

**ЭВОЛЮЦИЯ ПРОЦЕССОВ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ
ЗОЛОТО-РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ РУД СРЕДНЕ-ГОЛГОТАЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
(ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)**

В.И. Гвоздев¹, А.А. Гребенникова¹, А.С. Вах^{1,2}, Н.А. Горячев^{3,4}, Д.Г. Федосеев¹

¹ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, пр-т 100 лет Владивостоку 159, г. Владивосток, 690022; e-mail: anlotina@mail.ru

²ФГАОУВО Дальневосточный федеральный университет, ул. Суханова 8, г. Владивосток, 690950

³ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, ул. Портовая 16, г. Магадан, 685000

⁴ФГБУН Институт геохимии Сибирского отделения РАН им. А.П. Виноградова, ул. Фаворского 1а, г. Иркутск, 650033

Поступила в редакцию 23 марта 2018 г.

На основе результатов комплексного геологического и минералого-геохимического исследования руд золото-висмутового месторождения Средне-Голготайское с применением современных аналитических методов исследования были получены новые данные, отражающие типовые особенности и характер проявления Au-Bi-Te минерализации. В рудах Средне-Голготайского месторождения, сформированных в разные стадии золоторудного процесса, весьма широко развиты соединения Bi-Te-S и Pb-Bi-Sb-S минеральных систем, которые тесно ассоциируют с самородным золотом и являются типоморфными индикаторами условий формирования золотой минерализации.

Ключевые слова: золоторудные месторождения, золото-висмутовая минерализация, минералы, сульфосоли, типоморфизм, генезис, Восточное Забайкалье.

ВВЕДЕНИЕ

Средне-Голготайское месторождение Восточного Забайкалья является одним из характерных представителей жильных гидротермальных кварц-сульфидных гранитогенных месторождений золото-редкометалльного типа Востока России, формирование которого тесно связано со средне-позднеюрским магматизмом лагитового типа [25]. Сведения о геологическом строении месторождения, минералогии руд и условиях формирования золоторудной минерализации с разной степенью детальности охарактеризованы в работах ряда авторов [1, 4, 5, 23, 24, 26, 28, 29]. Проведенными ранее исследованиями установлено, что руды месторождения относятся к сложному турмалиновому золото-сульфидно-сульфосольному типу, для которого характерно широкое развитие пространственно совмещенных свинцово-сурьмяно-висмутовой и теллуридно-висмутовой минерализаций, находящихся в тесной ассоциации с самородным золотом [4]. По геологической позиции и минералого-геохи-

мическим особенностям руд месторождение довольно близко к выделяемому в Восточном Забайкалье «дарасунскому» минеральному типу [17, 25, 27], а также жильным сульфидно-кварцевым рудам Кировского золоторудного месторождения Верхнего Приамурья [13].

Для Средне-Голготайского месторождения характерна тесная генетическая связь золотого оруденения с Bi-Te минерализацией. В золотоносных рудах месторождения широко распространены многочисленные минеральные виды из группы висмутовых сульфосолей, минералогия которых детально рассмотрена в ряде публикаций М.С. Сахаровой с соавторами [24] и Н.С. Бортникова с соавторами [4, 5]. Проведенными исследованиями в золотоносных рудах были выявлены ряд весьма редких минералов из группы сурьмяно-висмутовых сульфосолей свинца, установленных на единичных рудных месторождениях мира, что является своеобразной «визитной» карточкой Средне-Голготайского месторождения. Эта особен-

ность минералогии руд месторождения неоднократно отмечалась в статьях ряда зарубежных исследователей [35, 36, 42, 43, 46, 48].

За последние 30 лет новые детальные минералогические исследования руд на месторождении не проводились. Это в конечном итоге и побудило авторов данной статьи на основе использования современных тонких методов изучения состава минеральных соединений провести исследования минерального состава руд Средне-Голготайского месторождения с целью получения новых данных, отражающих основные особенности формирования Au-Vi оруденения в рудных месторождениях «золото-турмалинового» типа восточной части Монголо-Охотского орогенного пояса.

В основу работы положена коллекция пород и руд разного минерального состава, собранная непосредственно авторами в процессе проведения полевых работ на месторождении в 2013 г. Для качественной диагностики минералов использовались методы световой микроскопии с применением высокоразрешающих микроскопов AxioPlan 2 и Stereo Discovery V 12 с цифровой фотокамерой AxioCam Mrc. Элементный состав минералов изучался на рентгеноспектральном микроанализаторе JXA-8100 (Jeol) в лаборатории Аналитического центра Дальневосточного геологического института ДВО РАН.

Полученные в процессе исследований новые данные в совокупности с уже полученными ранее результатами других исследователей позволили рассмотреть с новых позиций некоторые особенности формирования золото-редкометалльных руд рассматриваемого месторождения.

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Средне-Голготайское золоторудное месторождение расположено в юго-восточной части Балейского рудного поля, которое включает в себя вулканогенно-осадочные образования Балейского грабена и окаймляющие его разновозрастные магматические образования в пределах Ундинской депрессионной зоны [2]. Месторождение приурочено к узлу пересечения глубинных разломов и расположено в отдельных взаимосвязанных тектонических блоках (Центральный, Кафтановский, Южный, Северный и Восточный), которые ограничены разрывными нарушениями северо-восточного и близмеридионального направлений [29]. Основная площадь месторождения сложена палеозойскими гранитоидами ундинского комплекса, которые прорваны позднеюрскими магматическими телами, представленными штоком монзонитов и дайками диоритовых и диабазовых порфиритов, лампрофиров, гибридных порфиритов и гранодиорит-порфиритов (рис. 1). Абсолютный возраст (K/Ar метод) монзонитов

оценивается в 175 ± 5 млн лет, а даек лампрофиров – 160 ± 5 млн лет [25, 29]. На площади рудного поля месторождения широко развиты жилы выполнения, сложенные преимущественно кварцем, турмалином, карбонатом и сульфидами; незначительно – минерализованные зоны дробления и зоны измененных метасоматических пород с вкрапленной пирит-арсенопиритовой минерализацией [26]. Протяженность жил до 680 м при мощности до 3 м. Околожилные метасоматические изменения развиты слабо и представлены зонами турмалинизации, березитизации и окварцевания. Мощность зон гидротермально-измененных пород варьирует от 1 до 3 см, редко превышая 0.5 м.

Основные рудные тела месторождения представлены кварцевыми, сульфидно-кварцевыми, кварц-турмалин-сульфидными и кварц-сульфидно-карбонатными жилами. Наиболее ранние кварцевые жилы, приуроченные к разрывным нарушениям субширотного направления, содержат вкрапленную шеелитовую и молибденитовую минерализацию. Сульфидно-кварцевые жилы северо-восточного простирания, с вкрапленной арсенопирит-молибденит-висмутиновой минерализацией, содержат наиболее высокие концентрации Au и являются главными промышленными рудными телами месторождения. Промышленно золотоносными являются также и более поздние жилы кварц-турмалин-сульфидного состава северо-западного простирания, которые характеризуются широким развитием в их составе (до 50–80 %) турмалина и сульфидов, преимущественно пирита и арсенопирита. Наиболее поздние рудные образования месторождения представлены незолотоносными кварц-сульфидно-карбонатными жилами, сложенными преимущественно халцедоновидным кварцем и кальцитом, которые формировались в заключительную стадию рудного процесса.

На месторождении устанавливается определенная пространственная и генетическая связь золотого оруденения с позднеюрским дайковым комплексом. По данным В.Е. Тупякова [29], дайки диоритовых и диабазовых порфиритов являются дорудными. Дайки гибридных порфиритов и гранит-порфиров рассматриваются как внутрирудные образования, которые пересекают золото-кварцевые жилы и рассекаются золото-сульфидно-кварцевыми жилами

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ РУД, МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ, СТАДИЙНОСТЬ ПРОЦЕССОВ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ

По материалам предыдущих исследователей [4, 5, 27] и по результатам собственных наблюдений о составе рудных жил, авторами на месторождении выделены три основных типа руд: золото-кварцевые,

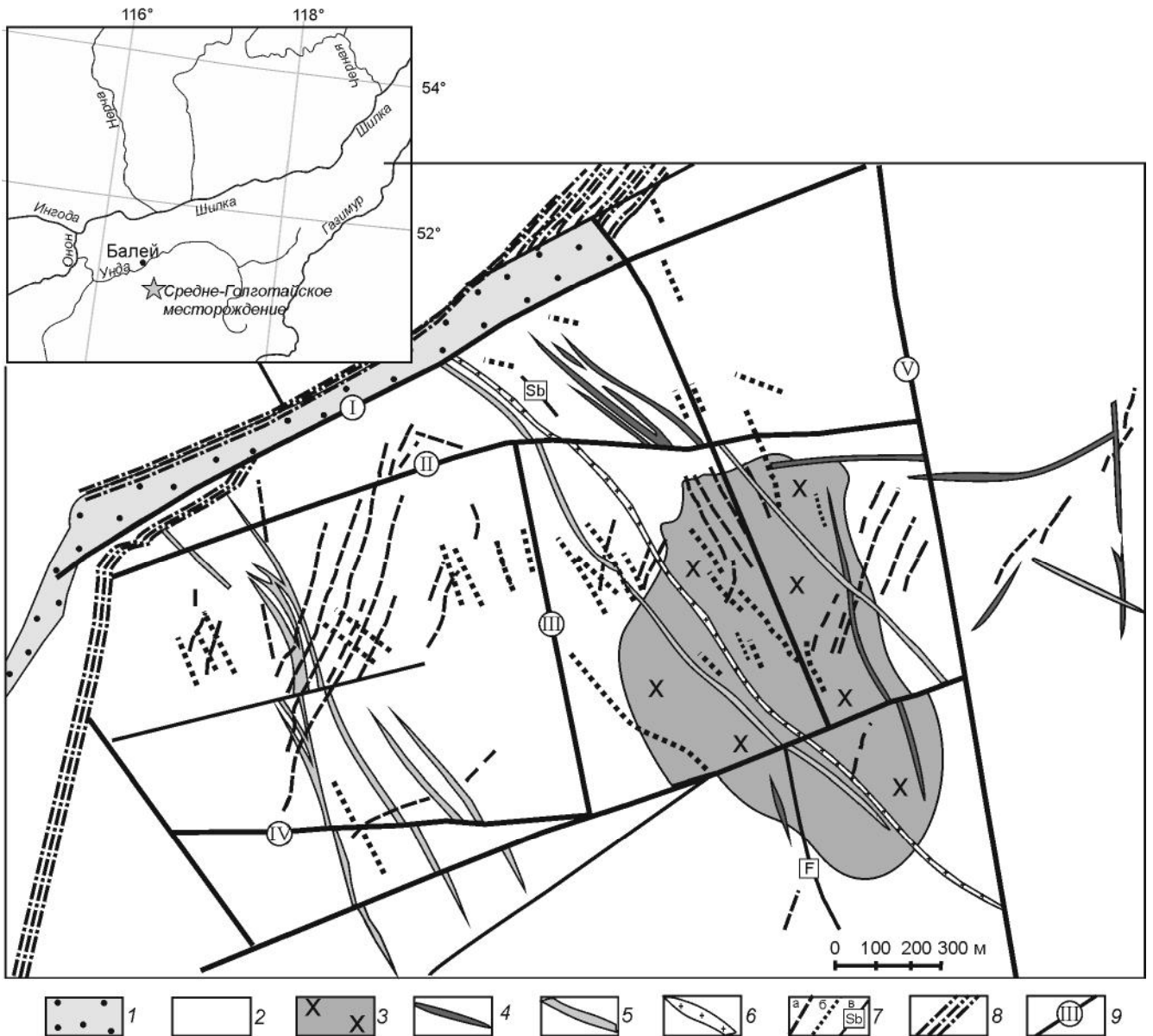


Рис. 1. Схема геологического строения Средне-Голготайского месторождения (по В.Е. Тулякову [29], с некоторыми упрощениями).

