

УДК: 549+235.47

DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-3-4

**ДЖОНАССОНИТ ИЗ БЕЛОГОРСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
(СИХОТЭ-АЛИНЬ)****Е.В. Перевозникова, В.Т. Казаченко, П.П. Сафронов***Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, пр. 100-летия Владивостока 159,
г. Владивосток, 690022 Россия; elenavalper@yandex.ru*

Статья поступила в редакцию 22.12.2021 г., принята к печати 29.07.2022 г.

JONASSONITE FROM THE BELOGORSKOE IRON DEPOSIT (SIKHOTE-ALIN)**E.V. Perevznikova, V.T. Kazachenko, P.P. Safronov***Far East Geological Institute FEB RAS, pr. 100-letiya Vladivostoka 159, Vladivostok, 690022 Russia;
elenavalper@yandex.ru*

Received 22.12.2021, accepted 29.07.2022

Аннотация. В статье охарактеризован редкий золото-висмутовый сульфид джонассонит из Белогорского железорудного месторождения (Сихотэ-Алинь), залежи которого сложены металлоносными осадками, преобразованными в результате контактового метаморфизма ($T \sim 550$ °C, $P_{\text{лит}} \sim 1.5$ кбар) и поздних гидротермальных процессов (T 350–415 и 271 °C или несколько ниже). Джонассонит встречается в составе продуктов гидротермального изменения метаморфической бустамит-андрадитовой (с небольшим количеством Mn-содержащего геденбергита, шеелита, лёллингита и барита) породы, сложенных кальцитом, флюоритом, самородным висмутом, висмутином, жозеитом А, неназванным соединением AgBiS_2 , козалитом, Mo-содержащим шеелитом, повеллитом, молибденитом и другими минералами. Джонассонит сростается с ксеноморфными агрегатами кальцита в андрадите и образует отдельные зерна с сечениями ($\sim 5 \times 7$ мкм), близкими к эллипсу. Джонассонит содержит до 2.29 мас. % Те, скорее всего, изоморфно замещающего S. Он образовался при температуре, не превышавшей 271 °C, в процессе гидротермального изменения метаморфических минеральных ассоциаций.

Ключевые слова: джонассонит, висмутовая минерализация, магнетитовое месторождение, Таухинский террейн, Сихотэ-Алинь.

Abstract. The paper describes a rare Au–Bi sulfide (jonassonite) from the Belogorskoe iron deposit (Sikhote-Alin), the ore bodies of which are composed of metalliferous sediments that underwent contact metamorphism ($T \sim 550$ °C, $P_{\text{lithostatic}} \sim 1.5$ kbar) and late hydrothermal processes (T 350–415 and 271 °C or slightly lower). Jonassonite is found in products of hydrothermal alteration of metamorphic bustamite-andradite (with a low amount of Mn-bearing hedenbergite, scheelite, lollingite and baryte) rocks composed of calcite, fluorite, native bismuth, bismuthinite, joseite A, an unnamed AgBiS_2 phase, cosalite, Mo-bearing scheelite, povellite-molybdenite and other minerals. Jonassonite is intergrown with anhedral calcite aggregates in andradite and forms grains with sections ($\sim 5 \times 7$ μm) close to ellipsoid shape. The mineral contains up to 2.29 wt. % Te, which most likely isomorphically substitutes S. Jonassonite formed at a temperature not exceeding 271 °C during hydrothermal alteration of metamorphic mineral assemblages.

Keywords: jonassonite, Bi mineralization, magnetite deposit, Taukha Terrane, Sikhote-Alin.

Для цитирования: Перевозникова Е.В., Казаченко В.Т., Сафронов П.П. Джонассонит из Белогорского железорудного месторождения (Сихотэ-Алинь). Минералогия, **8**(3), 67–78. DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-3-4

For citation: Perevznikova E.V., Kazachenko V.T., Safronov P.P. Jonassonite from the Belogorskoe iron deposit (Sikhote-Alin). Mineralogy, **8**(3), 67–78. DOI: 10.35597/2313-545X-2022-8-3-4.

Введение

Джонассонит вместе с другими минералами висмута и благородных металлов впервые обнаружен в залежах Белогорского магнетитового месторождения на юге Сихотэ-Алиня (рис. 1). Краткие сведения о джонассоните приведены в предыдущей публикации авторов, посвященной висмутовой минерализации Белогорского месторождения (Казаченко, Перевозникова, 2022). В данной статье подробно охарактеризованы химический состав, ассоциации и происхождение редкого сульфида Bi и Au .

Ассоциации минералов золота и висмута привлекают значительное внимание, т. к. важны для понимания процессов ремобилизации и осаждения золота при формировании месторождений (Spooner, 1993; Marcoux et al., 1996; Meinert, 2000). Они найдены в золоторудных плутогенных (McCoу, 2000) и эпитермальных порфировых (Cook, Ciobanu, 2004) месторождениях, современных океанических залежах сульфидов (Törmänen, Koski, 2005), железорудных (Ciobanu et al., 2003) и золоторудных (Cepedal et al., 2006 и др.) скарнах, золоторудных месторождениях зеленокаменных поясов (Oberthür, Weiser, 2008 и др.) и в других геологических образованиях. Ключевыми минералами в таких ассоциациях являются общие соединения этих элементов – джонассонит AuBi_5S_4 и мальдонит Au_2Bi (Ciobanu et al., 2010). Изучение взаимоотношений между золотосодержащими и висмутовыми минералами, текстурных и структурных особенностей руд, фазовых равновесий в природных образцах для системы Au-Bi-Te-S , а также распределения элементов между сосуществующими висмут- и золотосодержащими фазами могут быть использованы для создания генетических моделей золоторудных месторождений (Ciobanu et al., 2010).

Впервые минерал с химическим составом, почти точно соответствующим теоретическому составу джонассонита, обнаружен на золоторудном месторождении Цугахира (*Tsugahira*) в юго-западной Японии (Hamasaki et al., 1986). Его характеристика была недостаточно полной для утверждения нового минерала из-за малых размеров зерна и отсутствия результатов структурных исследований. В последующие годы было описано более десятка находок сходного по составу минерала Au , Bi и S (Некрасов и др., 1988; Павлова, Котельников, 1988; Lehrberger et al., 1990; Jouhari et al., 1999; Stegman, 2000, 2001; Oudin et al., 1988; Dobosi, Nagy, 1989), в том числе – составы с существенным содержани-

ем Pb . Однако из-за малых размеров зерен и сложных сростаний с другими рудными минералами они тоже не были в должной мере охарактеризованы. Гораздо более крупные зерна подобной фазы сечением до 500×150 мкм, содержащие включения самородного висмута, икунолита и висмутина, были обнаружены позднее в рудах месторождения Нагибёрцёни (*Nagybörzsöny*) в Венгрии. Их изучение позволило (Paar et al., 2006) утвердить новый минеральный вид джонассонит с формулой AuBi_5S_4 . После этого джонассонит был обнаружен на золоторудном месторождении Мальдон в Австралии, в основной медной жиле рудного района Хайис в Румынии (Ciobanu et al., 2006), золотодобывающем руднике Вайсрой (*Viceroy*) в Зимбабве (Oberthür, Weiser, 2008) и в некоторых других проявлениях. В России джонассонит известен в золотосодержащих рудах Якутии (описан в качестве неназванного минерала) (Некрасов и др., 1988), Восточного Забайкалья (месторождение Дарасун) (Кривицкая и др., 2008) и Центрально-Колымского региона Северо-Востока России (Альшевский, 2009).

