
МИНЕРАЛЫ И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ

МАЛЬДОНИТ И ПРОДУКТЫ ЕГО ЗАМЕЩЕНИЯ – БЕСПРИМЕСНОЕ ЗОЛОТО, ДЖОНАСОНИТ, ВИСМУТИСТЫЙ АУРОСТИБИТ В ЗОЛОТЫХ РУДАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДАРАСУН (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

© 2022 г. почетный чл. Э. М. Спиридонов¹, *, 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 11.07.2021 г.

После доработки 14.09.2021 г.

Принята к публикации 09.12.2021 г.

Позднеюрское орогенное вулканогенно-плутогенное месторождение золота Дарасунское березит-лиственитовой золото-сульфидно-кварцевой формации размещено в мезозоидах Восточно-Забайкальского сегмента Монголо-Охотского складчатого пояса. Месторождение включает Au–Bi–Te и послезолоторудную Sb минерализацию. Карбонат-кварц-сульфидные жилы Западного участка месторождения, сложенного в основном габброидами и габбро-амфиболитами, частично – гипербазитами, окружены ореолами лиственитов. Их богатые золотом руды формировались при пониженной активности сульфидной серы, обогащены пирротинном, содержат висмутин и/или сульфосоли Pb–Bi, местами – гнезда самородного висмута и икунолита Bi₄S₃. Высокопробное самородное золото (970–925) ассоциирует с висмутином и сульфосолями Pb–Bi. В гнездах самородного висмута и икунолита вместо этого золота возник обильный мальдонит Au₂Bi. Мальдонит – минерал, не содержащий Ag. При повышении активности сульфидной серы в золотоносных гидротермах мальдонит замещался сростаниями беспримесных золота и висмута, а также и висмутина. При дальнейшем и существенном повышении активности серы в золотоносных гидротермах мальдонит был массово замещен джонасонитом. В рудах Дарасунского месторождения наблюдается замещение мальдонита джонасонитом, вероятная реакция замещения: $Au_2Bi + 5 Bi + 2 Bi_2S_3 + S_2 \text{ p-p} \rightarrow 2 AuBi_5S_4$. Состав джонасонита варьирует от существенно преобладающего в дарасунских рудах беспримесного AuBi₅S₄ до Au(Bi, Pb)₅S₄ с 1–6 мас. % Pb, когда среди замещенных минералов присутствовали галенит или галеновисмутит. Таким образом, формула джонасонита отвечает AuBi₅S₄. При наложении на описанные руды Sb минерализации с самородной сурьмой возникли псевдоморфозы аурустибита по минералам золота. Аурустибит из псевдоморфоз по мальдониту содержит 4–10 мас. % Bi. Вероятная реакция замещения мальдонита аурустибитом: $2 Au_2Bi + 6 Sb \text{ p-p} + Sb_2S_3 \text{ p-p} \rightarrow 4 Au(Sb, Bi)_2 + (Bi, Sb)_2S_3$. Аурустибит внутренних зон псевдоморфоз по продуктам распада мальдонита – самородным золоту и висмуту – содержит до 18 мас. % Bi.

Ключевые слова: мальдонит, беспримесное самородное золото, джонасонит, богатый висмутом аурустибит, вулканогенно-плутогенное месторождение Дарасунское

DOI: 10.31857/S086960552202006X

Несмотря на столетнюю историю изучения крупнейшего в Забайкалье гидротермального месторождения золота Дарасунское со сложной историей формирования и обилием разнообразных минералов (Болдырев и др., 1936; Крейтер, 1940; Зенков, 1946; Фогельман, 1962; Филимонова, 1964; Туговик, 1964; Амосов, 1968; Сахарова, Кривицкая, 1970а, б; Сахарова, 1972; Сахарова, Демидов, 1972; Тимофеевский, 1972; Петровская, 1973; Ляхов, Дмитриев, 1975; Даниэльянц, Ляхов, 1975; Зорина, 1987; Прокофьев, Зорина, 1996; Зорин и др., 1998; Кривицкая и др., 2008, 2012, 2019; Спиридонов и др., 2008а, б, 2010, 2020; Чернышов и др., 2014 и мн. др.), оно остается недостаточно изученным. Наша статья содержит результаты изучения руд Западного участка месторождения, отличающихся с разнообразием минералов золота. Это руды жил 4 и 5 Электрической и Пирротиновой, в которых на золото-висмутовую минерализацию с самородным висмутом наложена после золоторудная сурьмяная минерализация с самородной сурьмой. Мальдонит, беспримесное самородное золото, джонасонит, богатый висмутом аурустибит в рудах месторождения Дарасунское установили авторы статьи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучены образцы богатых руд Западного участка месторождения Дарасунское, собранные в подземных шахтных выработках М.С. Сахаровой, Н.Н. Кривицкой, В.Г. Демидовым и их сотрудниками. Методы изучения руд стандартные. 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 аналитиком-исследователем Н.Н. Коротаевой; ею же получены электронные фотографии.

МЕСТОРОЖДЕНИЕ ДАРАСУНСКОЕ

Забайкалье — южное “подбрюшье” дорифейской Восточно-Сибирской платформы, коллаж фрагментов складчатых структур байкалид, каледонид, герцинид и мезозоид. Месторождение Дарасунское расположено в мезозоидах Восточного Забайкалья, в зоне влияния глубинного Монголо-Охотского разлома, разделяющего герциниды Малханов-Яблоневой зоны и мезозоиды Монголо-Охотского складчатого пояса (Зорин и др., 1998). Фундамент мезозоид образуют тектонические блоки байкалид, каледонид и герцинид. Толщи позднего рифея — венда — палеозоя, метаморфизованные в условиях от фации зеленых сланцев до амфиболитовой фации, содержат мелкие тела гипербазитов и пронизаны относительно крупными интрузивами габброидов и гранитоидов ранне-, средне- и позднепалеозойского возраста, слагающими основной объем рудного поля Дарасун.

Рудное поле находится в пределах мезозойского орогенного Северо-Даурского сводового поднятия, выделенного Н.А. Фогельман (1962), и приурочено к зоне сочленения протяженных разломов — Дарасуно-Восходинского восток-северо-восточного простиранья и северо-западного Балейско-Дарасунского (Фогельман, 1962; Тимофеевский, 1972; Зорина, 1987).

Рудное поле слагают преимущественно калиевые граниты пермского возраста, палеозойские кварцевые диориты и разнообразные мигматизированные и гранитизированные породы (Центральный, Восточный и Северный участки месторождения), преимущественно габброиды, габбро-амфиболиты и подчиненные гипербазиты (Западный участок). Те и другие прорваны паукообразными малыми интрузивами резко порфировидных кварцевых монцонитов, кварцевых сиенито-диоритов и граносиенитов, дайками гранитоид- и монцонит-порфиров, микромонцонитов, субвулканическими телами, покровами и трубками взрыва латитов, риолитов и трахириолитов рудоносного амуджиканского вулканоплутонического монцонит-латит-трахириолито-

вого комплекса позднеюрского возраста (Фогельман, 1962; Тимофеевский, 1972; Туговик, 1984; Зорина, 1987; Чернышов и др., 2014). Богатый калием состав рудовмещающих толщ и пород рудоносного магматического комплекса, вероятно, предопределили обилие в дарасунских рудах висмута и свинца.

Дарасунское месторождение — голотип орогенной гидротермальной вулканогенно-плутоногенной березит-лиственитовой золото-сульфидно-кварцевой формации (Спиридонов и др., 2008а, б, 2010). Возраст месторождения позднеюрский (Чернышов и др., 2014). Месторождение парагенетически связано с амуджиканским вулканоплутоническим комплексом латитового типа. Характерен однотипный стиль развития магматических и гидротермальных рудных образований: и те, и другие формировались в обстановке резко изменчивого давления, в условиях то закрытой, то открытой системы (Спиридонов и др., 2008а).

Для рудных тел характерны явления телескопирования. Рудные тела и залежи месторождения слагают минеральные агрегаты трех основных гидротермальных рудометасоматических формаций: 1) кварц-турмалиновой, 2) березит-лиственитовой золото-сульфидно-кварцевой (средне- и низкотемпературные карбонат-сульфидно-кварцевые жилы выполнения с $\text{Au-Ag-As-Cu-Sb-Pb-Bi-Te}$ минерализацией), 3) послезолоторудной сурьмяной (джаспероидной) (Крейтер, 1940; Зенков, 1946; Филимонова, 1964; Сахарова, 1972; Тимофеевский, 1972; Даниельянец, Эпов, 1974; Ляхов, Дмитриев, 1975; Даниельянец, Ляхов, 1975; Зорина, 1987; Прокофьев, Зорина, 1996; Спиридонов и др., 2010). Изотопный состав свинца золоторудной и сурьмяной минерализации идентичен и близок к составу свинца рудовмещающих калиевых биотитовых гранитов пермского возраста с монацит-ксенотимовой ассоциацией акцессорных минералов (Кривицкая и др., 2019). Становление золоторудной и сурьмяной формаций завершило внедрение даек лампрофиров (Даниельянец, Ляхов, 1975), после которых возникли локальные проявления низкотемпературной телетермальной жильной кварц-кальцитовой минерализации с марказитом, флюоритом, реальгаром, аурипигментом и эпигенетичная метаморфогенно-гидротермальная минерализация с цеолитами, палыгорскитом, ангидритом и точилинитом.