I – юрские осадочные и вулканогенно-осадочные отложения; *2* – позднепалеозойский комплекс гранитоидов Ундинского батолита (гнейсовидные и порфиroidные гранодиориты и граниты, плагиограниты); *3–6* – средне-позднеюрский комплекс малых интрузий и даек: *3* – кварцевые диориты, *4* – дайки диоритовых и диабазовых порфиритов, *5* – дайки лампрофиров и гибридных порфиритов, *6* – дайки порфиroidных гранитов; *7* – рудные жилы: *a* – золото-кварцевые, *б* – золото-сульфидно-кварцевые с турмалином, *в* – карбонатно-кварцевые с антимонитом (Sb) и флюоритом (F); *8* – зоны бластомилонитов и катаклазитов; *9* – разломы: *I* – Северо-Восточный, *II* – Северный, *III* – Меридиональный, *IV* – Герасимовский, *V* – Средне-Голготайский. На врезке показано географическое положение Средне-Голготайского месторождения.

золото-кварц-турмалин-сульфидные, кварц-сульфидно-карбонатные. Типовые образцы руд месторождения показаны на рисунке 2. Минеральный состав основных типов руд месторождения приведен в таблице 1.

Однако следует отметить, что выделение трех основных типов руд в определенной степени несколь-

ко условно, поскольку на месторождении часто отмечается наличие совмещенных руд сложного комбинированного состава, образованных в результате наложения друг на друга разных типов руд, связанных с пространственным совмещением разновременных стадий рудного процесса. Так, например, в собственных золото-кварцевых жилах часто наблюдаются зоны

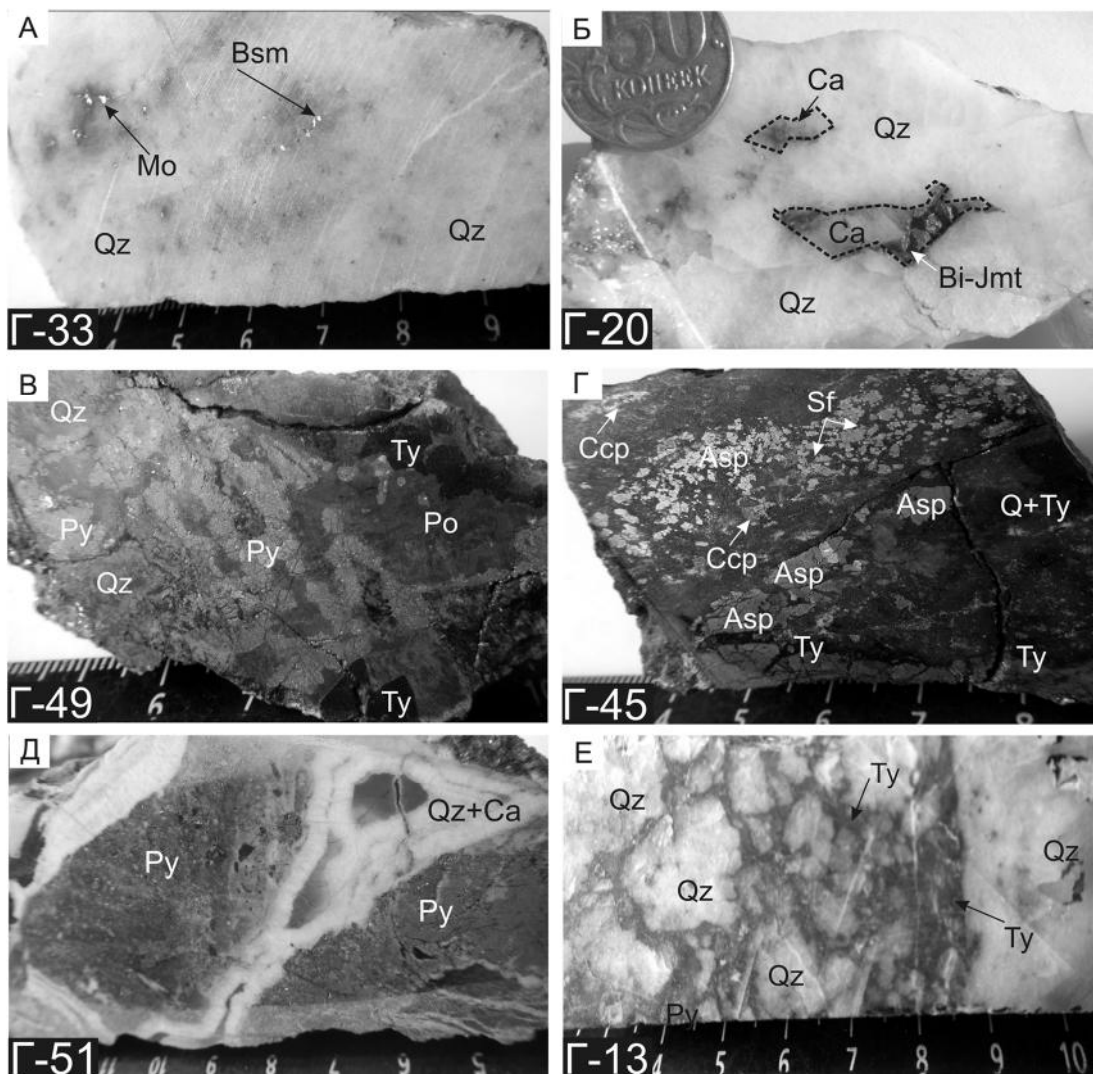


Рис. 2. Основные типы руд Средне-Голготайского золото-редкометалльного месторождения.

Золото-кварцевые руды: А – золото-молибденит-висмутин-кварцевая ассоциация, представленная среднезернистым молочно-белым кварцем с вкрапленниками молибденита и висмутина; Б – карбонат-кварцевая ассоциация – крупнозернистый молочно-белый кварц с вкрапленниками сульфидов и гнездами кальцита, к которым приурочены агрегаты молибденита в тесных срастаниях с висмутовым джемсонитом. Золото-турмалин-сульфидно-кварцевые руды: В – турмалин-пирротин-арсенопирит-кварцевая ассоциация – массивные пирротин-пиритовые образования и гнездовидные скопления турмалина в сером кварце; Г – золото-турмалин-арсенопирит-сфалерит-кварцевая ассоциация – массивные сплошные кварц-турмалин-сульфидные руды, с преобладанием турмалина, сложенные крупными идиоморфными вкрапленниками арсенопирита и ксеноморфными агрегатами сфалерита и халькопирита. Кварц-сульфидно-карбонатные руды: Д – кварц-пирит-кальцитовая ассоциация – кварц-кальцитовый прожилок в интенсивно измененной хлоритизированной породе с вкрапленностью и гнездовидными обособлениями пирита. Совмещенные руды: Е – рудная брекчия, состоящая из обломков ранних золото-кварцевых руд, сцементированных тонкозернистыми турмалин-сульфидными образованиями. Здесь и далее принятые сокращения минералов на рисунках: Asp – арсенопирит; Au – самородное золото; Bi – самородный висмут; Bln – буланжерит; Bsm – висмутин; Ca – кальцит; Ccp – халькопирит; Csl – козалит; Gn – галенит; Hrb – хобобетсуит; Ing – ингодит; Izk – изоклейкит; Jmt – джемсонит; Bi-Jmt – висмутовый джемсонит; JoA – жозеит А; JoB – жозеит В; Kbl – кобеллит; Mld – мальдонит; Mo – молибденит; Po – пирротин; Py – пирит; Qz – кварц; Rbn – робинсонит; Sf – сфалерит; Ttd – тетрадимит; Ttr – тетраэдрит; Ty – турмалин; Znk – цинкениит.

дробления, где обломки молочно-белого кварца цементируются турмалином и сульфидной минерализацией (рис. 2). Иногда кварцевые жилы в краевых частях переходят в жилы существенно сульфидного состава со значительным количеством тонкозернистого

турмалина, которые в свою очередь часто пересекаются карбонат-кварцевыми прожилками с вкрапленной сульфидной минерализацией. Ниже приводится краткая характеристика типовых руд Средне-Голготайского золото-редкометалльного месторождения.

Таблица 1. Минеральный состав руд Средне-Голготайского золото-редкометалльного месторождения.

Типы руд (минеральные ассоциации)	Минералы	
	Основные	Второстепенные и редкие
Золото-кварцевый (шеелит-молибденит-пирротин-кварцевая; золото-молибденит-арсенопирит-висмутин-кварцевая; кальцит-сульфосольно-кварцевая)	Кварц, молибденит, висмутин, арсенопирит, пирротин	Турмалин, кальцит, шеелит, пирит, самородное золото, самородный висмут, халькопирит, галеновисмутит, жозеит-А, жозеит-В, тетрадимит, икунолит, хоробетсуит*, ингодит*, сульфоцумоит*, мальдонит*, минерал X* близкий к минеральной фазе Bi_2TeS , висмутовый джемсонит**
Золото-кварц-турмалин-сульфидный (золото-пирротин-пирит-арсенопирит-турмалин-кварцевая; золото-сфалерит-галенит-сульфосольно-кварцевая)	Кварц, турмалин, арсенопирит, пирит, халькопирит, галенит, сфалерит, пирротин	Тетраэдрит, бурнонит, висмутсодержащий бурнонит, марказит, висмутин, буланжерит, висмутсодержащий буланжерит, висмутсодержащий тинтинаит, джемсонит, козалит, кобеллит, айкинит, эмплектит, самородное золото, самородный висмут, цинкениит, висмутсодержащий овихиит, висмутсодержащий галенит, сурьмянистый галеновисмутит, якульскийкиит, изоклейкиит, минерал $X_1[Cu_2Pb_6(Sb,Bi)_{16}S_{31}]$, минерал $X_2[Cu_2Pb_5(Sb,Bi)_{15}S_{28}]$, минерал А близкий к гиссениту, леллингит*, мальдонит*, сурьмянистый лиллианит*
Кварц-сульфидно-карбонатный (кварц-пирит-кальцитовая; кварц-антимонит-кальцитовая; кварц-флюорит-стильбит-кальцитовая)	Кварц, кальцит, флюорит, стильбит, пирит, марказит, антимонит	Буланжерит, джемсонит, цинкениит, бертьерит, галенит, тетраэдрит; робинсонит*, халькостибит*

Примечание. Таблица составлена авторами с использованием материалов, опубликованных в работах [4, 5, 24, 25, 28, 29]; * – минералы, установленные авторами статьи.

Золото-кварцевые руды являются наиболее распространенными на месторождении. В состав золото-кварцевых руд входят наиболее ранняя шеелит-молибденит-пирротиновая, а также более поздние – золото-молибденит-арсенопирит-висмутиновая и кальцит-сульфосольная минеральные ассоциации (табл. 1). Золото-молибденит-арсенопирит-висмутиновая минеральная ассоциация является наиболее продуктивной на золото-висмутовое оруденение и характеризуется зачастую аномально высокими концентрациями Au в кварцевых рудах. Золото-кварцевые руды обычно представлены светло-серым или молочно-белым крупнозернистым кварцем с крупночешуйчатыми выделениями молибденита, отдельными вкрапленниками шеелита, арсенопирита, пирротина, пирита, висмутина, редко – самородного золота. Количество сульфидных минералов в составе руд обычно не превышает 2–5 %. Иногда в кварце появляются отдельные гнездовидные или полосчатые выделения тонкозернистого черного турмалина, количество которых обычно не превышает 5 %.

Характерным и довольно распространенным минералом продуктивной ассоциации золото-кварцевых руд является висмутин, который зачастую образует в кварце рассеянную вкрапленность с размерами выделений до первых мм. В тесной ассоциации с висмути-

ном постоянно присутствуют самородный висмут, а также минералы сульфотеллуридов висмута (рис. 3 А, Б). Самородное золото в кварцевых жилах находится как в свободной минеральной форме (с размерами выделений до 1 мм и более), так и в виде микровыделений в тесных сростаниях с арсенопиритом, висмутином и сульфотеллуридами висмута (рис. 3 Б, В). Пробность самородного золота в золото-кварцевых рудах в основном составляет 920–980 %. В кварце иногда отмечаются весьма своеобразные субграфические мирмекитовые сростания самородного золота (пробностью 990–1000 %) с самородным висмутом (рис. 3 Г), которые представляют собой типичные структуры разложения мальдонита [9, 21]. В составе золото-кварцевых руд авторами впервые на месторождении установлен мальдонит в тесных сростаниях с самородным висмутом и жозеитом-А (рис. 3 Д).

