

**ВИСМУТОВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ БЕЛОГОРСКОГО МАГНЕТИТОВОГО
МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СИХОТЭ-АЛИНЬ)*****В.Т. Казаченко, Е.В. Перевозникова****ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, пр. 100 лет Владивостоку 159, г. Владивосток, 690022; e-mail: vkazachenko@mail.ru; elenavalper@yandex.ru*

Поступила в редакцию 6 апреля 2021 г.

Залежи Белогорского месторождения содержат разнообразные висмутовые минералы, многие из которых относятся к числу редких в природе или представлены редкими минеральными разновидностями. К ним относятся самородный висмут, висмутин, козалит, гладит(?), джонасонит, богатая Ag и Cu разновидность галенобисмутита, бисмит, бисмутит, прайзингерит, бисмоклит, заварицит и большая группа неназванных соединений. Особенностью эндогенной висмутовой минерализации месторождения является ее локализация в продуктах низко-среднетемпературного гидротермального преобразования ранних ассоциаций, особенно в крупных карбонатных (с флюоритом) гнездах, включенных в блоки существенно магнетитовых руд, где она тесно ассоциирует с Au-Ag-Pd-Pt и Mo-W минерализацией. С висмутовой минерализацией Белогорского месторождения связано также значительное количество Ag в виде общих Ag-Bi минералов. Тесная геохимическая связь Bi, Au и PGE в процессах минералообразования на Белогорском месторождении проявляется также и в присутствии общих минералов этих элементов, таких как джонасонит и неназванное соединение $Ru(Pb,Ag)_2Bi_4$.

Ассоциация висмутовой и молибден-вольфрамовой минерализации является характерной особенностью руд некоторых скарново-вольфрамовых и скарново-молибденовых месторождений, содержащих в качестве главных минералов шеелит, молибденит и висмутин. Присутствие висмутовой и благороднометалльной минерализации наиболее характерно для золотых и комплексных золотосодержащих руд гидротермальных месторождений различной формационной принадлежности. Однако на Белогорском месторождении, в отличие от месторождений упомянутых выше типов, такие металлы, как W, Mo и Bi, так же как Au, Ag, Pd и Pt, не имеют самостоятельного практического значения, являясь сопутствующими полезными компонентами по отношению к железным рудам.

Залежи Белогорского месторождения сложены породами и рудами, представляющими собой метаморфизованные и частично регенерированные в позднем мелу металлоносные осадки триасового возраста, накапливавшиеся в лагунах островов в результате размыва латеритной коры выветривания древних габброидов. С этим обстоятельством связано обогащение залежей многими металлами, в том числе Fe и Mn, и присутствие золото-серебро-палладий-платиновой, никель-кобальтовой, а также висмутовой минерализации, которая (включая соединения Bi с Au и ЭПГ) является особенностью некоторых ультрамафитовых массивов.

Ключевые слова: железорудное месторождение, акцессорные минералы, висмут, золото, серебро, платина, минералогия, Сихотэ-Алинь.

ВВЕДЕНИЕ

Для юга Сихотэ-Алиня характерны традиционно относимые к скарнам известково-силикатные породы с полиметаллическими, борными и железными рудами. Они приурочены к триасовым и девон-каменноугольным известнякам и генетически связаны с гранитоидными интрузиями позднемелового-палеогенового возраста. Общей особенностью этих пород

является высокое содержание Mn. Марганцовистые скарны, вмещающие борные и полиметаллические руды, распространены в Дальнегорском рудном районе на широко известных и хорошо изученных Дальнегорском боросиликатном, Втором Советском, Николаевском, Верхнем, Садовом, Партизанском и других месторождениях [3, 14, 16, 37, 38, 40, 41, 43 и др.]. Марганцовистые скарны с железными рудами присут-

ствуют в Ольгинском рудном районе на месторождениях Белогорское, Першинское, Мраморного Мыса и др. [4, 10–12, 19, 21, 29 и др.].

В последние годы авторами опубликованы новые сведения о породообразующих и акцессорных минералах, включая Au-Ag-Pd-Pt минерализацию, в скарнах боросиликатного и полиметаллических месторождений Дальнегорского рудного района [22]. Были изучены также породообразующие минералы и акцессорная благороднометаллическая минерализация скарнов с магнетитовыми рудами на примере хорошо вскрытого горными выработками Белогорского месторождения Ольгинского рудного района [21, 36]. В данной статье, на примере этого же месторождения, охарактеризована висмутовая минерализация скарново-магнетитовых залежей Ольгинского района. Целью исследований являлось выяснения ее минералогических особенностей, места в процессе формирования залежей и взаимоотношений с Au-Ag-Pd-Pt и Mo-W минерализацией.

РЕГИОНАЛЬНАЯ ПОЗИЦИЯ И ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Белогорское месторождение расположено в южной части Таухинского террейна Сихотэ-Алиня (рис. 1), в пределах Ольгинского рудного района. Площадь района сложена поздне меловыми-палеогеновыми вулканогенными образованиями и гранитоидами Восточно-Сихотэ-Алинского интрузивно-вулканогенного пояса, среди которых в виде останцов, тектонических блоков и “эрозионных окон” обнажаются палеозойские (девон-карбон), триасовые, юрские и раннемеловые осадочные породы фундамента (рис. 2). В структуре Ольгинского рудного района Ф.И. Ростовским [38] выделены три основных элемента. В юго-западной части расположена вулканотектоническая депрессия, выполненная средними и кислыми поздне меловыми-палеогеновыми вулканитами и во многих отношениях похожая на расположенную юго-западнее Милоградовскую вулканотектоническую структуру, для пород которой имеются датировки уран-свинцовым методом [39]. Стратифицированные вулканогенные образования площади (рис. 1) относятся к богопольскому (палеоцен), приморскому (турон-сантон) и синанчинскому (сеноман) вулканическим комплексам. В Милоградовской вулканотектонической структуре возраст образований богопольского вулканического комплекса составляет 57–60 млн лет, а приморского – 83–85. Комагматичными породам богопольского и приморского вулканических комплексов считаются магматические образования богопольского и приморского интрузивных комплексов, соответственно. На востоке и северо-востоке района

депрессия обрамлена гранитоидами Владимирского массива, возраст которого, по данным В.Г. Сахно с соавторами [39], составляет 67.9 млн лет, а по данным Б.М. Джан с соавторами [52] (согласно полученным датировкам циркона) – 64–71 млн лет. В наиболее приподнятом блоке северо-западной части обнажаются дислоцированные осадочные породы фундамента Восточно-Сихотэ-Алинского интрузивно-вулканогенного пояса, относящиеся к меланжевому комплексу позднеюрской-раннемеловой аккреционной призмы. Они представляют собой крупные блоки рифогенных известняков, кремнистых и кремнисто-глинистых пород с возрастным интервалом от позднего девона до позднего карбона [24] и фрагменты триасовой кремневой формации, заключенные в позднеюрско-раннемеловом терригенном матриксе. Известняки являются преимущественно форамениферово-водорослевыми. Для них характерна исключительная химическая чистота и отсутствие терригенной примеси. Осаждение карбоната кальция, согласно А.И. Ханчуку с соавторами [42], происходило на выровненной поверхности вдали от береговой линии. По этим и многим другим признакам рассматриваемые рифогенные массивы были отнесены к карбонатным постройкам гайотов.

Нижняя часть триасовой кремневой формации сложена “глинисто-кремнистой” толщей [35]. Она обогащена прослоями углеродистых разновидностей пород. Возраст “глинисто-кремнистой” толщи отвечает верхам нижнего триаса (оленок) – среднему триасу (средний анизий) [5]. Она перекрыта “кремневой” толщей, сложенной светло-серыми плитчатыми кремнями. В основании толщи присутствует горизонт яшм мощностью более 3 м. Уровень их появления – верхний анизий-ладинский ярус. Вышележащие кремни относятся к карнию и норию. В основании “кремневой” толщи присутствуют марганцевосиликатные (сложенные, главным образом, силикатами марганца) породы и силикатно-магнетитовые руды, которые вместе с яшмами слагают единую пачку или фашиально замещающие друг друга линзы и пласты [35]. Марганцевосиликатные породы и силикатно-магнетитовые руды представляют собой прошедшие стадию диагенеза контактово-метаморфизованные металлоносные осадки.

Породы фундамента в пределах рудного района слагают разделенные вулканогенными и интрузивными образованиями площади – Широкопаднинскую, Мокрушинскую и др., в совокупности образующие прерывистую полосу шириной 4–9 км, которая протягивается в северо-восточном направлении через всю площадь Ольгинского района. Породы фундамента смяты в асимметричные складки северо-восточного простирания, осложненные надвигами и разломами других типов.

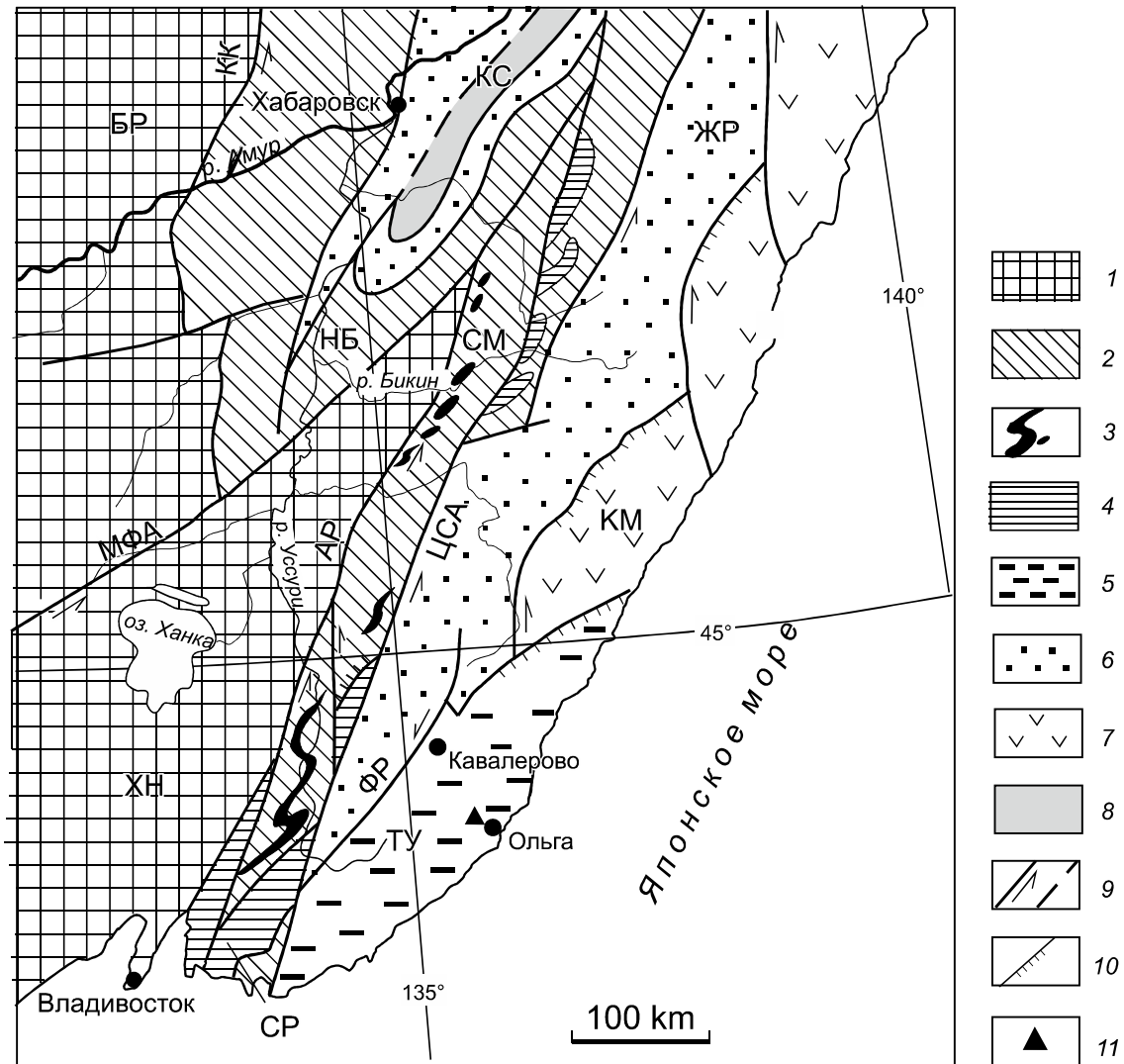


Рис. 1. Положение Белогорского месторождения в Сихотэ-Алине. Тектоническая основа по Ханчуку А.И. [7], с небольшими изменениями.

1 – ХН – Ханкайский массив, БР – Буреинский массив; 2 – юрские террейны (фрагменты аккреционных призм): СМ – Самаркинский, НБ – Наданьхада-Бикинский; 3 – калиновские габброиды (девон?); 4 – Окраинско-Сергеевский террейн (СР) и его фрагменты, включенные в структуры юрской аккреционной призмы и испытавшие вместе с ними цикл син- и постаккреционных преобразований; 5–8 – раннемеловые террейны-фрагменты: 5 – неокомовской аккреционной призмы (ТУ – Таухинский); 6 – приконтинентального спредингового турбидитового бассейна (ЖР – Журавлевско-Амурский); 7 – баррем-альбской островодужной системы (КМ – Кемский); 8 – альбской аккреционной призмы (КС – Киселевско-Маноминский); 9 – левые сдвиги, в том числе: КК – Куканский, АР – Арсеньевский, МФА – Мишань-Фушуньский (Алчанский), ЦСА – Центральный Сихотэ-Алинский, ФР – Фурмановский; 10 – надвиги; 11 – Белогорское месторождение.

