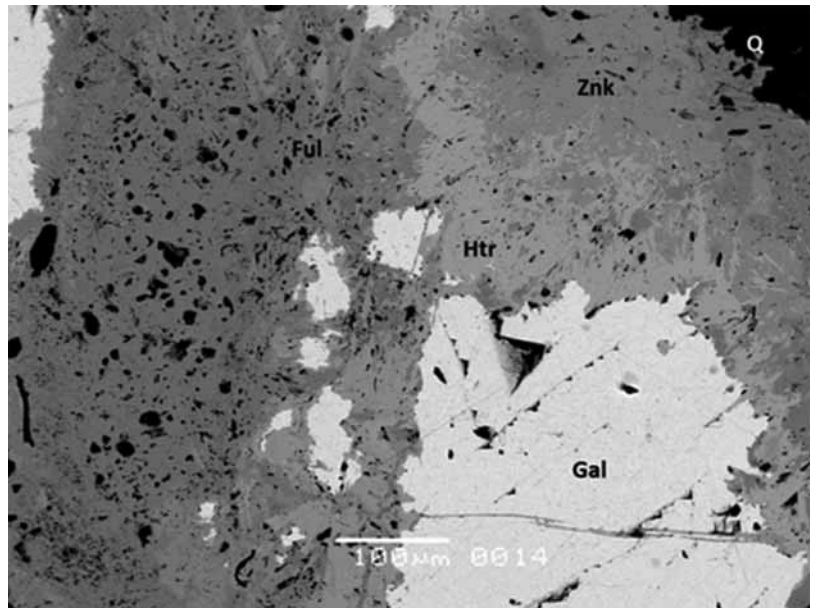
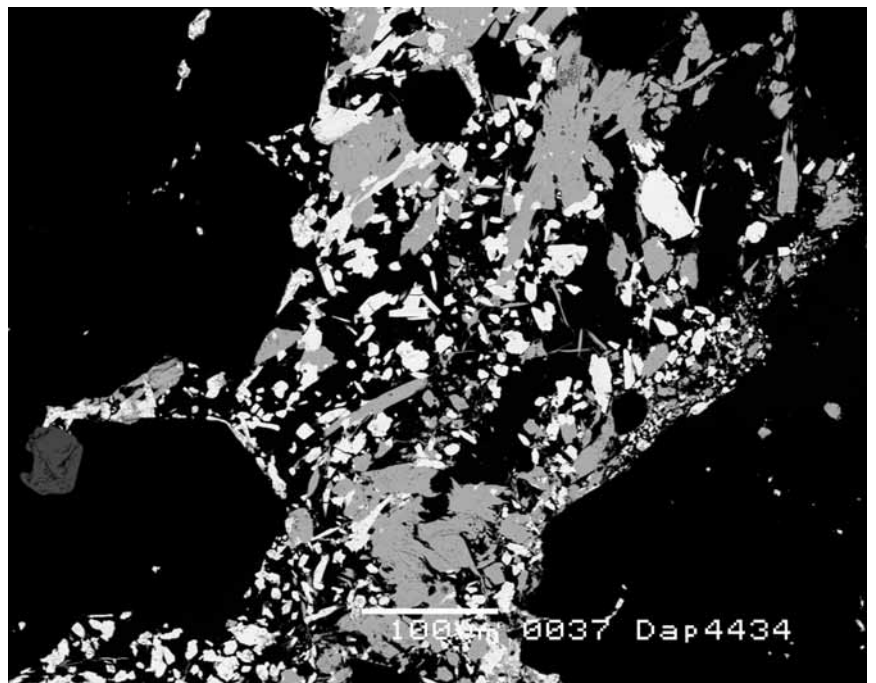


Рис. 2. Фюлëппит (серый, ан. 1, таблица), замещающий геокронит (светлый). Матрица — маложелезистый сфалерит (темно-серый). В отраженных электронах

затем цинкенимом, фюлëппитом (рис. 1). Фюлëппит замещает также геокронит (рис. 2) и блеклую руду — теннантит—тетраэдрит. Значительная часть фюлëппита развита в виде самостоятельных выделений в ассоциации с антимонитом и кальцитом в интерстициях кварца (рис. 3, 4); при этом антимонит нередко обрастает кристаллы фюлëппита (рис. 4). Итак, наиболее богатый сурьмой сульфoантимонид свинца фюлëппит завершает процесс кристаллизации сульфосолей Pb-Sb. Некоторая часть фюлëппита слагает реликтовые выделения в антимоните (рис. 5). С поздним антимонитом, который замещает фюлëппит, иногда ассоциирует бертьерит.