Региональная позиция, геологическое строение и генетические особенности месторождения

Белогорское месторождение расположено в Ольгинском рудном районе Таухинского террейна (рис. 1). На площади района распространены позднемеловые-палеогеновые вулканогенные образования и гранитоиды Восточно-Сихотэ-Алинского интрузивно-вулканогенного пояса, среди которых в виде останцов, тектонических блоков и «эрозийных окон» обнажаются палеозойские (девон-карбон), триасовые, юрские и раннемеловые осадочные породы. Восточная и северо-восточная части Ольгинского района сложены гранитоидами Владимирского батолита, возраст которых составляет 67.9 млн лет (Сахно и др., 2010) или 64–71 млн лет (Jahn et al., 2015). Осадочные породы присутствуют в виде крупных блоков рифогенных известняков, дислоцированных кремнистых и кремнисто-глинистых пород с возрастным интервалом от позднего девона до позднего карбона (Кемкин, 2003) и фрагментов триасовой кремневой формации, заключенных в терригенном матриксе меланжевого комплекса позднеюрской-раннемеловой аккреционной призм. В совокупности они образуют прерывистую полосу шириной 4–9 км, протягивающуюся в северо-восточном направлении через всю площадь. Осадочные породы смяты



Рис. 1. Схема геологического строения фрагмента Ольгинского рудного района, по (Геологическое..., 1981ф) с изменениями и дополнениями.

1 – четвертичные отложения; 2 – палеоцен, богопольский вулканический комплекс, риолиты, риодациты и их туфы; 3, 4 – поздний мел: 3 – приморский вулканический комплекс (турон-сантон), туфы и туфопесчаники риолитов, риодацитов, 4 – синанчинская свита (сеноман), андезиты, андезибазальты и их туфы; 5 – ранний мел (?): песчаниковая толща; 6 – юра (J2–3): алевролиты, туффиты, кремнистые породы, кремнисто-глинистые сланцы, песчаники; 7 – триас (T2–3): терригенно-кремнистая толща; 8 – палеозой (D3–C3), известняки, глинистые сланцы, песчаники; 9–11 – палеоцен, богопольский plutonic complex, дайки диоритов, андезитов, базальтов (9), дайки (10) и экструзии (11) риолитов, риодацитов, гранит-порфиров; 12 – маастрихт-дат, граниты Владимирского массива; 13–16 – турон-сантон, приморский plutonic complex: 13 – дайки риолитов, аплитов и пегматитов, 14–16 – субвулканические интрузии диоритов (14), габбродиоритов (15), дацитов (16); 17 – разломы установленные (а) и предполагаемые (б); 18 – направление и угол падения геологических границ; 19 – скарново-магнетитовые месторождения; 20 (на врезке) – площадь Белогорского месторождения.

Fig. 1. Schematic geological map of a fragment of the Olginsky ore district, simplified after (Geological..., 1981f).

1 – Quaternary sediments; 2 – Paleocene Bogopolsky volcanic complex, rhyolite, rhyodacite, rhyolitic and rhyodacitic tuff; 3, 4 – Late Cretaceous: 3 – Turonian–Santonian Primorsky volcanic complex, rhyolitic and rhyodacitic tuff and tuffstone, 4 – Cenomanian Sinancha Formation, andesite, basaltic andesite, their tuff; 5 – Early Cretaceous (?), sandstone sequence; 6 – Middle–Upper Jurassic: siltstone, tuffite, chert, siliceous shale, sandstone; 7 – Middle–Upper Triassic: terrigenous-siliceous sequence; 8 – Paleozoic (Upper Devonian–Upper Cretaceous), limestone, shale, sandstone; 9–11 – Paleocene Bogopolsky plutonic complex: dikes of diorite, andesite, basalt (9); dikes (10) and extrusions (11) of rhyolite, dacitic rhyolite, granite porphyry; 12 – granite of the Maastrichtian–Danian Vladimirsky pluton; 13–16 – Turonian–Santonian Primorsky plutonic complex: 13 – dikes of rhyolite, aplite and pegmatite, 14–16 – subvolcanic intrusions of diorite (14), gabbrodiorite (15), dacite (16); 17 – faults: proved (a), inferred (b); 18 – direction and dip angle of geological boundaries; 19 – skarn magnetite deposits; 20 (inset) – the area of the Belogorsk deposit.

в асимметричные складки северо-восточного простирания, осложненные надвигами и разломами других типов.

Белогорское месторождение приурочено к контакту блока среднекаменноугольных рифоген-

ных известняков (Кемкин, 2003) и Владимирского гранитоидного массива, осложненному субмеридиональным тектоническим нарушением (рис. 2). Месторождение состоит из четырех линзовидных залежей – Маргаритовской, Белогорской,

Благодатной и Скальной. На площади месторождения распространены дайки метабазальтов, а также диоритов, дацитов и риолитов, предположительно, приморского интрузивного комплекса (турон-сантон).

Благодатная, Маргаритовская и Белогорская залежи сложены гранатом, магнетитом, апатитом, Mn-содержащим пироксеном диопсид-геденбергитового ряда, бустамитом, везувианом, амфиболом, кальцитом, кварцем, флюоритом и другими минералами (Казаченко и др., 2011). Залежи имеют неоднородное строение, выраженное в вариациях количественных соотношений главных минералов – андрадита и магнетита, поэтому в залежах различимы блоки гранатовых, магнетит-гранатовых, гранат-магнетитовых и магнетитовых пород (руд) с постепенными переходами друг в друга. С изменением относительного количества граната и магнетита меняются текстурные особенности, степень развития кальцита, флюорита и других минералов, а также взаимоотношения граната и магнетита (Казаченко и др., 2011).

Гранатовая порода массивной текстуры сложена андрадитом. Магнетит-гранатовая порода имеет бурундучную текстуру. Нередко полосы магнетита прерываются и текстура становится ячеистой. Для некоторых участков породы характерно проникновение магнетита в полосы андрадита и, наоборот, в виде многочисленных просечек, ответвляющихся от андрадитовых и магнетитовых полос, а также присутствие маломощных прожилков и зон андрадит-карбонатного состава, пересекающих текстурный узор породы. В таких участках присутствуют многочисленные гнезда крупнокристаллического кальцита, содержащие редкие, иногда очень крупные (до 5 см) кристаллы магнетита и андрадита, а также флюорит, сфалерит и другие минералы, и резко возрастает количество магнетита. Гранат-магнетитовая руда сложена, главным образом, массивным магнетитом, содержащим многочисленные маломощные, различно ориентированные и быстро выклинивающиеся прожилки, просечки и линзообразные зоны андрадит-карбонатного (иногда с флюоритом) состава. От магнетит-гранатовой породы она отличается большим количеством андрадит-карбонатных прожилков. В прожилках, по сравнению с аналогичными образованиями магнетит-гранатовой породы, возрастает роль карбоната, а гранат несет признаки растворения. В гранат-магнетитовых породах значительно возрастает количество карбонатных гнезд.