Характерная черта металлогении Ольгинского рудного района, отличающая ее от металлогении расположенных вблизи Дальнегорского, Кавалеровского и Щербаковского рудных районов Таухинского террейна, – распространение относимых к скарновым железорудных месторождений, обогащенных оловом и вольфрамом.

Белогорское месторождение расположено в юго-восточной части Широкопаднинской площади (рис. 2)

и относится к числу наиболее изученных рудных объектов Ольгинского района. Оно приурочено к контакту блока среднекаменноугольных [24] рифогенных известняков и Владимирского гранитоидного массива, осложненному субмеридиональным тектоническим нарушением (рис. 3). Месторождение состоит из четырех линзовидных залежей – Маргаритовской, Белогорской, Благодатной и Скальной. На площади месторождения распространены дайки метабазальтов,

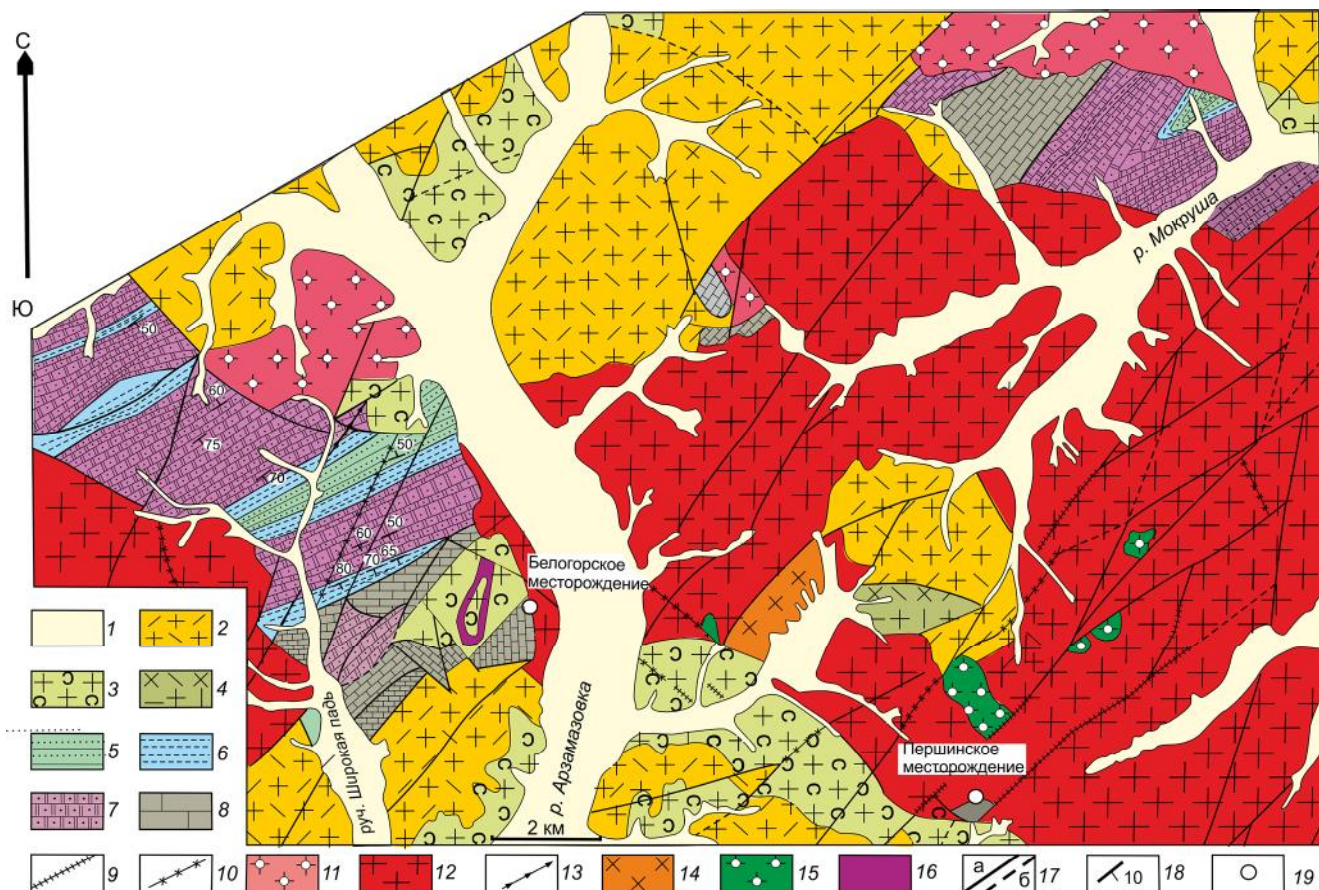


Рис. 2. Схема геологического строения фрагмента Ольгинского рудного района (по Ф.И. Ростовскому и др., 1981, с изменениями и дополнениями).

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 – юрская система (J_{2,3}): алевролиты, туффиты, кремнистые породы, кремнисто-глинистые сланцы, песчаники; 7 – триасовая система: терригенно-кремнистая толща (T_{2,3}); 8 – палеозой (D₃-C₃) – известняки, глинистые сланцы, песчаники; 9, 10, 11 – богопольский плутонический комплекс (палеоцен): дайки диоритов, андезитов, базальтов (9); дайки (10) и экструзии (11) риолитов, риодацитов, гранит-порфиров; 12 – граниты Владимирского массива (маастрихт–дат); 13–16 – приморский плутонический комплекс (турон–сантон): 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.

а также диоритов, дацитов и риолитов, предположительно, приморского интрузивного комплекса.

Минералогия месторождения рассматривалась в работах предшественников [10–12, 29, 37] и авторов данной статьи [21, 36 и др.]. Благодатная, Маргаритовская и Белогорская залежи сложены гранатом, магнетитом, F-апатитом, небольшим количеством пироксена, бустамита, везувиана и продуктами их средне-, низкотемпературного изменения – хлоритом, амфиболом, карбонатом, кварцем, сульфидами, куспидином [37], флюоритом, датолитом, родонитом и манганактинолитом [21].

Наиболее ранние и высокотемпературные образования основных залежей месторождения – Благодатной, Белогорской и Маргаритовской – представлены массивными гранатовыми и “бурундучными” магнетит-гранатовыми породами и рудами (с небольшим, как правило, количеством апатита, датолита, куспидина, пироксена, бустамита или везувиана). Гранатовые и магнетит-гранатовые породы и руды содержат следы интенсивного объемного средне-низкотемпературного гидротермального преобразования, главной особенностью которого было замещение граната магнетитом с образованием в наиболее переработанных

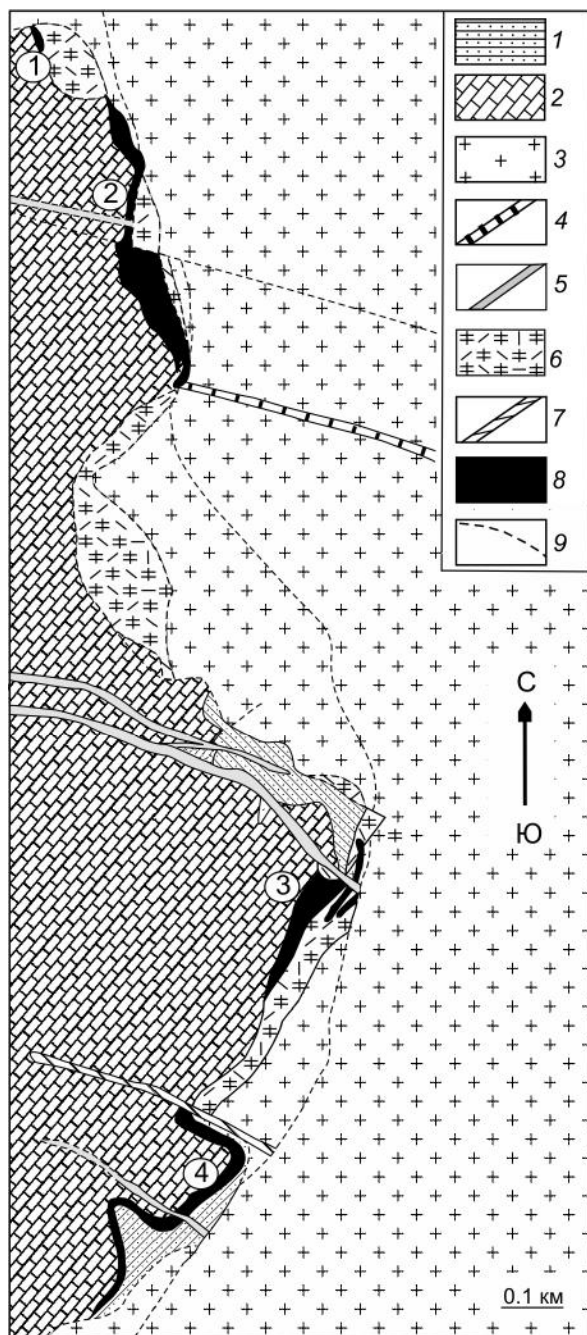


Рис. 3. Схема геологического строения Белогорского месторождения (по Бурдюгову И.С., 1945, с упрощениями).

1 – раннемеловые (?) песчаники; 2 – известняки среднекаменноугольного возраста, 3 – поздне меловые-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).

участках блоков существенно магнетитового состава [21]. К магнетитовым блокам приурочены гнезда диаметром до 1 м и более, сложенные крупнокристаллическим карбонатом. Они содержат подчиненное коли-

чество крупнокристаллических флюорита, родонита и манганактинолита, а также сфалерит, просечки которого (мощностью до 1 см и более) приурочены к плоскостям спайности карбоната и флюорита, образуя некоторое подобие решетки. Количество и размеры карбонатных гнезд напрямую зависят от степени замещения граната магнетитом. Главной особенностью этого процесса являлось разложение граната, F-содержащих и других ранних минералов и высвобождение Fe, Ca, Si, Mn, Sn (из граната), цинка (из пироксена) и F на фоне постепенного понижения температуры минералообразования. Железо и олово почти полностью фиксировались на месте в виде магнетита и касситерита. Кальций, марганец, цинк и фтор испытывали локальные перемещения и в различных минеральных формах отлагались в составе рассекающих весь объем скарнов тонких извилистых прожилков и просечек гранат-карбонатного (с флюоритом и родонитом) состава, фиксирующих пути наиболее интенсивной миграции элементов, и в составе карбонатных гнезд [21].

Скальная отличается от других залежей Белогорского месторождения высоким содержанием MnO – до 18.60 % массы [21]. Залежь сложена, главным образом, богатыми Mn бустамитом, клинопироксеном и гранатом и тоже претерпела средне-, низкотемпературные изменения, выразившиеся в неравномерном замещении этих минералов карбонатом, актинолитом, кварцем и хлоритом.

МЕТОДИКА АНАЛИТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Отбор проб для аналитических исследований производился штучным методом. Определение содержания Mn, P и Zn (табл. 1) выполнено методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре ICAP 6500Duo (Thermo Electron Corporation, США) в лаборатории аналитической химии ДВГИ ДВО РАН. Определение содержания прочих второстепенных элементов выполнено там же методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре Agilent 7500 с (Agilent Technologies, США). Особенностью пробоподготовки являлось сплавление навески с металлотом лития.

Для уверенной диагностики большинства акцессорных и рудных минералов скарновых залежей Белогорского месторождения, таких как касситерит, циркон, бадделейт, ториянит, алланит, ильменит, монацит, барит, вольфрамит, молибденит, пирит, сфалерит и другие, было достаточно изучения оптических свойств и морфологии кристаллов под микроскопом, а также определения их состава.

Примерно 2/3 известных минералов системы «Bi-(Te,Se)-S» (см. ниже) в силу мелких размеров

Таблица 1. Пределы (над чертой) и средние содержания (под чертой) некоторых элементов в залежах Белогорского месторождения.

Be	<u>0.09–4.53</u> 0.93	Va	<u>1.22–14.53</u> 4.91	Yb	<u>0.05–6.10</u> 0.78
V	<u>2.37–24.15</u> 6.98	La	<u>0.34–8.53</u> 2.78	Lu	<u>0.02–0.87</u> 0.10
Co	<u>1.22–103.57</u> 14.28	Ce	<u>0.63–28.73</u> 6.41	Hf	<u>0.05–0.91</u> 0.32
Ni	<u><10–113.22</u> 19.19	Pr	<u>0.05–3.78</u> 0.72	Ta	<u>0.01–0.40</u> 0.08
Ga	<u>1.10–17.02</u> 9.61	Nd	<u>0.20–12.51</u> 3.00	W	<u>1.94–223.2</u> 42.5
Rb	<u>0.21–5.33</u> 1.12	Sm	<u>0.07–2.33</u> 0.61	Pb	<u><0.01–75.99</u> 12.04
Sr	<u>0.61–66.75</u> 14.98	Eu	<u>0.04–0.54</u> 0.17	Th	<u>0.11–1.92</u> 0.58
Y	<u>1.05–34.93</u> 11.12	Gd	<u>0.09–2.96</u> 0.71	U	<u>0.08–6.77</u> 2.01
Zr	<u>1.80–32.95</u> 12.19	Tb	<u>0.02–0.41</u> 0.12	Sn	<u>7.86–651.75</u> 163.70
Nb	<u>0.22–4.00</u> 0.81	Dy	<u>0.11–3.46</u> 0.94	Mn*	<u>0.223–23.37</u> 3.20
Mo	<u>0.32–80.44</u> 11.23	Ho	<u>0.02–0.90</u> 0.22	P*	<u>0.004–1.373</u> 0.115
Cd	<u>0.50–1234</u> 88.04	Er	<u>0.09–4.16</u> 0.76	Zn*	<u>0.016–23.08</u> 2.172
Cs	<u>0.14–1.11</u> 0.40	Tm	<u>0.02–0.82</u> 0.12		

Примечание. * – определения методом ИСП АС (в мас. %), прочие – ИСП МС (в г/т); число штучных проб – 20; из-за использования штучного метода опробования приведенные в таблице средние содержания элементов следует рассматривать как оценочные.

