

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; Seikora 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

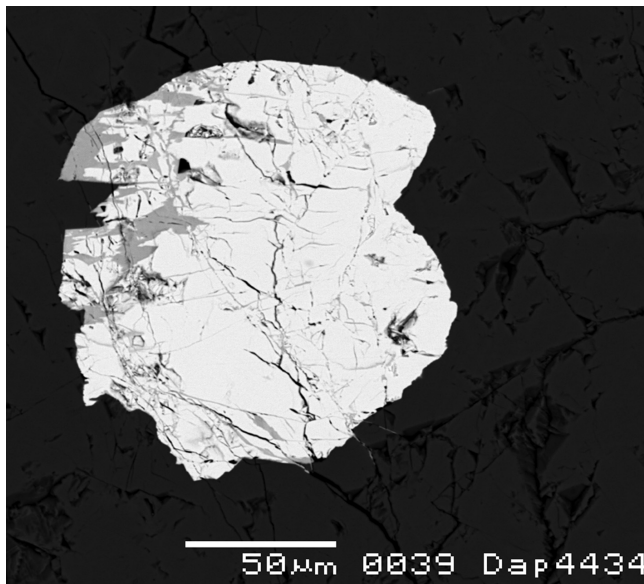
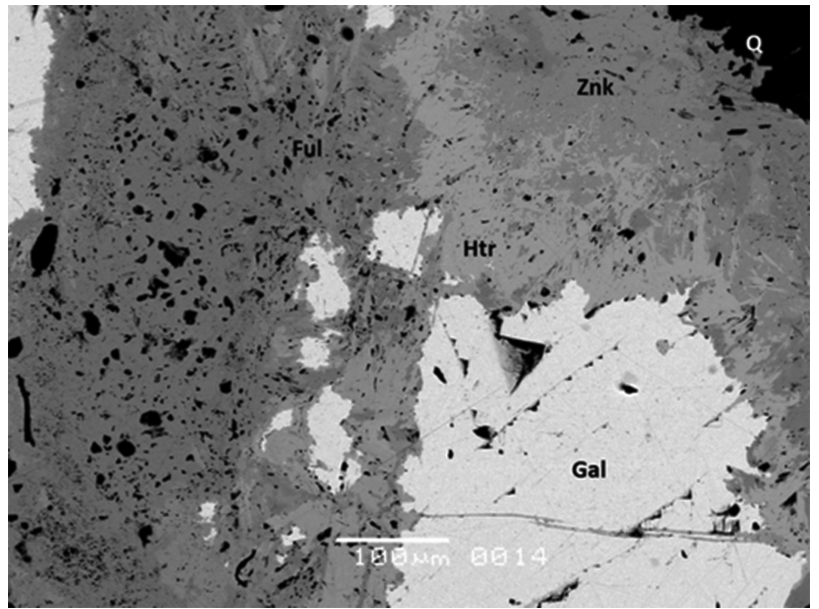
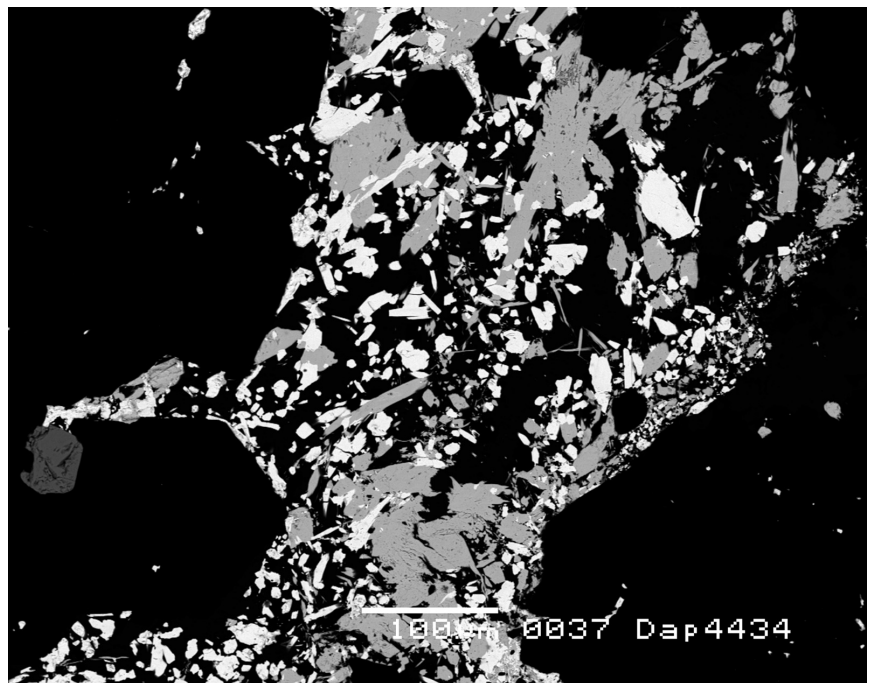


Рис. 2. Фюлëппит (серый, ан. 1, таблица), замещающий геокронит (светлый). Матрица — маложелезистый сфалерит (темно-серый). В отраженных электронах

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 сульфоантимонид 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.