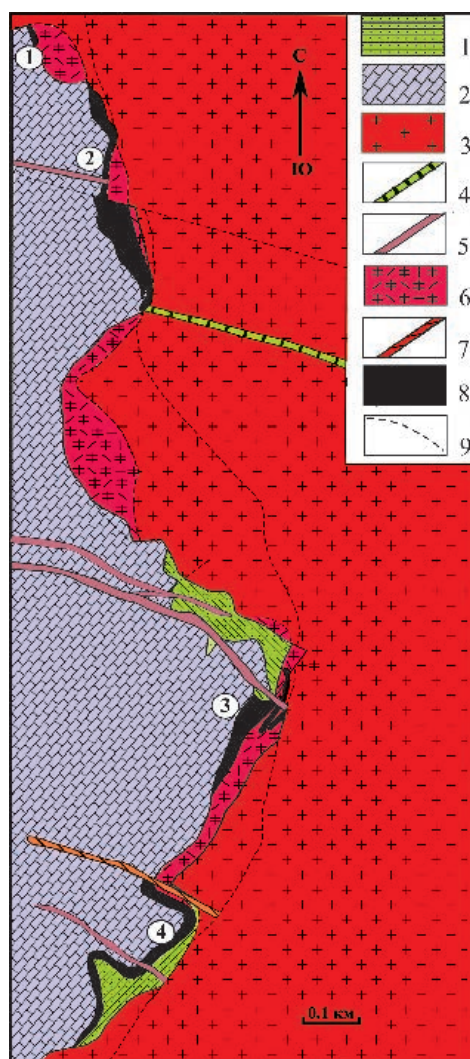


Рис. 2. Схема геологического строения Белогорского месторождения, по (Бурдюгов, 1945ф) с упрощениями.

1 – раннемеловые (?) песчаники; 2 – известняки среднекаменноугольного возраста; 3 – позднемеловые-палеогеновые граниты Владимирского массива; 4–7 – дайки метабазальтов (4), диоритов (5), дацитов (6), риолитов (7); 8 – скарны; 9 – тектонические нарушения. Цифры 1–4 на рисунке – рудные залежи Скальная (1), Благодатная (2), Белогорская (3) и Маргаритовская (4).

Fig. 2. Schematic geological map of the Belogorskoe deposit, simplified after (Burdyugov, 1945f).

1 – Early Cretaceous (?) sandstone; 2 – Middle Carboniferous limestone; 3 – Late Cretaceous–Paleogene granite of the Vladimirsii pluton; 4–7 dikes of metabasalt (4), diorite (5), dacite (6), rhyolite (7); 8 – skarn; 9 – faults. Numbers 1–4 in map – Skalnaya (1), Blagodatnaya (2), Belogorskaya (3), and Margaritovskaya (4) ore bodies.

Магнетитовая руда слагает блоки, состоящие из массивного магнетита с пустотами выщелачивания граната, имеющими форму прожилков, линз или просечек, содержащими реликты этого минера-

ла и полностью или частично заполненными карбонатом (иногда с флюоритом). От гранат-магнетитовой магнетитовая руда отличается меньшей ролью андрадита; она также иногда содержит амфибол, флюорит, сфалерит или родонит. Магнетитовой руде свойственно наибольшее количество карбонатных гнезд и значительное возрастание их размеров (до 1×1 м и более). В карбонатных гнездах присутствуют обособления бесцветного крупнокристаллического флюорита размером до 30×30 см и более, просечки сфалерита мощностью до 1–2 см, приуроченные к плоскостям спайности в карбонате. На отдельных участках многочисленные просечки сфалерита образуют сетчатую текстуру. Вблизи контактов с магнетитовой рудой в карбонатных гнездах присутствуют манганактинолитовые или манганактинолит-родонитовые участки. В родоните иногда встречаются просечки и гнезда молибденита и висмутовых минералов.

Рудные тела обогащены Mn, P, Zn, Cd, Sn, W, Bi, Mo, Ni, Co и благородными металлами (Перевозникова, Казаченко, 2019) и содержат разнообразные минералы Bi, Au, Ag, Pt и Pd. По результатам анализа проб атомно-абсорбционным методом содержания Au, Pt и Pd, достигают 0.91, 1.54 и 2.35 г/т, соответственно.

Рудные залежи Белогорского месторождения представляют собой метаморфизованные и гидротермально измененные богатые Ca силикатно-железистые осадки триасового возраста (Казаченко и др., 2015). Наиболее ранними образованиями Благодатной, Белогорской и Маргаритовской залежей, возникшими в результате контактового метаморфизма в поздне меловое-палеогеновое время при внедрении Владимирского гранитоидного батолита, являются массивные андрадитовые и «бурундучные» магнетит-андрадитовые породы и руды с небольшим количеством марганцовистого пироксена диопсид-геденбергитового ряда, бустамита или везувиана. В качестве аксессуарных они содержат циркон, бадделейт, торианит, торит и минералы ряда ильменит-пирофанит. Присутствуют также рутил, барит, вольфрамит и шеелит. Встречаются члены кобальтин-герсдорфитового изоморфного ряда, леллингит и арсенопирит. Температура контактового метаморфизма залежей Белогорского месторождения приблизительно оценивается в 550°C при литостатическом давлении около 1.5 кбар (Казаченко, 2002).

Андрадитовые и магнетит-андрадитовые породы и руды содержат признаки постмагматических

гидротермальных преобразований. Наиболее ранними и наиболее высокотемпературными продуктами гидротермальных изменений являются манганактинолитовые или манганактинолит-родонитовые участки, образовавшиеся при температуре $350\text{--}415^\circ\text{C}$. Основным результатом гидротермальных изменений являлось замещение андрадита магнетитом с возникновением в наиболее переработанных участках многочисленных существенно карбонатных (с флюоритом и реликтовым андрадитом) прожилков, блоков существенно магнетитового состава и гнезд, сложенных главным образом крупнокристаллическим кальцитом и в меньшей мере флюоритом (Казаченко, 2002). Температура или, возможно, нижний температурный предел образования кальцитовых гнезд, судя по присутствию в них самородного висмута, составляла около 270°C или несколько ниже. Главной особенностью процесса гидротермального преобразования метаморфических пород и руд являлось разложение андрадита, F-содержащих и других ранних минералов и высвобождение Fe, Ca, Si, Mn, Sn (из андрадита), Zn (из пироксена) и некоторых других элементов. Железо и Sn почти полностью фиксировались на месте в виде магнетита и касситерита. Кальций, Mn, Zn и другие элементы (Au, Ag, Bi, Pb, Mo, W) локально мигрировали и отлагались в различных минеральных формах в составе секущих андрадит-кальцитовых (с флюоритом) прожилков и манганактинолит-родонитовых и существенно кальцитовых гнезд (Казаченко и др., 2011). Образование кальцитовых гнезд в составе магнетитовых блоков компенсировало дефицит объема, возникавшего при замещении граната магнетитом, сопровождавшегося выносом Si. Определяющую роль в образовании карбонатных гнезд играли летучие компоненты (O_2 , CO_2 , F_2 и S_2), связывавшие такие элементы, как Ca, Mn, Zn, Bi, Ag, Pb и Mo в карбонатной, фторидной или сульфидной минеральных формах.

Краткая характеристика минералогии висмута Белогорского месторождения

Висмутовая минерализация Белогорского месторождения представлена большой группой эндогенных и экзогенных минералов (Казаченко, Перевозникова, 2022). Эндогенные висмутовые минералы представлены самородным висмутом, висмутином, жозеитом-А, козалитом, гладитом, галенобисмутитом, соединениями Bi_2Te и большой группой неназванных соединений: BiS , (Bi, Ag)

(S,Te), $\text{Bi}_5\text{Te}_2\text{S}_3$, Bi_3S_4 , $(\text{Pb,Ag})\text{BiS}_2$, Bi_6Te , Bi_5Te и Bi_4Te . Широко распространены экзогенные кислородсодержащие минералы Bi: бисмит, бисмутит, бисмоклит, добреит, заварицкит и прайзингерит, заместившие эндогенные висмутовые минералы и слагающие совместно с реликтовым кальцитом мелкие гнезда, или выполняющие микротрещины в андрадите.