зерен и тонких сростаний с другими минералами изучены только двумя методами – с помощью поляризационного микроскопа отраженного света и рентгеноспектрального микроанализатора. Вследствие этого, они не имеют собственных названий и внесены CNMMN IMA в систему кодификации существующих неназванных минералов. Значительная часть соединений висмута Белогорского месторождения относится к числу таких минералов. По упомянутым выше причинам они тоже изучены с помощью поляризационного микроскопа отраженного света и рентгеноспектрального микроанализатора.

Анализы минералов (в аншлифах) (табл. 2–4) проводились в ДВГИ ДВО РАН на микроанализаторе JXA8100 с тремя волновыми спектрометрами и энергодисперсионным спектрометром INCAx-sight. Для обеспечения электропроводности применялось графитовое напыление.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Из-за использования штучного метода опробования приведенные в статье (табл. 1 и текст) средние содержания элементов следует рассматривать как оценочные.

Среднее содержание MnO в Белогорской, Благодатной и Маргаритовской залежах составляет 4.13 мас. %. Количество Zn и Cd достигает 23.08 и 0.12 мас. % (из-за высокой концентрации сфалерита в карбонатных гнездах), при среднем содержании этих металлов 2.17 мас. % и 88.04 г/т (табл. 1), соответственно. Относительно высокое содержание характерно для Sn (до 651.75 г/т), W (до 223.2) и Mo (до 80.44). Содержание фосфора в анализируемых пробах достигает 1.37 мас. %, но в некоторых случаях, судя по количеству апатита, достигающего 40 об. % образцов, оно гораздо выше. По результатам анализов проб атомно-абсорбционным методом для залежей Белогорского месторождения характерны повышенные содержания Au, Pt и Pd, достигающие 0.91, 1.54 и 2.35 г/т, соответственно.

Гранат, являющийся концентратором Sn (до 2.17 % массы SnO₂) [11, 21] в неизменных гранатовых и гранат-магнетитовых породах и рудах, относится, в основном, к андрадит-гроссуляр-спессартиновой изоморфной серии. В Благодатной и Маргаритовской залежах распространен андрадит и его разновидности с примесью кальдеритового и кохаритового миналов. Магнетит из полосчатых магнетит-гранатовых пород и руд беден Mn (не более 5 мол. % якобсита) и иногда содержит немного Zn (2.00–4.16 массы ZnO) [12 и др.].

Пироксен относится к диопсид-геденбергит-иогансенитовой серии и отличается непостоянным содержанием иогансенитового минала (16.9–23.9 мол. %). Клинопироксен Благодатной залежи обогащен диопсидовым (31.2–37.4 мол. %) и относительно беден геденбергитовым (43.3–49.1, редко 65.6) миналами. Для Маргаритовской залежи характерны разновидности, совсем не содержащие Mg. Иногда в анализах пироксена отмечается Sn (до 0.56 % массы). Бустамит совместно с клинопироксеном встречается в Маргаритовской залежи. Он представлен очень богатой Ca и бедной Mn разновидностью, близкой по составу к волластониту. Датолит содержит немного Sc, Mg и Fe – (Ca_{1.00}Sc_{0.01}Mg_{0.01}Fe_{0.01})_{1.03}B(SiO₄)_{0.97}(OH), или только Fe – (Ca_{0.98}Fe_{0.01})_{0.99}B(SiO₄)_{1.01}(OH). Апатит во всех залежах представлен богатой F разновидностью. В Маргаритовской залежи встречается необычная разновидность, обогащенная As, количество которого достигает 2.65 % массы (или 0.18 ф.е.) [21].

В массивных гранатовых и “бурундучных” магнетит-гранатовых породах и рудах среди аксессуарных

Таблица 2. Результаты изучения эндогенных висмутовых минералов Белогорского месторождения с помощью рентгеноспектрального микроанализатора (мас. %).

№	O	S	Ca	Cu	Zn	Ag	Te	Au	Pb	Bi	Сумма	Минерал	Формула
Благodatная залежь													
1										100.73	100.73	висмут	Bi _{1,00}
2						24.13				75.55	99.68	Bi ₂ Te	Bi _{1,97} Te _{1,03}
3	1.31					27.42			3.27	65.12	97.12	Bi ₃ Te ₂	(Bi _{2,87} Pb _{0,13}) _{3,02} Te _{1,98}
4		14.07								85.91	99.98	(Bi,Ag)(S,Te)	Bi _{0,97} S _{1,03}
5		13.10				6.02	5.53			76.14	100.79	(Bi,Ag)(S,Te)	(Bi _{0,84} Ag _{0,13}) _{0,97} (S _{0,93} Te _{0,10}) _{1,03}
6		7.01				18.67				75.48	101.16	Bi ₅ Te ₂ S ₃	Bi _{4,97} Te _{2,02} S _{3,01}
7	1.81	16.17	0.26						2.88	79.22	100.34	Bi ₃ S ₄	(Bi _{2,96} Pb _{0,11}) _{3,07} S _{3,93}
8		16.86								82.25	99.11	Bi ₃ S ₄	Bi _{3,00} S _{4,00}
9		17.77	0.30							79.63	97.70	висмутин	Bi _{2,04} S _{2,96}
10		17.69	0.64			0.70				78.19	97.22	висмутин	(Bi _{2,00} Ag _{0,04}) _{2,04} S _{2,96}
11		15.93		3.87					15.18	63.04	98.02	гладит	(Pb _{1,17} Cu _{0,99} Bi _{4,85}) _{7,01} S _{7,99}
12		12.95				9.04			37.88	39.86	99.73	(Pb,Ag)BiS ₂	(Pb _{0,85} Ag _{0,39}) _{1,24} Bi _{0,89} S _{1,87}
13		12.88				2.00	1.19		42.47	41.58	100.12	(Pb,Ag)BiS ₂	(Pb _{0,98} Ag _{0,09}) _{1,07} (Bi _{0,95} Te _{0,05}) _{1,00} S _{1,93}
14		15.50		3.35		9.84			25.37	49.82	103.88	(Pb,Ag)BiS ₂	(Pb _{0,52} Ag _{0,39}) _{0,91} Bi _{1,02} S _{2,07}
15		14.43					2.14		41.14	43.41	101.12	козалит	Pb _{2,05} Bi _{2,14} (S _{4,64} Te _{0,17}) _{4,81}
16		15.25							41.06	42.96	99.27	козалит	Pb _{2,03} Bi _{2,09} S _{4,88}
17		18.81	1.88			8.16			31.34	36.81	97.00	галенобисмутит	Pb _{1,04} (Cu _{0,20} Ag _{0,52} Bi _{1,21}) _{1,93} S _{4,03}
Маргаритовская залежь													
18						9.23				90.93	100.16	Bi ₆ Te	Bi _{6,00} Te _{1,00}
19						10.67				90.01	100.68	Bi ₅ Te	Bi _{5,02} Te _{0,98}
20						12.80				85.37	98.17	Bi ₄ Te	Bi _{4,01} Te _{0,99}
21		5.92				12.12				83.28	101.32	жозеит А	Bi _{4,11} Te _{0,98} S _{1,91}
22		17.39						1.93	79.41	98.73	висмутин	(Bi _{2,04} Pb _{0,05}) _{2,91}	
23		19.02							80.95	99.97	висмутин	Bi _{1,98} S _{3,02}	
24		8.56				2.29	12.62			77.20	100.67	джонасонит	Au _{0,89} Bi _{5,14} (S _{3,72} Te _{0,25}) _{3,97}
Скальная залежь													
25		14.41				4.05			39.68	40.85	98.99	(Pb,Ag)BiS ₂	(Pb _{0,88} Ag _{0,17}) _{1,05} Bi _{0,89} S _{2,06}
Белогорская залежь													
26										97.67	97.67	висмут	Bi _{1,00}

Таблица 3. Результаты изучения экзогенных висмутовых минералов Белогорского месторождения с помощью рентгеноспектрального микроанализатора.

№	O	C	F	V	Cl	Zn	Ag	Cu	As	Pb	Bi	Сумма	Минерал	Формула
Благodatная залежь														
1	12.33		1.10								86.62	100.05	добреит	Bi(OH) _{0.86} F _{0.14}
2	9.64		1.85								87.6	99.09	добреит	Bi(OH) _{0.77} F _{0.23}
3	8.29		5.91			0.67					83.38	98.28	заварицит	(Bi _{0.97} Zn _{0.03}) _{1.00} OF _{0.76} (OH) _{0.24}
4	15.45	2.34*								0.43	80.73	98.95	бисмутит	(Bi _{1.99} Pb _{0.01}) _{2.00} O ₂ (CO ₃)
Маргаритовская залежь														
5	7.93			10.95							82.31	101.19	бисмоклит	Bi(OH) _{0.22} Cl _{0.78}
6	10.55										88.71	99.26	бисмит	Bi ₂ O ₃
7	17.07					1.41	15.25				64.40	98.13	прайзингерит	(Bi _{2.88} Cu _{0.21}) _{3.09} [AsO ₄] _{1.91} O(OH)
Скальная залежь														
8	16.64	0.76					13.97				67.74	99.62	прайзингерит	Bi _{3.11} [(AsO ₄) _{1.79} (VO ₄) _{0.10}] _{1.89} O(OH) _{0.61} F _{0.39}
9	15.96	2.40*				1.23	1.89				75.81	97.29	бисмутит	(Bi _{1.82} Zn _{0.10} Ag _{0.08}) _{2.00} O ₂ (CO ₃)

Примечание. * – нормативное содержание, рассчитанное из анализов на основе одного атома углерода в формуле минерала.

Таблица 4. Результаты изучения некоторых минералов W, Mo и благородных металлов, ассоциирующих с висмутовыми минералами в карбонатных гнездах, с помощью рентгеноспектрального микроанализатора (мас. %).

№	O	Si	S	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	Mo	Ag	W	Au	Pt	Сумма	Минерал	Формулы
Маргаритовская залежь																
1	23.29			15.09		2.12			7.10		51.72			99.51	шеелит-повеллит	Ca _{1.03} (W _{0.77} Mo _{0.20}) _{0.97} O ₄
2	24.16			16.69				2.16	24.27		29.38			96.66	шеелит-повеллит	Ca _{1.00} (Mo _{0.61} W _{0.39}) _{1.00} O _{3.64}
3	28.69			19.52				1.96	48.19		0.68			99.04	повеллит	Ca _{0.98} (Mo _{1.01} W _{0.01}) _{1.02} O _{3.61}
4	25.76			18.09				1.99	34.52		17.75			98.11	шеелит-повеллит	Ca _{1.00} (Mo _{0.75} W _{0.21}) _{1.00} O _{3.54}
5	2.14	0.43	35.17	1.75				1.14	59.18					99.81	молибденит	Mo _{1.08} S _{1.93}
6	26.11	0.56		16.05		0.58		1.81	19.78		33.21			98.57	шеелит-повеллит	Ca _{1.02} (Mo _{0.52} W _{0.46}) _{0.98} O _{4.03}
7	24.65			15.33				10.57	10.57		47.39			97.94	шеелит-повеллит	Ca _{1.02} (Mo _{0.29} W _{0.69}) _{0.98} O ₄
8	23.16			16.43				14.47			45.85			99.91	шеелит-повеллит	Ca _{0.99} (W _{0.65} Mo _{0.36}) _{1.01} O ₄
9	25.57			4.50	13.89	2.24					51.77			102.97	вольфрамит	(Mn _{0.88} Fe _{0.14}) _{1.02} (WO ₄) _{0.98}
10	21.59			4.16	13.94	2.21					50.36			98.60	вольфрамит	(Mn _{0.93} Fe _{0.07}) _{1.00} (WO ₄) _{1.00}
11	20.77			13.71		2.35					60.91			97.74	шеелит	Ca _{1.02} (WO ₄) _{0.98}
Благodatная залежь																
12	29.34	12.41		21.9	1.58	17.94							11.19	94.36	платина	Pt _{1.00}
13	16.38	8.00		13.03	0.37	11.48				7.44		44.06		100.76	золото	Au _{0.76} Ag _{0.24}
Белогорская залежь																
14	32.44	14.09		16.19	0.41	4.76	5.91			1.15		16.81		99.31	купроаурид	Cu _{0.99} (Au _{0.90} Ag _{0.11}) _{1.01}

Примечание. В ан. 1, 6, кроме того, 0.19 и 0.47 мас. % P, соответственно; 9 – 5.00 Sr; 10 – 0.52 P и 5.82 Sr; 14 – 0.39 Mg и 7.18 Al.

минералов были обнаружены циркон, бадделейт, торит, торит и ильменит-пирофанитовый твердый раствор. Присутствуют рутил, барит, вольфрамит и шеелит. Широко распространены члены кобальтингерсдорфитового изоморфного ряда, леллингит, арсенипирит и диарсенид $(\text{Fe,Ni})\text{As}_2$.

Минералогия продуктов средне-низкотемпературного преобразования массивных гранатовых и “бурундучных” магнетит-гранатовых пород и руд Белогорской, Благодатной и Маргаритовской залежей представляет особый интерес. Амфибол относится к тремолит-ферроактинолитовому ряду и обогащен Mn. Для Благодатной залежи характерна ассоциация амфибола с родонитом. Карбонат представлен кальцитом с небольшим количеством родохрозитового, сидеритового и, в единичных случаях, магнезитового миналов. Для продуктов низко-, среднетемпературного изменения массивных гранатовых и “бурундучных” магнетит-гранатовых пород и руд Белогорской, Благодатной и Маргаритовской залежей свойственны разнообразные минералы редких элементов. Они присутствуют в существенно магнетитовых блоках и карбонатных гнездах, характерных для наиболее переработанных участков, а также встречаются в составе рассекающих весь объем массивных гранатовых и “бурундучных” магнетит-гранатовых пород и руд тонких извилистых прожилков и просечек гранат-карбонатного состава.