Кальцит-сульфосольные фациальные разновидности золото-кварцевого типа руд встречены на месторождении в единичных количествах. Их позиция в общей схеме формирования руд не совсем понятна, поскольку ранее эта ассоциация на месторождении не выделялась. Руды сложены крупнозернистым светло-серым кварцем, в котором находятся отдельные гнезда кальцита размером до 1 см и более, которые заполняют пустоты в межзерновом пространстве квар-

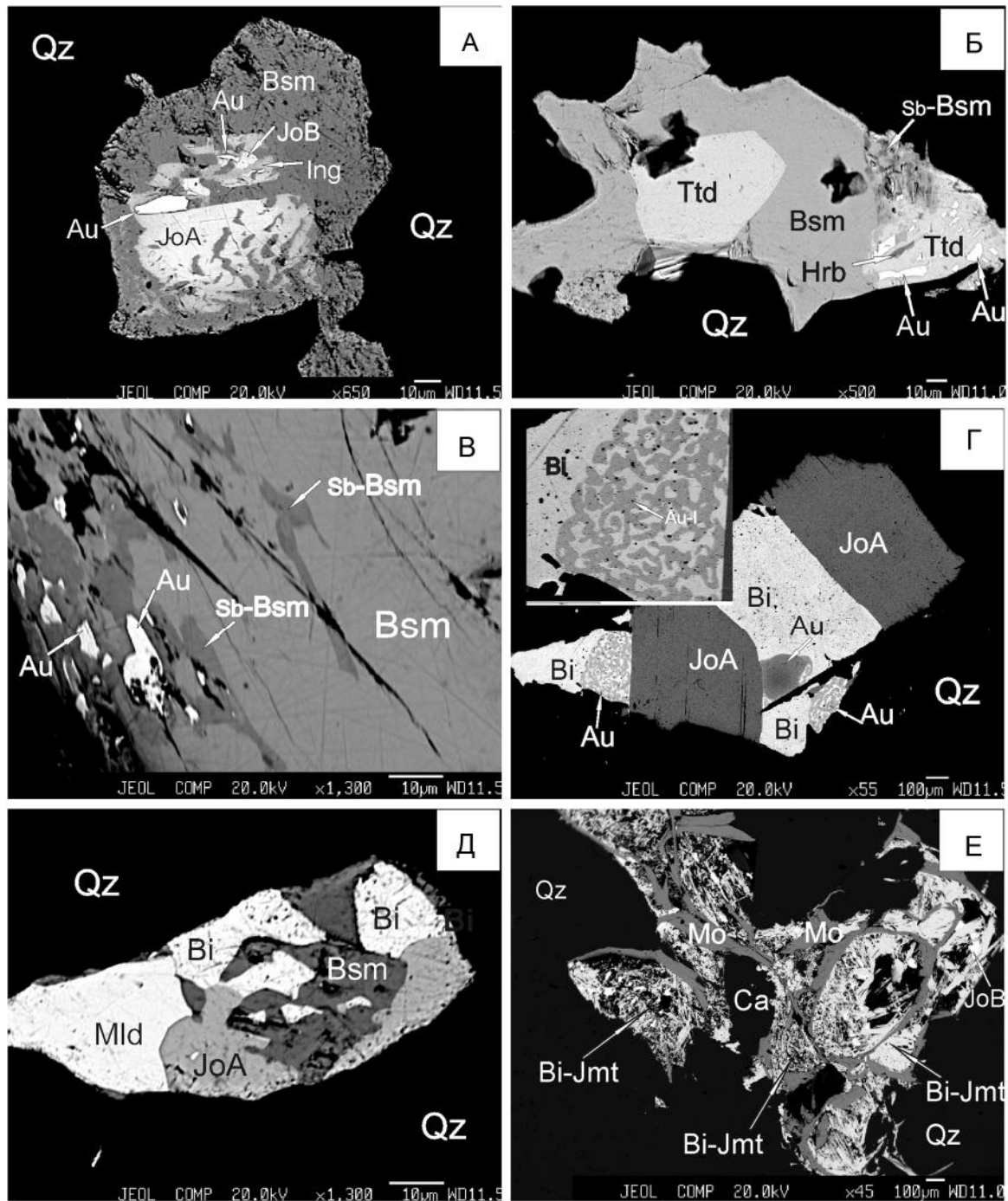


Рис. 3. Формы выделений и характер взаимоотношений минералов в золото-кварцевых рудах Средне-Голготайского месторождения.

А – агрегат висмутита в кварце, с ксеноморфными мирмекитоподобными выделениями сульфотеллуридов висмута и приуроченных к ним агрегатов самородного золота; Б – выделения тетрадимита, с агрегатами самородного золота, в висмутине. На контакте висмутита и тетрадимита развиты микровыделения Sb-висмутита, а по микротрещинам в тетрадимите отмечается хоробетсуит. В – микровыделения самородного золота в висмутине, приуроченные к агрегатам Sb-содержащего висмутита; Г – сростания жозеита-А с самородным висмутом. В самородном висмуте широко развиты мирмекитовые образования (врезка – увеличенный фрагмент), сложенные самородным золотом (менее 1 мас. % Ag) и самородным висмутом, которые представляют собой типичные структуры распада мальдонита. В агрегатах самородного висмута отмечаются выделения Sb-содержащего висмутита и более низкопробного (16 мас. % Ag) самородного золота; Д – рудные микровыделения в кварце, представленные сростаниями висмутита, жозеита-А, мальдонита и самородного висмута; Е – гнездо карбоната в кварцевом прожилке заполненное мелкими игольчатыми скоплениями висмутового джемсонита и крупночешуйчатыми агрегатами молибденита. Фотографии в отраженных электронах.

ца. Рудная минерализация приурочена к выделениям кальцита (рис. 2 Б) и представлена крупночешуйчатыми агрегатами молибденита и волокнистыми игольчатыми тонкозернистыми агрегатами висмутового джемсонита с микровключениями сульфотеллуридов висмута (рис. 2 Е).

Золото-кварц-турмалин-сульфидные руды менее распространены на месторождении. Характерной особенностью руд является широкое развитие в них сульфидов и тонкозернистых агрегатов турмалина в виде сложных мономинеральных гнезд и прожилков в светло-сером или темно-сером кварце. Руды чаще всего имеют массивную или полосчатую текстуру, обусловленную наличием полос, выполненных кварцем, турмалином и сульфидами. Часто катаклизированы и брекчированы. По минеральному составу выделяются существенно турмалин-сульфидные и кварц-турмалин-сульфидные жилы, с количеством турмалина до 60 % и сульфидных минералов – от 20 до 50–60 %, где основными минералами чаще всего являются пирит и арсенопирит. Менее распространены – халькопирит, пирротин, сфалерит, галенит и сульфосоли Pb (табл. 1). В то же время в составе кварц-турмалин-сульфидных руд резко уменьшается количество висмутина (рис. 4 Е) и теллуридов висмута. В составе руд выделяются две золотоносные минеральные ассоциации: ранняя – золото-пирротин-пирит-арсенопирит-турмалин-кварцевая и более поздняя – золото-галенит-сфалерит-сульфосольно-кварцевая.

Один из основных сульфидных минералов ранней ассоциации – арсенопирит, неоднороден и зачастую имеет сложное пятнисто-зональное внутреннее строение (рис. 4 А), обусловленное различными соотношениями в его составе S и As (от 0.81 до 1.28 ат. %). При этом существенно мышьяковистые зоны арсенопирита (иногда с содержаниями Ni до 1 %) часто содержат в себе многочисленные микровыделения, представленные микронными округлыми агрегатами самородного висмута, галенита, жозеита-А, реже – мальдонита (рис. 4 А, Б) и высокопробного самородного золота (960–980 ‰).

Для турмалин-золото-галенит-сфалерит-сульфосольно-кварцевой ассоциации характерно широкое развитие железистого сфалерита (9–11 % Fe) и Bi-содержащего галенита (до 7 % Bi), а также большого набора различных по составу сульфосолей. Последние представлены блеклыми рудами (преимущественно тетраэдритом с содержанием As от 0 до 1.1 % и Ag – до 2.5 %), сульфовисмутитами свинца (сурьмянистый лиллианит и сурьмянистый козалит), сульфоантимонитами свинца и меди (буланжеритом и бурнонитом, часто с примесью Bi), а также редко встречающимися в природе сурьмяно-висмутовыми

сульфосолями свинца – кобеллитом, яскульскитом и айзоклейкитом. Сурьмяно-висмутовые сульфосоли свинца чаще всего образуют относительно крупные (до 1 мм) агрегаты ксеноморфной либо игольчатой формы в пирите, арсенопирите, халькопирите и в тетраэдрите, находясь в тесных сростаниях с самородным висмутом и галенитом (рис. 4 В, Г, Д).

Кварц-сульфидно-карбонатный тип руд представлен жилами соответствующего состава, распространенными на месторождении повсеместно в незначительном количестве. В составе жил преобладают крупнокристаллические агрегаты светло-розового или серого кальцита, а также белого тонкозернистого хальцедоновидного кварца. Основные рудные минералы в них представлены рассеянной вкрапленностью пирита и марказита, гораздо реже, в незначительных количествах отмечается присутствие тетраэдрита, бурнонита, галенита и сульфоантимонитов свинца (рис. 5 А–Г). Жилы характеризуются отсутствием минералов золота, висмута и теллура. Кроме того, по данным В.Е. Тупякова [29], на месторождении отмечается присутствие поздних жильных образований кварц-антимонит-кальцитового и кварц-флюорит-стильбит-кальцитового составов.

Процесс гидротермального рудообразования на месторождении протекал последовательно и многостадийно. По данным В.Г. Тупякова [29], в формировании месторождения выделяется 5 основных стадий: полевошпатовая; турмалиновая; золото-кварцевая; турмалин-сульфидно-кварцевая; карбонат-кварцевая. По мнению этого исследователя, продуктивными на золото-редкометалльное оруденение являются третья и четвертая стадии, где самородное золото тесно связано с минеральными соединениями Bi, представленными в рудах самородным висмутом, висмутином и сульфосолями висмута. Золоторудные жилы, сформированные в разные продуктивные стадии рудного процесса, имеют на месторождении различную структурную позицию и отделены друг от друга внедрением даек гибридных порфириров. Наши наблюдения показывают, что основные минералы руд сформировались в три главных стадии, соответствующие выделенным типам руд, к поздней четвертой стадии можно отнести пострудные прожилки кварц-кальцитового состава В.Г. Тупякова.

ТИПОМОРФНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛОВ Pb-Bi-Sb-S И Bi-Te-S СИСТЕМ СРЕДНЕ- ГОЛГОТАЙСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В рудах Средне-Голготайского месторождения, сформированных в разные стадии золоторудного процесса, весьма широко развиты минеральные соединения Bi-Te-S и Pb-Bi-Sb-S систем, которые тесно