Эндогенные висмутовые минералы встречаются во всех залежах Белогорского месторождения в продуктах средне-низкотемпературного гидротермального преобразования ранних ассоциаций. В Белогорской, Благодатной и Маргаритовской залежах в виде мелких выделений они присутствуют в извилистых андрадит-кальцитовых прожилках (с флюоритом и иногда родонитом), пересекающих андрадитовые породы и магнетит-андрадитовые руды. Основное количество висмутовых минералов в залежах представлено скоплениями отдельных относительно крупных (диаметром десятки–сотни микрометров) ксеноморфных зерен и кристаллов или их агрегатов, главным образом, в кальцитовых гнездах (название гнезд здесь и ниже дается по резко преобладающему минералу – кальциту): в кальците и флюорите или на контакте кальцита и флюорита с андрадитом. В кальците и флюорите они встречаются в виде самостоятельных ксеноморфных зерен, кристаллов и сростаний друг с другом, сфалеритом и галенитом или удлиненных участков вдоль плоскостей спайности кальцита и флюорита. Висмутовые минералы наблюдались в виде мелких включений и просечек в родонит-манганактинолитовых агрегатах, тяготеющих к кальцитовым гнездам, а также они слагают ксеноморфные зерна и прожилки в бустамите (рис. 3) или в андрадите (в сростании с кальцитом).

Методы исследований

Отбор проб для аналитических исследований производился штупным методом. Состав минералов проанализирован на рентгеноспектральном микроанализаторе JXA8100 с тремя волновыми спектрометрами и ЭДС INCAx-sight при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе 1×10^{-8} А в Дальневосточном геологическом институте ДВО РАН (ДВГИ ДВО РАН, аналитик Г.Б. Молчанова). При анализах использовался стандарт, поставляемый фирмой Agar, регистрационный номер стандарта 6976. Для обеспечения электропроводимости применялось графитовое напыление. Аншлифы

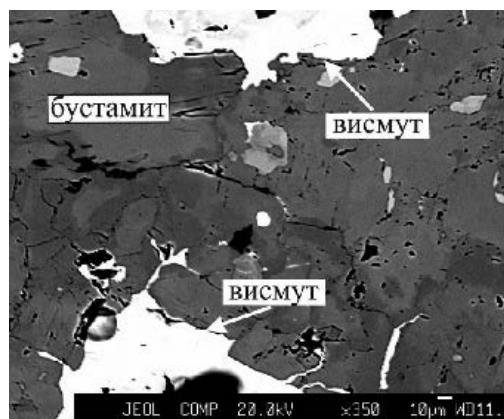


Рис. 3. Ксеноморфные выделения и прожилковидные зоны самородного висмута в неоднородном по составу бустамите Маргаритовской залежи (Казаченко, Перевозникова, 2022).

Fig. 3. Anhedral aggregates and veinlets of native bismuth in bustamite of heterogeneous composition of the Margaritovskaya ore body (Kazachenko, Perevoznikova, 2022).

предварительно тщательно промывались в органических растворителях с использованием ультразвука.

Результаты исследований

Джонассонит обнаружен в Маргаритовской залежи, в образце породы, текстура которой изменяется от массивной до пятнистой, а структура преимущественно гранобластовая грубозернистая. Состав некоторых изученных минералов приведен в таблице 1. Главным минералом является андрадит, но на отдельных участках порода сложена в основном бустамитом или Mn-содержащим геденбергитом. Кроме перечисленных минералов в ней в подчиненном количестве присутствуют магнетит, кальцит и флюорит, а в качестве аксессуарных встречаются шеелит, лёллингит, барит, самородный висмут, висмутин, жозеит-А, соединения $(\text{Pb,Ag})\text{BiS}_2$ и $\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{S}_5$, козалит, Mo-содержащий шеелит, повеллит и молибденит. Встречаются также бисмит и члены заварицкит-добреитового изоморфного ряда. Андрадит, бустамит и Mn-содержащий геденбергит слагают относительно изометричные, иногда слегка удлиненные идиоморфные выделения без признаков коррозии на контактах этих минералов. Андрадит (до 0.34–0.60 мас. % Mn, до 0.47 мас. % Al) и Mn-содержащий геденбергит (3.79–4.55 мас. % Mn) иногда содержат Sn (до 0.57 и 0.56 мас. %, соответственно). Бустамит относится к редкой, богатой кальцием (26.37–

Таблица 1
Table 1

Состав минералов джонассонитсодержащей породы Белогорского железорудного месторождения, мас. %

Composition of minerals of the jonassonite-bearing rock of the Belogorskoe iron deposit, wt. %

№ п/п	Минерал	O	Si	S	Ca	Mn	Fe	Zn	Mo	Ag	Sn	Sb	Te	W	Pb	Bi	Сумма	Формула
1	Бустамит	38.87	23.53	—	26.37	4.66	5.65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	99.08	$(\text{Ca}_{0.78}\text{Fe}_{0.12}\text{Mn}_{0.10})_{1.00}\text{Si}_{1.00}\text{O}_{3.00}$
2	Mn-содержащий геденбергит	37.67	22.40	—	16.00	4.55	18.41	—	—	—	0.56	—	—	—	—	—	99.59	$(\text{Ca}_{0.99}\text{Mn}_{0.01})_{1.00}(\text{Fe}_{0.82}\text{Mn}_{0.19}\text{Sn}_{0.01})_{1.02}\text{Si}_{1.98}\text{O}_{6.00}$
3	Кальцит	41.64	—	—	40.68	0.97	0.39	—	—	—	—	—	—	—	—	—	83.68	$(\text{Ca}_{0.97}\text{Mn}_{0.02}\text{Fe}_{0.01})_{1.00}\text{CO}_{3.00}$
4	Мо-содержащий шеелит	23.16	—	—	16.43	—	—	—	14.47	—	—	—	—	45.85	—	—	99.91	$\text{Ca}_{0.99}(\text{W}_{0.65}\text{Mo}_{0.36})_{1.01}\text{O}_{4.00}$
5	Повеллит	28.69	—	—	19.52	—	—	1.96	48.19	—	—	—	—	0.68	—	—	99.04	$\text{Ca}_{0.98}(\text{Mo}_{1.01}\text{W}_{0.01})_{1.02}\text{O}_{4.00}$
6	Молибденит	—	—	37.20	—	—	—	—	62.60	—	—	—	—	—	—	—	99.80	$\text{Mo}_{1.07}\text{S}_{1.93}$
7	Самородный висмут	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	99.34	—
8	Висмутин	—	—	19.02	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80.95	99.97	$\text{Bi}_{1.98}\text{S}_{3.02}$
9	Жозеит А	—	—	6.50	—	—	—	—	—	—	—	—	10.99	—	—	82.54	100.03	$\text{Bi}_{4.04}\text{Te}_{0.89}\text{S}_{2.07}$
10	Бисмит	10.09	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	88.71	98.80	$\text{Bi}_2\text{O}_{3.00}$
11	Фаза $(\text{Pb}, \text{Ag})\text{BiS}_2$	—	—	14.90	—	—	—	—	—	8.97	—	—	—	—	21.80	53.57	99.24	$(\text{Ag}_{0.37}\text{Pb}_{0.46}\text{Bi}_{1.13})_{1.00}\text{S}_{2.04}$
12	Фаза $\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{S}_5$	—	—	20.07	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	49.85	—	100.12	$\text{Pb}_{1.95}\text{Sb}_{2.00}\text{S}_{5.05}$
13	Сфалерит	—	—	33.09	—	—	—	66.24	—	—	—	—	—	—	—	—	99.33	$\text{Zn}_{1.01}\text{S}_{0.99}$

Примечание. Формулы минералов рассчитаны на суммы атомов равные: единице – для кальцита и самородного висмута; двум – для бустамита, бисмита, сфалерита, Мо-содержащего шеелита и повеллита; трем – для молибденита; четырем – для Mn-содержащего геденбергита и фазы $(\text{Pb}, \text{Ag})\text{BiS}_2$; пяти – для висмутина; семи – для жозеита-А; восьми – для граната; девяти – для фазы $\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{S}_5$. Прочерк – элемент не обнаружен.