Для магнетита сливного облика, слагающего существенно магнетитовые блоки, наиболее характерны микровключения касситерита, образовавшиеся за счет Sn, присутствовавшего в гранате, а для карбоната и флюорита карбонатных гнезд – крупные просечки (по плоскостям спайности) сфалерита и микровключения сфалерита, молибденита и членов шеелит-повеллитового изоморфного ряда. В составе рассекающих весь объем в разной степени измененных массивных гранатовых и “бурундучных” магнетит-гранатовых пород и руд тонких извилистых прожилков и просечек гранат-карбонатного (с флюоритом и родонитом) состава обнаружены галенит, сфалерит, пирит, халькопирит, арсенипирит, гудмундит, ульманит, станнин, сульфосоли, стибнит, самородная Sb и многие другие минералы.

На фоне снижения температуры кристаллизации сливного магнетита происходило возрастание в нем содержания якобитового минала до 33 мол. % [21]. Сфалерит в карбонатных гнездах представлен мало-железистой или безжелезистой разновидностью коричневой или зеленой окраски. В Благодатной, Белогорской и Маргаритовской залежах распространены экзогенные кислородсодержащие минералы – бастнезит, ильземанит, лафоссаит, массикот и другие.

Ранние ассоциации Скальной залежи сложены гранатом, пироксеном и бустамитом. В качестве акцессорных минералов в них присутствуют ильменит-пирофанитовый твердый раствор, титанит, циркон, монацит, алланит, санборнит, перовскит, рутил, апатит, фосфат InPO_4 и барит. Встречаются, кроме того, соединения $\text{Ni} - \text{Ni}_2\text{As}_3$, никелин, диарсенид $(\text{Fe,Ni})\text{As}_2$, ульманит и кобальтингерсдорфит. Гранат относится к гроссуляр-спессартиновой разновидности, иногда обогащенной (до 24.3 мол. %) андрадитовым миналом. Пироксен является членом диопсид-геденбергит-иогансенитовой серии и отличается непостоянным содержанием иогансенитового минала (16.9–23.9 мол. %). Иногда в анализах пироксена присутствуют содержания Zn (до 0.40 мас. %). Бустамит встречается совместно с клинопироксеном. Он относится к редкой, богатой Mn и наиболее бедной Ca разновидности, характерной также для Дальнегорского боросиликатного месторождения [22]. Ильменит-пирофанитовый твердый раствор присутствует в виде рассеянных удлиненных табличатых кристаллов. Его состав изменяется в широких пределах – от состава почти “чистого” пирофанита (88.9 мол. % MnTiO_3) до состава обогащенного Mn ильменита (69.4 мол. % FeTiO_3).

Продукты средне-низкотемпературного изменения ранних ассоциаций Скальной залежи сложены, главным образом, карбонатом, амфиболами, марганцовистым хлоритом и манганаксинитом. Карбонат представлен манганкальцитом (до 12 мол. % родохрозитового минала). Амфибол тремолит-ферроактинолитового ряда тоже обогащен Mn (до 2.90 мас. %). Изредка встречается амфибол куммингтонит-грюнеритового ряда, представленный богатой Mn и Fe разновидностью. Аксинит представлен очень богатой Mn разновидностью, относящейся к манганаксинит-тинценитовому изоморфному ряду.

Минералы благородных металлов обнаружены во всех залежах Белогорского месторождения как в ранних ассоциациях, так и в продуктах их преобразования. Они представлены самородным Au без примесей, Au-Ag твердым раствором, неупорядоченными Cu-Ag-Au твердыми растворами (на основе Au), неупорядоченными твердыми растворами или, возможно, интерметаллическими соединениями Cu_2Au , $\text{Cu}_4(\text{Au,Ag})_3$, CuAu_2 , джонасонитом, Pd_3Ag , а также Pd_4Ag , PdPt , самородной платиной, сульфидом Ag, богатым Ag тетраэдритом, полибазитом, разнообразными соединениями Ag с Bi, Te, Sb и другими минералами. Подробно Au-Ag-Pd-Pt минерализация рассмотрена в отдельной публикации [36].

Висмутовая минерализация Белогорского месторождения представлена большой группой эндогенных

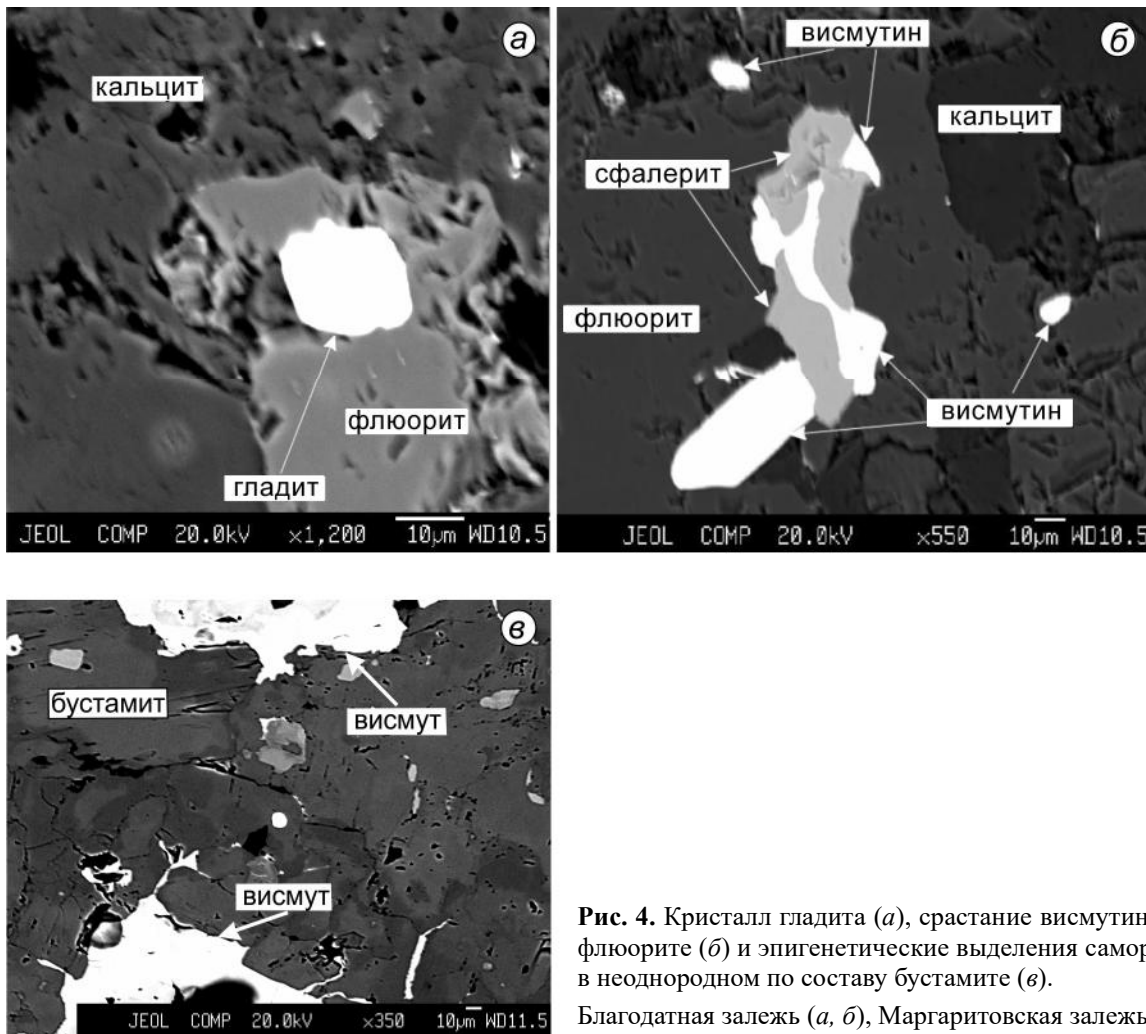


Рис. 4. Кристалл гладита (а), сростание висмутин и сфалерита в флюорите (б) и эпигенетические выделения самородного висмута в неоднородном по составу бустамите (в).

Благodatная залежь (а, б), Маргаритовская залежь (в).

и экзогенных минералов, включающей, кроме самородного Bi, сульфиды, теллуриды и сульфотеллуриды Bi, Bi и Pb, Bi, Pb и Ag, Bi и Au, а также кислородсодержащие висмутовые соединения. Эндогенные висмутовые минералы (табл. 2) встречаются во всех залежах Белогорского месторождения в продуктах средне-низкотемпературного гидротермального преобразования ранних ассоциаций. В Белогорской, Благodatной и Маргаритовской залежах в виде мелких выделений они встречаются в составе рассекающих весь объем в разной степени измененных массивных гранатовых и “бурундучных” магнетит-гранатовых пород и руд тонких извилистых прожилков и просечек гранат-карбонатного (с флюоритом и родонитом) состава. Однако основное их количество в этих залежах в виде скоплений отдельных, главным образом, мелких (диаметром 10–15 мкм и менее) бесформенных зерен и кристаллов или их агрегатов присутствует в карбонатных гнездах – в карбонате и флюорите, или на контакте карбоната и флюорита с более ран-

ним гранатом. В карбонате и флюорите они образуют самостоятельные кристаллы (рис. 4, а) и сростания друг с другом, сфалеритом (рис. 4, б), галенитом или слагают удлиненные участки вдоль плоскостей спайности. Висмутовые минералы, кроме того, в виде мелких гнезд и вкрапленности нередко развиваются по родониту, тоже тяготеющему к карбонатным гнездам, а также слагают эпигенетические гнезда и прожилки в бустамите (рис. 4, в) или (в сростании с кальцитом) в андрадите.

С эндогенной висмутовой минерализацией на Белогорском месторождении связано основное количество Ag. С висмутовыми минералами, кроме того, тесно ассоциируют разнообразные минералы этого элемента, а также Au, платиноидов, Mo и W.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Висмутовые минералы Белогорского месторождения представлены самородным Bi, висмутином, жозеитом А, козалитом, гладитом, галенобисмутином,

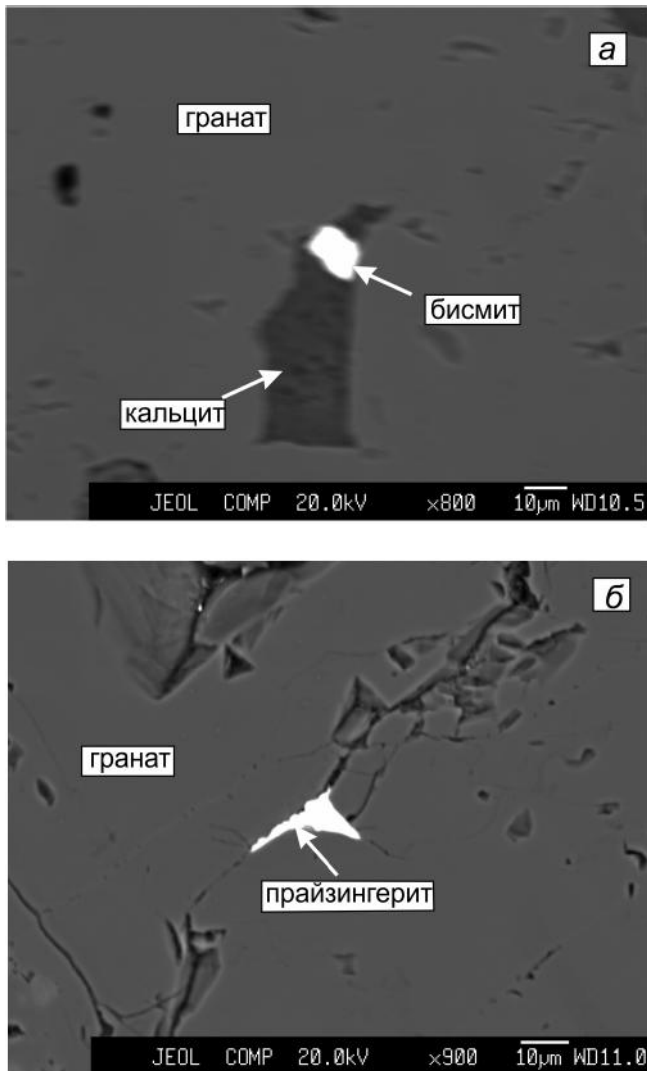


Рис. 5. Эпигенетические включения кислородсодержащих висмутовых минералов: бисмита (в сростании с кальцитом) в андрадите (а) и прайзингерита в гроссуляр-спескартиновом гранате (б).

Маргаритовская залежь (а), Скальная залежь (б).

джонасонитом, Bi_2Te и большой группой других названных соединений. В Благодатной, Белогорской и Маргаритовской залежах широко распространены экзогенные кислородсодержащие минералы Bi (табл. 3) – бисмит, бисмутит, бисмоклит, добреит, заварицкит и прайзингерит, слагающие (вместе с кальцитом) мелкие гнезда (рис. 5, а) или выполняющие микротрещинки (рис. 5, б) в гранате. В Скальной залежи висмутовые минералы – самородный Bi и соединение $(\text{Pb,Ag})\text{BiS}_2$ (табл. 2), так же как и в основных залежах месторождения, образуют включения в продуктах средне-низкотемпературного изменения ранних ассоциаций, главным образом, в карбонате.