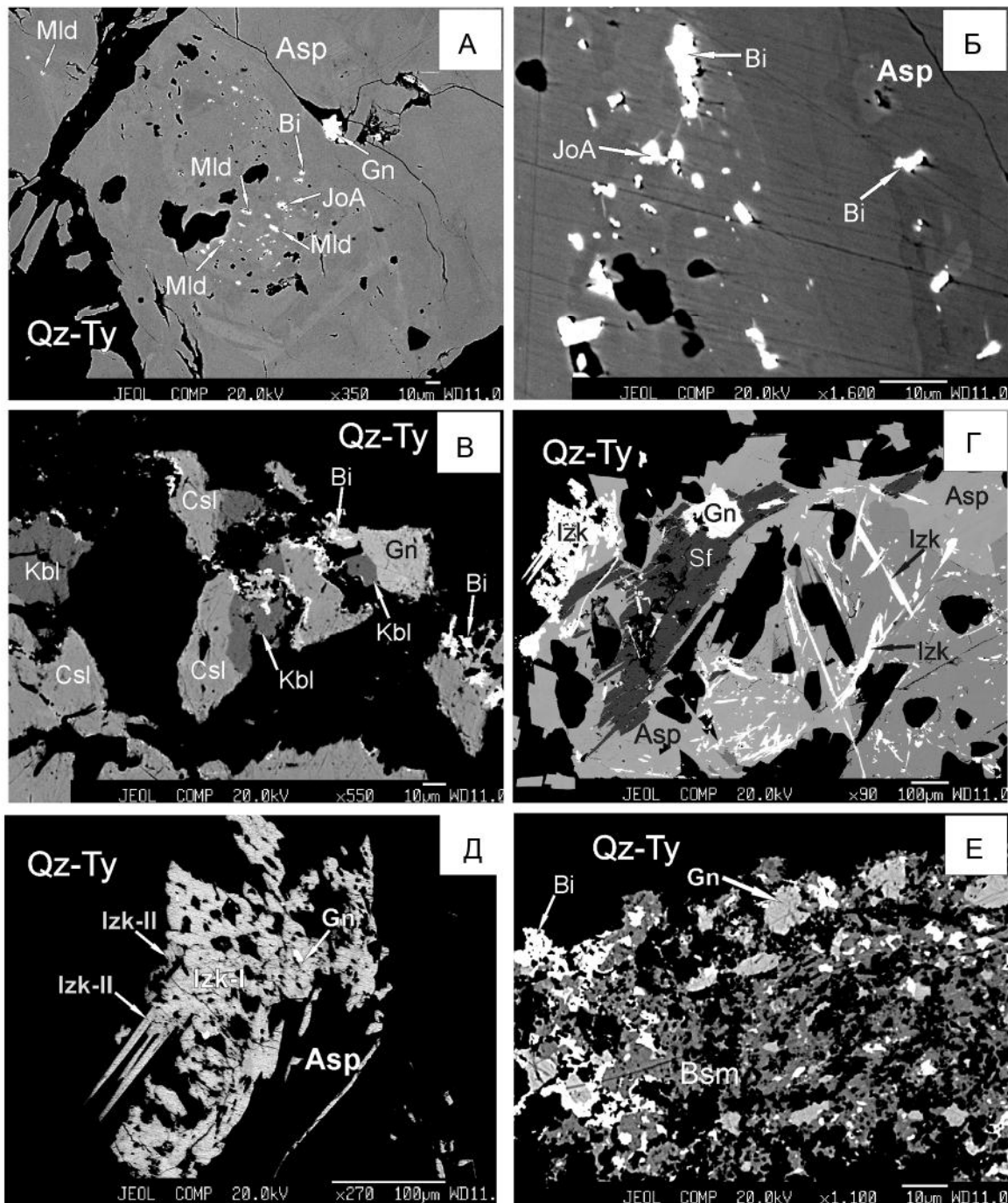


Рис. 4. Формы выделений и характер взаимоотношений минералов в золото-кварц-турмалин-сульфидных рудах Средне-Голготайского месторождения.

А, Б – микровыделения галенита, самородного висмута, жозеита-А и мальдонита в арсенопирите. Отчетливо видна неоднородная пятнисто-зональная внутренняя структура арсенопиритов, где наиболее светлые зоны представлены мышьяковистой разновидностью арсенопирита; В – совместные сростания кобеллита, козалита и галенита с обильными микровыделениями самородного висмута; Г – выделения сульфоселей изоклейкит-гиссенитовой серии в арсенопирите; Д – увеличенный фрагмент левой верхней части снимка Г. Отчетливо видно наличие в сульфосолях изоклейкит-гиссенитовой серии двух самостоятельных минеральных фаз: Izk-I с содержаниями Sb – 6 мас. % и Izk-II с содержаниями Sb – 12 мас. %; Е – ксеноморфные тонкозернистые агрегаты висмутита в кварц-турмалиновой матрице. Замещение висмутита галенитом и самородным висмутом. Фотографии в отраженных электронах.

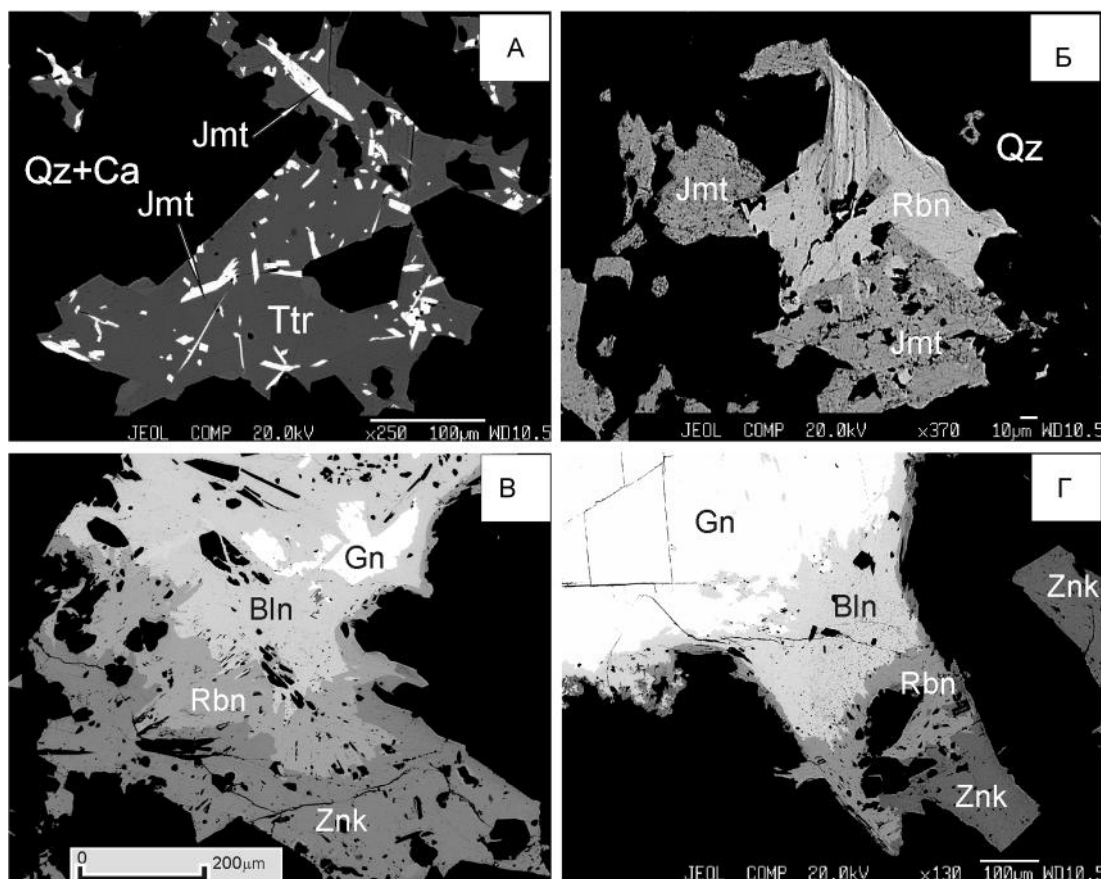


Рис. 5. Формы выделений и характер взаимоотношений минералов в кварц-сульфидно-карбонатных рудах Средне-Голготайского месторождения.

А – игольчатые агрегаты джемсонита в тетраэдрите; Б – аллотриоморфнозернистые сростания робинсонита с джемсонитом; В, Г – развитие по галениту сульфоантимонитов свинца с последовательной кристаллизацией буланжерита, робинсонита и цинкениита. Фотографии в отраженных электронах.

ассоциируют с самородным золотом и являются своеобразными индикаторами условий формирования золотой минерализации.

Минеральные соединения системы Pb-Bi-Sb-S можно разделить на три основные группы (рис. 6): I – минералы гомологического ряда Bi_2S_3 – Sb_2S_3 , представляющие собой твердый раствор висмутина–стибнита; II – сурьмяно-висмутовые сульфосоли свинца, с весьма широким диапазоном колебаний в их составе соотношений Bi/Sb; III – минералы гомологического ряда PbS – Sb_2S_3 , представленные группой игольчатых сульфоантимонитов свинца семейства буланжерита [19].

Твердый раствор висмутина–стибнита в рудах месторождения представлен собственно висмутином, а также промежуточными минеральными соединениями, получившими название «хоробетсуит» [38]. Висмутин – ведущий минерал золото-кварцевой ассоциации, является одним из самых ранних вис-

мутовых минералов в рудах Средне-Голготайского месторождения, с которым тесно связана основная масса выделений самородного золота. Детальное изучение висмутинов показало, что зачастую его агрегаты представлены двухфазными (рис. 3 В), а иногда многофазными образованиями, которые существенно различаются по морфологии и составу (табл. 2). Висмутины стехеометричны, но их состав изменяется в значительных интервалах за счет наличия в них постоянных примесей Pb (до 4.52 %) и Sb (до 27.2 %). На диаграмме составов минералов в системе Bi_2S_3 – PbS – Sb_2S_3 висмутины занимают обширную область, образуя практически непрерывную серию твердых растворов в системе Bi_2S_3 – Sb_2S_3 , от чистых висмутинов до хоробетсуита $(\text{Bi,Sb})_2\text{S}_3$, где замещение Sb в висмутине может достигать до 45 моль. % (рис. 6). Анализ распределения концентраций Pb и Sb в висмутине, приведенный на рис. 7, позволяет более детально оценить характер вхождения этих элементов

Таблица 2. Химический состав висмутина Средне-Голготайского месторождения.

N/N	Номер	Содержание элементов, мас. %						
		Bi	Pb	Cu	Ag	Sb	S	Сумма
1	Г-17	72.37	4.12	-	-	4.90	17.36	98.75
2	Г-17	72.46	2.84	0.66	-	4.71	17.31	97.98
3	Г-17	73.12	2.21	0.77	0.20	4.73	17.49	98.52
4	Г-17	49.25	1.07	-	0.08	27.25	20.14	97.79
5	Г-17	69.65	4.52	0.93	0.25	5.92	17.16	98.43
6	Г-33	71.62	3.94	0.71	-	5.50	17.81	99.58
7	Г-33	81.12	2.04	-	-	0.00	16.81	99.97
8	Г-33	76.06	2.02	-	-	2.68	16.95	97.71
9	Г-33	51.67	2.80	-	-	24.61	19.45	98.53
10	Г-33	65.14	-	-	-	13.22	19.33	97.69
11	Г-33	65.72	2.34	-	-	11.96	18.63	98.65
12	Г-53	80.08	2.59	-	0.09	0.00	16.52	99.28
13	Г-53	78.18	3.09	-	-	0.00	16.87	98.14
14	Г-53	78.65	2.26	-	0.35	0.00	16.55	97.81
Коэффициенты в формулах $(\text{Bi} + \text{Pb} + \text{Cu} + \text{Ag} + \text{Sb} + \text{Bi} + \text{S}) = 5$								
		Bi	Pb	Cu	Ag	Sb	S	Pb+Sb
1	Г-17	2.55	0.15	0.00	0.00	0.30	2.01	2.99
2	Г-17	2.54	0.10	0.08	0.00	0.28	2.00	2.93
3	Г-17	2.54	0.08	0.09	0.01	0.28	2.00	2.90
4	Г-17	1.51	0.03	0.00	0.00	1.43	2.03	2.97
5	Г-17	2.41	0.16	0.11	0.02	0.35	1.95	2.92
6	Г-33	2.45	0.14	0.08	0.00	0.32	2.01	2.91
7	Г-33	2.93	0.07	0.00	0.00	0.00	2.00	3.00
8	Г-33	2.75	0.07	0.00	0.00	0.17	2.01	2.99
9	Г-33	1.61	0.09	0.00	0.00	1.31	1.99	3.01
10	Г-33	2.15	0.00	0.00	0.00	0.75	2.10	2.90
11	Г-33	2.19	0.08	0.00	0.00	0.68	2.04	2.96
12	Г-53	2.92	0.10	0.00	0.01	0.00	1.98	3.01
13	Г-53	2.86	0.11	0.00	0.00	0.00	2.03	2.97
14	Г-53	2.89	0.08	0.00	0.02	0.00	2.00	2.97

Примечание. Типы руд: 1–11 – золото-кварцевый; 12–14 – золото-кварц-турмалин-сульфидный; - содержание ниже предела обнаружения элемента. Анализы минералов выполнены в лаборатории рентгеновских методов Аналитического центра ДВГИ ДВО РАН на рентгеноспектральном микроанализаторе JXA-8100. Аналитики: Г.Б. Молчанова, Н.И. Екимова.

в структуру минерала. Достоверные концентрации Pb в составе висмутинов установлены в 50 % анализов, что однозначно свидетельствует о вхождении этого элемента в состав висмутина. При этом пик концентраций Pb в висмутине приходится на область 2.0–2.5 мас. %. Распределение концентраций Sb в висмутине имеет более сложное бимодальное распределение, что указывает на наличие, как минимум, трех генераций висмутинов: I – висмутины без примесей Sb (11 % от общего количества определений); II – с концентрациями Sb от 2 до 6 мас. % (52 %), III – 8–12 мас. % Sb (17 %). Наличие значимых взаимосвязей между концентрациями Pb и Bi, а также Pb и Sb в составе висмутинов не выявлены. В то же время устанавливается четко выраженная линейная зависимость между содержаниями в составе висмутинов Sb и Bi (рис. 8).