Note. The mineral formulas are recalculated to the sum atoms of one – for calcite, native bismuth; two – for bustamite, bismite, sphalerite, Mo-bearing sheelite, povellite; three – for molybdenite; four – for Mn-bearing hedenbergite and $(\text{Pb}, \text{Ag})\text{BiS}_2$ phase; five – for bismuthinite; seven – for joséite-A; eight – for garnet; and nine – for $\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{S}_5$ phase. Dash – the element is not found.

27.53 мас. %), близкой по составу к волластониту разновидности. Шеелит, лёллинит и барит образуют рассеянные, значительно более мелкие идиоморфные, без признаков коррозии включения в андрадите, бустамите и Mn-содержащем геденбергите (шеелит – главным образом, в Mn-содержащем геденбергите). Лёллинит обогащен Ni (2.59 мас. %) и Co (8.88 мас. %). В шеелите и барите примеси не обнаружены.

Кальцит и флюорит, иногда в сростании друг с другом, слагают гнезда и участки неправильной формы, а также прожилковидные зоны в андрадите, бустамите и Mn-содержащем геденбергите или вдоль контактов этих минералов. Кальцит содержит незначительную примесь Mn (до 0.97 мас. %) и Fe (до 0.39 мас. %). В образце обнаружены многочисленные мельчайшие кристаллы приуроченного к кавернам в андрадите богатого Mn (2.53–7.98 мас. %) магнетита, краевые части которых обогащены Zn (1.12–1.22 мас. %). Акцессорные самородный висмут, висмутин, жозеит-А, соединения $(\text{Pb}, \text{Ag})\text{BiS}_2$ и $\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{S}_5$, козалин, Мо-содержащий шеелит, повеллит и молибденит, встречаются в виде отдельных (редких) ксеноморфных, идиоморфных (или комбинированных) мономинеральных или сложенных соединениями, относящимися к одному изоморфному ряду, выделений в тесной ассоциации с кальцитом и флюоритом, образуя с ними сростания.

Нами обнаружено и изучено три зерна джонассонита. Джонассонит слагает мелкие (~ 5 × 7 мкм) округлые или овальные зерна, местами с угловатыми очертаниями, и сростается с ксеноморфными агрегатами кальцита в андрадите (рис. 4).

Сравнение рельефа джонассонита Белогорского месторождения с рельефом кальцита на контактах этих минералов в аншлифах под микроскопом свидетельствует о том, что

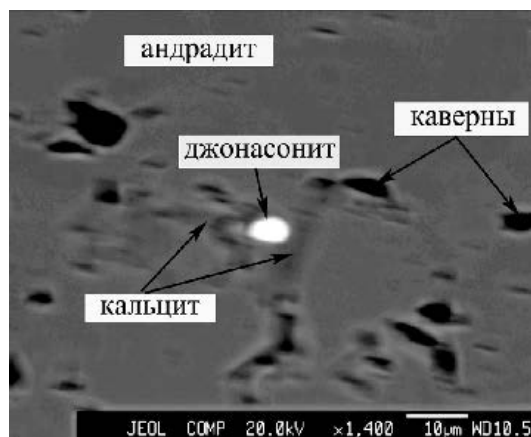


Рис. 4. Джонассонит в сростании с кальцитом в андрадите.

Fig. 4. Jonassonite-calcite intergrowth in andradite.

его твердость, по-видимому, незначительно ниже твердости кальцита. С другой стороны, судя по качеству полировки, она, вероятно, выше твердости козалинта (джонассонит лучше полируется) и, следовательно, можно полагать, что ее значения находятся в интервале от 2.5 до 3 единиц по шкале Мооса. Отражение джонассонита Белогорского месторождения по оценке под микроскопом несколько выше, чем у висмутина, а двуотражение и анизотропия выражены слабее. В отраженном свете джонассонит Белогорского месторождения обладает голубовато-белым (до бледно-серого) цветом, слабым плеохроизмом.

Состав джонассонита Белогорского месторождения изменяется незначительно и удовлетворительно соответствует теоретической формуле (табл. 2). В джонассоните Белогорского месторождения установлены относительно высокие концентрации Те (1.79–2.29 мас. %).

Обсуждение

Образование джонассонита Белогорского месторождения связано со второй (низкотемпературной) стадией гидротермального процесса, продуктами которой являются также магнетит, кальцит, флюорит, сфалерит и акцессорные самородное золото, самородный висмут, висмутин, жозеит-А, козалинт, гладит, галенобисмутит, неназванные соединения BiS, (Bi,Ag)(S,Te), Bi₅Te₂S₃, Bi₃S₄, (Pb,Ag)BiS₂, молибденит и члены ряда шеелит–повеллит. Все перечисленные акцессорные минералы и джонассонит встречаются в основных залежах месторождения в одинаковой геологической обстановке – в андрадит-кальцитовых прожилках с флюоритом, рассекающих андрадитовые и магнетит-андрадитовые породы и руды, и в существенно карбонатных гнездах, в тесных сростаниях с кальцитом или флюоритом. Поэтому совокупность этих минералов, которые не образуют сростаний друг с другом, но нередко наблюдаются рядом в аншлифах и образцах, может быть выделена в качестве самостоятельной минеральной ассоциации, связанной с низкотемпературной стадией гидротермального процесса. По элементному и минеральному составу эта ассоциация обнаруживает значительное сходство с ассоциациями, содержащими джонассонит, из других известных мест обнаружения этого минерала. Джонассонит в природе обычно встречается совместно с соединениями Au, Bi, Te, Pb и S (Paar et al., 2006). Это характерно практически для всех находок этого минерала, включая и Белогорское месторождение. Во многих случаях джонассонит, как и на Белогорском месторождении, сопровождается самородным золотом, козалинтом, самородным висмутом, висмутином и другими минералами, относящимися к системе Bi–Te–S. Реже с ним ассоциируют Bi-содержащие сульфосоли (пекоит, лиллианит, ингодит, и лайтакарит), галенит, клаусталит и

Таблица 2

Состав джонассонита Белогорского железорудного месторождения, мас. %

Table 2

Composition of jonassonite of the Belogorskoe iron deposit, wt. %

№ п/п	Bi	Au	Te	S	Сумма	Формула
1	77.20	12.62	2.29	8.56	100.67	Au _{0.89} Bi _{5.14} (S _{3.72} Te _{0.25}) _{3.97}
2	76.24	13.25	1.79	8.75	100.03	Au _{0.94} Bi _{5.06} (S _{3.80} Te _{0.20}) _{4.00}
3	76.15	12.93	2.11	8.63	99.82	Au _{0.92} Bi _{5.09} (S _{3.76} Te _{0.23}) _{3.99}

Примечание. Формула джонассонита рассчитана на сумма атомов, равную десяти.
Note. The formula of jonassonite is recalculated to the sum of atoms of ten.

промежуточные члены серии PbS–PbSe (Paar et al., 2006).