В данной работе для минералов системы “Bi-(Te, Se)-S” принята систематика Н. Дж. Кука с соавторами [46], основанная на выделении рядов или подсистем по отношению $\text{Bi}/(\text{Te}+\text{Se}+\text{S})$. Согласно автору, для составов минералов таких подсистем характерно удивительное постоянство отношения $\text{Bi}/(\text{Te}+\text{Se}+\text{S})$. Отклонение от него может быть связано с проявлением разупорядоченности. Большая часть минералов, относящихся к одной подсистеме, в основном, ограничена в изменении состава и в отношении Te, Se и S. Наиболее широкое изменение состава характерно для соединений Bi и Te, таких как хедлейит и цумоит, а также для Se-содержащих фаз (например, лайтакарита), связанное с изоморфными замещениями между Te, Se и S. Поэтому теоретические формулы многих упоминавшихся в литературе в качестве самостоятельных и вынесенных нами на классификационную диаграмму Н. Дж. Кука с соавторами (рис. 6) висмутовых минералов могут соответствовать лишь промежуточным составам изоморфных рядов. Всем минералам свойственно замещение Bi небольшим количеством Pb, особенно минералам подсистемы $\text{Bi}_4\text{Te}_3\text{--Bi}_4\text{Se}_3\text{--Bi}_4\text{S}_3$. Из большой группы упоминавшихся в геологической литературе соединений Bi и Te (рис. 7) не вызывает сомнения существование в качестве самостоятельных минералов теллуровисмутита, цумоита, пильзенита и хедлейита, так как это подтверждено структурными исследованиями [46].

Самородный Bi отличается оптической анизотропией и полисинтетическим двойникованием. В отраженном свете – кремово-белый со слабым плеохроизмом. Этот минерал встречается в продуктах низко-среднетемпературного изменения ранних ассоциаций во всех залежах Белогорского месторождения или образует эпигенетические мономинеральные гнезда и прожилковидные выделения в бустамите (рис. 4, в) и других минералах скарнов.

Соединение Bi_2Te описано Г.Н. Гамяниным [6], В.Л. Гончаровым с соавторами [9], А. Лукконе-ным [57], К. Гу с соавторами [48] и др. Состав минерала с такой теоретической формулой близок к составу хедлейита и “висмутистого” цумоита (рис. 7), однако, судя по оптическим свойствам, отличающимся (незначительно) от оптических свойств хедлейита, и другим данным, он является, скорее всего, самостоятельным минералом [46]. Соединение Bi_2Te получено экспериментальным способом [45, 63]. На Белогорском месторождении соединение Bi_2Te обнаружено в измененной гранатовой породе (с небольшим количеством пироксена и актинолита), вместе с богатой Ag ассоциацией висмутовых минералов, таких как соединения $(\text{Pb,Ag})\text{BiS}_2$, $(\text{Bi,Ag})(\text{S,Te})$ и необычайно

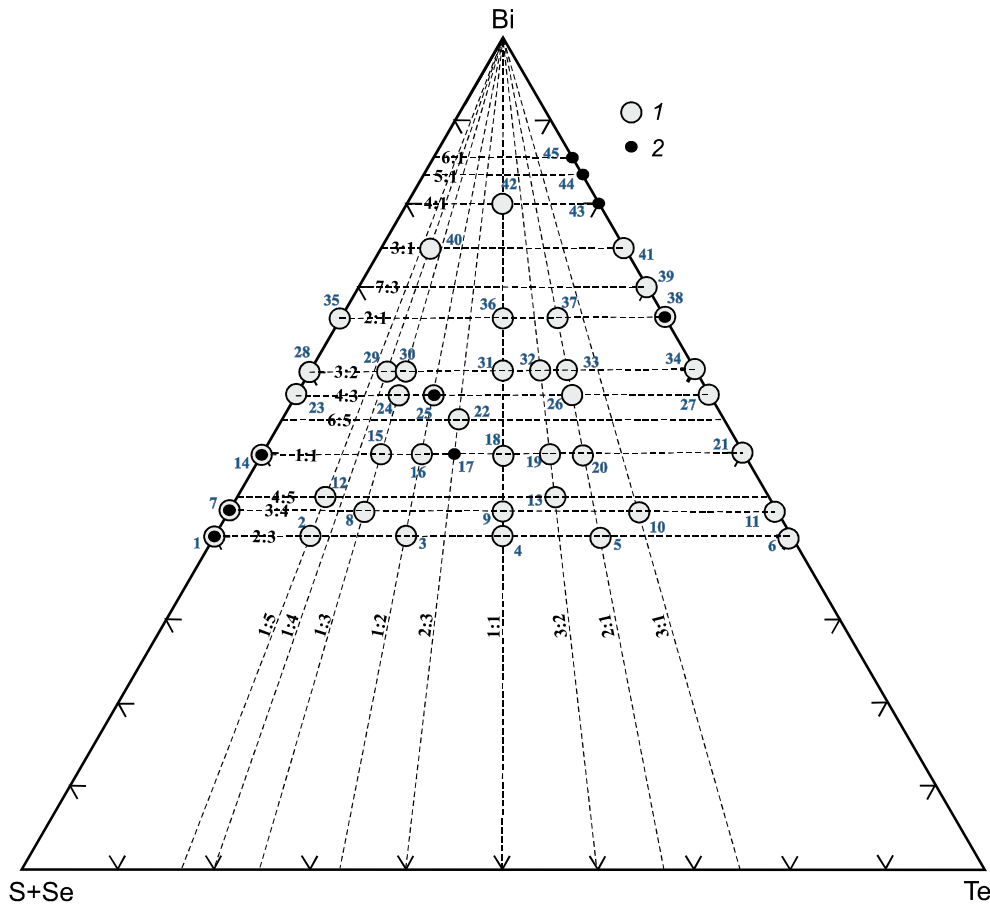


Рис. 6. Классификационная диаграмма минералов в системе “Bi-Te-(S,Se)”, по Н. Куку с соавторами [46], с изменениями и дополнениями.

1, 2 – точки теоретических составов минералов: литературные источники (1), данная работа (2).

Подсистемы – сечения диаграммы по $Bi/(Te+S+Se)=x$, и номера на рисунке:

$x=2:3$ – 1 – Guanajuatite, Paraguajuatite, висмутин; 2 – Bi_2TeS_3 [66]; 3 – скиппенит, Bi_4TeSe_2 [65]; 4 – $Bi_4Te_3Se_2$ [60]; 5 – тетрадимит, кавачулит; 6 – теллуrowисмутит; $x=3:4$ – 7 – Bi_3S_4 [33, данная работа]; 8 – $Bi_3Se_2TeS^*$ [15], Bi_3TeS_3 [34]; 9 – $Bi_3Te_2S_2^*$ [8, 50], $Bi_3Te_2(Se,S)^*$, Bi_3Te_2SeS [25]; 10 – Bi_3Te_3S [31]; 11 – руклиджейт; $x=4:5$ – 12 – Bi_4TeS_4 [23, 51, 56]; 13 – $Bi_4Te_3(S,Se)_2^*$ [67]; $x=1:1$ – 14 – невскит, BiS [71, данная работа], Bi_2SeS^* [67], $Bi_2(Se,S)$, [53]; 15 – Bi_4TeS_3 [34], Bi_4TeSe_3 [53], $Bi_4Te(S,Se)_3$ [28]; 16 – теллуrowневскит; 17 – $Bi_5Te_2S_3$ (данная работа); 18 – ингодит, $Bi_4Te_2S_2$ [50]; 19 – $Bi_5Te_3S_2$ искусственный [70]; 20 – сульфоцумоит; 21 – цумоит $BiTe$; $x=6:5$ – 22 – баксанит; $x=4:3$ – 23 – лайтакарит, икунолит; 24 – жозеит С; 25 – жозеит В [48], $Bi_4Te_2Se^*$ [48]; 27 – пильзенит; $x=3:2$ – 28 – Bi_5S_7 [71]; 29 – $Bi_{15}Te_2S_8^*$ [34]; 30 – $Bi_6TeS_4^*$ [34]; 31 – протожозеит, $Bi_6Te(S,Se)$ [17, 25, 34, 67]; 32 – $Bi_{15}Te_6S_4$ [34]; 33 – $Bi_6Te_4S_2^*$ [8]; 34 – Bi_3Te_2 [18, 59, 68]; $x=2:1$ – 35 – Bi_2S [46]; 36 – Bi_4TeS [58]; 37 – Bi_6Te_2S [62], Bi_6Te_2Se [54, 55]; 38 – Bi_2Te [6, 9, 48, 57, данная работа]; $x=7:3$ – 39 – хедлейит; $x=3:1$ – 40 – $Bi_{15}TeS_4$ [8]; 41 – Bi_3Te [23, 61]; $x=4:1$ – 42 – Bi_8TeS [8]; 43 – Bi_4Te (данная работа); $x=5:1$ – 44 – Bi_5Te (данная работа); $x=6:1$ – 45 – Bi_6Te (данная работа).

*после формул минералов в подписях к рис. 6 – внесен CNMMN IMA в систему кодификации существующих названных минералов [65].

богатая Ag разновидность галеновисмутита. Висмутовые минералы приурочены, главным образом, к новообразованным выделениям карбоната. В образцах, содержащих соединения Bi_2Te , также встречаются магнетит, халькопирит, пирит, вольфрамит, шеелит, касситерит, сульфид Ag и другие минералы. В отраженном свете этот минерал Белогорского месторождения имеет серебристо-белую со слабым желтоватым оттенком окраску и обладает отчетливой анизотропией и высокой отражательной способностью. Его анализы хорошо пересчитываются на формулу Bi_2Te (табл. 2). Впервые для Сихотэ-Алиня такой минерал был обнаружен в флогопит-оливиновых породах Мокрушинской взрывной структуры палеоценового возраста в скоплениях зерен минералов Bi и Te, таких как самородный Bi, цумоит, соединение Bi_3Te , а также соединение Bi_4TeS_4 [23]. Соединение Bi_2Te является крайним теллуристым членом семейства ми-

тропией и высокой отражательной способностью. Его анализы хорошо пересчитываются на формулу Bi_2Te (табл. 2). Впервые для Сихотэ-Алиня такой минерал был обнаружен в флогопит-оливиновых породах Мокрушинской взрывной структуры палеоценового возраста в скоплениях зерен минералов Bi и Te, таких как самородный Bi, цумоит, соединение Bi_3Te , а также соединение Bi_4TeS_4 [23]. Соединение Bi_2Te является крайним теллуристым членом семейства ми-

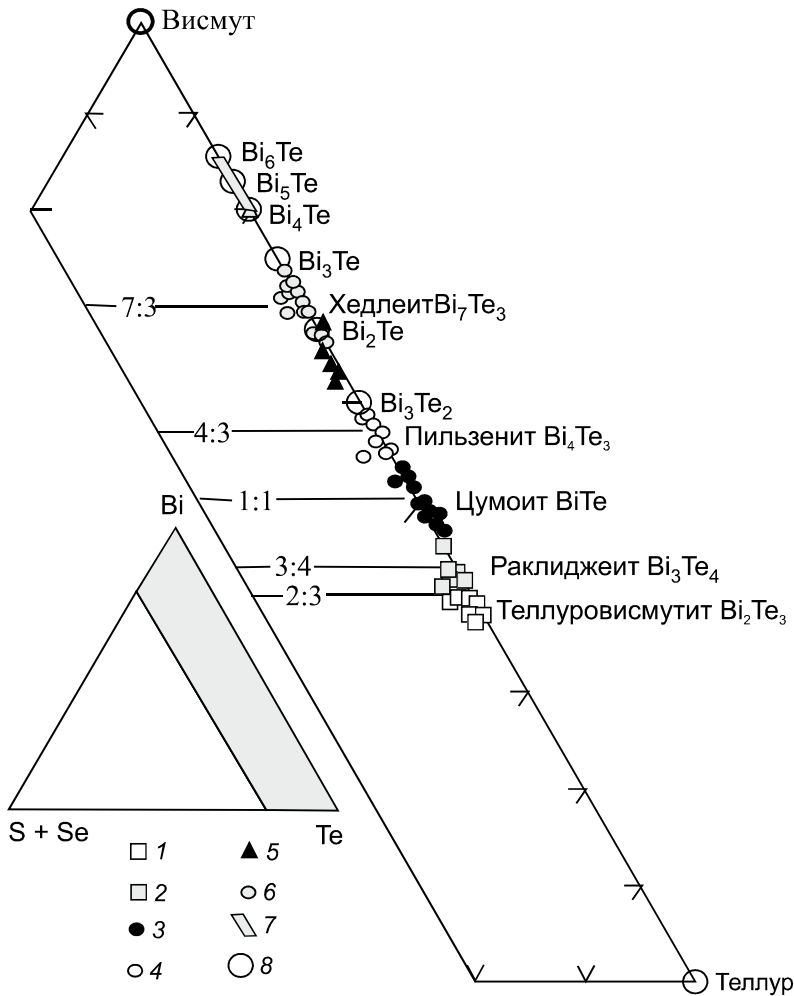


Рис. 7. Диаграмма составов минералов в сечении “Bi–Te” системы “Bi–Te–(S + Se)”, по Н. Куку с соавторами [46], с изменениями и дополнениями.

1 – теллуrowисмутит; 2 – раклиджеит; 3 – цумоит; 4 – пильзенит; 5 – “висмутистый цумоит”; 6 – хедлейит; 7 – ряд составов “хедлейита” из постскарновой сульфидно-арсенидной минерализации железорудного месторождения Мартиново в Болгарии [47]; 8 – теоретические составы соединений Bi_2Te , Bi_3Te , Bi_4Te , Bi_5Te , Bi_6Te , самородных теллура и висмута.

нералов в системе “Bi–Te–(S,Se)” с отношением $Bi/(Te,S,Se)=2:1$. Из других минералов этого семейства известны соединения Bi_6Te_2S , Bi_6Te_2Se , Bi_4TeS и Bi_2S (рис. 6). Указывались также соединения $Bi_2(S,Te,Se)$ [55] и $Bi_6(Te,Se)_3$ [48, 69], что наводит на мысль о возможном существовании изоморфных рядов в системе $Bi_2S-Bi_2Te-Bi_2Se$, включающих составы некоторых перечисленных выше соединений.