Кварц-турмалиновая формация возникла при 590–450–320 °C и резко изменчивом давлении (1.5–0.07 кбар), из кипящих растворов и рассолов KCl-NaCl с солесностью до 45–50%, содержащих до 3.5 моль $\text{CO}_2/\text{кг}$ раствора. Более поздняя золоторудная березит-лиственитовая кварц-карбонат-сульфидная формация возникла из растворов с солесностью менее 3–10% при 370–320–190 °C (Ляхов, Дмитриев, 1975; Прокофьев, Зорина, 1996). Верхний предел образования березитов-лиственитов и раннего кварца — 370 °C (Ляхов, Дмитриев, 1975), что коррелируется с экспериментальной оценкой верхнего предела устойчивости березитов-лиственитов — 380 °C (Зарайский, 1992). Диапазон формирования березитов-лиственитов с Mg-содержащим сидеритом, сложно осцилляционно-зональным анкеритом-доломитом и пиритом (или пирротинном) — 370–320 °C. Один из главных рудных минералов дарасунских руд — ранний сернистый арсенопирит возник при ~320–300 °C (Ляхов, Дмитриев, 1975). Более поздняя кварц-карбонатная (анкерит, доломит, сидерит) ассоциация с поздним пиритом (или пирротинном), арсенопиритом, железистым сфалеритом, халькопиритом (кубанитом), галенитом возникла при ~280–220 °C; бурнонит и замещающие его блеклые руды ряда теннантит-тетраэдрит — при ~240–230–210 °C; сульфосоли Pb-Bi — при ~225–210 °C; самородное золото — при ~230–200 °C; теллуриды Au-Ag — при ~205–190 °C (Ляхов, Дмитриев, 1975).

Рудные тела Восточного и Центрального участков размещены в основном среди гранитоидов и окружены ореолами березитов. Основные сульфиды — пирит и арсенопирит, много сфалерита, галенита, бурнонита, блеклых руд, сложных сульфидов Bi-Pb . Рудные тела Западного участка размещены среди габброидов с включениями гипербазитов,

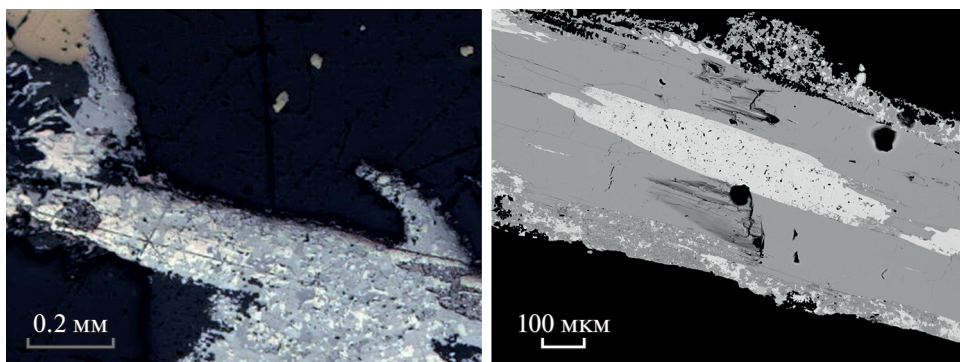


Рис. 1. Жила 5 Электрическая (далее на рисунках – она же). Пластинчатые выделения икунолита. Икунолит распался на висмутин и висмут. Изображения: слева – в отраженном свете при одном николе, справа – в отраженных электронах.

Fig. 1. Vein № 5 “Elektricheskaya” (further on the figures- the same). Plate-shaped segregations of ikunolite. Ikunolite disintegrated into bismuthinite and bismuth. Left – in reflected light, without analyzer. Right – BSE image.

оказаны ореолами лиственитов, основные сульфиды – пирит, пирротин, халькопирит, кубанит и арсенопирит, в рудных жилах нередок магнетит и даже гематит. Основные минералы висмута – висмутин и галеновисмутит, местами развиты гнезда самородного висмута и икунолита Bi_4S_3 (рис. 1). Это типичный пример зональности по составу рудовмещающей среды. Особенно широко самородный висмут и икунолит развиты в рудных жилах 4 и 5 Электрической и Пирротиновой Западного участка. Золотые руды Западного участка, в отличие от остальных, содержат заметное количество теллуридов и сульфотеллуридов висмута.

Сурьмяная минерализация относительно широко развита на Центральном и Восточном участках, где она представлена жилами и прожилками мощностью от первых мм (чаще) до нескольких десятков см, секущими под различными углами золото-сульфидно-кварцевые и кварц-турмалиновые жилы, нередко ориентированными вдоль залыганов этих жил, а также слагает цемент брекчий из обломков золоторудных жил. Ее более ранние образования – рисовидный кварц, минералы ряда иорданит–геокроинит–шульцит, сфалерит, галенит, арсенопирит, теннантит–тетраэдрит, кальцит; более поздние – рисовидный кварц, маложелезистый сфалерит, сульфосоли Pb-Sb , Mn-Mg -содержащий сидерит, антимонит и бертьерит. Дарасунский тренд сульфосолей Pb-Sb : буланжерит → семсейит → моелоит → плагионит → джемсонит → цинкениит → фюльппит типичен для послемагматических гидротермальных месторождений золота (Филимонова, 1964; Кривицкая и др., 2019; Спиридонов и др., 2020). Температура отложения рисовидного кварца и сульфосолей Pb-Sb – 190–130 °C (Ляхов, Дмитриев, 1975). На Западном участке сурьмяная минерализация развита в меньшей степени, ее состав иной: халькостибит CuSbS_2 (Сахарова, Кривицкая, 1970б), виллиамит $(\text{Co,Ni})\text{SbS}$, брейтгауптит NiSb (Сахарова, Кривицкая, 1970а), нисбит NiSb_2 , ульманнит NiSbS , редкая самородная сурьма, ауростибит AuSb_2 (Спиридонов и др., 2010), продукты замещения галенита и галеновисмутита сурьмянистыми растворами: семсейит, моелоит (преобладает), гетероморфит, плагионит (все висмут-содержащие).

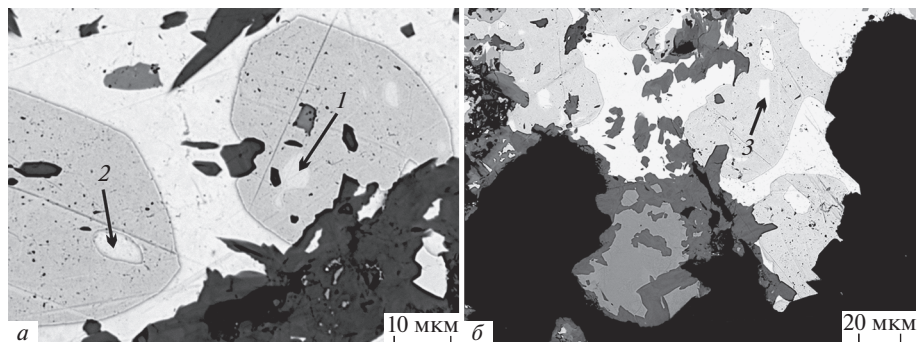


Рис. 2. Реликты мальдонита (табл. 1, ан. 1, 2, 3) среди продуктов замещения мальдонита агрегатом кристаллов беспримесных самородного золота (светло-серое) и самородного висмута (белый), а также висмутина (черный). Галенит — темно-серый. Изображения в отраженных электронах.

Fig. 2. Relics of maldonite (Table 1, an. 1, 2, 3) among products of the maldonite replacement by aggregates of pure gold (light gray), pure bismuth (white) and bismuthinite (black). Galenite — dark gray. BSE image.

МАЛЬДОНИТ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДАРАСУНСКОЕ

Мальдонит Au_2Bi , открытый в золото-кварцевых жилах месторождения Мальдон, залегающих в калийных гранитах Австралии (Ulrich, 1870), считался крайне редким минералом (Петровская, 1973; Ramdohr, 1982). Возможно, это кажущаяся редкость, т.к. мальдонит устойчив в поле стабильности пирротина (Barton, Skinner, 1979). К настоящему времени мальдонит установлен в десятках гидротермальных золоторудных месторождений, как плутоногенных, так и вулканогенно-плутоногенных (Boyer, Picot, 1963; Pianton et al., 1994; Прокуронов и др., 1978; Громова и др., 1979; Сахарова и др., 1983; Гамянин и др., 1986; Альшевский, 2001; Спиридонов и др., 2008a; Birch, Ciobanu, 2009). В этих месторождениях мальдонит возник при воздействии золотоносных растворов на самородный висмут или минералы, которые легко распадаются с выделением самородного висмута, — икунолит или хедлиит. Наши наблюдения показали, что мальдонит — один из распространенных минералов золотых руд жил 4 и 5 Электрической и Пирротиновой Западного участка.

В карбонат-сульфидно-кварцевых жилах Западного участка самородное золото первой продуктивной ассоциации с пробностью 970–925 находится в сростаниях с висмутином и галеновисмутитом (Кривицкая и др., 2012); самородного висмута и мальдонита в этих сростаниях нет. В жилах 4 и 5 Электрической и Пирротиновой Западного участка в гнездах самородного висмута и икунолита вместо этого самородного золота развит обильный мальдонит — продукт замещения самородного висмута под действием золотоносных гидротерм. Таким образом, самородное золото I и синхронный мальдонит возникли позже сульфидов висмута, их ассоциации с висмутином — сонахождение, а не парагенез.

Мальдонит — минерал не устойчивый. Небольшого размера участки мальдонита сохранились среди продуктов его деструкции — в беспримесном самородном золоте (рис. 2) и среди продуктов его замещения — в джонасоните (рис. 3). Форма и размер выделений мальдонита в дарасунских рудах определялись формой (неправильной) и размером (до 50 мкм) выделений самородного висмута, который был замещен мальдонитом. Размер гнезд мальдонита достигнет 350 мкм (рис. 2).

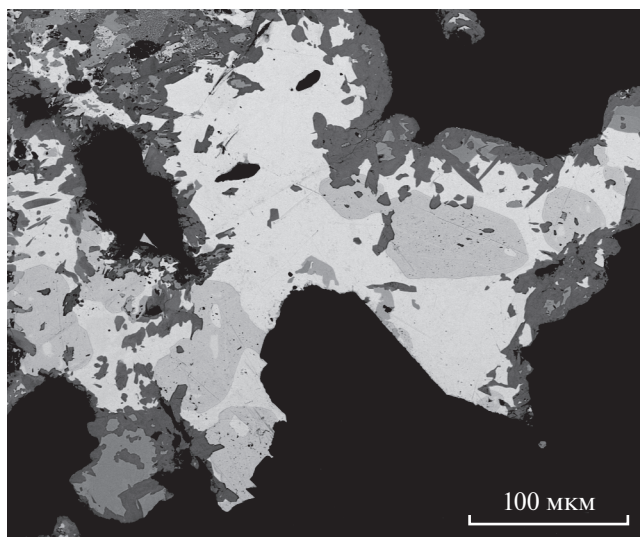


Рис. 3. Крупное ксеноморфное выделение мальдонита среди кристаллов кварца, арсенопирита и пирротина (черные), замещенное сростаниями беспримесных самородного золота (светло-серое) и самородного висмута (белый), а также висмутина (темный). Изображение в отраженных электронах.