Ранее было предложено четыре основных механизма образования джонассонита: (1) соосаждение с самородным висмутом и висмутином в условиях, близких к равновесным для висмут-висмутиновой ассоциации (Hamasaki et al., 1986; Dobosi, Nagy, 1989); (2) кристаллизация из богатого Bi эвтектического (или близкого к нему) расплава (Damian et al., 2004; Ciobanu et al., 2010; и др.); (3) замещение ранее образовавшихся мальдонита, самородного золота и самородного висмута в результате воздействия растворов с высокой фугитивностью S (Lehrberger et al., 1990; Jouhari et al., 1999; Кривицкая и др., 2008; и др.); (4) реакция Au-содержащих растворов с сульфотеллуридами (Некрасов и др., 1988).

Ни один из этих механизмов не подходит для объяснения происхождения джонассонита Белогорского месторождения. Соответствующая низкотемпературной гидротермальной стадии минеральная ассоциация, является, главным образом, следствием высвобождения, локального перераспределения и отложения в благоприятных участках в различных минеральных формах ранее присутствовавших в залежах химических элементов как слагавших собственные минералы (Ca, Fe), так и рассеянных в других минералах (Mn, Sn, Zn, Bi, Pb, Ag, Au, Mo и W). Главными осадителями этих элементов в существенно кальцитовых прожилках в магнетитовых рудах и кальцитовых гнездах, судя по минеральному составу, являлись летучие компоненты (O₂, CO₂, F₂ и S₂). Очевидно, что образование джонассонит-кальцитовой ассоциации соответствовало периодам возрастания активности S и CO₂. Согласно (Кривицкая и др., 2008) джонассонит устойчив, если активность сульфидной серы выше ее активности в золото-висмутиновой ассоциации.

Существует ряд противоречивых оценок температуры и давления кристаллизации джонассонита. Одни авторы (Hamasaki et al., 1986; Dobosi, Nagy, 1989), с учетом присутствия совместно с этим минералом турмалина, предполагали высокие значения этих параметров. Напротив, низкая температура около 200 °C (Jouhari et al., 1999) и между 200 и 350 °C при давлении 2–3 кбар (Stegman 2000, 2001) определена в результате изучения флюидных включений. Температура образования джонассонита Белогорского месторождения, в целом, согласуется с данными (Jouhari et al., 1999) и (Stegman, 2000, 2001).

Джонассонит, как следует из литературных данных, обычно встречается в золото-кварцевых жилах, содержащих самородные золото и висмут, теллуриды и сульфотеллуриды Bi, висмутин или сложные сульфиды Pb и Bi относящиеся к поздним стадиям минералообразования. На Белогорском месторождении джонассонит присутствует в продуктах наложенного гидротермального преобразования ранних ассоциаций, которые тоже содержат самородные золото и висмут, сложные сульфиды Ag, Pb и Bi, соединения Mo (как на Дарасунском месторождении) и W, но встречается в иной геологической обстановке. Этот минерал впервые обнаружен в залежах железорудного месторождения, сложенных метаморфизованными и частично регенерированными богатыми Са силикатно-железистыми осадками.

Выводы

Присутствие джонассонита в залежах Белогорского месторождения отражает тесную геохимическую связь Bi и Au в процессах минералообразования. Особенностью эндогенной висмутовой минерализации Белогорского месторождения является локализация джонассонита и других висмутовых минералов в составе продуктов низкотемпературного гидротермального преобразования ранних высокотемпературных ассоциаций, особенно в крупных карбонатных с флюоритом гнездах, заключенных в блоках существенно магнетитовых руд. На Белогорском месторождении джонассонит образовался на конечной стадии гидротермального процесса при невысоких температуре (≤ 271 °C) и литостатическом давлении.

Джонассонит, находки которого обычно связаны с золото-кварцевыми жилами, впервые обнаружен в залежах железорудного месторождения, сложенных метаморфизованными и частично регенерированными богатыми Са силикатно-железистыми осадками. Залежи обогащены благородными металлами и содержат разнообразные минералы Bi, Au, Ag, Pt и Pd. Также, как и в золото-кварцевых жилах, в залежах Белогорского железорудного месторождения наряду с джонассонитом встречаются самородные Au и Bi, теллуриды и сульфотеллуриды Bi, висмутин или сложные сульфиды Ag, Pb, Bi и соединения Mo.

Литература

- Альшевский А.В.** (2009) Геология, особенности вещественного состава, генезис и перспективы золотого оруденения в Утинском узле (Центрально-Колымский регион, Северо-Восток России). *Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук*. Владивосток, 29 с.
- Бурдюгов И.С.** (1941ф) Белогорское и Першинское железорудные месторождения Ольгинского района Приморского края (отчет о геологоразведочных работах в Ольгинском районе Приморского края в 1939–1941 г.г., ВИМС.
- Геологическое строение и полезные ископаемые бассейнов рек Аввакумовки, Ольги и Тимофеевки (1981ф) Отчет Ольгинской партии о результатах геологической съемки и поисков масштаба 1 : 50 000 на листах К-53-7-В (южная часть), Г и геологического доизучения масштаба 1 : 50 000 на листах К-53-7-А, Б, В (северная часть) и К-53-8-А (а, в) за 1977–1981 г.г. (в двух томах). Владивосток.
- Казаченко В.Т.** (2002) Петрология и минералогия гидротермальных марганцевых пород Востока России. Владивосток, Дальнаука, 250 с.
- Казаченко В.Т., Перевозникова Е.В.** (2022) Висмутовая минерализация Белогорского магнетитового месторождения (Сихотэ-Алинь). *Тихоокеанская геология*, **41**(1), 90–109.
- Казаченко В.Т., Лаврик С.Н., Перевозникова Е.В., Скосарева Н.В.** (2015) Габброиды сергеевского и калиновского комплексов Сихотэ-Алиня: геохимия и изотопные отношения самария, неодима, стронция и свинца. *Вестник Кольского научного центра РАН*, **3** (22), 21–39.
- Казаченко В.Т., Перевозникова Е.В., Лаврик С.Н.** (2011) Минералогия и генезис Белогорского скарново-магнетитового месторождения (Приморье). *Тихоокеанская геология*, **30**(6), 67–83.
- Кемкин И.В.** (2003) Аккреционные призмы Сихотэ-Алиня и основные события геологической эволюции Япономорского региона в мезозое. *Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук*. Владивосток, 52 с.
- Кривицкая Н.Н., Брызгалов И.А., Спиридонов Э.М.** (2008) Джонасонит $AuBi_5S_4$ – первая находка в Забайкалье. *Доклады Академии наук*, **420**(3), 368–371.
- Некрасов И.Я., Яковлев Я.В., Соловьев Л.И., Лескова Н.В.** (1988) Первая находка золото-висмутового сульфида. *Доклады Академии наук СССР*, **299**(2), 438–441.
- Павлова З.Н., Котельников П.Е.** (1988) Формы нахождения серебра, висмута, теллура, селена, кобальта и сурьмы в медно-золоторудном месторождении Казахстана. *Известия Академии Наук Казахской ССР. Серия геологическая*, **2**, 13–23.
- Перевозникова Е.В., Казаченко В.Т.** (2019) Минералогия золота, серебра, платины и палладия в залежах Белогорского железорудного месторождения (Приморье). *Вестник Воронежского государственного университета. Серия геология*, **3**, 64–73.
- Сахно В.Г., Ростовский Ф.И., Аленичева А.А.** (2010) U-Pb изотопное датирование магматических комплексов Милоградовского золото-серебряного месторождения (Южное Приморье). *Доклады Академии наук*, **433**(2), 219–226.
- Cepedal A., Fuertes-Fuente M., Martin-Izard A., Gonzalez-Nistal S., Rodriguez-Pevida L.** (2006) Tellurides, selenides and Bi-mineral assemblages from the Rio Narcea Gold Belt, Asturias, Spain: genetic implications in Cu–Au and Au skarns. *Mineralogy and Petrology*, (87), 277–304.
- Ciobanu C.L., Birch W.D., Cook N.J., Pring A., Grundler P.V.** (2010) Petrogenetic significance of Au–Bi–Te–S associations: The example of Maldon, Central Victorian gold province, Australia. *Lithos*, (116), 1–17.
- Ciobanu C.L., Cook N.J., Bogdanov K., Kiss O., Vučković B.** (2003) Gold enrichment in deposits of the Banatitic magmatic and metallogenic belt. In: *Mineral Exploration and Sustainable Development*. Millpress, Rotterdam, 1153–1156.
- Ciobanu C.L., Cook N.J., Damian G.** (2006) Gold scavenged by bismuth melts: example from Alpine shear remobilizates in the Highis massif, Romania. *Mineralogy and Petrology*, (87), 351–384.
- Cook N.J., Ciobanu C.L.** (2004) Bismuth tellurides and sulphosalts from the Larga hydrothermal system, Metaliferi Mts., Romania: paragenesis and genetic significance. *Mineralogical Magazine*, (68), 301–321.
- Damian F., Ciobanu C., Cook N., Damian G.** (2004) A new occurrence of $AuBi_5S_4$ in shear remobilizates from Highis, Romania: compositions, association and implications. *Abstracts of the 32nd Session of IGC (Florence)*, (1), p. 273.
- Dobosi G., Nagy B.** (1989) The occurrence of an Au–Bi sulphide in the Nagyörzsöny hydrothermal ore deposit, Northern Hungary. *Neues Jahrbuch für mineralogie, Monatshefte*, (1), 8–14.
- Hamasaki S., Murao S., Hoshino K., Watanabe M., Soeda A.** (1986) Unnamed Au–Bi sulfide from the Tsugahira mine, Southern Kyushi, SW Japan. *Neues Jahrbuch für mineralogie, Monatshefte*, **9**, 416–422.
- Jahn B.M., Valui G.A., Kruk N.N., Gonevchuk V.G., Usuki M., Jeremy T.J., Wu J.T.J.** (2015) Emplacement ages, geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic characterization of Mesozoic to early Cenozoic granitoids of the Sikhote-Alin orogenic belt, Russian Far East: crustal growth and regional tectonic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, **111**, 872–918.
- Jouhari A., Greiling R., Laduron D., Aarab El.M.** (1999) Géologie de la minéralisation aurifère d'Oukilal, Haut-Atlas occidental paléozoïque (Maroc). *Chronique de la recherche minière*, **536–537**, 79–89. (in French)