Фюлëппит месторождения Дарасун. Обособленные выделения фюлëппита — призматические, длиннопризматические и игольчатые

Рис. 3. Агрегаты призматических кристаллов фюлëппита (светлое, ан. 8, таблица), более позднего антимонита (серое) и кальцита (черное) выполняют промежутки между кристаллами кварца (черные гексагоны). В отраженных электронах



Химический состав флюэппита Дарасунского месторождения

Состав	Номер образца								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
масс. %									
Pb	28,90	29,27	29,90	28,33	30,07	30,87	30,03	28,75	28,24
Cu	0,16	0,03	нпо	0,36	0,28	нпо	0,19	0,39	0,70
Ag	0,94	0,77	0,30	0,09	нпо	нпо	0,06	нпо	нпо
Sb	36,84	38,08	39,22	44,04	44,92	45,05	46,90	47,14	47,52
As	7,51	6,48	5,02	2,24	1,29	1,02	0,11	нпо	нпо
Bi	1,33	1,31	0,14	0,23	0,16	0,13	0,05	нпо	нпо
S	24,30	24,24	23,62	23,23	23,38	23,32	23,39	22,24	23,63
Сумма	99,98	100,18	98,20	98,52	100,10	100,39	100,73	99,52	100,09
Число атомов в формуле в расчете на 26									
Pb	2,75	2,82	2,94	2,82	2,98	3,07	2,98	2,87	2,78
Cu	0,05	0,01	—	0,12	0,09	—	0,06	0,13	0,23
Ag	0,17	0,14	0,06	0,02	—	—	0,01	—	—
Сумма	2,97	2,97	3,00	2,96	3,07	3,07	3,05	3,00	3,01
Sb	5,97	6,20	6,58	7,45	7,58	7,64	7,92	8,01	7,96
As	1,98	1,71	1,37	0,62	0,35	0,28	0,03	—	—
Bi	0,13	0,12	0,01	0,02	0,02	0,01	—	—	—
Сумма	8,08	8,03	7,96	8,09	7,95	7,93	7,95	8,01	7,96
S	14,95	15,00	15,04	14,95	14,98	15,00	15,00	14,99	15,03

Примечания. Se, Zn, Cd, Sn, Tl — не обнаружены; 1–7 — аналитик И.А. Брызгалов, 8–9 — аналитик Н.Н. Коротаева; нпо — ниже предела обнаружения.