Fig. 3. Large xenomorphic segregation of maldonite among crystals of quartz, arsenopyrite and pyrrhotite (black); maldonite is replaced by intergrowths of fine gold (light gray), pure bismuth (white) and bismuthinite (dark). BSE image.

Состав дарасунского мальдонита достаточно устойчив: $\text{Au}_{1.99-2.005}\text{Bi}_{1.01-0.995}$ (табл. 1, ан. 1–5), средний состав отвечает формуле $\text{Au}_{1.995}\text{Bi}_{1.005}$.

БЕСПРИМЕСНОЕ САМОРОДНОЕ ЗОЛОТО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДАРАСУНСКОЕ

Крупнейший знаток минералогии золота Н.В. Петровская считала, что в рудах эндогенных месторождений беспримесного самородного золота нет, что это — гиперген-

Таблица 1. Химический состав (мас. %) мальдонита жилы 5 Электрической. Западный участок месторождения Дарасун

Table 1. Chemical composition of maldonite (wt %) from the vein 5 “Elektricheskaya”, western part of Darasun deposit

Компонент	1	2	3	4	5
Au	64.14	64.92	64.51	64.09	65.47
Bi	34.04	34.56	34.50	34.43	35.54
Сумма	98.18	99.48	99.01	98.52	101.01
Число атомов в формуле					
Au	2.005	2.00	2.00	1.995	1.99
Bi	0.995	1.00	1.00	1.005	1.01
Сумма	3				

Примечание. Ag, Cu, Pb, Sb, Hg, Se — не обнаружены.

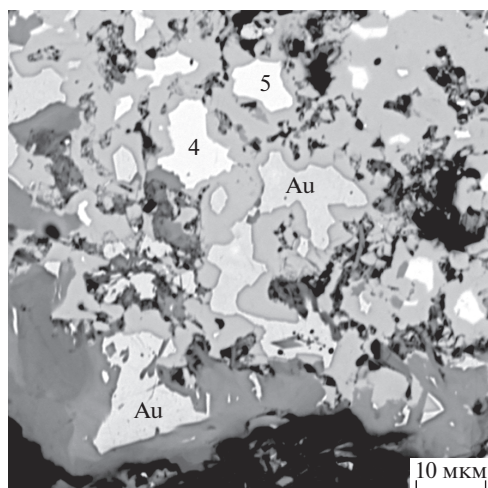


Рис. 4. Замещение мальдонита (табл. 1, ан. 4 и 5) и продуктов его деструкции — беспримесных самородного золота (Au) и самородного висмута джонасонитом (светло-серый). Изображение в отраженных электронах.
Fig. 4. Replacement of maldonite (Table 1, an. 4, 5) and products of its destruction — fine gold (Au) and pure bismuth — by jonassonite (light gray). BSE image.

ное образование (Петровская, 1973). Э.М. Спиридонов установил такое золото в рудах плутогенного золото-теллуридного месторождения Северное Аксу (север Центрального Казахстана) в шахтных выработках на глубине 100–250 м. В этих рудах беспримесное 1000-пробное самородное золото развито в сростаниях с теллуrowисмути-том, тетрадимитом и калаверитом. Крайне высоко пробное золото (995–985) находится в тех же рудах, но без калаверита; вероятно, калаверит вобрал последние остатки серебра из золотоносных гидротерм (Спиридонов, 1995, 2015).

Беспримесное (1000-пробное) самородное золото жилы 5 Электрическая Западного участка Дарасуна, в составе которого не обнаружены примеси Ag, Cu, Hg, Bi, Te, Sb, Pd, Pt, рассматривается как продукт распада мальдонита, замещения мальдонита сростаниями самородного золота и беспримесного самородного висмута, а также висмутитина (рис. 2 и 3). Выполнено более 10 анализов такого самородного золота. Форма его выделений варьирует от неправильной до близкой к кубооктаэдру (рис. 2, а). Размер его выделений — до 100 мкм (рис. 2, 3).

ДЖОНАСОНИТ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДАРАСУНСКОЕ

Сложный сульфид золота и висмута состава AuBi_5S_4 , устойчивый при весьма высокой активности сульфидной серы (Barton, Skinner, 1979), описывался неоднократно (Dobosi, Nagy, 1989, и др.). Как новый, этот минерал, названный джонасонитом, с составом $\text{Au}(\text{Bi}, \text{Pb})_5\text{S}_4$ опубликован в работе (Paar et al., 2006). Джонасонит развит в рудах вулканогенных и вулканогенно-плутогенных месторождений золота.

В дарасунских рудах джонасонит установили Н.Н. Кривицкая и Э.М. Спиридонов (Кривицкая и др., 2008; Спиридонов и др., 2008а). В этих рудах наблюдается непосредственное замещение мальдонита джонасонитом (рис. 4).

Массовое замещение мальдонита джонасонитом произошло при дальнейшем и существенном повышении активности сульфидной серы в золотоносных гидротермах. В

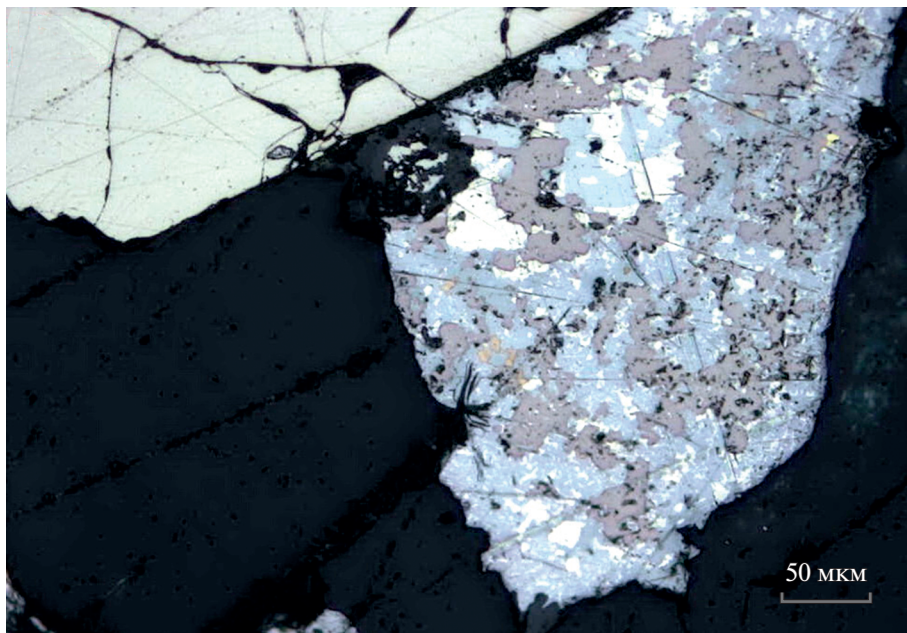


Рис. 5. Обильный джонасонит насыщенного серого цвета, слагающий псевдоморфозы по мальдониту в агрегате висмутита (голубоватый) и самородного висмута (белый). Вверху — крупный кристалл арсенопирита. Изображение в отраженном свете при одном никеле.

Fig. 5. Abundant jonassonite, of saturated grayish color, forming pseudomorphs after maldonite in aggregate of bismuthinite (bluish) and bismuth (white). At the top — large arsenopyrite crystal. Image in reflected light, without analyzer.

отдельных участках руд жилы 5 Электрическая Западного участка джонасонит — один из распространенных рудных минералов. Поскольку джонасонит — это редкий минерал, было желательным показать разнообразие форм его выделений и его особенности в отраженном свете (рис. 5–9). Форма и размер выделений джонасонита лимитировались параметрами кристаллов мальдонита.

Ранее считали, что джонасонит оптически не отличим от висмутита (Paar et al., 2006; Кривицкая и др., 2008; Спиридонов, 2008a). Наблюдения на более обширном материале показали, что цвет джонасонита в отраженном свете заметно более насыщенный, а двуотражение слабее, чем у висмутита (рис. 5, 6).

Поскольку дарасунские руды богаты джонасонитом, был детально изучен его химический состав. В табл. 2 и 3 приведены 16 представительных анализов джонасонита, не содержащего свинец, из выполненных 54 анализов (рис. 10).

Состав дарасунского джонасонита, не содержащего свинец, близок к теоретическому, из примесей минерал содержит менее 0.5 мас. % Sb; вариации его состава $\text{Au}_{0.99-1.005}(\text{Bi}_{4.92-5.005}\text{Sb}_{0-0.045})_{4.98-5.00}\text{S}_{3.995-4.045}$; средний состав — $\text{Au}_{1.00}(\text{Bi}_{4.98}\text{Sb}_{0.015})_{4.995}\text{S}_{4.005}$. В табл. 4 и 5 приведены 16 анализов джонасонита, содержащего от 1 до 6 мас. % Pb; джонасонит такого состава возник, когда среди замещенных минералов присутствовали галенит или галеновисмутит. В составе этого джонасонита отчетливо проявлен изоморфизм Bi–Pb. Вариации состава Pb-содержащего джонасонита

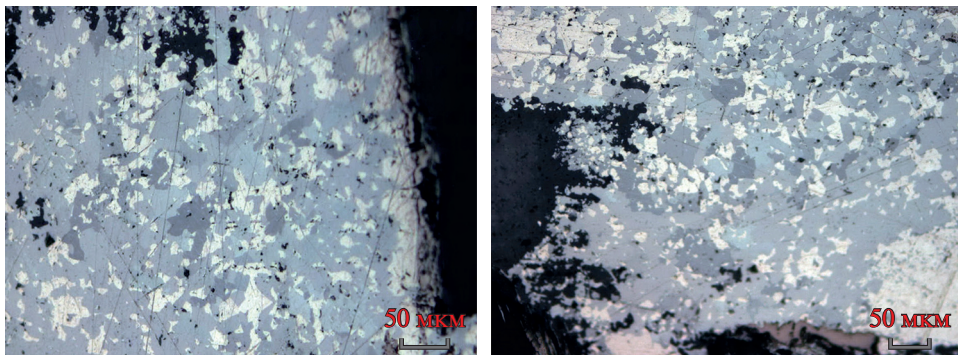


Рис. 6. Обильный джонасонит насыщенного сероватого цвета, слагающий псевдоморфозы по мальдониту в агрегате висмутина (голубоватый) и самородного висмута (белый). Изображение в отраженном свете при одном никеле.