- Lehrberger G., Preinfalk C., Morteani G., Lahusen L.** (1990) Stratiforme Au–As–Bi–Vererzung in Cordierit–Sillimanit–Gneisen des Moldanubikums bei Oberviechtach–Unterlangau, Oberpfälzer Wald (NE-Bayern). *Geologica Bavarica*, **95**, 133–176. (in German)
- Marcoux E., Moëlo Y., Leistel J.M.** (1996) Bismuth and cobalt minerals as indicators of stringer zones to massive sulphide deposits, Iberian Pyrite Belt. *Mineralium Deposita*, (31), 1–26.
- McCoy D.T.** (2000) Mid-Cretaceous plutonic-related gold deposits of interior Alaska: metallogenesis, characteristics, gold associative mineralogy and geochronology. *Ph.D. thesis*. Fairbanks, University of Alaska, 245 p.
- Meinert L.D.** (2000) Gold in skarns related to epizonal intrusions. *Reviews in Economic Geology*, (13), 347–375.
- Oberthür T., Weiser T.W.** (2008) Gold-bismuth-telluride-sulphide assemblages at the Viceroy Mine, Harare-Bindura-Shamva greenstone belt, Zimbabwe. *Mineralogical Magazine*, (72), 953–970.
- Oudin E., Jouhari A., Tane J.L., Wadjiny A.** (1988) Observation d'un sulfure d'or-plomb-bismuth Au(Bi,Pb)₅S₄ dans une mineralization du Massif du Tichka (Haut Atlas Occidental, Morocco). *Principaux resultats scientifiques et techniques du BRGM*, p. 169. (in French)
- Paar W.H., Putz H., Topa D., Roberts A.C., Stanley C., Culletto F.J.** (2006) Jonassonite, Au(Bi,Pb)₅S₄, a new mineral species from Nagybörzsöny, Hungary. *The Canadian Mineralogist*, **44**(5), 1127–1136.
- Spooner E.T.C.** (1993) Magmatic sulphide/volatile interaction as a mechanism for producing chalcophile element enriched, Archean Au-quartz, epithermal Au-Ag and Au skarn hydrothermal ore fluids. *Ore Geology Reviews*, (7), 359–379.
- Stegman C.L.** (2000) The new Occidental deposit: variation on a theme. In: *Central West Symposium Cobar: Geology, Landscapes and Mineral Exploration*. CSIRO, Extended Abstracts, 107–112.
- Stegman C.L.** (2001) Cobar deposits: still defying classification. *SEG Newsletter*, **44**, 14–26.
- Törmänen T.O., Koski R.A.** (2005) Gold enrichment and the Bi–Au association in pyrrhotite-rich massive sulfide deposits, Escanaba Trough, Southern Gorda Ridge. *Economic Geology*, (100), 1135–1150.
- Burdyugov I.S.** (1941) Belogorskoe and Pershinskoe iron deposits of the Olga region of Primorsky kray (unpublished report on geological exploration in the Olga region of Primorsky kray of 1939–1941), VIMS. (in Russian)
- Cepedal A., Fuertes-Fuente M., Martin-Izard A., Gonzalez-Nistal S., Rodriguez-Pevida L.** (2006) Tellurides, selenides and Bi-mineral assemblages from the Rio Narcea Gold Belt, Asturias, Spain: genetic implications in Cu–Au and Au skarns. *Mineralogy and Petrology*, (87), 277–304.
- Ciobanu C.L., Birch W.D., Cook N.J., Pring A., Grundler P.V.** (2010) Petrogenetic significance of Au-Bi-Te-S associations: The example of Maldon, Central Victorian gold province, Australia. *Lithos*, (116), 1–17.
- Ciobanu C.L., Cook N.J., Bogdanov K., Kiss O., Vučković B.** (2003) Gold enrichment in deposits of the Banatitic magmatic and metallogenetic belt. In: *Mineral Exploration and Sustainable Development*. Millpress, Rotterdam, 1153–1156.
- Ciobanu C.L., Cook N.J., Damian G.** (2006) Gold scavenged by bismuth melts: example from Alpine shear remobilizates in the Highis massif, Romania. *Mineralogy and Petrology*, (87), 351–384.
- Cook N.J., Ciobanu C.L.** (2004) Bismuth tellurides and sulphosalts from the Larga hydrothermal system, Metaliferi Mts., Romania: paragenesis and genetic significance. *Mineralogical Magazine*, (68), 301–321.
- Damian F., Ciobanu C., Cook N., Damian G.** (2004) A new occurrence of AuBi₅S₄ in shear remobilizates from Highis, Romania: compositions, association and implications. *Abstracts of the 32nd Session of IGC (Florence)*, (1), p. 273.
- Dobosi G., Nagy B.** (1989) The occurrence of an Au–Bi sulphide in the Nagybörzsöny hydrothermal ore deposit, Northern Hungary. *Neues Jahrbuch für mineralogie, Monatshefte*, (1), 8–14.
- Geological structure and mineral deposits of basins of the Avvakumovka, Olga, and Timofeevka rivers (1981). Unpublished report of the Olga Party on the results of geological survey and searches on a scale of 1 : 50 000 on sheets K-53-7-C (southern part), G and geological re-study on a scale of 1 : 50 000 on sheets K-53-7-A, B, C (northern part) and K-53-8-A (a, c) for 1977-1981 (in two volumes). Vladivostok (in Russian)
- Hamasaki S., Murao S., Hoshino K., Watanabe M., Soeda A.** (1986) Unnamed Au-Bi sulfide from the Tsugahira mine, Southern Kyushi, SW Japan. *Neues Jahrbuch für mineralogie, Monatshefte*, **9**, 416–422.
- Jahn B.M., Valui G.A., Kruk N.N., Gonevchuk V.G., Usuki M., Jeremy T.J., Wu J.T.J.** (2015) Emplacement ages, geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic characterization of Mesozoic to early Cenozoic granitoids of the Sikhote-Alin orogenic belt, Russian Far East: crustal growth and regional tectonic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, **111**, 872–918.
- Jouhari A., Greiling R., Laduron D., Aarab El.M.** (1999) Géologie de la minéralisation aurifère d'Oukilal,