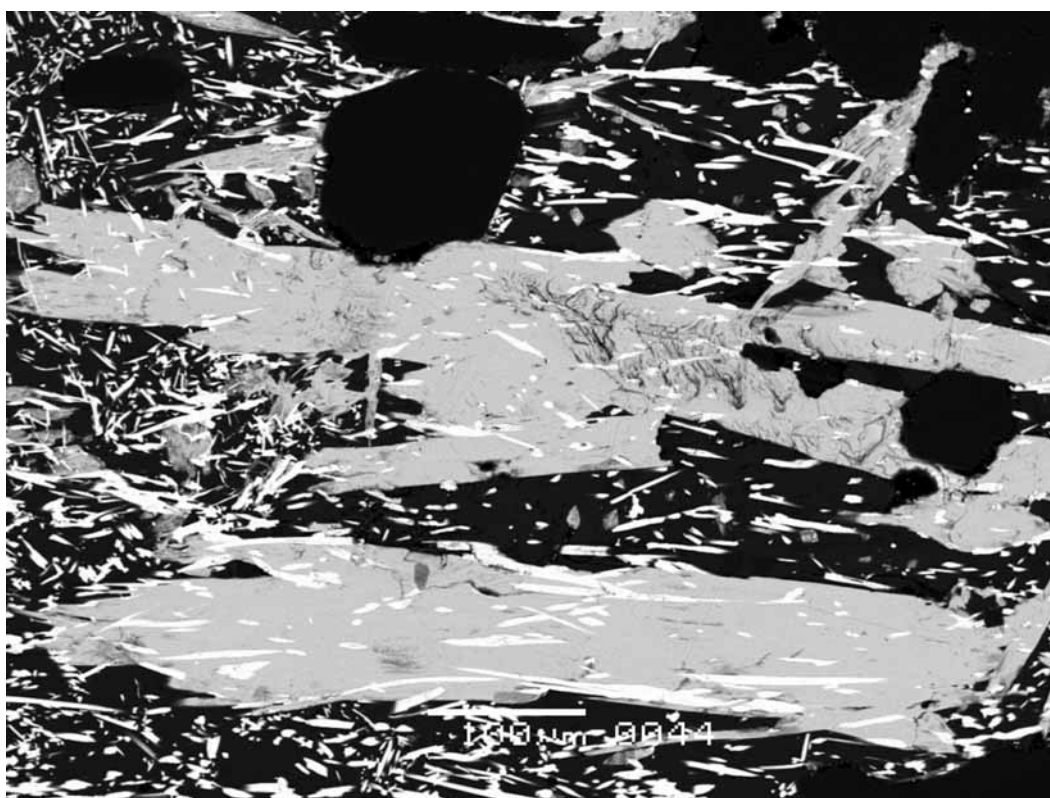
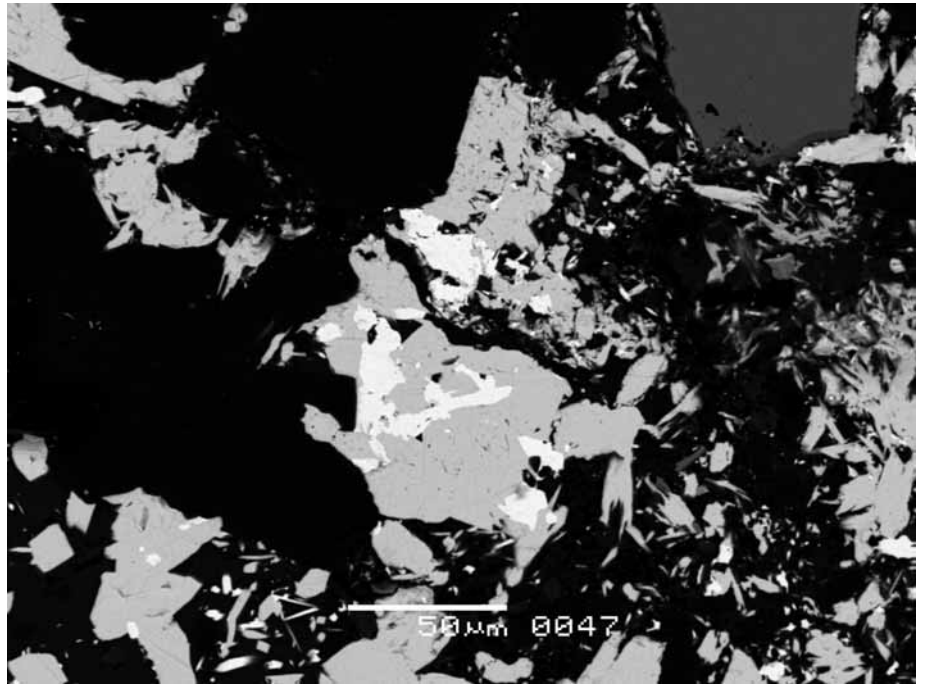


Рис. 4. Длиннопризматические до игольчатых кристаллы флюэппита (светлое, ан. 9, таблица) включены в более крупные призматические кристаллы антимонита (серое) и в кальцит (черное). Среди них идиоморфные включения кварца (черное). В отраженных электронах

Рис. 5. Реликты фюлëппита (светлое, ан. 5, таблица) в антимоните (серое). Справа вверху — сфалерит (темно-серое). Матрица — кальцит и кварц (черное). В отраженных электронах



кристаллы длиной от нескольких до 60–100 мкм в кальците в интерстициях кварца (рис. 3, 4). Фюлëппит слагает также сноповидные и массивные выделения в кальците в сростаниях с клейофаном и антимонитом. Кроме того, фюлëппит частью замещает теннантит–тетраэдрит, геохронит, шульцит, буланжерит, образуя каймы замещения (рис. 1) и неправильной формы метасоматические вросстки (рис. 2).