Сложные по составу сурьмяно-висмутовые сульфосоли свинца характерны для руд золото-кварц-турмалин-сульфидной ассоциации. Анализ опубликованных данных [4, 5] и полученные авторами новые результаты, приведенные в табл. 3, позволяют выделить для сурьмяно-висмутовых сульфосолей свинца следующие основные разновидности минеральных соединений (рис. 9): 1 – висмутовые сульфосоли свинца с незначительными концентрациями Sb (1–7 мас. %), которые относятся к сурьмянистому лилианиту, сурьмянистому кобеллиту и сурьмянистому галеновисмутиту. 2 – висмутово-сурьмяные сульфосоли свинца с весьма широким диапазоном соотношений в их составе $\text{Bi}/(\text{Bi} + \text{Sb})$ – от 0.30 до 0.73. Они представлены яскульскиитом, минеральными соединениями изоклейкит-гиссенитовой и кобеллит-тинтинаитовой серий. 3 – сурьмянистые сульфосоли свинца с повы-

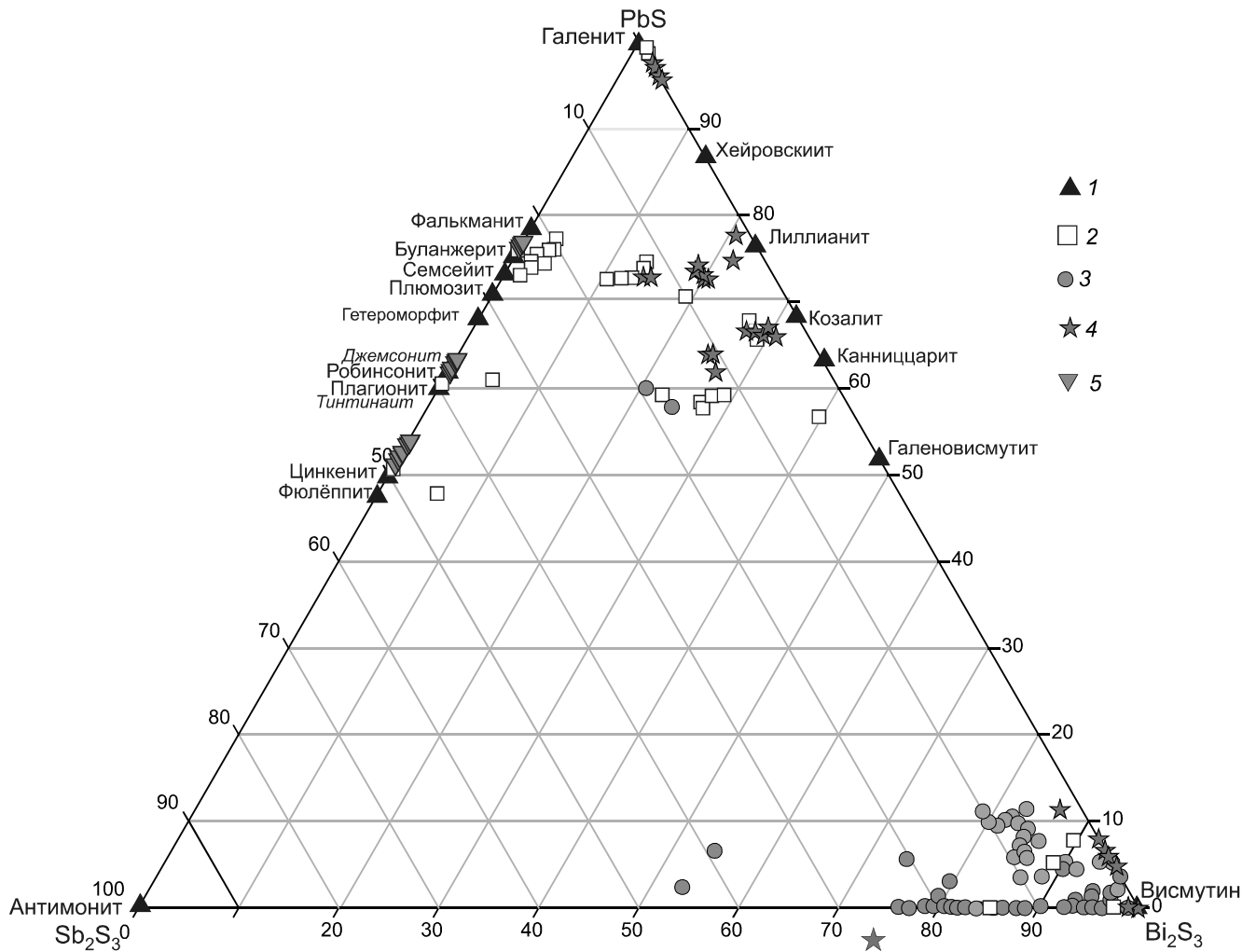


Рис. 6. Диаграмма составов минералов системы Pb-Bi-Sb-S Средне-Голготайского месторождения в координатах PbS-Bi₂S₃-Sb₂S₃ (моль %).

1 – теоретический состав минералов [43]; 2 – литературные данные [4, 5, 23, 24]; 3–5 – данные авторов. Типы руд: 3 – золото-кварцевый, 4 – золото-турмалин-сульфидно-кварцевый; 5 – кварц-сульфидно-карбонатный. Формулы минералов: фалькманит – Pb₃Sb₂S₆; буланжерит – Pb₅Sb₄S₁₁; семсейит – Pb₉Sb₈S₂₁; плюмозит – Pb₂Sb₂S₅; гетероморфит – Pb₇Sb₈S₁₉; джемсонит – Pb₄FeSb₆S₁₄; робинсонит – Pb₄Sb₆S₁₃; плагионит – Pb₅Sb₈S₁₇; тинтинаит – Pb₁₀Cu₂Sb₁₆S₃₅; цинкениит – Pb₉Sb₂S₄₂; фюлэппит – Pb₃Sb₈S₁₅; хейровскиит – Pb₆Bi₂S₉; лиллианит – Pb₃Bi₂S₆; козалиит – Pb₂Bi₂S₅; галеновисмутит – PbBi₄S₄.

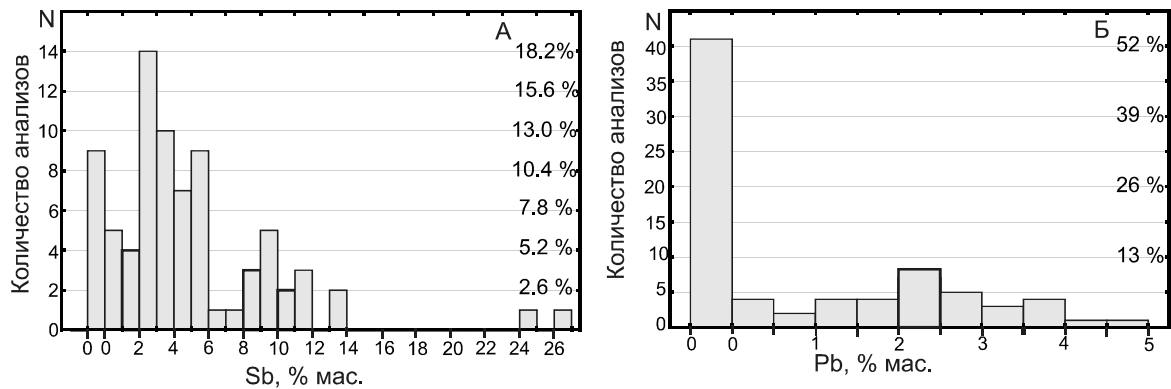


Рис. 7. Гистограммы распределений концентраций Sb (А) и Pb (Б) в составе висмутинов Средне-Голготайского месторождения. N = 77.

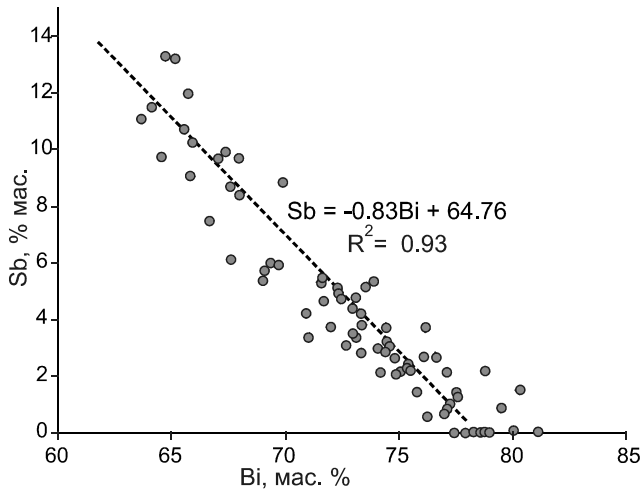


Рис. 8. Диаграмма соотношений концентраций Sb и Bi (мас. %) в составе висмутинов Средне-Голготайского месторождения.

Пунктиром показана линия тренда изменения концентраций, уравнение и достоверность аппроксимации результатов.

шенными содержаниями Bi (висмутовый буланжерит и висмутовый тинтинаит).

Среди сурьмяно-висмутовых сульфосолей свинца особый интерес представляет наличие в рудах месторождения весьма редких минеральных соединений изоклейкит-гиссенитовой серии, которые выявлены и изучены на единичных рудных объектах мира [32, 36, 42, 45, 49]. Следует отметить, что к изоклейкитам обычно относят минеральные виды сурьмяно-висмутовых сульфосолей свинца с соотношениями Bi/Sb в составе минералов, близкими к 1 [42]. Однако в процессе исследований в рудах Средне-Голготайского месторождения были выявлены и богатые Sb разновидности изоклейкита (рис. 9) с соотношениями $Bi/(Bi + Sb)$ 0.69–0.73, которые по своему составу близки к гиссениту. Аналогичный широкий диапазон изменений соотношений $Bi/(Bi + Sb)$ в минералах данной серии описан также в литературе для серебро-полиметаллических руд проявлений Кутна Горы, Чешская республика [46].

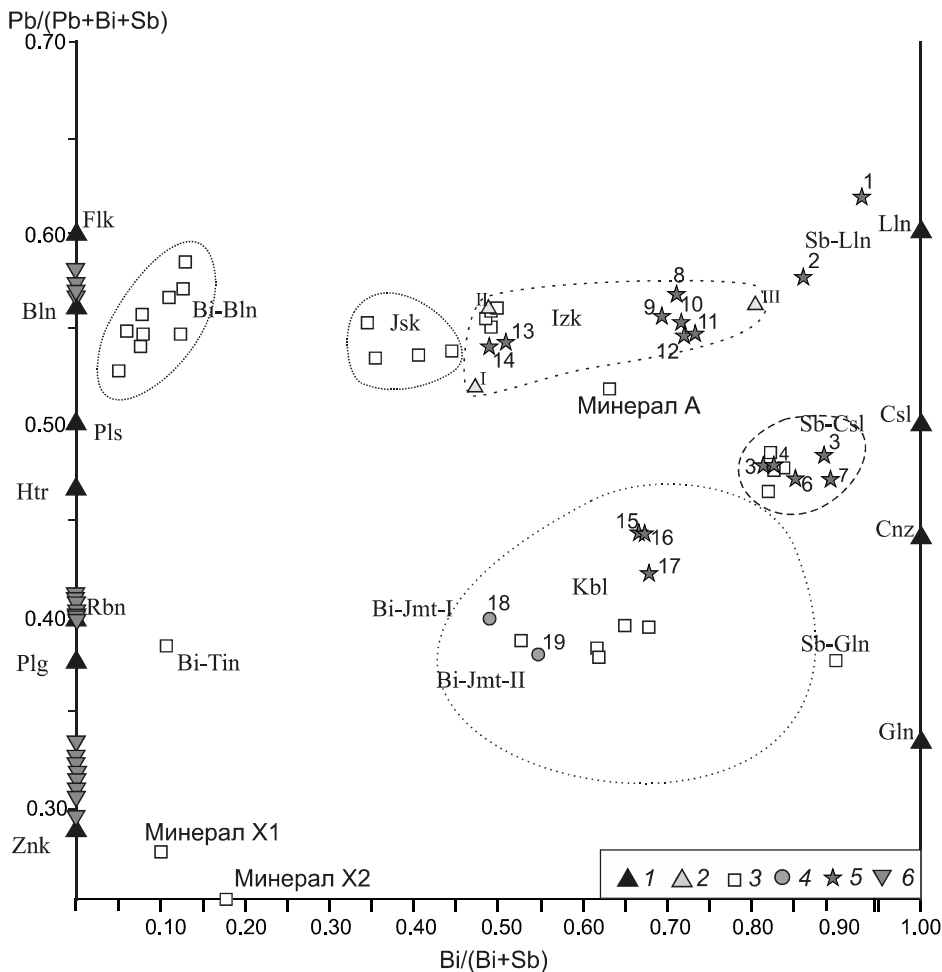


Рис. 9. Поля составов сурьмяно-висмутовых сульфосолей свинца Средне-Голготайского месторождения в системе $Bi/(Bi+Sb)-Pb/(Pb+Bi+Sb)$ (атомные соотношения).