Из более богатых Bi, по сравнению с минералом Bi_2Te и хедлейитом, теллуридов в литературе имеются немногочисленные сведения только о соединениях Bi_3Te [23, 61] и $Bi_3(Te,S)$ [6]. В составе висмутовой минерализации Белогорского месторождения встречаются Te-содержащие минералы, анализы которых пересчитываются на теоретические формулы Bi_4Te , Bi_5Te и Bi_6Te (табл. 2). В составе постскарновой сульфидно-арсенидной минерализации на железорудном месторождении Мартиново в Болгарии присутствует названный хедлейитом [47] минерал, анализы которого укладываются в вариационный ряд составов $(Bi_{8.53-8.93}Cu_{0.14-0.27}Fe_{0.05-0.13}Pb_{0.18-0.39})_{8.84-9.46}Te_{1.54-2.16}$, плохо

согласующихся с теоретической формулой Bi_8Te_3 . По заключению Д. Димитровой и Т. Керестеджана [47], наблюдаемое при пересчете анализов Bi/Te отношение атомных количеств значительно ближе к 4:1, чем к 8:3. Однако, как видно из диаграммы (рис. 7), “хедлейит” из месторождения Мартиново на самом деле образует ряд составов, ограниченный примерно составами соединений Bi_4Te и Bi_6Te . Можно предположить, что составы Bi_4Te , Bi_5Te и Bi_6Te относятся к одному изоморфному ряду (неназванному минералу переменного состава) или характеризуют существующие минералы с такими теоретическими формулами. Соединение Bi_4Te является крайним теллуристым членом семейства минералов в системе “Bi–Te–(S,Se)” с отношением $Bi/(Te,S,Se)=4:1$. Из других минералов этого семейства известно соединение Bi_8TeS (рис. 6). На Белогорском месторождении соединения Bi_4Te , Bi_5Te и Bi_6Te слагают мелкие зерна в измененном магнетит-гранатовом скарне и по оптическим свойствам практически не отличаются друг от друга и соединения Bi_2Te . Они встречаются (часто совместно)

в образцах, содержащих висмутин, самородный Bi, барит, монацит, леллингит, стибнит, сульфид Ag, богатый Ag тетраэдрит и купроаурид.

Встречающееся на Белогорском месторождении неназванное соединение Bi_3Te_2 (табл. 2) часто упоминается в публикациях, касающихся висмутовой минерализации. Этот минерал был описан в качестве новой фазы, обнаруженной в музейном образце типа пильзенита (“верлита”) [68] в сростаниях с жозеитом-Б. На золото-теллуридном проявлении Райконкоски в Карелии он встречается в галенит-висмут-теллуридной ассоциации вместе с хедлейитом, цумоитом и многими другими соединениями Bi [18]. В гидротермально измененных вулканитах Закарпатья (Украина) обнаружены очень богатые S и Se разновидности этого минерала [59]. На Белогорском месторождении этот минерал присутствует в карбонатных гнездах в тесной ассоциации с карбонатом, сфалеритом и флюоритом. В отраженном свете – кремово-розовый с высокой отражательной способностью. Вместе с ним в образцах встречаются соединения BiS, висмутин, гладит, соединение $\text{Bi}_5\text{Te}_2\text{S}_3$, бисмутит, касситерит, самородные Pt и Au, а также сульфид Ag. Соединение Bi_3Te_2 на Белогорском месторождении представлено необычной Pb-содержащей разновидностью (табл. 2). Оно является крайним теллуристым членом семейства указывавшихся в литературе многочисленных неназванных минералов в системе “Bi-S-(Te,Se)” с отношением $\text{Bi}/(\text{S,Te,Se})=3:2$ (рис. 6). Отмечалась также фаза состава $\text{Bi}_3(\text{Te,Se,S})_2$ [67].

Жозеит А – Bi_4TeS_2 , на Белогорском месторождении встречается в продуктах гидротермального изменения массивных гранатовых и “бурундучных” магнетит-гранатовых пород и руд Маргаритовской залежи вместе с карбонатом, флюоритом, сфалеритом, самородным Bi, соединением $(\text{Pb,Ag})\text{BiS}_2$, бисмитом, шеелитом, молибдошеелитом, джонасонитом и гетероморфитом,. В отраженном свете обладает белой окраской с едва заметным кремовым оттенком. Анизотропия умеренная, без цветовых эффектов. Этот минерал (табл. 2) является членом семейства указывавшихся в литературе минералов в системе “Bi-S-(Te,Se)” с отношением $\text{Bi}/(\text{S,Te,Se})=4/3$ (рис. 6).

В продуктах гидротермального преобразования гранат-магнетитовых пород и руд Белогорского месторождения встречаются соединения BiS и $\text{Bi}_5\text{Te}_2\text{S}_3$. Соединение BiS является сернистым аналогом невскита $\text{Bi}(\text{Se,S})$. В отраженном свете – белое (без цветовых оттенков) с высокой до умеренной отражательной способностью. На Белогорском месторождении этот минерал широко распространен, изредка встречается его Ag- и Te-содержащая разновидность

(табл. 2). Соединение BiS обнаружено в Благодатной залежи в образцах, содержащих карбонат, флюорит, сфалерит, висмутин, соединение Bi_3S_4 , самородный Bi, гладит, самородное Au, сульфид Ag, галенит, пирит, вольфрамит, касситерит, гудмундит, арсенопирит, галенобисмутит, шеелит и другие минералы. Ранее соединение BiS было обнаружено на одном из золоторудных месторождений Богемского массива (Чехия) [71] и на Николаевском месторождении (Приморье) [22]. Соединение $\text{Bi}_5\text{Te}_2\text{S}_3$ (табл. 2) встречается в карбонатных гнездах Благодатной залежи вместе с карбонатом, флюоритом, сфалеритом, висмутином, гладитом и сульфидом Ag. Соединения BiS и $\text{Bi}_5\text{Te}_2\text{S}_3$ являются членами многочисленного семейства висмутовых минералов с отношением $\text{Bi}/(\text{S,Te,Se})=1:1$ (рис. 6). Упоминались также соединения $\text{Bi}_3(\text{Te,S})_3$ [6] и $\text{Bi}_2(\text{Te,Se,S})_2$ [53].

В продуктах гидротермального преобразования массивных гранатовых и “бурундучных” магнетит-гранатовых пород и руд Благодатной залежи вместе с шеелитом, сфалеритом, висмутином и гладитом встречается соединение Bi_3S_4 , как правило, содержащее изоморфную примесь Pb (табл. 2). Ранее подобный минерал был обнаружен в одном из золоторудных месторождений Казахстана [33]. Соединение Bi_3S_4 с примесью Sb – $(\text{Bi}_{2.72}\text{Sb}_{0.32})_{3.04}\text{S}_{3.96}$, ранее было выявлено также в рудах Николаевского месторождения в Приморье и описано под названием “висмутин” [23]. Соединение Bi_3S_4 является членом семейства минералов системы “Bi-Te-(S,Se)” с отношением $\text{Bi}/(\text{S,Te,Se})=3:4$ (рис. 6). Упоминалось также соединение $\text{Bi}_3(\text{Te,Se,S})_4$ [64].

Висмутин в виде относительно крупных бесформенных выделений или кристаллов довольно часто встречается в продуктах преобразования массивных гранатовых и “бурундучных” магнетит-гранатовых пород и руд Белогорского месторождения, особенно в карбонатных гнездах. Нередко он образует относительно крупные сложные сростания со сфалеритом, размещенные в флюоритовой или карбонат-флюоритовой матрице (рис. 4, б). Особенностью висмутина Белогорского месторождения является присутствие изоморфной примеси Ag или Cu (табл. 2). Висмутин является членом семейства минералов с отношением $\text{Bi}/(\text{S,Te,Se})=2:3$ (рис. 6).

Гладит(?) (теоретическая формула $\text{PbCuBi}_5\text{S}_9$) на Белогорском месторождении наблюдался в Благодатной залежи в виде включений хорошо образованных относительно крупных кристаллов в флюорите (рис. 4, а) карбонатных гнезд. Для этого минерала Белогорского месторождения отмечается значительный недостаток S, вследствие чего его анализы лучше пе-

рассчитываются на теоретическую формулу $PbCuBi_5S_8$ (табл. 2).

Среди соединений Bi на Белогорском месторождении широко распространен минерал, по составу и оптическим свойствам близкий к козалиту. Однако в его анализах постоянно присутствует Ag , иногда Te и отмечается недостаток S по сравнению с теоретической формулой козалита $Pb_2Bi_2S_5$. Анализы этого минерала (табл. 2) соответствуют общей формуле $(Pb_{0.77-0.49}Ag_{0.20-0.34})_{0.97-0.83}Bi_{1.09-1.13}S_{1.94-2.04}$. Теоретическая формула этого минерала $(Pb,Ag)BiS_2$ близка к формуле матильдита, но предполагает присутствие Pb и вхождение части Bi в двухвалентном состоянии. Соединение $(Pb,Ag)BiS_2$ вместе с другими висмутовыми минералами встречается в карбонатных гнездах в виде включений в кальците и флюорите или образует эпигенетические сростания с кальцитом в измененном андрадите. Подобный минерал ранее был обнаружен в рудах Болотистого золоторудного месторождения (Хабаровский край) [30]. В Маргаритовской залежи, наряду с этим минералом, встречается и козалит, иногда обогащенный Te , анализы которого хорошо пересчитываются на идеальную формулу $Pb_2Bi_2S_5$, но он совсем не содержит Ag (табл. 2). В отраженном свете этот минерал белый, слабо анизотропный, без заметного двуотражения, с умеренной отражательной способностью.

Галенобисмутит встречается в Благодатной залежи вместе с пиритом, халькопиритом, вольфрамитом, неназванным соединением $Pb_4Sb_6S_{13}$, самородным Bi , висмутином, $Au-Ag$ твердым раствором, соединением $(Ag,Bi)(S,Te)$ и другими минералами. В отраженном свете – белый, отчетливо анизотропный, со слабым двуотражением. Галенобисмутит Белогорского месторождения представлен редкой разновидностью, обогащенной Cu и, особенно, Ag (табл. 2). Ранее подобная разновидность с несколько большими содержаниями Ag и меньшими Cu была обнаружена в сульфидно-магнетитовых рудах месторождения Акташ (Западный Кармазар, Таджикистан) вместе с другими висмутовыми минералами – самородным Bi , висмутином, виттихенитом, эмплектитом, айкинитом, фридрихитом и зальцбургитом [44].

Джонасонит – золото-висмутовый сульфид $AuBi_5S_4$, относится к числу редких в природе минералов. Впервые он был обнаружен в золотых рудах месторождения Цугахира в Японии [49], позднее – в золоторудных месторождениях Казахстана [33] и некоторых других местах. В России джонасонит известен в золотых рудах Восточного Забайкалья (месторождение Дарасун) [26], Якутии [32] и Центрально-Колымского региона Северо-Востока России [1].

Джонасонит обычно встречается в золото-кварцевых жилах и ассоциирует с самородными Au и Bi , теллуридами и сульфотеллуридами Bi , часто с висмутином или сложными сульфидами Pb и Bi [26]. Джонасонит Белогорского месторождения (табл. 2) является первой находкой в Сихотэ-Алине и встречается в иной геологической обстановке, но в сходной ассоциации висмутовых минералов. Он присутствует в залежах железорудного месторождения, сложенных метаморфизованными и частично регенерированными богатыми Ca силикатно-железистыми осадками, обогащенными благородными металлами и содержащими разнообразные минералы Au , Ag , Pt и Pd . На Белогорском месторождении джонасонит встречается в измененной бустамит-гранатовой (с клинопироксеном и магнетитом) породе вместе с кальцитом, флюоритом, самородным Bi , висмутином, жозеитом A , а также шеллитом, молибдошеелитом и другими минералами.

В залежах Белогорского месторождения распространены кислородсодержащие экзогенные минералы Bi . Некоторые из них, как, например, бисмит (рис. 5, а), образуют включения в кальците без признаков замещения или коррозии. Бисмутит, как правило, в небольшом количестве содержит Pb , Zn и Ag (табл. 3). В залежах Белогорского месторождения встречается также редкий в природе арсенат Bi – прайзингерит $Bi_3[AsO_4]_2O(OH)$, частично выполняющий поздние микротрещинки в гроссуляр-спессартиновом гранате Скальной залежи (рис. 5, б). Этот минерал может образовывать изоморфные ряды с шумахеритом $Bi_3[VO_4]_2O(OH)$ и петитджанитом $Bi_3(PO_4)_2O(OH)$. Впервые в России прайзингерит был обнаружен в качестве вторичного минерала в $Bi-As-Cu-U$ проявлении Магаданской области (Россия) [27]. Прайзингерит Белогорского месторождения является первой находкой в Сихотэ-Алине и, возможно, второй в России. Он иногда содержит небольшое количество шумахеритового минерала (табл. 3) и существенно обогащен F , частично заместившим, очевидно, гидроксильную группу. В залежах Белогорского месторождения широко распространены редкие в природе экзогенные минералы, относящиеся к добреит $BiO(OH)$ -заварицкит $BiOF$ -бисмоклитовой $BiOCl$ изоморфной серии. Встречаются добреит с переменным содержанием заварицкитового минерала, а также бисмоклит и заварицкит, обогащенные добреитовым минералом (табл. 3). Заварицкит, описанный в качестве нового минерала, был обнаружен в составе висмутовой минерализации Шерловогорского гранитного массива [13]. Бисмоклит в России известен в составе аксессуарной минерализации отложений южной части Уринского синклинория (юго-восток Сибирской платформы, Россия) [2].