Руды Дарасуна содержат два типа фюлëппита по составу — обогащенный мышьяком (до 7,5 масс.%), продукт замещения сульфосолей Pb–As–Sb ряда геохронита и As–Sb блëклой руды, а также не содержащий мышьяка, который ассоциирует с антимонитом. В мышьяксо­держащем фюлëппите присутствует заметное количество примесей Ag и Bi (таблица). Вариации состава мышьяк­содержащего фюлëппита таковы: $(\text{Pb}_{2,75-3,07}\text{Ag}_{0-0,17}\text{Cu}_{0-0,12})_{2,96-3,05}(\text{Sb}_{5,97-7,92}\text{As}_{0,03-1,98}\text{Bi}_{0-0,13})_{7,93-8,09}\text{S}_{14,95-15,04}$ (таблица, ан. 1–7), его средний состав $(\text{Pb}_{2,90}\text{Ag}_{0,06}\text{Cu}_{0,05})_{3,01}(\text{Sb}_{7,05}\text{As}_{0,91}\text{Bi}_{0,04})_{8,00}\text{S}_{14,99}$. Фюлëппит, не содержащий мышьяка, беден Ag и Bi, но в нем повышено количество Cu. Вариации состава не содержащего мышьяка фюлëппита таковы: $(\text{Pb}_{2,78-2,87}\text{Cu}_{0,13-0,23})_{2,96-3,05}(\text{Sb}_{5,97-7,92}\text{As}_{0,03-1,98}\text{Bi}_{0-0,13})_{7,93-8,09}\text{S}_{14,95-15,04}$ (таблица, ан. 8–9), его средний состав $(\text{Pb}_{2,90}\text{Ag}_{0,06}\text{Cu}_{0,05})_{3,01}(\text{Sb}_{7,05}\text{As}_{0,91}\text{Bi}_{0,04})_{8,00}\text{S}_{14,99}$. Таким образом,

дарасунский фюлëппит по составу близок к стехиометричному. Для него характерна положительная корреляция содержания As, Bi и Ag.

Заключение. Орогенное вулканогенно-плутоногенное месторождение золота Дарасун, расположенное в Восточно-Забайкальском сегменте Монголо-Охотского складчатого пояса, включает послезолоторудную сурьмяную минерализацию с сульфосолями Pb–As–Sb и Pb–Sb, а также с антимонитом. Дарасунский тренд последовательности сульфосолей Pb–Sb от буланжерита до фюлëппита типичен для послемагматических гидротермальных месторождений золота и отличается от телетермальных. В рудах Дарасуна развиты два типа фюлëппита — обогащенный мышьяком (до 7,5 масс.%), продукт замещения сульфосолей Pb–As–Sb ряда геохронита и As–Sb блëклой руды, и не содержащий мышьяка, ассоциирующий с антимонитом, клейофаном и кальцитом. Составы дарасунского мышьяк­содержащего фюлëппита — $(\text{Pb}_{2,90}\text{Ag}_{0,06}\text{Cu}_{0,05})_{3,01}(\text{Sb}_{7,05}\text{As}_{0,91}\text{Bi}_{0,04})_{8,00}\text{S}_{14,99}$ и состав фюлëппита без мышьяка — $(\text{Pb}_{2,83}\text{Cu}_{0,18})_{3,01}\text{Sb}_{7,98}\text{S}_{15,01}$ близки к стехиометричному. Для дарасунского фюлëппита характерна положительная корреляция содержания As, Bi и Ag; медью обогащен фюлëппит без мышьяка.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-05-00490).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Брызгалов И.А., Кривицкая Н.Н., Спиридонов Э.М. Первая находка минералов ряда иорданит–геохронит–шульцит на одном месторождении (Дарасун, Восточное Забайкалье) // Докл. РАН. 2011. Т. 438, № 5. С. 655–658.

Брызгалов И.А., Кривицкая Н.Н., Спиридонов Э.М. Pb–As–Sb минерализация джаспероидной формации на Дарасунском месторождении // Минералогия во всем пространстве сего слова. СПб.: РМО, 2015. С. 87–89.