Fig. 6. Abundant jonassonite, of saturated grayish color, forming pseudomorphs after maldonite in aggregate of bis-muthinite (bluish) and bismuth (white). Image in reflected light, without analyzer.

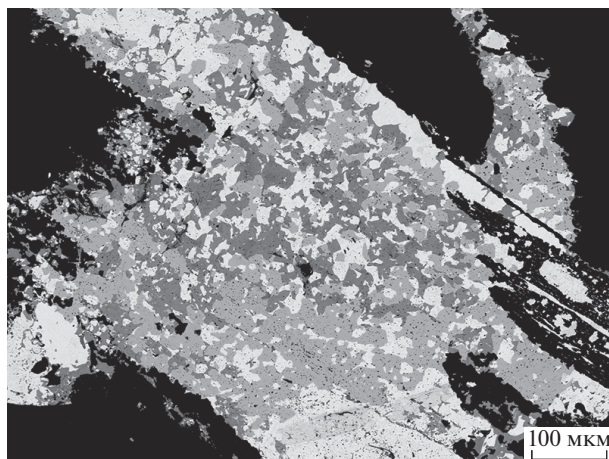


Рис. 7. Обильный джонасонит (светло-серый), слагающий псевдоморфозы по мальдониту в агрегате висмутина (темно-серый) и самородного висмута (белый); протофаза – пластинчатый икунолит. Черное – кварц, карбонаты, пирротин, халькопирит, арсенопирит. Изображение в отраженных электронах.

Fig. 7. Abundant jonassonite, of saturated grayish color, forming pseudomorphs after maldonite in aggregate of bis-muthinite (bluish) and bismuth (white); the primary phase – laminated ikonolite. Black – quartz, carbonates, pyrrhotite, chalcopyrite and arsenopyrite. BSE image.

$\text{Au}_{0.99-1.01}(\text{Bi}_{4.595-4.94}\text{Pb}_{0.06-0.395}\text{Sb}_{0-0.03})_{4.985-5.015}\text{S}_{3.985-4.015}$; средний состав минерала отвечает $\text{Au}_{1.00}(\text{Bi}_{4.785}\text{Pb}_{0.20}\text{Sb}_{0.005})_{4.995}\text{S}_{4.005}$ (табл. 4, 5).

В целом, состав дарасунского джонасонита варьирует от существенно преобладающего беспримесного AuBi_5S_4 (рис. 10) до $\text{Au}(\text{Bi}, \text{Pb})_5\text{S}_4$ с 1–6 мас. % Pb, когда среди замещенных минералов присутствовали галенит или галеновисмутит.

Таким образом, формула минерала джонасонита отвечает AuBi_5S_4 .

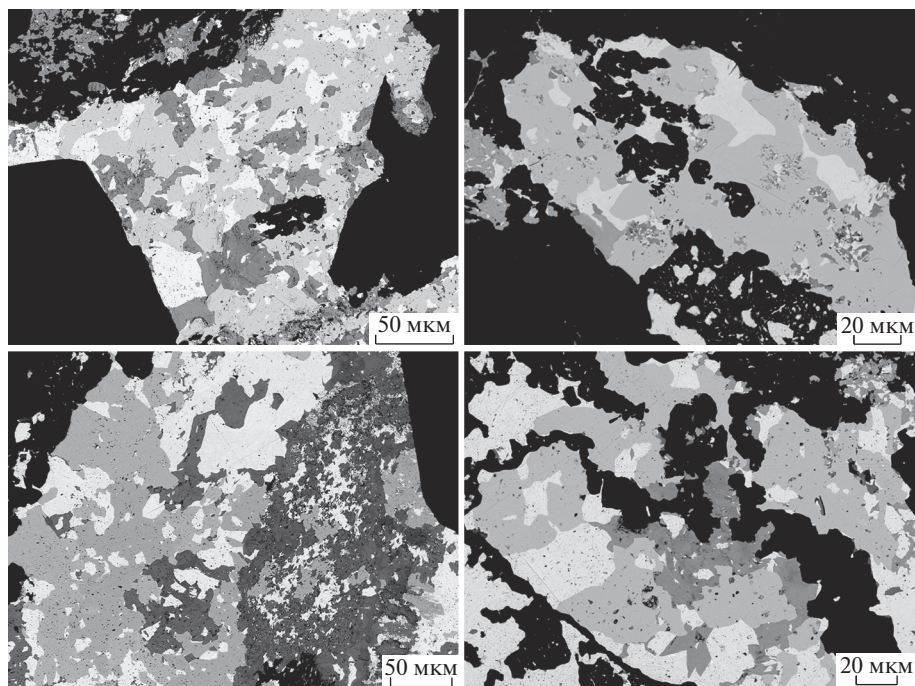


Рис. 8. Обильный джонасонит (светло-серый), слагающий псевдоморфозы по мальдониту в агрегате висмутина (темно-серый) и самородного висмута (белый). Черное — кварц, карбонаты, пирротин, арсенопирит, халькопирит. Изображения в отраженных электронах.

Fig. 8. Abundant jonassonite, of saturated grayish color, forming pseudomorphs after maldonite in aggregate of bismuthinite (bluish) and bismuth (white). Black — quartz, carbonates, pyrrhotite, chalcopyrite and arsenopyrite are black. BSE image.

Вероятная реакция образования джонасонита — это реакция замещения мальдонита джонасонитом: $\text{Au}_2\text{Bi} + 5 \text{Bi} + 2 \text{Bi}_2\text{S}_3 + \text{S}_2 \text{ p-p} \rightarrow 2 \text{AuBi}_5\text{S}_4$.

Местами агрегаты джонасонита с висмутином и самородным висмутом брекчированы. Их обломки сцементированы и частично замещены сростаниями сульфоселей Pb-Bi с заметной примесью сурьмы, преимущественно козалитом и кобеллитом (рис. 11), с которыми часто ассоциирует серебристое золото II.

Местами агрегаты с джонасонитом пересечены прожилками козалита и кобеллита с теллуржозеитом и серебристым золотом II. Эти после джонасонитовые образования — производные более дифференцированных и низкотемпературных золотоносных гидротерм, в которых произошло накопление Sb , Ag , Te . Еще более поздние образования золотых руд Западного участка — богатое серебром самородное золото III (и электрум), с которыми ассоциируют гессит Ag_2Te , петцит AuAg_3Te_2 и цумоит Bi_2Te_2 (Кривичкая и др., 2012).

БОГАТЫЙ ВИСМУТОМ АУРОСТИБИТ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДАРАСУНСКОЕ

Интерметаллид золота и сурьмы — аурустибит AuSb_2 развит во многих десятках месторождений золота Якутии, Казахстана, Узбекистана, Чехии, Франции, Финляндии, Южной и Центральной Африки, Австралии, российского Дальнего Востока, Забайка-

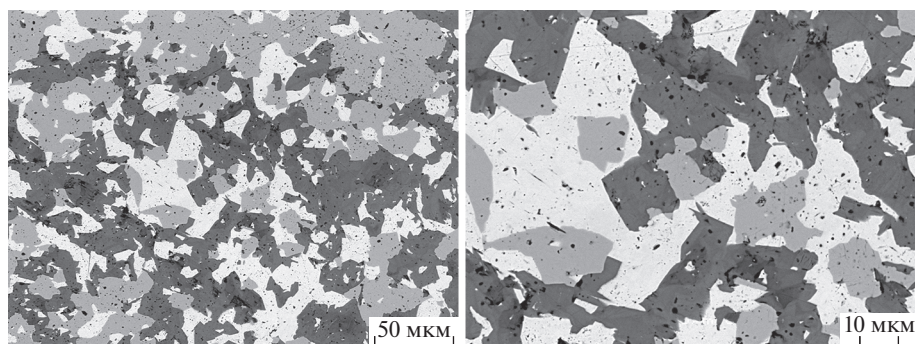


Рис. 9. Обильный джонасонит (светло-серый), слагающий псевдоморфозы по мальдониту в агрегате висмутинита (темно-серый) и самородного висмута (белый). Изображения в отраженных электронах.

Fig. 9. Abundant jonassonite (light gray) forming pseudomorphs after maldonite in aggregate of bismuthinite (dark gray) and bismuth (white). BSE image.

ля (Graham, Kaiman, 1952; Назьмова и др., 1975; Индолев, Жданов, 1975; Громова и др., 1979; Ramdohr, 1982; Спиридонов и др., 1986, 2010; Ashley et al., 1990; Суплецов, Жданов, 1992; Dill et al., 1995; Ortega et al., 1996; Hytönen, 1999; Альшевский, 2001; Амузинский и др., 2001). Ауростибит устойчив в поле стабильности пирротина (Barton, Skinner, 1979). Развиг в гидротермальных гиабиссальных плутоногенных, вулка-

Таблица 2. Химический состав (мас. %) джонасонита жилы 5 Электрической. Западнй участок месторождения Дарасун

Table 2. Chemical composition of jonassonite (wt %) from the vein 5 “Elektricheskaya”, western part of Darasun deposit

Компонент	6	7	8	9	10	11	12	13
Au	14.67	14.37	14.64	14.40	14.14	14.26	14.10	14.51
Bi	77.83	75.19	77.76	75.98	75.23	75.89	74.91	76.56
Sb	нпо	0.21	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0.41
S	9.56	9.35	9.54	9.37	9.23	9.30	9.25	9.50
Сумма	102.06	99.12	101.94	99.75	98.60	99.45	98.26	100.96
Число атомов в формуле								
Au	1.005	1.005	1.005	1.005	1.00	1.00	1.00	1.00
Bi	4.995	4.95	5.00	4.99	5.00	5.00	4.985	4.95
Sb	—	0.03	—	—	—	—	—	0.045
Bi + Pb + Sb	4.995	4.98	5.00	4.99	5.00	5.00	4.985	4.995
S	4.00	4.015	3.995	4.01	4.00	3.995	4.015	4.005

Примечание. Здесь и далее “нпо” — ниже предела обнаружения. Pb, Ag, Se — не обнаружены.