I – теоретические составы минералов; 2 – составы эталонных минералов: I – изоклейкит Zn-Cu-Pb-Ag месторождения озеро Изок (IzokLake), Canada, [40]; II – изоклейкит месторождения Вэна (Vena), Швеция, [49]; III – гиссенит проявления Биннаталь (Binnatal), Швейцария [39]; 3 – литературные данные [4, 5, 23]; 4–6 – анализы авторов. Типы руд: 4 – золото-кварцевый, 5 – золото-турмалин-сульфидно-кварцевый; 6 – кварц-сульфидно-карбонатный. Принятые сокращения минералов на диаграмме: Bln – буланжерит; Bi-Bln – висмутсодержащий буланжерит; Gln – галеновисмутит; Sb-Gln – сурьмянистый галеновисмутит; Htr – гетероморфит; Bi-Jmt – висмутовый джемсонит (фаза I и фаза II); Izk – изоклейкит-гиссенитовая серия; Cnz – канниццарит; Kbl – кобеллит-тинтинаитовая серия; Csl – козалит; Sb-Csl – сурьмянистый козалит; Lln – лиллианит; Sb-Lln – сурьмянистый лиллианит; Pls – плюмозит; Plg – плагионит; Rbn – робинсонит; Tin – тинтинаит; Bi-Tin – висмутсодержащий тинтинаит; Znk – цинкенил; Flk – фалькманит; Jsk – яскульскийит. Номера анализов соответствуют табл. 3.

Таблица 3. Химический состав сурьмяно-висмутовых сульфосолей свинца Средне-Голготайского месторождения.

N/N	Номер образца	Содержание элементов, мас. %							
		Pb	Fe	Cu	Ag	Bi	Sb	S	Сумма
1	Г-20	37.31	-	-	-	27.75	16.88	17.22	99.17
2	Г-20	33.80	0.47	1.56	0.46	30.43	14.64	17.28	98.65
3	Г-56	54.08	-	-	1.16	31.25	1.30	14.31	102.10
4	Г-56	50.07	-	-	2.35	31.98	3.04	14.35	101.79
5	Г-53	40.82	-	0.60	-	38.90	2.92	14.82	98.06
6	Г-53	40.84	-	0.51	-	36.97	4.53	15.11	97.96
7	Г-53	40.26	-	0.83	-	35.97	4.78	14.97	96.81
8	Г-53	40.04	-	0.82	-	38.47	3.85	14.90	98.08
9	Г-53	38.82	-	0.56	1.11	39.11	2.69	15.09	97.38
10	Г-56	49.18	-	1.05	-	26.86	6.34	15.38	98.81
11	Г-56	48.88	-	1.03	-	27.23	7.00	15.26	99.40
12	Г-56	49.38	-	0.95	-	28.82	6.62	15.49	101.26
13	Г-56	48.53	-	1.08	1.17	29.64	6.28	15.64	102.34
14	Г-56	47.99	-	1.06	-	28.85	6.55	15.57	100.02
15	Г-56	49.88	-	1.23	-	21.49	12.08	16.05	100.73
16	Г-56	48.50	-	1.13	-	20.32	12.37	16.15	98.47
17	Г-53	39.57	0.59	2.01	-	33.7	9.55	16.16	101.58
18	Г-53	37.78	0.58	1.88	-	31.98	9.25	16.07	97.54
19	Г-53	35.71	0.39	2.02	-	33.34	9.23	16.38	97.07

Коэффициенты в формуле минералов

N/N	Номер образца	Pb	Fe	Cu	Ag	Bi	Sb	S	Sb+Bi	Bi/(Bi+Sb)	Pb/(Pb+Sb+Bi)
1	Г-20	3.99	0.00	0.00	0.00	2.94	3.07	11.90	6.01	0.49	0.40
2	Г-20	10.37	0.00	0.00	0.00	7.65	7.98	30.93	15.63	0.55	0.38
3	Г-56	3.27	0.00	0.00	0.13	1.87	0.13	5.59	2.01	0.93	0.62
4	Г-56	2.99	0.00	0.00	0.27	1.89	0.31	5.54	2.20	0.86	0.58
5	Г-53	2.02	0.00	0.10	0.00	1.91	0.25	4.73	2.15	0.89	0.48
6	Г-53	1.99	0.00	0.08	0.00	1.79	0.38	4.76	2.16	0.83	0.48
7	Г-53	1.97	0.00	0.13	0.00	1.75	0.40	4.74	2.15	0.81	0.48
8	Г-53	1.96	0.00	0.13	0.00	1.87	0.32	4.72	2.19	0.85	0.47
9	Г-53	1.90	0.00	0.09	0.10	1.90	0.22	4.78	2.12	0.89	0.47
10	Г-56	26.12	0.00	1.82	0.00	14.15	5.73	52.80	19.88	0.71	0.57
11	Г-56	25.61	0.00	1.76	0.00	14.15	6.24	51.68	20.39	0.69	0.56
12	Г-56	25.46	0.00	1.60	0.00	14.73	5.81	51.61	20.54	0.72	0.55
13	Г-56	25.19	0.00	1.83	1.17	15.26	5.55	52.48	20.81	0.73	0.55
14	Г-56	25.16	0.00	1.81	0.00	15.00	5.84	52.76	20.84	0.72	0.55
15	Г-56	25.01	0.00	2.01	0.00	10.68	10.31	52.01	20.99	0.51	0.54
16	Г-56	24.87	0.00	1.89	0.00	10.33	10.80	53.53	21.13	0.49	0.54
17	Г-53	11.53	0.64	1.91	0.00	9.74	4.74	30.43	14.47	0.67	0.44
18	Г-53	11.53	0.66	1.87	0.00	9.67	4.80	31.68	14.47	0.67	0.44
19	Г-53	10.99	0.45	2.03	0.00	10.17	4.83	32.58	15.01	0.68	0.42

Примечание. 1–2 – висмутовый джемсонит: 1 – фаза I, 2 – фаза II. Фаза I рассчитана как джемсонит (Pb+Sb+Bi = 10), фаза II – как тинтинит (Pb+Sb+Bi = 26), 3–4 – сурьмасодержащий лиллианит $Pb_3(Sb,Bi)_2S_6$ (расчет коэффициентов проведен на 11 атомов). 5–9 – сурьмасодержащий козалиит $Pb_2(Sb,Bi)_2S_5$ (расчет коэффициентов проведен на 9 атомов). 10–16 – изоклейкит-гиссенитовая серия $(Cu,Fe)_2Pb_{26.4}(Sb,Bi)_{19.6}S_{57} - (Cu,Fe)_2Pb_{26.4}(Bi,Sb)_{19.6}S_{57}$: фаза I (10–14) и фаза II (15–16), см. рис. 4, Д). Расчет коэффициентов в формулах минералов проведен по $Pb+Sb+Bi = 46$ [42]. 17–19 – тинтинит-кобеллитовая серия $Cu_2Pb_{10}Sb_{16}S_{35} - (Cu,Fe)_2Pb_{11}(Bi,Sb)_{15}S_{35}$ (расчет коэффициентов в формулах минералов проведен по $Pb+Sb+Bi=26$ [42]). Типы руд: 1, 2 – золото-кварцевый, 3–19 – золото-кварц-турмалин-сульфидный; 1–2 – среднее из 7 (1) и 9 (2) анализов. - содержание ниже предела обнаружения элемента. Анализы минералов выполнены в лаборатории рентгеновских методов Аналитического центра ДВГИ ДВО РАН на рентгеноспектральном микроанализаторе JXA-8100. Аналитики: Г.Б. Молчанова, Н.И. Екимова.

Весьма необычная по составу сурьмяно-висмутовая сульфосоли свинца, попадающая в поле кобеллит-тинтинитовой серии, была выявлена в рудах карбонат-кварцевых жил, где она совместно с молибденитом заполняет пустоты в карбонатном агрегате (рис. 3 Е). По рентгеноструктурным данным, сульфосоли свинца относится к джемсониту, а по химическому составу близка к висмутовому джемсониту Устарасайского месторождения [22], с соотношениями Pb/Sb в формуле минерала, близкими к 1. Установлено, что сурьмяно-висмутовая сульфосоли свинца представлена двумя самостоятельными минеральными фазами (I и II), которые имеют незначительные различия в составе (табл. 3). Минеральная фаза I отличается от фазы II отсутствием в ее составе Cu и Fe . По результатам кристаллохимических расчетов анализов фаза I близка к джемсониту, а фаза II – к тинтиниту [6].

Своеобразный набор игольчатых сульфоантимонитов свинца, представленных джемсонитом, буланжеритом, робинсонитом и цинкенином, выявлен в составе кварц-сульфидно-карбонатных руд месторождения. Характер выделений сульфосолей в ряду буланжерит-робинсонит-цинкенин, показанный на рис. 5 (В, Г), однозначно указывает на температурную последовательность их кристаллизации из единого рудного флюида, обогащенного Pb и Sb . Изучение состава этих сульфосолей (табл. 4) выявило, что они имеют переменный состав, с обратной зависимостью между содержаниями в их составе металлов и полуметаллов. Особенно это характерно для буланжерита и цинкенина, фигуративные точки составов которых на диаграмме соотношений $Sb-Pb$ располагаются между теоретическими составами буланжерита – фалькманита и цинкенина – плагинита (рис. 10). Полученные в процессе исследований сульфоантимонитов свинца новые данные показывают, что в кварц-карбонат-сульфидных рудах месторождения изученные природные соединения буланжеритового гомологического ряда представляют собой нестехиометричные соединения, что вероятней всего указывает на специфические условия их формирования.

Здесь следует отметить, что одной из характерных типоморфных особенностей минералогии сульфосолей свинца Средне-Голготайского месторождения является наличие в минеральных ассоциациях химически близких по составу природных минеральных соединений, представленных чаще всего двумя самостоятельными, близкими по составу минеральными фазами, которые находятся между собой в тесных срастаниях (джемсонит и робинсонит, изоклейкит I и II, козалит и кобеллит, висмутовый джемсонит I и вис-

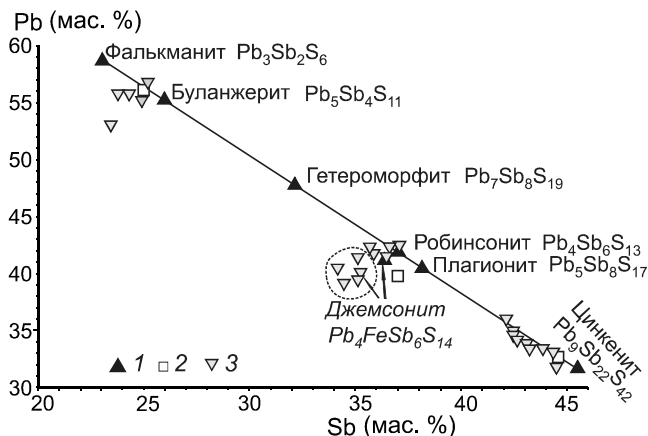


Рис. 10. Соотношение содержаний Sb и Pb (мас. %) в сульфоантимонитах свинца Средне-Голготайского месторождения.

1 – теоретические составы минералов; 2 – литературные данные [4, 5]; 3 – анализы авторов.

мутовый джемсонит II), а также нестехеометричный состав сульфоантимонитов свинца буланжеритового гомологического ряда.