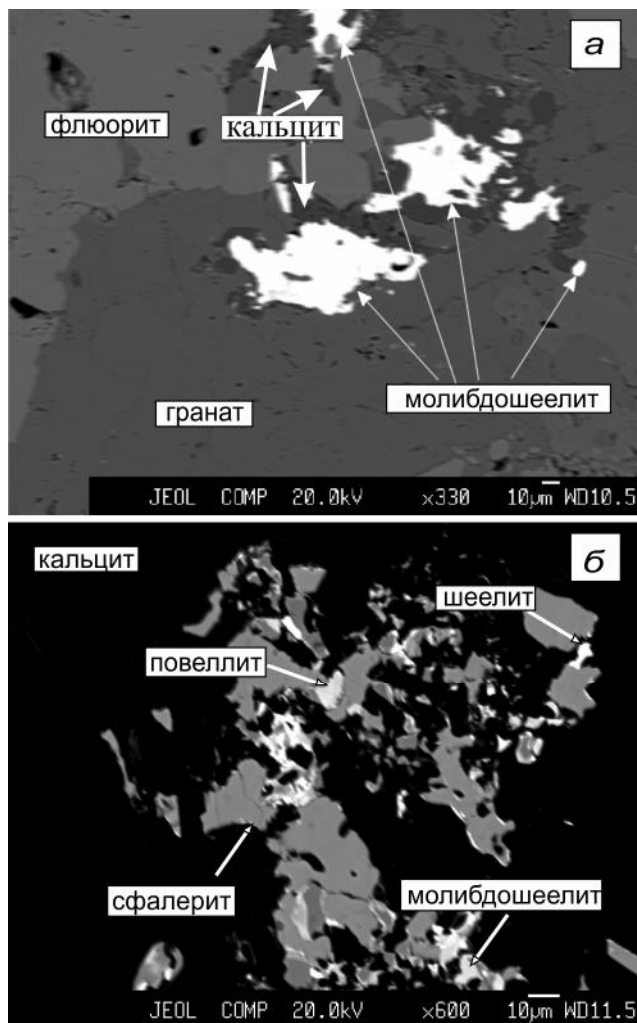


Рис. 8. Агрегаты.

a – кальцит-молибдошеелитовые в флюорите и гранате; *б* – шеелит-молибдошеелит-повеллит-сфалеритовые в кальците. Маргаритовская залежь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, залежи Белогорского месторождения содержат разнообразные висмутовые минералы, многие из которых относятся к числу редких в природе или представлены редкими минеральными разновидностями, впервые обнаруженными в Сихотэ-Алине. К ним относятся самородный висмут, висмутин, козалин, гладит(?), джонасонит, богатая Ag и Cu разновидность галенобисмутита, бисмит, бисмутит, прайзингерит, бисмоклит, заваричит, а также большая группа неназванных соединений. Особенностью эндогенной висмутовой минерализации Белогорского месторождения является ее локализация в составе продуктов низко-среднетемпературного гидротермального преобразования ранних высокотемпературных ассоциаций, особенно в крупных карбонатных (с

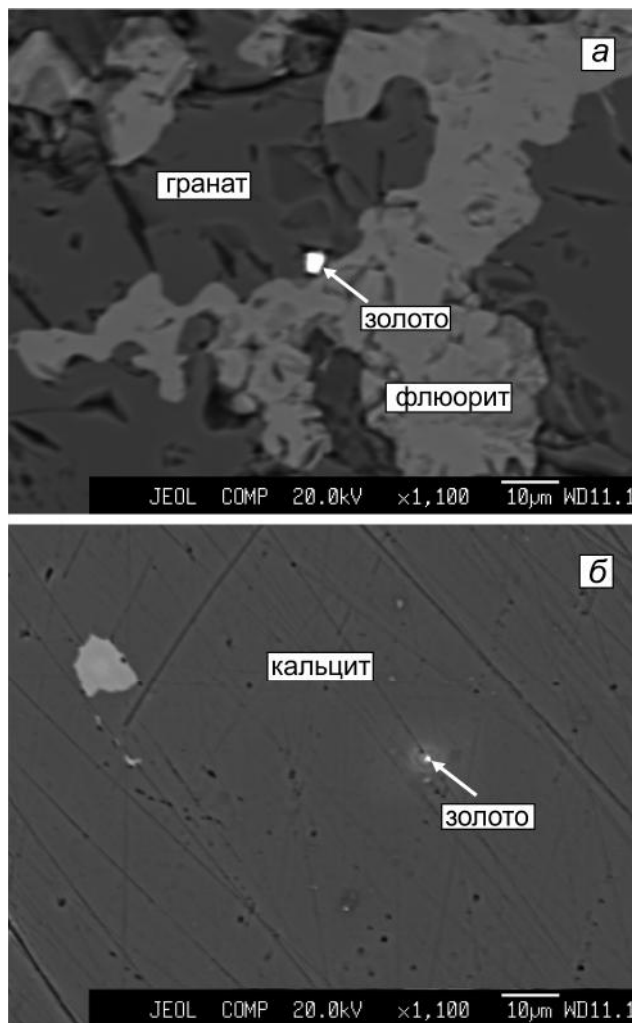


Рис. 9. Включения самородного золота.

a – в гранате (на контакте с флюоритом); *б* – в кальците. Благотатная залежь Белогорского месторождения. «Гало» вокруг зерна самородного золота на рис. 9, *б* – следствие воздействия электронного пучка на окружающий кальцит. Вид в отраженных электронах.

флюоритом) гнездах, включенных в блоки существенно магнетитовых руд, где она тесно ассоциирует с Au-Ag-Pd-Pt и Mo-W минерализацией. Вместе с висмутовыми минералами в карбонатных гнездах распространены молибденит, вольфрамит, шеелит, повеллит и промежуточные члены шеелит-повеллитового изоморфного ряда (табл. 4). Молибденит, вольфрамит, шеелит, повеллит и члены шеелит-повеллитового изоморфного ряда слагают окаймленные кальцитом мономинеральные гнезда, а также просечки в андрадите и флюорите (рис. 8, *a*), или образуют сложные неправильной формы срастания друг с другом и со сфалеритом в продуктах гидротермального преобразования ранних ассоциаций (рис. 8, *б*). С висмутовой минерализацией Белогорского месторождения связа-

но также значительное количество Ag в виде общих Ag-Vi минералов. Кроме того, наряду с висмутовыми минералами в продуктах низко-среднетемпературного изменения ранних минералов, в том числе в карбонатных гнездах на контакте с флюоритом (рис. 9, а) или в виде включений в кальците (рис. 9, б), встречаются разнообразные минералы Au, Ag, Pt и Pd (табл. 4). Тесная геохимическая связь Bi, Au и PGE в процессах минералообразования на Белогорском месторождении проявляется также и в присутствии общих минералов этих элементов, таких как джонасонит и ранее охарактеризованное незаглавленное соединение $Ru(Pb,Ag)_2Bi_4$ [20].

Ассоциация висмутовой и молибден-вольфрамовой минерализации является, как следует из литературных данных, характерной особенностью руд некоторых скарново-вольфрамовых и скарново-молибденовых месторождений (Восток-II в Приморье, Тырнауз на Северном Кавказе, Эмеральд-Фи в Канаде и других), содержащих в качестве главных минералов шеелит, молибденит и висмутин. Присутствие висмутовой и благороднометалльной минерализации наиболее характерно для золотых и комплексных золотосодержащих руд гидротермальных месторождений различной формационной принадлежности. Однако на Белогорском месторождении, в отличие от месторождений упомянутых выше типов, такие металлы, как W, Mo и Bi, так же как Au, Ag, Pd и Pt, не имеют самостоятельного практического значения, являясь сопутствующими полезными компонентами по отношению к железным рудам. Ассоциация висмутовой, благороднометалльной, никель-кобальтовой и урановой минерализации, присутствующая в рудах Белогорского месторождения [21], характерна также для месторождений пятиэлементной формации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альшевский А.В. Геология, особенности вещественного состава, генезис и перспективы золотого оруденения в Утинском узле (Центрально-Кольмский регион, Северо-Восток России): Автореф. дис. ... на канд. геол.-минер. наук. Владивосток, 2009. 29 с.
2. Анисимова Г.С., Стручков К.К. Рудная и акцессорная минерализация в отложениях южной части Уринского антиклинория // Наука и образование. 2016. № 4. С. 35–41.
3. Благодарева Н.С., Говоров И.Н., Лаговская Е.А., Славкина С.П. Материалы по минералогии Садового свинцово-цинкового месторождения / Вопросы минералогии, магматизма и рудогенеза Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1974. С. 79–92.
4. Волярович Г.П. Геология Ольгинских железорудных месторождений и их оценка // Зап. ВМО. 1940. Ч. 69. Вып. 1. С. 121–134.
5. Волохин Ю.Г., Михайлик Е.В., Бурий Г.И. Триасовая кремневая формация Сихотэ-Алиня. Владивосток: Дальнаука, 2003. 252 с.
6. Гамянин Г.Н., Лескова Н.В., Вяльсов Л.Н., Лапутина И.П. Висмутовые теллуриды – Bi_2Te and $BiTe$ – в месторождениях северо-востока СССР // Зап. Всесоюзного минерал. об-ва. 1980. № 109. С. 230–235.
7. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.
8. Годовиков А.А., Кочеткова К.В., Лаврентьев Ю.Г. Изучение сульфотеллуридов висмута Сохондинского месторождения // Геология и геофизика. 1970. № 11. С. 123–127.
9. Гончаров В.Л., Альшевский А.В., Ворцепнев В.В., Сергеева Н.И., Савва Н.И. Новая находка висмутового теллурида Bi_2Te на Северо-Востоке СССР // Докл. АН СССР. 1984. № 275. С. 717–720.
10. Гуляева Т.Я., Щека С.А. Микронеоднородности редких разновидностей магнетита и их генетическое значение / Минералы – индикаторы петрогенезиса. Владивосток. 1980. С. 62–68.
11. Гуляева Т.Я. Оловосодержащий андрацит Белогорского месторождения (Приморье) // Тихоокеан. геология. 1982. Т. 1, № 5. С. 110–113.
12. Гуляева Т.Я., Щека С.А. О редкой Zn-Mg-марганцевой разновидности магнетита // Докл. АН СССР. 1982. Т. 267, № 6. С. 1448–1453.
13. Долманова Е.И., Сендерова В.М., Янченко М.Т. Заварицит ($BiOF$) – новый минерал из группы оксифторидов // Докл. АН СССР. 1962. Т. 146, № 3. С. 680–682.
14. Дымкин А.М., Шешегов Ф.Н., Моглиева М.П. Пироксеновые скарны Николаевского месторождения (Тетюхинское рудное поле) / Тр. ИГиГ СО АН СССР, 1974. Вып. 55. С. 81–90.
15. Ефимов А.В., Ненашева С.Н., Бородаев Ю.С., Мозгова Н.Н., Сивцов А.В. Гипогенная селеновая минерализация Невского оловянно-рудного месторождения // Новые данные о минералах. 1988. № 35. С. 128–151
16. Ефимова М.И., Гусев М.С., Василенко Г.П., Шабанов В.Н. Физико-химические условия минералообразования “продушин” месторождения Верхний рудник / Рудообразующая среда по включениям в минералах. М.: Наука, 1972. С. 40–44.
17. Завьялов Ю.Н., Бегизов М.Д. Новые данные о конституции и номенклатуре сульфотеллуридов висмута жозеитовой группы // Зап. Всес. минерал. об-ва. 1983. № 112. Вып. 5. С. 589–601.
18. Иващенко В.И., Сунблад К., Торицын А.Н., Голубев А.И., Лавров О.Б. Золото-теллуридное проявление Райконко-ски – новый, высокоперспективный тип комплексного благороднометалльного оруденения в протерозое Карелии // ДАН. 2008. Т. 422, № 5. С. 645–651.
19. Казаченко В.Т. Петрология и минералогия гидротермальных марганцевых пород Востока России. Владивосток: Дальнаука. 2002. 250 с.
20. Казаченко В.Т., Перевозникова Е.В., Мирошниченко Н.В., Карабцов А.А., Соляник В.А. Золото и платиноиды в скарнах Ольгинского и Дальнегорского рудных районов Приморья и некоторые вопросы металлогении южной части Сихотэ-Алиня // ДАН. 2007. Т. 414, № 5. С. 667–671.
21. Казаченко В.Т., Перевозникова Е.В., Лаврик С.Н. Минералогия и генезис Белогорского скарново-магнетитового