Вершковская О.В., Юшко-Захарова О.Е., Дубаккина Л.С. Первая находка фюлëппита в ртутно-сурьмяных рудах // Докл. АН СССР. 1982. Т. 264, № 5. С. 1203–206.

Зенков Д.А. Рудничная геология на Дарасунском золото-мышьяковом месторождении // Рудничная геология. М.: Госгеолиздат, 1946. С. 112–134.

Клемперт С.Я., Рябева Е.Г., Волков Ю.А. Фюлëппит — первая находка в СССР // Зап. ВМО. 1979. Ч. 108, вып. 3. С. 333–336.

Кривицкая Н.Н., Брызгалов И.А., Спиридонов Э.М., Кочетова К.Н. Особенности послезолоторудной As-Sb минерализации Восточного участка Дарасунского вулканогенно-плутоногенного месторождения, Восточное Забайкалье // МГУ. Ломоносовские чтения-2019. URL: <https://conf.msu.ru/rus/event/5604/>

Савва Н.Е. Минералогия серебра Северо-Востока России. М.: Триумф, 2018. 544 с.

Сахарова М.С. Стадийность процессов рудообразования и вопросы зональности на Дарасунском золоторудном месторождении // Рудообразование и его связь с магматизмом. М.: Наука, 1972. С. 213–222.

Спиридонов Э.М., Брызгалов И.А., Кривицкая Н.Н. и др. Минеральные ассоциации гидротермальных плутоногенных, вулканогенно-плутоногенных, вулканогенных, телетермальных месторождений золота // Золото северного обрамления Пацифики. Магадан, 2008. С. 155–158.

Спиридонов Э.М., Петрова И.В., Дашевская Д.М. и др. Рошинит $Ag_{19}Pb_{10}Sb_{51}S_{96}$ — новый минерал группы андорита // Зап. ВМО. 1990. Ч. 119, вып. 5. С. 32–43.

Тимофеевский Д.А. Геология и минералогия Дарасунского золоторудного региона. М.: Недра, 1972. 260 с.

Филимонова А.А. Об ассоциациях сульфoантимонитов свинца в рудах Дарасунского месторождения //

Геология рудных месторождений. 1967. Т. 9, № 2. С. 107–121.

Чвилëва Т.Н., Безсмертная М.С., Спиридонов Э.М. и др. Справочник-определитель рудных минералов в отражённом свете. М.: Недра, 1988. 505 с.

Чернышов И.В., Прокофьев В.Ю., Бортников Н.С. и др. Возраст гранодиорит-порфиров и березитов Дарасунского золоторудного поля (Восточное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. 2014. Т. 56, № 1. С. 3–18.

Anthony J.W., Bideaux R.A., Bladh K.W., Nichols M.C. Handbook of Mineralogy. Vol 1. Elements, Sulfides, Sulfosalts. Tucson: Mineral Data Publishing, 1990. 588 p.

Cook N.J., Damian G.S. New data on «plumosite» and other sulphosalts minerals from the Herja hydrothermal vein deposit, Baia Mare ore district, Rumania // Geol. Carpathica. 1997. Vol. 48, N 6. P. 387–399.

DeFinály I., Koch S. Fülöppite, a new hungarian mineral of the pligionite-senseyite group // Mineral. Mag. 1929. Vol. 22. P. 179–184.

Fortey N.J., Ingham J.D., Skilton B.R.H. et al. Antimony mineralization at Wet Swine Gill, Caldbeck Fells, Cumbria // Proc. Yorkshire Geol. Soc. 1984. Vol. 45. P. 59–65.

Jambor J.L. Sulfosalts of the pligionite group // Mineral. Mag. 1969. Vol. 37. P. 442–446.

Moëlo Y. Contribution à l'étude des conditions naturelles de formation des sulfures complexes d'antimoine et plomb. (Sulfosels de Pb/Sb) // Signification métallogénique. Document du BRGM. 1983, N 55. 624 p.

Sejkora J., Pauliš P., Gramblička R., Malíková R. Fülöppite and pligionite from the Sb deposit Boněnov near Chodová Planá (Czech Republic) // Bull. Mineral. Petrol. 2017. Vol. 25, N 2. P. 201–208.

Поступила в редакцию 29.04.2020

Поступила с доработки 30.06.2020

Принята к публикации 30.06.2020