Таблица 3. Химический состав (мас. %) джонасонита жилы 5 Электрической. Западный участок месторождения Дарасун**Table 3.** Chemical composition of jonassonite (wt %) from the vein 5 “Elektricheskaya”

Компонент	14	15	16	17	18	19	20	21
Au	14.28	14.20	14.27	14.17	14.48	14.27	14.42	14.33
Bi	76.10	75.89	76.94	75.48	76.58	75.06	76.63	76.39
Sb	нпо	нпо	нпо	нпо	0.29	0.35	0.21	0.42
S	9.35	9.29	9.39	9.29	9.48	9.47	9.49	9.46
Сумма	99.73	99.38	100.60	98.94	100.83	97.86	100.75	100.54
Число атомов в формуле								
Au	1.00	1.00	1.00	0.995	0.995	0.995	0.99	0.99
Bi	5.00	5.005	4.99	4.995	4.965	4.92	4.97	4.96
Sb	—	—	—	—	0.03	0.045	0.025	0.045
Bi + Sb	5.00	5.005	4.99	4.995	4.995	4.965	4.995	5.005
S	4.00	3.995	4.01	4.005	4.005	4.045	4.01	4.005

ногенно-плутоногенных и телетермальных, изредка в вулканогенных, а также в метаморфизованных месторождениях. Ауростибит — реакционный минерал. Во многих плутоногенных и телетермальных Au-Sb месторождениях ауростибит образуется при воздействии сурьмянистых гидротерм, отлагающих самородную сурьму, на самород-

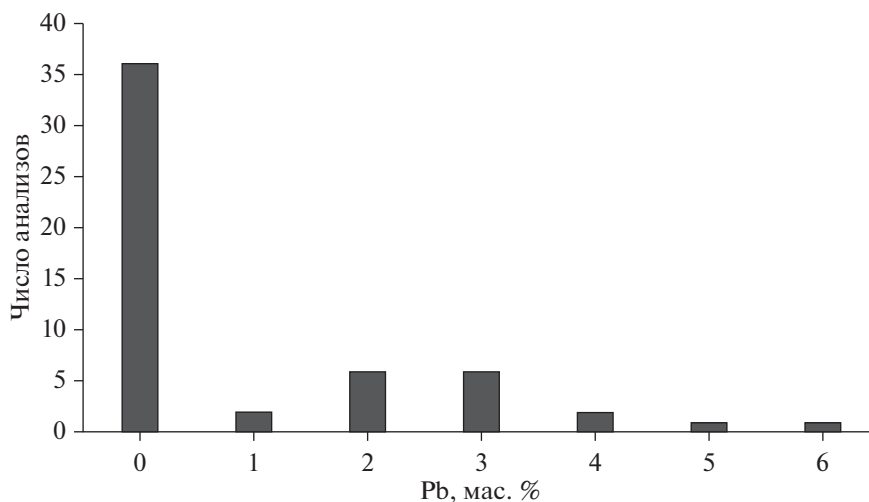
**Рис. 10.** Гистограмма содержаний свинца ($n = 54$) в джонасоните жилы 5 Электрической.**Fig. 10.** Vein № 5 “Elektricheskaya”. Histogram of lead content in jonassonite ($n = 54$).

Таблица 4. Химический состав (мас. %) свинец-содержащего джонасонита жилы 5 Электрической. Западный участок месторождения Дарасун**Table 4.** Chemical composition of the lead-bearing jonassonite (wt %) from the vein 5 “Elektricheskaya”

Компонент	22	23	24	25	26	27	28	29
Au	14.53	14.47	14.60	14.29	14.20	14.39	14.38	14.44
Bi	76.59	75.34	75.80	73.87	72.97	73.90	72.45	74.16
Pb	0.94	1.66	2.07	2.28	2.34	2.43	2.72	2.81
Sb	нпо	0.10	нпо	нпо	0.19	0.24	нпо	нпо
S	9.52	9.49	9.56	9.38	9.29	9.46	9.29	9.45
Сумма	101.56	101.06	102.03	99.82	98.99	100.42	98.84	100.86
Число атомов в формуле								
Au	1.00	1.00	1.00	1.00	0.995	0.995	1.01	1.00
Bi	4.94	4.875	4.865	4.84	4.82	4.805	4.80	4.815
Pb	0.06	0.11	0.135	0.155	0.16	0.16	0.18	0.185
Sb	—	0.01	—	—	0.025	0.03	—	—
Bi + Pb + Sb	5.00	4.995	5.00	4.995	5.005	4.9956	4.98	5.00
S	4.00	4.005	4.00	4.01	4.00	4.01	4.01	4.00

Примечание. Ag, Se — не обнаружены.

Таблица 5. Химический состав (мас. %) свинец-содержащего джонасонита жилы 5 Электрической. Западный участок месторождения Дарасун**Table 5.** Chemical composition of the lead-bearing jonassonite (wt %) from the vein 5 “Elektricheskaya”, western part of Darasun deposit

Компонент	30	31	31	33	33	35	36	37
Au	14.41	14.24	14.57	14.24	14.53	14.20	14.28	14.36
Bi	73.68	71.72	74.61	71.38	73.77	71.48	71.02	69.39
Pb	3.19	3.30	3.50	3.53	3.72	4.01	4.63	5.89
Sb	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	0.24	нпо	нпо
S	9.45	9.26	9.53	9.23	9.55	9.34	9.35	9.27
Сумма	100.73	98.52	102.21	98.38	101.57	99.27	99.28	98.91
Число атомов в формуле								
Au	1.00	1.01	0.995	1.01	1.00	0.995	1.00	1.01
Bi	4.79	4.765	4.795	4.75	4.75	4.705	4.68	4.595
Pb	0.21	0.22	0.225	0.235	0.24	0.265	0.31	0.395
Sb	—	—	—	—	—	0.03	—	—
Bi + Pb + Sb	5.00	4.985	5.02	4.985	4.99	5.00	4.99	4.99
S	4.00	4.005	3.985	4.005	4.01	4.005	4.01	4.00

Примечание. Ag, Se — не обнаружены.

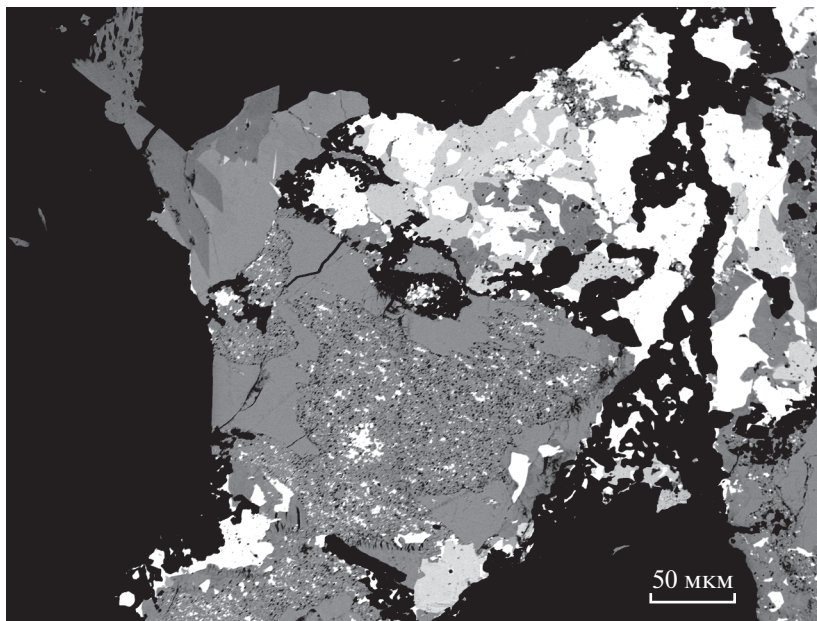


Рис. 11. Обломки агрегата джонасонит (светло-серый) + висмутин (темно-серый) + самородный висмут (белый) сцементированы и замещаются козалитом (ровный серый) в сростании с кобеллитом (темно-серые ромбовидные кристаллы вверху). Черное — кварц, карбонаты, арсенопирит, пирротин, халькопирит. Изображение в отраженных электронах.

Fig. 11. Fragments of the aggregate of jonassonite (light gray) + bismuthinite (dark gray) + bismuth (white) cemented and replaced by cosalite (gray) in association with kobellite (dark gray rhomboid crystals at the top). Black — quartz, carbonates, pyrrhotite, chalcopyrite and arsenopyrite. BSE image.

ное золото (Спиридонов, 1995). П. Рамдор полагал, что ауристибит образуется при воздействии любых сурьму-содержащих гидротерм на самородное золото (Ramdohr, 1982). Это не так. При воздействии на золотые руды сурьмянистых гидротерм, отлагающих антимонит или бертьерит, ауристибит не образуется. Ауристибит плутоногенных месторождений иногда содержит до 3 мас. % As (Назьмова и др., 1975). Ауристибит метаморфизованных месторождений золота содержит до 5 мас. % As и до 4 мас. % Bi (Нутönen, 1999).

В дарасунских рудах наряду со стандартным ауристибитом с ~1 мас. % Bi, заместившим самородное золото, развит ауристибит, заместивший мальдонит и содержащий до 10 мас. % Bi (Спиридонов и др., 2010). Ниже приведенные результаты подтверждают эти оценки.