- месторождения (Приморье) // Тихоокеан. геология. 2011. Т. 30, № 6. С. 67–83.
22. Казаченко В.Т., Перевозникова Е.В., Нарнов Г.А. Акцессорная минерализация в скарнах Дальнегорского рудного района (Сихотэ-Алинь) // ЗРМО. 2012. № 4. С. 74–96.
23. Казаченко В.Т., Ханчук А.И., Лаврик С.Н., Перевозникова Е.В. Флогопит-оливиновые породы Таухинского террейна (Юго-Восточный Сихотэ-Алинь) // Тихоокеан. геология. 2013. Т. 32, № 5. С. 35–51.
24. Кемкин И.В. Аккреционные призмы Сихотэ-Алиня и основные события геологической эволюции Япономорского региона в мезозое. Автореф. дисс. на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Владивосток. 2003. 52 с.
25. Коваленкер В.А., Плотинская О.Ю., Консеев Р.И. Минералогия эпитермальных золото-сульфидно-теллуридных руд месторождения Кайрагач (Узбекистан) // Новые данные о минералах. 2003. Вып. 38. С. 45–56.
26. Кривицкая Н.Н., Брызгалов И.А., Спиридонов Э.М. Джонасонит $AuBi_3S_4$ – первая находка в Забайкалье // ДАН. 2008. Т. 420, № 3. С. 368–371.
27. Кринов Д.И., Азарова Ю.В., Стружков С.Ф., Наталенко М.В., Радченко Ю.И. О находке рузвельтита, прайзингерита, трегерита и цейнерита в составе Bi-As-Cu-U-минерализации рудного поля Оранжевое Верхне-Калганинского массива (Магаданская область, Россия) // Новые данные о минералах. 2011. № 46. С. 20–24.
28. Кудрина М.А., Кудрин В.С., Материкова А.М., Рябьева Е.Г., Юркина К.В. Висмутовые минералы вольфрамовых месторождений стратиформного скарноидного типа // Новые данные о минералах СССР. 1986. № 33. С. 86–93.
29. Лобанова Г.М. Условия нахождения куспидиновых и монтичеллитовых скарнов в месторождениях Южного Приморья // ЗВМО. 1960. Ч. 89, вып. 5. С. 523–541.
30. Лотина А.А. Золото-висмут-теллуровая минерализация в коренных источниках и россыпях месторождения Болотистого (Хабаровский край). Автореф. канд. дис., Владивосток, 2011. 26 с.
31. Молошаг В.П., Грабежев А.И., Гуляев Т.Я. Условия образования теллуридов в рудах колчеданных и медно-золото-порфировых месторождений Урала // Записки Всероссийского минералогического общества. 2002. Ч. СXXXI, № 5. С. 40–54.
32. Некрасов И.Я., Яковлев Я.В., Соловьев Л.И., Лескова Н.В. Первая находка золото-висмутового сульфида // ДАН. 1988. Т. 299, № 2. С. 438–441.
33. Павлова З.Т., Котельников П.Е. Формы нахождения серебра, висмута, теллура, селена, кобальта и сурьмы в медно-золоторудном месторождении Казахстана // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. 1988. № 2. С. 13–23.
34. Павлова З.Н., Омарбекова А.Е., Левин В.Л., Котельников П.Е. Новая разновидность сульфотеллурида висмута Bi_3TeS_3 // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. 2015. Т. 5, № 413. С. 76–79.
35. Перевозникова Е.В. Марганцевосиликатные породы Южного Сихотэ Алиня: минералогия и генезис. Канд. дисс. Владивосток, 2010. С. 192.
36. Перевозникова Е.В., Казаченко В.Т. Минералогия золота, серебра, платины и палладия в залежах Белогорского железорудного месторождения (Приморье) // Вестн. ВГУ. Серия геология. 2019. № 3. С. 64–73.
37. Радкевич Е.А., Лобанова Г.М., Томсон И.Н., Бородаев Ю.С., Мозгова Н.Н., Хетчиков Л.Н., Александров А.И., Соляников В.П., Смирнов С.И. Геология свинцово-цинковых месторождений Приморья // Тр. ИГЕМ АН СССР. 1960. Вып. 34, Т. 1. 328 с.
38. Ростовский Ф.И. Геология и генетические особенности свинцово-цинкового оруденения Садового рудного поля (Дальнегорский рудный район Приморья). Автореф. дисс. ... канд. геол.-минер. наук. Владивосток, 1975. 28 с.
39. Сахно В.Г., Ростовский Ф.И., Аленичева А.А. U-Pb изотопное датирование магматических комплексов Милоградовского золото-серебряного месторождения (Южное Приморье) // Докл. АН. 2010. Т. 433, № 2. С. 219–226.
40. Симаненко Л.Ф., Раткин В.В. Партизанское скарново-полиметаллическое месторождение: геология, минералогия, генезис (Таухинская металлогеническая зона, Сихотэ-Алинь). М.: Наука, 2008. 158 с.
41. Федчина Г.Н. К минералогии Николаевского скарново-полиметаллического месторождения (Приморье) / Вопросы минералогии, магматизма и рудогенеза Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1974. С. 93–100.
42. Ханчук А.И., Никитина А.П., Панченко И.В., Бурий Г.И., Кемкин И.В. Палеозойские и мезозойские гайоты Сихотэ-Алиня и Сахалина // Докл. АН СССР. 1989. Т. 307, № 1. С. 186–190.
43. Хетчиков Л.Н. Геологическое строение и минералогия месторождения Первый Советский рудник (Тетюхе) / Материалы по геологии, полезным ископаемым и минералогии южной части Дальнего Востока. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 53–187.
44. Ятимов У.А., Аюпова Н.Р., Блинов И.А., Котляров В.А. Висмутовые минералы сульфидно-магнетитовых руд месторождения Акташ (Западный Карамазар, Таджикистан) // Минералогия. 2019. № 5 (4). С. 39–51.
45. Abrikosov N.K., Bankina V.F. Study of phase diagram of the system Bi-Te // Russian Journal of Inorganic Chemistry. 1958. N 3. P. 659–667.
46. Cook N.J.C., Ciobanu C.L., Wagner T.J., Stanle C.J. Minerals of the system Bi-Te-Se-S related to the tetradymite archetype: review of classification and compositional variation // The Canadian Mineralogist. 2007. V. 45. Part 4. P. 665–708.
47. Dimitrova D., Kerestedjian T. Bismuth minerals in the posts-karn sulphide-arsenide mineralization in the Martinovo iron deposit, NW Bulgaria Geochemistry // Mineralogy and petrology. Sofia. 2006. N 44. P. 19–32.
48. Gu X., Watanabe M., Hoshino K., Shibata Y. Mineral chemistry and associations of Bi-Te(S, Se) minerals from China // N. Jb. Mineral. 2001. N 7. P. 289–309.
49. Hamasaki S., Murao S., Hoshino K., Watanabe M. and Soeda A. Unnamed Au-Bi sulfide from the Tsugahira mine, Southern Kyushi, SW Japan // Neues Jahrb. Mineral. Monatsh. 1986. Hoft 9. P. 416–422.
50. Haranczyk Cz. The Krakow Paleozoic telluride province // Przegląd Geol. 1978. V. 26, N 6. P. 337–343.
51. Hirtopanu P., Udubasa G. Minerals from Razoare Mn-Fe deposit, Preluca mountains, East Carpathians, Rovanja: new data // Rom. J. Mineral Deposits. 2015. V. 88, N 1–2. P. 11–28.

52. Jahn B.M., Valui G.A., Kruk N.N. Gonevchuk V.G, Usuki M., Jeremy T.J., Wu J.T.J. 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. // *J. of Asian Earth Sciences*. 2015. V. 111. P. 872–918.
53. Johan Z., Picot P., Ruhlmann F. The ore mineralogy of the Otish Mountains uranium deposit, Ouebec: skippenite, $\text{Bi}_2\text{Se}_2\text{Te}$, and watsinsonite, $\text{Cu}_2\text{PbBi}_4(\text{Se},\text{S})_8$, two new mineral species // *Canadian Mineralogist*. 1987. V. 25. P. 625–638.
54. Kontoniemi O., Johanson B., Kojonen K., Pakkanen L. Ore mineralogy of the Osikonmäki gold deposit, Rantasalmi, south-eastern Finland // *Geol. Surv. Finland. Spec. Pap.* 1991. N 12. P. 81–89.
55. Kontoniemi O. Geological setting and characteristics of the tonalite-hosted Paleoproterozoic gold deposit at Osikonmäki, Rantasalmi, southeastern Finland. Edited by Olavi Kontoniemi and Pekka Nurmi // *Geological Survey of Finland, Special Paper*. 1998. N 25. P. 39–80.
56. Kuikka A. Pirkkalan alueen kultaesiintymien malmimineralogia. Summary: Ore mineralogy of the gold deposits in the Pirkkala area // *Geological Survey of Finland, Report of Investigation*. 2014. N 212. 95 p.
57. Luukkonen A. Main geological features, metallogeny and hydrothermal alteration phenomena of certain gold and gold – tin – tungsten prospects in southern Finland // *Geol. Surv. Finland Bull.* 1994. N 377. P. 1–153.
58. Melnikov V.S., Bondarenko S., Grinchenko O. Conditions of Bi-telluride formation in Vyghorlat-Huta volcanic ridge, Transcarpathian region, Ukraine // *Geochemistry, mineralogy and petrology*. 2005. N 43. P. 124–127.
59. Melnikov V., Jeleň S., Bondarenko S., Balintová T., Ozdín D., Grinchenko A. Comparative study of Bi-Te-Se-S mineralizations in Slovak republic and Transcarpathian region of Ukraine. Part 2. Crystal chemistry and genesis of layered Bi-tellurides // *Mineral. Journ. (Ukraine)*. 2010. V. 32, N 1. P. 38–44.
60. Miller R. Kawazulite, related bismuth minerals and selenian covellite from the northwest territories // *Canadian Mineralogist*. 1981. V. 19. P. 341–348.
61. Nekrasov I.Ya., Lennikov A.M., Zalishchak B.L., Oktyabrsky R.A., Ivanov V.V., Sapin V.I., Taskaev V.I. Compositional variations in platinum-group minerals and gold, Konder alkaline-ultrabasic massif, Aldan Shield, Russia // *Can. Mineral.* 2005. N 43. P. 637–654.
62. Oberthur T., Weiser W. Gold-bismuth-telluride-sulphide assemblages at the Viceroy Mine, Harare-Bindura-Shamva greenstone belt, Zimbabwe // *Mineralogical Magazine*. 2008. V. 72 (4). P. 953–970.
63. Okamoto K., Tanner L.E. Bi–Te (bismuth–tellurium) // *Binary Alloy Phase Diagrams*. ASM International, Materials Park, Ohio. 1990. P. 800–801.
64. Shimizu M., Schmidt S.T., Stanley C.J., Tsunoda K. Kawazulite and unnamed $\text{Bi}_3(\text{Te},\text{Se},\text{S})_4$ in Ag-Bi-Te-Se-S mineralization from the Sutttsu mine, Hokkaido, Japan // *Neues Jahrb. Mineral. Abh.* 1995. N 169. P. 305–308.
65. Smith D.G.W., Nickel E.H. A System of Codification for Unnamed Minerals: Report of the Sub Committee for Unnamed Minerals of the IMA Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification // *Canadian Mineralogist*. 2007. V. 45. P. 983–1055.
66. Somarin A.K. Ore mineralogy and mineral chemistry of the Glen Eden Mo-W-Sn greisen-breccia system, eastern Australia // *J. Mineral. Petrol. Scie.* 2009. V. 104. P. 339–355
67. Warren H.V., Peacock M.A. Hedleyite, a new bismuth telluride from British Columbia, with notes on wehrlite and some bismuth–tellurium alloys // *Univ. Toronto Stud., Geol. Ser.* 1945. N 49. P. 55–69.
68. Weiszbürg T.G. Bi_3Te_2 : A new mineral phase from the type specimen of pilsenite (“wehrlite”) / *Acta Mineralogica-Petrographica, Szeged, XLI, Supplementum*. 2000. P. 123.
69. Xiangping Gu, Watanabe M., Hoshino K., Shibata Y. Mineral chemistry and associations of Bi-Te(S,Se) minerals from China // *Neues Jahrb. Mineral. Mon.* 2001. P. 289–309.
70. Yusa K., Kitakaze A., Sugaki A. Synthesized bismuth – tellurium – sulfur system minerals – synthetic sulfide minerals (IX) // *Science Reports Tohoku Univ., 3rd Ser.* 1979. N 14. P. 121–133.
71. Zachariá’s J., Pertold Z., Pudilová M., Žák K., Pertoldová J., Stein H., Markey R. Geology and genesis of Variscan porphyry-style gold mineralization, Petráčková hora deposit, Bohemian Massif, Czech Republic // *Mineral. Deposita*. 2001. N 36. P. 517–541.

Рекомендована к печати А.И. Ханчуком

после доработки 29.07.2021 г.
принята к печати 26.09.2021 г.

V.T. Kazachenko, E.V. Perevoznikova

Bismuth mineralization of the Belogorsky magnetite deposit (Sikhote-Alin)

Various bismuth minerals are found in the Belogorsky deposit. Many of them are rare natural minerals and mineral varieties. These are native bismuth, bismutite, cosalite, gladite(?), jonasonite, galenobismutite enriched with Ag and Cu, zavaritskite, a large group of unnamed compounds and other. A feature of the endogenous bismuth mineralization of the deposit is its localization in the products of low-medium-temperature hydrothermal transformation of early associations, especially in large carbonate (with fluorite) pockets in blocks of essentially magnetite ores, where it is closely associated with Au-Ag-Pd-Pt and Mo-W mineralization. The significant amount of Ag in the form of common Ag-Bi minerals is also associated with the bismuth mineralization of the Belogorsky deposit. A close geochemical relationship of Bi, Au, and PGEs in the processes of mineral formation at the Belogorsky deposit is also evident in the presence of common minerals of these elements, such as jonasonite and the unnamed compound $\text{Ru}(\text{Pb,Ag})_2\text{Bi}_4$.

The association of Bi and Mo-W mineralization is a characteristic feature of ores of some skarn-tungsten and skarn-molybdenum deposits containing scheelite, molybdenum and bismuthin as the main minerals. The presence of bismuth and noble-metal mineralization is most characteristic of gold and complex gold-bearing ores of hydrothermal deposits of various types. However, at the Belogorsky deposit, in contrast to the deposits of the above-mentioned types, such metals as W, Mo and Bi, as well as Au, Ag, Pd, and Pt do not have an independent practical value, being the accompanying useful components in relation to iron ores.

Rocks and ores of the Belogorsky deposit are Triassic metal-bearing sediments metamorphosed and partially regenerated in the Late Cretaceous, which were accumulated in the lagoons of the islands as a result of erosion of the laterite weathering crust of ancient gabbroids. Related to this is the enrichment of ores in different metals, including Fe and Mn, and the presence of gold-silver-palladium-platinum, nickel-cobalt, and bismuth mineralization (Bi compounds with Au and PGE included), which is characteristic of some ultramafic massifs.

***Key words:* iron ore deposit, accessory minerals, bismuth, gold, silver, platinum, mineralogy, Sikhote-Alin.**