References

Alshevsky A.V. (2009) [Geology, features of mineral composition, genesis and prospects of gold mineralization in the Utiny cluster (Central Kolyma region, Northeast of Russia)]. [*Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni kandidata geologo-mineralogicheskikh nauk*]. [*Abstracts of Dissertation of Candidate of Geological-Mineralogical Sciences*]. Vladivostok, 29 p. (in Russian)

Haut-Atlas occidental paléozoïque (Maroc). Chronique de la recherche minière, **536–537**, 79–89. (in French)

Kazachenko V.T. (2002) [Petrology and mineralogy of hydrothermal, manganese rocks of the east of Russia]. Vladivostok, Dalnauka, 250 p. (in Russian)

Kazachenko V.T., Lavrik S.N., Perevoznikova E.V., Skosareva N.V. (2015) [Gabbroids of the Sergeevsky and Kalinovsky Sikhote-Alin complexes: geochemistry and Sm, Nd, Sr and Pb isotopic ratios]. [Vestnik Kola'skogo nauchnogo tsentra RAN] [Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], **3** (22), 21–39. (in Russian)

Kazachenko V.T., Perevoznikova E.V. (2022) [Bi mineralization of the Belogorsky magnetite deposit (Sikhote-Alin)]. *Tikhookeanskaya geologiya* [Russian Journal of Pacific Geology], **41**(1), 90–109. (in Russian)

Kazachenko V.T., Perevoznikova E.V., Lavrik S.N. (2012) Mineralogy and genesis of the Belogorsk skarn-magnetite deposit, Primorye. *Russian Journal of Pacific Geology*, **6**(2), 173–188.

Kemkin I.V. (2003) [Sikhote-Alin accretionary prisms and the main events of the geological evolution of the Japanese Sea region in the Mesozoic]. [Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni doctora geologo-mineralogicheskikh nauk]. [Abstracts of Dissertation of Doctor of Geological-Mineralogical Sciences]. Vladivostok, 52 p. (in Russian)

Krivitskaya N.N., Bryzgalov I.A., Spiridonov E.M. (2008) Jonassonite AuBi_5S_4 – the first find in Transbaikalia. *Doklady Earth Sciences*, **420** (1), 576–579.

Lehrberger G., Preinfalk C., Morteani G., Lahren L. (1990) Stratiforme Au–As–Bi–Vererzung in Cordierit–Sillimanit–Gneisen des Moldanubikums bei Oberviechtach–Unterlangau, Oberpfälzer Wald (NE-Bayern). *Geologica Bavarica*, **95**, 133–176. (in German)

Marcoux E., Moëlo Y., Leistel J.M. (1996) Bismuth and cobalt minerals as indicators of stringer zones to massive sulphide deposits, Iberian Pyrite Belt. *Mineralium Deposita*, (31), 1–26.

McCoy D.T. (2000) Mid-Cretaceous plutonic-related gold deposits of interior Alaska: metallogenesis, characteristics, gold associative mineralogy and geochronology. *Ph.D. thesis*. Fairbanks, University of Alaska, 245 p.

Meinert L.D. (2000) Gold in skarns related to epizonal intrusions. *Reviews in Economic Geology*, (13), 347–375.

Nekrasov I.Ya., Yakovlev Ya.V., Soloviev L.I., Leskova N.V. (1988) [The first find of a new gold-bismuth sulfide]. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Doklady of the Academy of Sciences of the USSR], **299**(2), 438–441. (in Russian)

Oberthür T., Weiser T.W. (2008) Gold-bismuth-telluride-sulphide assemblages at the Viceroy Mine, Harare-Bindura-Shamva greenstone belt, Zimbabwe. *Mineralogical Magazine*, (72), 953–970.

Oudin E., Jouhari A., Tane J.L., Wadjinny A. (1988) Observation d'un sulfure d'or-plomb-bismuth $\text{Au}(\text{Bi,Pb})_5\text{S}_4$ dans une mineralization du Massif du Tichka (Haut Atlas Occidental, Morocco). *Principaux resultats scientifiques et techniques du BRGM*, p. 169. (in French)

Paar W.H., Putz H., Topa D., Roberts A.C., Stanley C., Culletto F.J. (2006) Jonassonite, $\text{Au}(\text{Bi,Pb})_5\text{S}_4$, a new mineral species from Nagybörzsöny, Hungary. *The Canadian Mineralogist*, **44**(5), 1127–1136.

Pavlova Z.N., Kotelnikov P.E. (1988) [The mode of occurrence of Ag, Bi, Te, Se, Co and Sv in a copper-gold deposit of Kazakhstan]. *Izvestiya Akademii nauk Kazakhskoi SSR. Seriya geologicheskaya* [Bulletin of the Academy of Sciences of the Kazakh SSR. Geological Series], **2**, 13–23 (in Russian)

Perevoznikova E.V., Kazachenko V.T. (2019) [Mineralogy of Au, Ag, Pt and Pd of the Belogorsky iron ore deposit (Primorye)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya geologiya* [Bulletin of Voronezh State University. Series Geology], (3), 64–73. (in Russian)

Sakhno V.G., Rostovsky F.I., Alenicheva A.A. (2010) U-Pb isotopic dating of magmatic complexes of the Milogradovskoe gold-silver deposit (Southern Primorye). *Doklady Earth Sciences*, **433**(1), 879–886.

Spooner E.T.C. (1993) Magmatic sulphide/volatile interaction as a mechanism for producing chalcophile element enriched, Archean Au-quartz, epithermal Au-Ag and Au skarn hydrothermal ore fluids. *Ore Geology Reviews*, (7), 359–379.

Stegman C.L. (2000) The new Occidental deposit: variation on a theme. In: *Central West Symposium Cobar: Geology, Landscapes and Mineral Exploration*. CSIRO, Extended Abstracts, 107–112.

Stegman C.L. (2001) Cobar deposits: still defying classification. *SEG Newsletter*, **44**, 14–26.

Törmänen T.O., Koski R.A. (2005) Gold enrichment and the Bi–Au association in pyrrhotite-rich massive sulfide deposits, Escanaba Trough, Southern Gorda Ridge. *Economic Geology*, (100), 1135–1150.