При наложении на золотые руды жил 4 и 5 Электрическая и Пирротиновая Западного участка с мальдонитом, беспримесным самородным золотом, самородным висмутом и джонасонитом Sb минерализации с самородной сурьмой возникли псевдоморфозы ауристибита по минералам золота. Ауристибит из псевдоморфоз по самородному золоту I содержит 1–3 мас. % Bi и до 1.5 мас. % As. В этих же рудах относительно широко распространены псевдоморфозы ауристибита по мальдониту. Их размер обычно менее 30 мкм, форма от неправильной до ромбовидной. Ауристибит из псевдоморфоз по мальдониту содержит 4–10 мас. % Bi и от следов до 1.5 мас. % As (табл. 6, ан. 38–45; табл. 7, ан. 46–51). Вариации состава ауристибита из псевдоморфоз по

Таблица 6. Химический состав (мас. %) висмутистого ауристибита жилы Пятой Электрической. Западный участок месторождения Дарасун**Table 6.** Chemical composition of the bismuth-bearing aurstibite (wt %) from the vein 5 “Elektricheskaya”, western part of Darasun deposit

Компонент	38	39	40	41	42	43	44	45
Au	43.42	43.53	45.69	43.55	44.81	43.68	43.41	42.40
Sb	51.30	51.08	53.43	50.15	50.87	49.70	48.69	47.08
Bi	4.97	5.25	2.49	5.28	3.17	7.43	4.60	8.81
As	нпо	нпо	1.16	нпо	1.44	нпо	1.26	нпо
Сумма	99.69	99.86	102.77	98.98	100.29	100.81	97.96	98.29
Число атомов в формуле								
Au	0.995	1.00	1.00	1.01	1.01	1.005	1.005	1.005
Sb	1.895	1.89	1.885	1.875	1.84	1.835	1.81	1.80
Bi	0.11	0.11	0.05	0.115	0.065	0.16	0.10	0.195
As	—	—	0.065	—	0.085	—	0.075	—
Sb + Bi + As	2.005	2.00	2.00	1.99	1.99	1.995	1.995	1.995

Примечание. Pb, Ag, Se – не обнаружены.

Таблица 7. Химический состав (мас. %) висмутистого ауристибита жилы Пятой Электрической. Западный участок месторождения Дарасун**Table 7.** Chemical composition of the bismuth-bearing aurstibite (wt %) from the vein 5 “Elektricheskaya”, western part of Darasun deposit

Компонент	46	47	48	49	50	51	52	53
Au	43.16	42.70	42.62	42.73	42.39	42.61	41.21	40.55
Sb	48.17	47.35	47.87	47.59	47.09	47.21	41.52	39.54
Bi	9.09	9.21	9.33	9.49	9.57	9.83	16.51	17.79
As	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо	нпо
Сумма	100.42	99.26	99.82	99.81	99.05	99.65	99.24	97.88
Число атомов в формуле								
Au	1.00	1.005	0.995	1.00	1.00	1.00	1.00	1.005
Sb	1.800	1.795	1.80	1.79	1.79	1.785	1.625	1.58
Bi	0.20	0.20	0.205	0.21	0.21	0.215	0.375	0.415
As	—	—	—	—	—	—	—	—
Sb + Bi + As	2.00	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. Pb, Ag, Se – не обнаружены.

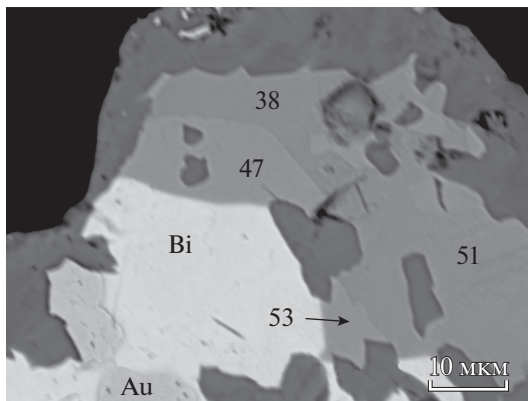


Рис. 12. Зональная псевдоморфоза богатого висмутом ауристибита (табл. 6, ан. 38; табл. 7, ан. 47, 51, 53) по мальдониту и продуктам его деструкции — беспримесным самородному золоту (Au) и самородному висмуту (Bi). Темно-серый — сурьмянистый висмутин. Изображение в отраженных электронах.

Fig. 12. Zonal pseudomorph of the rich-in-bismuth aurostibite (Table 6, an. 38; Table 7, an. 47, 51, 53) after maldonite and products of its destruction — fine gold (Au) and pure bismuth (Bi). Dark gray — antimony-bearing bismuthinite. BSE image.

мальдониту $\text{Au}_{0.995-1.01}(\text{Sb}_{1.785-1.895}\text{Bi}_{0.065-0.215}\text{As}_{0-0.085})_{1.99-2.005}$; средний состав минерала отвечает формуле $\text{Au}_{1.00}(\text{Sb}_{1.83}\text{Bi}_{0.155}\text{As}_{0.015})_{2.00}$ (табл. 6, 7). Вероятная реакция замещения мальдонита ауристибитом при воздействии поздних сурьмянистых гидротерм: $2\text{Au}_2\text{Bi} + 6\text{Sb p-p} + \text{Sb}_2\text{S}_3 \text{ p-p} \rightarrow 4\text{Au}(\text{Sb},\text{Bi})_2 + (\text{Bi},\text{Sb})_2\text{S}_3$. Эта реакция объясняет появление висмутина в составе дарасунской сурьмяной минерализации.

Ауристибит внутренних зон псевдоморфоз по продуктам распада мальдонита — самородным золоту и висмуту содержит рекордное количество — до 18 мас. % Bi (рис. 12, табл. 7, ан. 53). Состав такого ауристибита $\text{Au}_{1.00-1.005}(\text{Sb}_{1.58-1.625}\text{Bi}_{0.375-0.415})_{1.995-2.00}$; средний состав минерала отвечает формуле $\text{Au}_{1.00}(\text{Sb}_{1.605}\text{Bi}_{0.395})_{2.00}$ (табл. 7, ан. 52–53).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Орогенное вулканогенно-плутогенное березит-лиственитовое золото-сульфидно-кварцевое месторождение Дарасунское, размещенное в Восточно-Забайкальском сегменте мезозоид Монголо-Охотского складчатого пояса, включает золото-висмутую и послезолоторудную сурьмяную минерализацию. В рудах жил 4 и 5 Электрическая и Пирротиновая Западного участка месторождения, залегающих среди габброидов и гипербазитов, содержащих самородный висмут и икунолит, при образовании первой продуктивной минеральной ассоциации — при наложении золотоносных гидротерм возник обильный мальдонит Au_2Bi . В дальнейшем, при небольшом росте активности сульфидной серы в золотоносных гидротермах, часть мальдонита была замещена сростаниями беспримесных самородных золота и висмута. Далее, при значительном росте активности серы в золотоносных гидротермах, большая часть мальдонита была псевдоморфно замещена джонасонитом AuBi_5S_4 . В дарасунских рудах наблюдается прямое замещение мальдонита джонасонитом, вероятная реакция: $\text{Au}_2\text{Bi} + 5\text{Bi} + 2\text{Bi}_2\text{S}_3 + \text{S}_2 \text{ p-p} \rightarrow 2\text{AuBi}_5\text{S}_4$. Состав джонасонита варьирует от преобладающего в дарасунских рудах беспримесного AuBi_5S_4 до $\text{Au}(\text{Bi},\text{Pb})_5\text{S}_4$ с 1–6 мас. % Pb,

когда среди замещенных минералов присутствовали галенит или галеновисмутит. Таким образом, формула минерала джонасонита отвечает AuBi_5S_4 .

При наложении на описанные руды Sb минерализации с самородной сурьмой возникли псевдоморфозы аурустибита по минералам золота. Аурустибит псевдоморфоз по мальдониту содержит 4–10 мас. % Bi. Вероятная реакция замещения мальдонита аурустибитом: $2 \text{Au}_2\text{Bi} + 6 \text{Sb p-p} + \text{Sb}_2\text{S}_3 \text{ p-p} \rightarrow 4 \text{Au}(\text{Sb}, \text{Bi})_2 + (\text{Bi}, \text{Sb})_2\text{S}_3$. Аурустибит внутренних зон псевдоморфоз по продуктам распада мальдонита – самородным золоту и висмуту содержит рекордное количество – до 18 мас. % Bi.

Наличие в одних и тех же рудных жилах и, даже, в одних и тех же малого размера штуфах, минералов, возникших при крайне низкой активности сульфидной серы (самородный висмут, мальдонит, аурустибит), и минералов, возникших при весьма высокой активности серы (джонасонит), свидетельствует о весьма изменчивых условиях формирования вулканогенно-плутоногенного месторождения Дарасунское.

Изученные руды жил 4 и 5 Электрическая и Пирротиновая Западного участка Дарасуна содержат заметное количество минералов золота – мальдонита, джонасонита, аурустибита, которые не цианируются. Если схема переработки этих руд включает процесс цианирования, то такие руды после дробления и до цианирования необходимо обжигать на воздухе, чтобы избежать существенных потерь золота.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 19-05-00490) с использованием оборудования, приобретенного по программе развития Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Альшеевский А.В. Интерметаллиды золота – мальдонит и аурустибит из месторождений Северо-Востока России. В кн.: Проблемы геологии и металлогении Северо-Востока Азии на рубеже тысячелетий. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2001. С. 131–134.

Амосов Р.А. Отношение золота к серебру в рудах Западного участка Дарасунского месторождения // Тр. ЦНИГРИ. 1968. Вып. 79. С. 135–141.

Амузинский В.А., Анисимова Г.С., Жданов Ю.Я. Сарылахское и Сентачанское золото-сурьмяные месторождения: геология, минералогия, геохимия. М.: Наука, 2001. 218 с.

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., Соловьёв С.П., Успенский Н.М., Черных В.В., Шаталов Е.Т., Шафрановский И.И. Курс минералогии. М.-Л.: ОНТИ, 1936. 1056 с.

Гамянин Г.Н., Некрасов И.Я., Самусиков В.П. Мальдонит из золоторудных проявлений Восточной Якутии // Минерал. журнал. 1986. № 3. С. 65–71.