Минералы из группы сульфотеллуридов висмута являются неотъемлемыми спутниками висмутовой минерализации в ранних золото-кварцевых рудах Средне-Голготайского месторождения. Они постоянно находятся непосредственно в висмутинах в виде ксеноморфных «реликтовых» образований, либо образуют в них своеобразные структуры распада твердых растворов (рис. 3 В, Г). В рудах более поздней золото-кварц-турмалин-сульфидной ассоциации роль сульфотеллуридов висмута весьма незначительна. Основная масса этих минералов чаще всего отмечается в виде ксеноморфных микровыделений в арсенипирите (рис. 4 А, Б). По составу сульфотеллуриды висмута в рудах Средне-Голготайского месторождения в основном представлены жозеитом-А, жозеитом-В и минеральными соединениями тетрадимитовой гомологической серии (рис. 11). По характеру взаимоотношений сульфотеллуридов между собой можно предполагать, что жозеит-А и жозеит-В являются более ранними минералами по отношению к агрегатам тетрадимитовой серии. Обе разновидности жозеитов, которые наиболее распространены в золото-кварцевых рудах, имеют ярко выраженный дискретный характер без наличия взаимных переходов между собой (рис. 11) и могут быть отнесены к стехеометричным минеральным образованиям, хотя их состав не всегда четко рассчитывается на теоретическую формулу. Жозеит-А и жозеит-В различаются между собой по составу элементов примесей. В составе жозеита-А постоянно отмечается наличие Pb (до 2.5 мас. %, табл. 5), тог-

Таблица 4. Химический состав сульфоантимонитов свинца из кварц-сульфидно-карбонатных руд Средне-Голготайского месторождения.

N/N	Pb	Mn	Fe	Cu	Sb	S	Сумма
1	55.93	-	-	-	23.78	17.80	97.51
2	55.77	-	-	-	24.25	18.14	98.16
3	56.84	-	-	-	25.21	18.59	100.64
4	55.25	-	-	-	24.91	18.42	98.58
5	39.36	1.03	1.59	1.93	35.10	20.91	99.92
6	39.08	0.84	1.76	1.07	34.43	21.25	98.43
7	39.99	0.73	1.71	-	35.20	20.94	98.57
8	40.33	0.89	1.69	-	34.15	20.64	97.70
9	41.39	0.94	1.73	-	35.15	21.16	100.37
10	42.34	-	-	-	37.05	20.73	100.12
11	41.79	-	-	-	35.83	20.09	97.71
12	42.38	-	-	-	35.65	20.04	98.07
13	41.34	-	-	-	36.47	20.14	97.95
14	42.31	-	-	-	36.70	20.70	99.71
15	34.21	-	-	1.16	42.68	21.57	99.62
16	34.73	-	-	0.72	42.45	21.66	99.56
17	34.41	-	-	0.61	42.55	21.79	99.36
18	33.18	-	-	1.22	44.36	22.01	100.77
19	35.98	-	-	0.65	42.15	21.33	100.11
20	33.51	-	-	0.61	43.28	22.15	99.55
21	31.71	-	-	0.54	44.48	22.27	99.00
22	33.71	-	-	0.59	43.09	21.76	99.15
23	33.40	-	-	0.65	43.86	22.26	100.17
Коэффициенты в формуле минералов							
	Pb	Mn	Fe	Cu	Sb	S	Pb/Sb
1	5.29	0.00	0.00	0.00	3.83	10.88	1.38
2	5.21	0.00	0.00	0.00	3.85	10.94	1.35
3	5.17	0.00	0.00	0.00	3.90	10.93	1.32
4	5.10	0.00	0.00	0.00	3.91	10.99	1.30
5	3.93	0.39	0.59	0.63	5.97	13.50	0.66
6	3.94	0.32	0.66	0.35	5.90	13.83	0.67
7	4.09	0.28	0.65	0.00	6.13	13.85	0.67
8	4.18	0.35	0.65	0.00	6.02	13.81	0.69
9	4.17	0.36	0.65	0.00	6.03	13.79	0.69
10	4.07	0.00	0.00	0.00	6.06	12.87	0.67
11	4.13	0.00	0.00	0.00	6.03	12.84	0.69
12	4.19	0.00	0.00	0.00	6.00	12.81	0.70
13	4.07	0.00	0.00	0.00	6.11	12.82	0.67
14	4.08	0.00	0.00	0.00	6.02	12.90	0.68
15	9.99	0.00	0.00	1.10	21.21	40.70	0.47
16	10.17	0.00	0.00	0.69	21.15	40.99	0.48
17	10.06	0.00	0.00	0.58	21.17	41.18	0.48
18	9.50	0.00	0.00	1.14	21.62	40.74	0.44
19	10.60	0.00	0.00	0.62	21.14	40.63	0.50
20	9.70	0.00	0.00	0.58	21.31	41.42	0.45
21	9.15	0.00	0.00	0.51	21.83	41.51	0.42
22	9.86	0.00	0.00	0.56	21.45	41.13	0.46
23	9.60	0.00	0.00	0.61	21.45	41.34	0.45

Примечание. Образец Г-47. 1–4 – буланжерит $Pb_5Sb_4S_{11}$ (расчет коэффициентов проведен на 20 атомов); 5–9 – джемсонит $FePb_4Sb_6S_{14}$ (расчет коэффициентов проведен на 25 атомов); 10–14 – робинсонит $Pb_4Sb_6S_{14}$ (расчет коэффициентов проведен на 23 атома); 15–23 – цинкениит $Pb_9Sb_{22}S_{42}$ (расчет коэффициентов проведен на 73 атома); – – содержание ниже предела обнаружения элемента. Анализы минералов выполнены в лаборатории рентгеновских методов Аналитического центра ДВГИ ДВО РАН на рентгеноспектральном микроанализаторе JXA-8100. Аналитики: Г.Б. Молчанова, Н.И. Екимова.

да как для некоторых агрегатов жозеита-В характерна незначительная примесь Se (табл. 5).

Минеральные соединения тетрадимитовой гомологической серии в рудах Средне-Голготайского месторождения представлены минеральными соединениями переменного состава тетрадимит-ингодитового изоморфного ряда (рис. 12). Характерной особенностью минералов этого ряда является наличие в их составе повышенных концентраций Pb (до 8.5 мас. %, табл. 5). На диаграмме соотношений (Pb + Bi)–Te (мас. %) точки составов образуют квазинепрерывный ряд природных соединений, которые практически идеально ложатся на теоретическую линию изоморфных замещений между тетрадимитом (Bi_2Te_2S) и ингодитом (Bi_2TeS). Наличие обширной серии твердых растворов в ряду тетрадимит–ингодит в системе Bi–Te–S ранее в минералогической литературе не отмечалось, хотя и предполагалось наличие твердых растворов в системе Bi_3Te_4 – Bi_3S_4 , а также присутствие незначительных концентраций Pb в этой серии минералов [36]. В последние годы аналогичные по составу минеральные соединения этого ряда, содержащие в своем составе Pb от 2.52 до 6.99 вес. %, выявлены в сульфидных рудах одного из крупных Fe-Cu-(Mo)-Au скарновых месторождений Китая–Бейя [50]. Данные минеральные соединения отнесены к новой неназванной фазе сульфотеллуридов, с предполагаемой кристаллохимической формулой $(Pb,Bi)_3(Te,S)_4$ с широким диапазоном изменений в его составе концентраций Bi (55.9–62.3 мас. %) и Te (27.8–34.6 мас. %). На диаграмме соотношений концентраций (Pb+Bi) – Te фигуративные точки составов Pb-Bi-Te минеральных соединений из месторождения Бейя практически полностью совпадают с составом сульфотеллуридов ингодит-тетрадимитового ряда Средне-Голготайского месторождения (рис. 12), однако занимают более узкий интервал в данном ряду, располагаясь ближе к тетрадимиту.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изучение взаимоотношений рудных жил разного минерального состава, последовательности формирования в них рудных минералов, а также их типоморфных особенностей позволило авторам более детально рассмотреть общую направленность развития процесса минералообразования при формировании жильного золото-редкометалльного оруденения Средне-Гол-

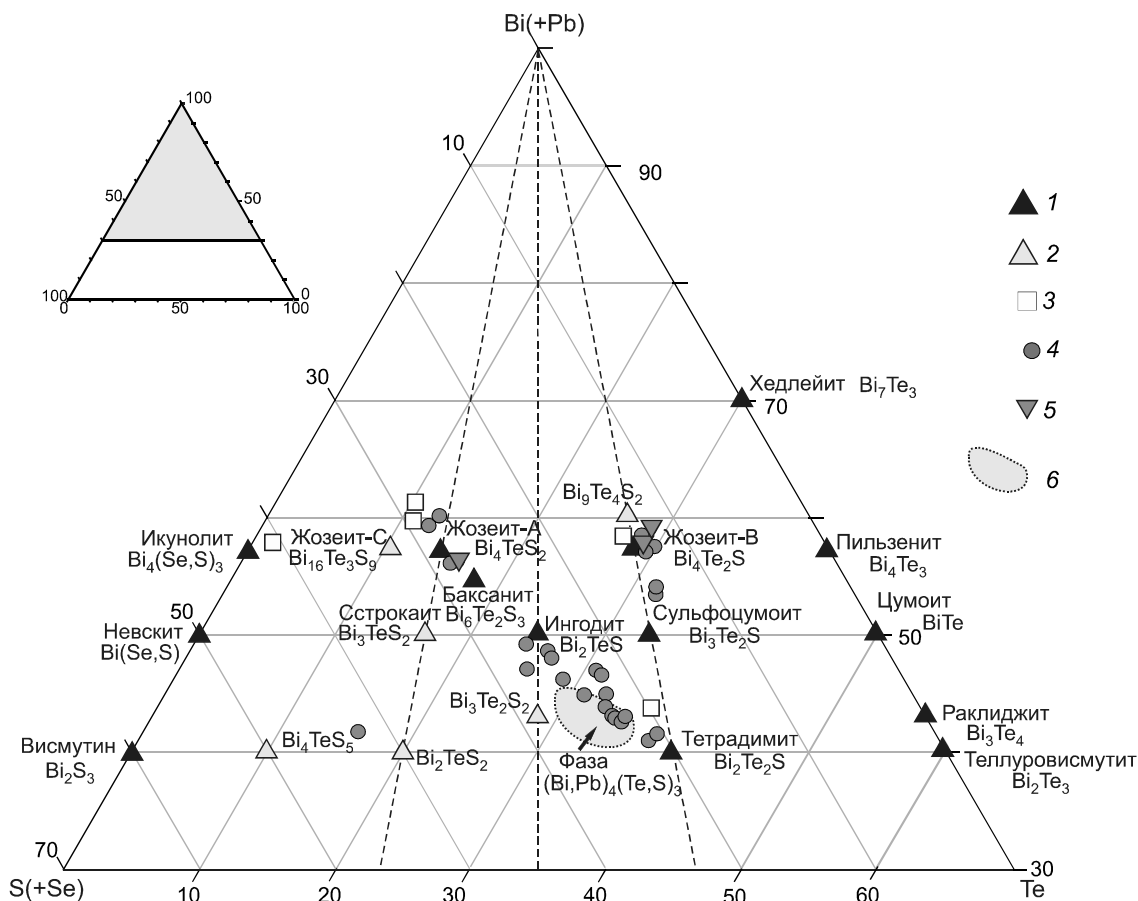


Рис. 11. Диаграмма составов сульфотеллуридов висмута из золото-кварцевых руд Средне-Голготайского месторождения в системе Bi–Te–S.

1 – теоретические составы минералов [43]; 2 – минеральные фазы, официально не утвержденные как самостоятельные минералы; 3 – литературные данные [4, 5]; 4–5 – данные авторов. Типы руд: 4 – золото-кварцевые, 5 – кварц-карбонатные; 6 – поле составов неназванной фазы $(Pb,Bi)_3(Te,S)_4$ из месторождения Бейя, Китай [50].

готайского месторождения. Для данного месторождения характерен сложный многоактный процесс рудогенеза с четким выделением по геологическим данным ранней продуктивной золото-кварцевой, поздней продуктивной – золото-турмалин-сульфидно-кварцевой и заключительной кварц-сульфидно-карбонатной стадий минералообразования. Такая стадийность отражает временную (и возможно – температурную) последовательность формирования ассоциаций минералов, обусловленную эволюцией гидротермальной системы и изменением физико-химических условий среды минералообразования.