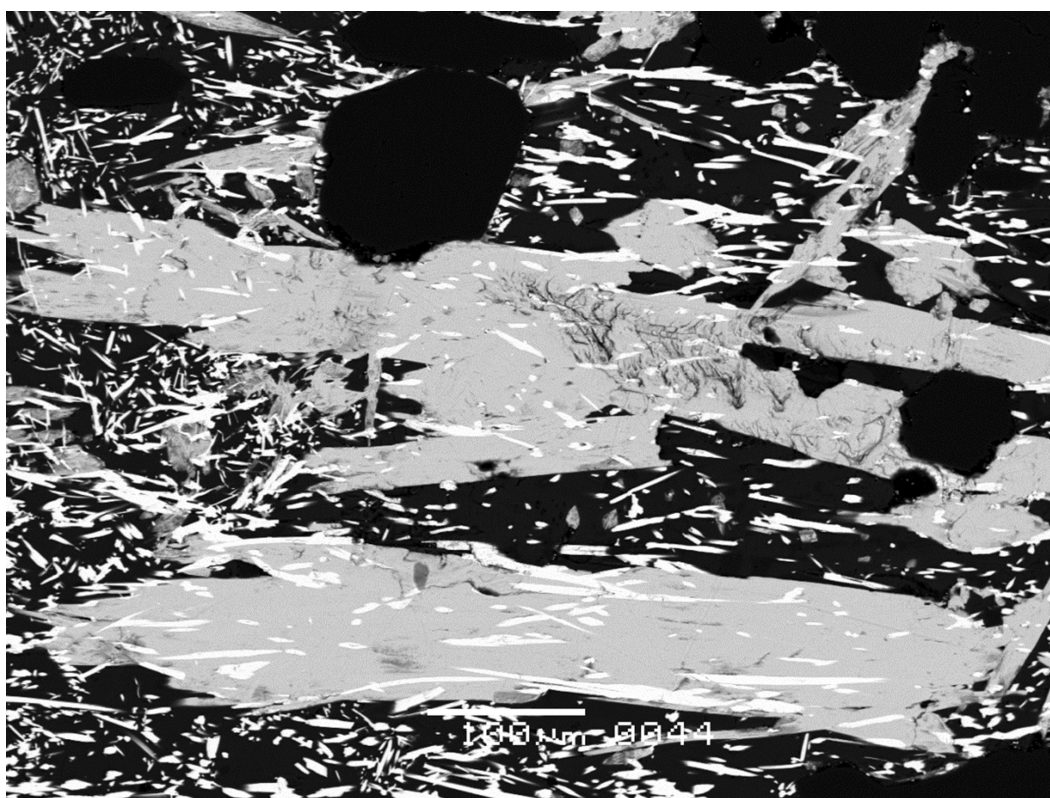
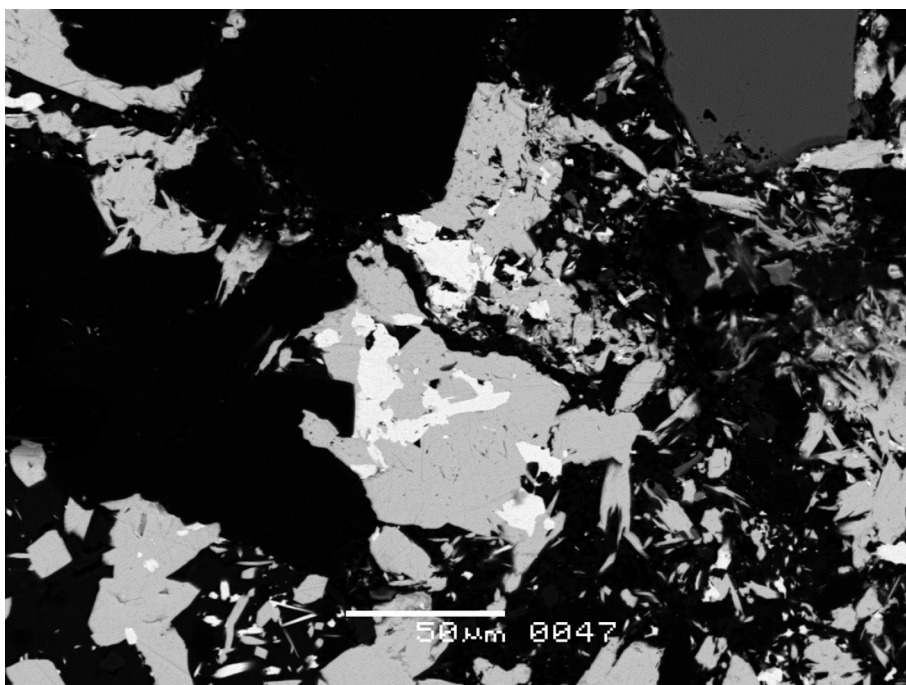


Рис. 4. Длиннопризматические до игольчатых кристаллы флюэппита (светлое, ан. 9, таблица) включены в более крупные призматические кристаллы антимонита (серое) и в кальцит (черное). Среди них идиоморфные включения кварца (черное). В отраженных электронах

Рис. 5. Реликты фюлёппита (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). Фюлёппит слагает также сноповидные и массивные выделения в кальците в сростаниях с клейофаном и антимонитом. Кроме того, фюлёппит частью замещает теннантит–тетраэдрит, геохронит, шульцит, буланжерит, образуя каймы замещения (рис. 1) и неправильной формы метасоматические вростки (рис. 2).

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

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

Заклучение. Оrogenное 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 фюлёппита типичен для послемагматических гидротермальных месторождений золота и отличается от телетермальных. В рудах Дарасуна развиты два типа фюлёппита — обогащенный мышьяком (до 7,5 масс.%), продукт замещения сульфосолей Pb–As–Sb ряда геохронита и As–Sb блёклой руды, и не содержащий мышьяка, ассоциирующий с антимонитом, клейофаном и кальцитом. Составы дарасунского 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.

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., Дубакина 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 sulphosalt 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