Громова Е.И., Завьялова Л.Л., Готов А.М. Находка редко встречающихся минералов золота (мальдонит, аурустибит) в рудах месторождения Зармитан (Чармитан) Западного Узбекистана // Зап. Узб. отд. ВМО. 1979. Вып. 31. С. 38–40.

Даниэльянц С.Е., Ляхов Ю.В. Новые данные об относительном возрасте лампрофиров и оруденения Дарасунского месторождения (Восточное Забайкалье) // Изв. ВУЗ. Геология и разведка. 1975. № 5. С. 94–103.

Даниэльянц С.Е., Эпов И.Н. Минеральные сообщества и последовательность их отложения в жилах Дарасунского месторождения. В кн.: Геология и методика оценки рудоносности Забайкалья. Иркутск: изд. Иркут. гос. ун-та, 1974. С. 46–59.

Зарайский Г.П. Зональность и условия образования метасоматических горных пород. М.: Наука, 1989. 341 с.

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

Зорин Ю.А., Беличенко В.Г., Рутштейн И.Г. Геодинамика западной части Монголо-Охотского пояса и тектоническая позиция рудных проявлений золота в Забайкалье // Геол. и геофиз. 1998. Т. 39. С. 1578–1586.

Зорина Л.Д. Рудно-магматические системы Забайкалья с латитовым магматизмом. В кн.: Современные проблемы теоретической и прикладной геохимии. Новосибирск: Наука, **1987**. С. 93–100.

Индолев Л.Н., Жданов Ю.Я. Ауростибит из золото-сурьмяных месторождений Якутии // ЗВМО. **1975**. Ч. 104. С. 586–588.

Крейтер В.М. Поиски и разведки полезных ископаемых. М.-Л.: Госгеоллиздат, **1940**. 790 с.

Кривицкая Н.Н., Брызгалов И.А., Спиридонов Э.М. Джонасонит AuBi_5S_4 — первая находка в Восточном Забайкалье // Докл. РАН. **2008**. Т. 420. № 2. С. 368–371.

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 / Ломоносовские чтения — 2019. Секция “Геология”, Москва, МГУ, 15–25 апреля **2019**.

Кривицкая Н.Н., Спиридонов Э.М., Брызгалов И.А., Санкин Ю.И. Генетическая минералогия золота вулканогенно-плутоногенного месторождения Дарасун (Забайкалье) / Тез. докл. Годичного собрания РМО. СПб, 9–11 октября 2012 г. СПб, **2012**. С. 145–147.

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.

Назымова Г.Н., Спиридонов Э.М., Шалаев Ю.С. Ауростибит месторождения Бестюбе в Северном Казахстане (первая находка в СССР) / Докл. АН СССР. **1975**. Т. 222. С. 687–689.

Петровская Н.В. Самородное золото. М.: Наука, **1973**. 348 с.

Прокофьев В.Ю., Зорина Л.Д. Флюидный режим Дарасунской рудно-магматической системы (Восточное Забайкалье) по данным исследования флюидных включений // Геол. и геофиз. **1996**. Т. 37. № 5. С. 50–61

Прокуронов П.В., Дрыжак Ю.И., Шкурский В.И. Первая находка мальдонита в СССР // ЗВМО. **1978**. Ч. 105. Вып. 4. С. 453–456.

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., Демидов В.Г. О соотношении золота и серебра на Дарасунском месторождении // Тр. Мин. музея АН СССР им. А.Е. Ферсмана. **1972**. Вып. 21. С. 127–132.

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.

Сахарова М.С., Кривицкая Н.Н., Спиридонов Э.М., Чвилёва Т.Н. Первая находка мальдонита в Сибири // Докл. АН СССР. **1983**. Т. 270. С. 960–962.

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. Новые данные по минералогии месторождений плутоногенной золото — кварцевой формации севера Центрального Казахстана. Ч. 2 // Тр. Минерал. музея РАН им. А.Е. Ферсмана. **2015**. Вып. 50. С. 69–82.

Спиридонов Э.М., Брызгалов И.А., Кривицкая Н.Н., Назымова 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: **2008а**. С. 155–158.

Спиридонов Э.М., Кривицкая Н.Н., Брызгалов И.А., Куликова И.М., Городецкая М.Д. Особенности строения агрегатов и состав карбонатов золоторудных жил Дарасунского вулканогенно-плутоногенного месторождения (Восточное Забайкалье) // Проблемы рудных месторождений, минералогии, петрологии и геохимии. М.: ИГЕМ РАН, **2008б**. С. 352–355.

Спиридонов Э.М., Кривицкая Н.Н., Брызгалов И.А., Кортаева Н.Н., Кочетова К.Н. Фюльепит $\text{Pb}_3\text{Sb}_8\text{S}_{15}$ из вулканогенно-плутоногенного месторождения золота Дарасун, Восточное Забайкалье // Вестник МГУ. Серия геол. **2020**. № 5. С. 71–76.

Спиридонов Э.М., Кривицкая Н.Н., Брызгалов И.А., Куликова И.М., Городецкая М.Д. Богатый висмутом ауростибит — продукт замещения мальдонита в вулканогенно-плутоногенном месторождении Дарасун (Восточное Забайкалье) // Докл. РАН. **2010**. Т. 435. С. 531–534.

Спиридонов Э.М., Назьмова Г.Н., Шалаев Ю.С., Шавкин Г.Н. Месторождение Бестюбе. В кн.: Геология золоторудных месторождений СССР. Т. II. Месторождения Средней Азии и Казахстана. М.: ЦНИГРИ, 1986. С. 32–43.

Суплецов В.М., Жданов Ю.Я. Типоморфные особенности золото-ауростибитового парагенезиса сурьмяных месторождений Восточной Якутии. В кн.: Редкие и самородные металлы и интерметаллиды коренных и россыпных месторождений Якутии. Якутск: Изд. ЯНЦ СО РАН, 1992. С. 20–39.

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

Туговик Г.А. Флюидно-эксплозивные структуры и их рудоносность. М.: Наука, 1984. 193 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.

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.

Maldonite and Products of Its Replacement: Pure Native Gold, Jonassonite, Bismuthic Aurostibite in Gold Ores of the Darasun Deposit (Eastern Transbaikalia)

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

^a*Moscow State University, Moscow, Russia*

^{*}*e-mail: ernstspiridon@gmail.com*

The Late Jurassic orogenic volcanogenic-plutonogenic gold ore deposit Darasun of bere-site-listvenite gold-sulphide-quartz formation is situated in Mesozooids of the Eastern Transbaikalian segment of the Mongolo-Okhotsk folded belt. The deposit holds Au–Bi–Te and postgold Sb mineralization. The western part of the deposit is composed of gabbroids, gabbro-amphibolites and, lesser, ultrabasites containing carbonate-quartz-sulfide veins surrounded by listvenite halos. Rich gold ores were formed there under the low aS_2 conditions, they are enriched in pyrrhotite, contain bismuthine and/or Pb–Bi sulphosalts and, someplace, rare nests of native bismuth and ikonolite Bi_4S_3 . The high fineness gold (970–925) associates with bismuthinite and Pb–Bi sulphosalts. Instead of native gold, in nests of native bismuth and ikonolite there are high concentrations of maldonite Au_2Bi – the mineral free of Ag. Under conditions of the aS_2 increase in hydrotherms maldonite was replaced by intergrowths of pure native gold, pure native bismuth and bismuthinite. With the further aS_2 elevation in gold-bearing hydrotherms, maldonite was massively replaced by jonassonite. Thus, the direct replacement of maldonite by jonassonite is observed in Darasun ores, as result of the probable reaction: $Au_2Bi + 5 Bi + 2 Bi_2S_3 + S_{2sol} \rightarrow 2 AuBi_5S_4$. The composition of jonassonite varies from the pure $AuBi_5S_4$, most abundant in Darasun ores, to $Au (Bi, Pb)_5S_4$ with 1–6 wt. % Pb, in the case when galena and plumbobismutite were present among replaced minerals. Therefore, the jonassonite formula is $AuBi_5S_4$. Aurostibite pseudomorphs after above named gold minerals appeared in such ores due to overlaying Sb mineralization with native Sb. Aurostibite pseudomorphs, formed after maldonite, contains 4–10 wt. % Bi. The probable reaction of aurostibite replacing maldonite is: $2 Au_2Bi + 6 Sb_{sol} + Sb_2S_{3sol} \rightarrow 4 Au (Sb, Bi)_2 + (Bi, Sb)_2S_3$. Aurostibite contains up to 18 wt % Bi within central zones of pseudomorphs, formed after maldonite decomposition products – pure native gold and pure native bismuth.

Keywords: maldonite, pure native gold, jonassonite, Bi-rich aurostibite, volcanogenic-plutonogenic Darasun deposit

REFERENCES

- Al'shevsky A.V. Intermetallides of native gold—maldonite and aurostibite from deposits of the Nord-East of Russia. In: *Problems of geology and metallogeny of the Nord-East of Asia at millennium boundary*. Magadan: SVKNII Far East Branch RAS, DVO RAS, **2001**. P. 131–134 (in Russian).
- Amosov R.A. The Au/Ag ratio in ores of Western Part of the Darasun deposit. *Proc. TSNIGRI*. **1968**. Vol. 79. P. 135–141 (in Russian).
- Amuzinsky V.A., Anisimova G.S., Zhdanov Yu.Ya. Sarylakh and Sentachan Au-Sb deposits: geology, mineralogy, and geochemistry. Moscow: Nauka, **2001**. 218 p. (in Russian).
- Ashley P.M., Cook N.D.J., Hill R.L. Occurrence and significance of aurostibite in Sb–Au ore from Hillgrove, New South Wales, Australia. *Neues Jahrb. Mineral. Monat.* **1990**. S. 537–551.
- 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.
- Birch W.D., Ciobanu C.L. Maldonite from the type locality, Maldon, Victoria, Australia: a new investigation of its occurrence. *Austral. J. Miner.* **2009**. Vol. 15. P. 25–38.
- 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., Solov'ev S.P., Uspensky N.M., Chernykh V.V., Shatalov E.T., Shavranovsky I.I. Course of mineralogy. Moscow–Leningrad: ONTI, **1936**. 1056 p. (in Russian).
- Boyer F., Picot P. Sur la présence de maldonite (Au₂Bi) à Salsigne (Aude). *Bull. Minéral. Année*. **1963**. Vol. 86(4). P. 429–429.
- 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 porphyry and beresite from the Darasun gold field, eastern Transbaikalia region, Russia. *Geol. Ore Deposits*. **2014**. Vol. 56. P. 1–14.
- Daniel'yants S.E., Lyakhov Yu.V. New data about relative age of the lamprophyres and ores in the Darasun deposit (East Transbaikalia). *Proc. Higher Educat. Establ. Geol. Explor.* **1975**. N 5. P. 94–103 (in Russian).
- Daniel'yants S.E., Epov I.N. Mineral assemblages and sequence of their depositions in veins of the Darasun deposit. In: *Geology and methodology for evaluation of ore content of Transbaikalia*. Irkutsk: Irkutsk State University, **1974**. P. 46–59 (in Russian).
- Dill H.G., Weiser T., Bernhardt I.R. The composite gold-antimony deposit at Kharma (Bolivia). *Econ. Geol.* **1995**. Vol. 90. P. 51–66.
- Dobosi G., Nagy B. The occurrence of an Au-Bi sulphide in the Nagyörzsöny hydrothermal ore deposit, northern Hungary. *Neues Jahrb. Mineral. Monatsh.* **1989**. S. 8–14.
- Filimonova A.A. Description of the Darasun deposit. In: *Structural and textural features of endogenic ores*. Moscow: Nedra, **1964**. P. 419–437 (in Russian).
- Fogel'man N.A. Tectonics 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).
- Gamyanin G.N., Nekrasov I.Ya., Samusikov V.P. Maldonite from gold deposits at Eastern Yakutia. *Miner. J.* **1986**. N 3. P. 65–71 (in Russian).
- Graham A.R., Kaiman S. Aurostibite, AuSb₂: a new mineral in the pyrite group. *Amer. Miner.* **1952**. Vol. 37. P. 461–469.
- Gromova E.I., Zav'yalov L.L., Glotov A.M. Maldonite and aurostibite from the Zarmitan deposit, Western Uzbekistan. *Proc. Uzbekistan Branch. Al-Union Miner. Soc.* **1979**. Vol. 31. P. 38–40 (in Russian).
- Hytonen K. Suomen Mineraalit. Geologian Tutkimuskeskus. Erillisjulkaisien, **1999**. 399 s.
- Indolev L.N., Zhdanov Yu.Ya. Aurostibite from Au-Sb deposits at Yakutia. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1975**. Vol. 104. P. 586–588 (in Russian).
- Kreiter V.M. Search and prospecting of minerals. Moscow-Leningrad: Gosgeolizdat, **1940**. 790 p. (in Russian).
- Krivitskaya N.N., Bryzgalov I.A., Spiridonov E.M. First find of jonassonite AuBi₅S₄ in Eastern Transbaikalia. *Doklady Earth Sci.* **2008**. Vol. 420. N 2. P. 368–371.
- Krivitskaya N.N., Bryzgalov I.A., Spiridonov E.M., Kochetova K.N. Post-gold As-Sb mineralization at the western part of the Darasun volcanogenic-pluronogenic deposit, Eastern Transbaikalia. In: *Lomonosov readings – 2019*. Sec. Geol, Moscow, Moscow State University, April 15–25, **2019** (in Russian).
- Krivitskaya N.N., Spiridonov E.M., Bryzgalov I.A., Sankin Yu.I. Genetic mineralogy of gold in the volcanogenic–plutonogenic Darasun deposit, Transbaikalia. In: *Proc. Annual Meet. Russian Miner. Soc.* Saint Petersburg, October 9–11, 2012. Saint Petersburg, **2012**. P. 145–147 (in Russian).

Lyakhov Yu.V., Dmitriev L.K. Physical and chemical conditions of mineral formation at the Darasun gold deposit (Eastern Transbaikalia) by inclusions in minerals. Pt. 1 and 2. *Miner. Misc. Lvov Univ.* **1975**. N 29. Iss. 3. P. 48–56. Iss. 4. P. 17–22. (in Russian).

Naz'mova G.N., Spiridonov E.M., Schalaev Yu.S. Aurostibite from the Bestube deposit, Northern Kazakhstan (first find in USSR). *Doklady Earth Sci.* **1975**. Vol. 222. P. 687–689 (in Russian).

Ortega L., Oyarzun R., Gallego M. The Mari Rosa late Hercynian Sb–Au deposit, Western Spain: Geology and geochemistry of the mineralizing processes. *Miner. Deposita*. **1996**. Vol. 31. N 3. P. 172–187.

Paar W.H., Putz H., Topa D., Roberts A.C., Culetto F.J. Jonassonite, $\text{Au}(\text{Bi}, \text{Pb})_5\text{S}_4$, a new mineral species from Nagyörzsöny, Hungary. *Canad. Miner.* **2006**. Vol. 44. P. 1127–1136.

Petrovskaya N.V. Native gold. Moscow: Nauka, **1973**. 348 p.

Pianton P., Wu X., Touray J.-C. Zoned hydrothermal alteration and genesis of the gold deposit at Le Châtelet (French Massif Central). *Econ. Geol.* **1994**. Vol. 89. P. 757–777.

Prokofiev V.Yu., Zorina L.D. Fluid regime of the Darasun ore-magmatic system (Eastern Transbaikalia) according to the study of fluid inclusions. *Russian Geol. Geophys.* **1996**. Vol. 37. N 5. P. 50–61 (in Russian).

Prokuronov P.V., Dryzhak Yu.I., Shkursky V.I. The first find of maldonite in the USSR. *Zapiski VMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1978**. N. 4. P. 453–456.

Ramdohr P. The ore minerals and their intergrowths. Pergamon Press, **1982**. 1207 p.

Sakharova M.S. Stages of ore formation processes and the issue of zoning at the Darasun gold deposit. In: *Ore formation and its connection with magmatism*. Moscow: Nauka, **1972**. P. 213–222 (in Russian).

Sakharova M.S., Demidov V.G. On the ratio of gold and silver at the Darasun deposit. *Proc. Fersman Miner. Museum RAS*. **1972**. Vol. 21. P. 127–132 (in Russian).

Sakharova M.S., Krivitskaya N.N. On the discovery of williamite and breithauptite in Transbaikalia. *Dokl. USSR Acad. Sci.* **1970a**. Vol. 193. N 3. P. 687–689 (in Russian).

Sakharova M.S., Krivitskaya N.N. About chalcostibite of the Darasun deposit. *Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.)*. **1970b**. N 3. P. 340–344 (in Russian).

Sakharova M.S., Krivitskaya N.N., Spiridonov E.M., Chvilyova T.N. The first find of maldonite in Siberia. *Dokl. USSR Acad. Sci.* **1983**. Vol. 270. P. 960–962 (in Russian).

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

Spiridonov E.M. New data on the mineralogy of plutonogenic gold-quartz formation deposits in the north of Central Kazakhstan. Vol. 2. *Proc. Fersman Miner. Museum RAS*. **2015**. N 50. P. 69–82 (in Russian).

Spiridonov E.M., Bryzgalov I.A., Krivitskaya N.N., Naz'mova, Ryakhovskaya S.K., Filimonov S.V. Mineral associations of hydrothermal plutonogenic, volcanogenic-plutonogenic, volcanogenic, telethermal gold deposits. In: *Gold at northern periphery of Pacific*. Magadan: **2008a**. P. 155–158 (in Russian).

Spiridonov E.M., Krivitskaya N.N., Bryzgalov I.A., Kulikova I.M., Gorodetskaya M.D. Texture of aggregates and composition of carbonates in gold-bearing veins at the volcanogenic-plutonogenic Darasun deposit, East Transbaikalia. In: *Problems of ore deposits, mineralogy, petrology, and geochemistry*. Moscow: Inst. Geol. Ore Deposits Petrogr. Miner. Geochem RAS, **2008b**. P. 352–355 (in Russian).

Spiridonov E.M., Krivitskaya N.N., Bryzgalov I.A., Korotaeva N.N., Kochetova K.N. Fülöppite $\text{Pb}_3\text{Sb}_8\text{S}_{15}$ from the volcanogenic-plutonogenic Darasun gold deposit, East Transbaikalia. *Vestnik Moscow State Univers. Ser. Geology*. **2020**. N 5. P. 71–76 (in Russian).

Spiridonov E.M., Krivitskaya N.N., Bryzgalov I.A., Kulikova I.M., Gorodetskaya M.D. Bi-rich aurostibite as the product of replacement of maldonite at the volcanogenic-plutonogenic Darasun deposit, East Transbaikalia. *Doklady Earth Sci.* **2010**. Vol. 435. P. 531–534.

Spiridonov E.M., Naz'mova, Schalaev Yu.S., Schavkin G.N. Bestube deposit. In: *Geology of gold deposits in the USSR. Vol. II. Deposits at Central Asia and Kazakhstan*. Moscow: TSNIGRI, **1986**. P. 32–43 (in Russian).

Supletsov V.M., Zhdanov Yu. Ya. Typomorphic features of gold-aurostibite paragenesis in stibium deposits at East Yakutia. In: *Rare and native metals and intermetallics in primary and placer deposits of Yakutia*. Yakutsk: Yakut. Sci. Centre Siberian Branch RAS, **1992**. P. 20–39 (in Russian).

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

Tugovik G.A. Fluid-explosion structures and their ore content. Moscow: Nauka, **1984**. 193 p. (in Russian).

Ulrich G.H.F. Maldonite or bismuthic gold. In: *Contributions to the Mineralogy of Victoria*. Melbourne: John Ferres. **1870**. P. 1–32.

Zaraisky G.P. Zoning and formation conditions of metasomatic rocks. Moscow: Nauka, **1989**. 341 p. (in Russian).

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

Zorin Yu.A., Belichenko V.G., Rutschtein I.G. Geodynamics of western part of the Mongolo-Okhotsky belt and the tectonic position of gold ore deposits at Transbaikalia. *Russian Geol. Geophys.* **1998**. Vol. 39. P. 1578–1586.

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