Для ранней золото-кварцевой стадии наиболее продуктивной на золотое оруденение является молибденит-арсенопирит-висмутиновая ассоциация с ярко выраженной Au-Mo-As-Bi-Te специализацией руд. Для нее характерно широкое развитие в рудах висмутин и сульфотеллуридов висмута. В составе этих минералов постоянно отмечается примесь свинца (до

2.56 мас. % Pb – в жозеите-А, до 8.56 мас. % – в ингодит-тетрадимите, до 4.52 мас. % – в висмутине). Для Bi-Te минерализации характерно широкое развитие структур распада твердых растворов, которое наиболее ярко проявилось в висмутинах в виде образования в них неоднородных двух-, реже – трехфазных агрегатов различного состава. При этом, как правило, основная матрица висмутина содержит в своем составе не более 4–6 мас.% Sb, тогда как находящиеся в них более поздние фазы уже относятся к существенно сурьмянистым разновидностям и содержат в своем составе от 8 до 14 мас. % Sb.

В составе минеральной ассоциации сочетаются два совмещенных морфологических типа проявления золотой минерализации: Au-As и Au-Bi-Te. Первый тип представлен золотоносным арсенопиритом с многочисленными сингенетичными каплеобразными или округлыми микровыделениями размерами порядка 0.5–2 мкм, редко – до 10–20 мкм. Микровыделения

Таблица 5. Химический состав сульфотеллуридов висмута из золото-кварцевых руд Средне-Голготайского месторождения.

N/N	Номер образца	Содержание элементов, мас. %						
		Bi	Ag	Pb	Te	Se	S	Сумма
1	Г-17	79.62	0.25	1.91	10.37	-	6.05	98.20
2	Г-33	79.65	-	1.71	10.71	-	5.74	97.81
3	Г-33	77.17	-	2.24	13.59	-	6.18	99.18
4	Г-20	76.39	-	2.56	13.60	-	6.08	98.64
5	Г-33	73.42	-	-	22.13	0.80	2.21	98.56
6	Г-17	73.73	0.48	-	23.46	0.65	2.22	100.54
7	Г-17	73.10	-	-	23.15	0.80	2.36	99.41
8	Г-20	75.53	-	-	22.75	-	2.39	100.67
9	Г-20	73.45	-	-	23.45	-	2.30	99.20
10	Г-33	70.17	-	-	25.28	-	2.86	98.31
11	Г-33	69.54	-	-	25.69	-	2.90	98.13
12	Г-33	68.95	-	1.20	21.73	-	5.80	97.68
13	Г-17	65.75	0.45	5.02	24.19	-	5.67	101.08
14	Г-17	65.17	0.06	4.67	24.10	-	5.59	99.59
15	Г-17	68.33	0.25	2.01	23.64	-	6.34	100.57
16	Г-17	65.25	0.20	2.07	27.35	-	4.97	99.84
17	Г-33	67.04	-	-	28.13	-	4.95	100.12
18	Г-33	58.77	-	8.56	26.06	-	5.61	99.00
19	Г-17	63.20	0.37	1.62	27.71	1.47	4.77	99.14
20	Г-17	60.89	0.35	3.97	29.23	-	5.05	99.49
21	Г-17	57.60	0.25	6.16	29.63	-	5.17	98.81
22	Г-17	59.51	0.23	4.87	31.55	-	5.30	101.46
23	Г-33	60.28	-	2.43	31.43	-	5.04	99.18
24	Г-33	62.39	-	-	31.07	-	5.13	98.59
25	Г-17	58.62	0.24	3.87	31.84	-	5.15	99.72
26	Г-17	59.78	0.08	0.93	34.57	-	4.69	100.05
27	Г-17	57.89	-	2.95	34.75	-	4.92	100.51
28	Г-33	71.24	-	-	16.76	-	11.25	99.25
Коэффициенты в формулах минералов								
		Bi	Ag	Pb	Te	Se	S	Bi/Te
1	Г-17	4.03	0.02	0.10	0.86	0.00	1.99	4.69
2	Г-33	4.09	0.00	0.09	0.90	0.00	1.92	4.54
3	Г-33	3.81	0.00	0.11	1.10	0.00	1.99	3.47
4	Г-20	3.80	0.00	0.13	1.11	0.00	1.97	3.43
5	Г-33	4.07	0.00	0.00	2.01	0.12	0.80	2.03
6	Г-17	3.99	0.05	0.00	2.08	0.09	0.78	1.92
7	Г-17	3.98	0.00	0.00	2.07	0.12	0.84	1.93
8	Г-20	4.12	0.00	0.00	2.03	0.00	0.85	2.03
9	Г-20	4.05	0.00	0.00	2.12	0.00	0.83	1.91
10	Г-33	3.23	0.00	0.00	1.91	0.00	0.86	1.69
11	Г-33	3.20	0.00	0.00	1.93	0.00	0.87	1.65
12	Г-33	1.82	0.00	0.03	0.94	0.00	1.00	1.94
13	Г-17	1.78	0.02	0.14	1.07	0.00	1.00	1.66
14	Г-17	1.79	0.00	0.13	1.08	0.00	1.00	1.65
15	Г-17	1.65	0.01	0.05	0.94	0.00	1.00	1.76
16	Г-17	2.01	0.01	0.06	1.38	0.00	1.00	1.46
17	Г-33	2.08	0.00	0.00	1.43	0.00	1.00	1.46
18	Г-33	1.61	0.00	0.24	1.17	0.00	1.00	1.38
19	Г-17	2.03	0.02	0.05	1.46	0.13	1.00	1.39
20	Г-17	1.85	0.02	0.12	1.45	0.00	1.00	1.27
21	Г-17	1.71	0.01	0.18	1.44	0.00	1.00	1.19
22	Г-17	1.72	0.01	0.14	1.50	0.00	1.00	1.15
23	Г-33	1.84	0.00	0.07	1.57	0.00	1.00	1.17
24	Г-33	1.87	0.00	0.00	1.52	0.00	1.00	1.23
25	Г-17	1.75	0.01	0.12	1.55	0.00	1.00	1.12
26	Г-17	1.96	0.01	0.03	1.85	0.00	1.00	1.06
27	Г-17	1.81	0.00	0.09	1.77	0.00	1.00	1.02
28	Г-33	2.07	0.00	0.00	0.80	0.00	2.13	2.60

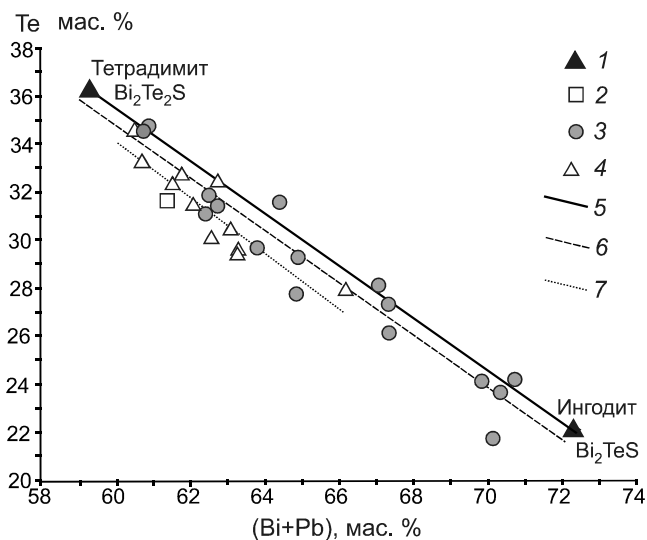


Рис. 12. Зависимость между содержаниями (Bi + Pb) и Te (мас. %) в составе сульфотеллуридов висмута ингодит-тетрадимитового ряда из руд месторождений Средне-Голготайского, Восточное Забайкалье, и Бейя, Китай [50].

1 – теоретические составы минералов; 2 – литературные данные [4, 5]; 3 – анализы авторов; 4 – сульфотеллуриды Au-Fe-Cu месторождения Бейя; 5–7 – линии тренда изменения состава сульфотеллуридов: 5 – теоретические составы; 6 – Средне-Голготайское месторождение, 7 – месторождение Бейя.

сложены преимущественно гомогенными агрегатами высокопробного самородного золота, сульфотеллуридами висмута и самородным висмутом. Второй, основной тип золотой минерализация в золото-кварцевых рудах представлен высокопробным самородным золотом (920–980 ‰), которое чаще всего находится в кварце в виде крупных самостоятельных минеральных агрегатов, часто в тесных сростаниях с висмутином и сульфотеллуридами висмута. Помимо самородного золота в кварцевых рудах отмечаются и Au-Bi интерметаллические соединения в виде мальдонита.

Наличие в золото-кварцевых рудах мальдонита указывает, что формирование основной массы Au-Bi-Te минерализации происходило из малосернистых теллуридных гидротермальных растворов [8, 20]. Температурные условия кристаллизации руд косвенно могут быть определены по минералам висмута. Устойчивость мальдонита определяется в диапазоне температур 375–116 °С [44], а температура кристаллизации самородного висмута – 271 °С [30].

Проведенные ранее оценки температурного режима формирования золото-кварцевых руд по результатам изучения газовой-жидких включений в кварце оцениваются в 300–360 °С [31], что свидетельствует также о высокотемпературных условиях формирования золото-висмутовой минерализации.

Для золото-кварцевой стадии можно выделить следующую минералого-геохимическую эволюцию состава ее продуктов: W-Mo → Mo-Au-As-Bi-Te → Bi-Sb. Формирование золотой минерализации в кварцевых рудах Средне-Голготайского месторождения происходило из высокотемпературного малосернистого флюида и характеризовалось совмещенностью Mo, As и Bi-Te минерализации с увеличением роли сурьмы в составе флюида на заключительной фазе рудообразования. Это фиксируется по появлению в составе руд сурьмянистых разновидностей висмутита и висмутового джемсонита.

По минеральному составу руды золото-кварцевой стадии Средне-Голготайского месторождения имеют определенные черты сходства с золотоносными минеральными ассоциациями жильных золоторудных (Кировское, Дарасунское, Малиновское, Бутарное и др.) и скарновых Cu-W (Восток-2, Агылки и др.) месторождений, генетически связанных с гранитоидным магматизмом [7, 9–14, 16, 18].

Характерной особенностью минерального состава руд турмалин-сульфидно-кварцевой стадии является широкое распространение сфалерита, галенита, а также блеклых руд и Bi-Sb сульфосолей Pb. Набор минералов свидетельствует о том, что рудоносные флюиды, интенсивно обогащенные бором, были высокосернистые и имели сложный поликомпонентный As-Cu-Zn-Pb-Bi-Sb состав.

В составе кварц-турмалин-сульфидных руд выделяются две золотоносные парагенетические минеральные ассоциации: ранняя – золото-пирротин-пирит-арсенопирит-турмалин-кварцевая, и более поздняя – золото-сфалерит-галенит-сульфосолевая. Самородное золото в рудах первой ассоциации находится в виде микровыделений в арсенопирите, в тесной ассоциации с самородным висмутом, сульфотеллуридами висмута, висмутином и мальдонитом, во второй ассоциации – в тесных сростаниях с сурьмяно-висмутовыми сульфосолями Pb. Самородное золото в арсенопирите высокопробное (950–980 ‰), в сроста-

Примечание. 1–4 – жозеит-А ($Bi_4Te_2S_2$), 5–9 – жозеит-В (Bi_4Te_2S); 10–11 – предположительно сульфозумаит (Bi_3Te_2S), 12–27 – минералы переменного состава тетрадимит (Bi_2Te_2S) – ингодит (Bi_2TeS) ряда (расчет коэффициентов в формулах минералов проведен по S), 28 – минерал X, близкий по составу к минеральной фазе с теоретической формулой Bi_2Te_2S ; - - содержание ниже предела обнаружения элемента. Анализы минералов выполнены в лаборатории рентгеновских методов Аналитического центра ДВГИ ДВО РАН на рентгеноспектральном микроанализаторе JXA-8100. Аналитики: Г.Б. Молчанова, Н.И. Екимова.

ниях с сульфосолями – относительно высокопробное (800–860 ‰).

Температурные условия формирования золото-сульфидных руд, оцененные по полям устойчивости сульфовисмутитов свинца, находятся в интервале 425–360 °С [5].

Анализ взаимоотношений минералов в составе золото-кварц-турмалин-сульфидных руд показывает, что в начале формирования рудной стадии рудоносный флюид имел преимущественно Au-As-(Bi-Te) состав, близкий к образованиям ранней золото-кварцевой стадии. В этом отношении особенно характерно появление в арсенопиритах микровыделений мальдонита – одного из типоморфных минералов золото-кварцевых руд. В дальнейшем отмечается смена состава рудоносного флюида за счет развития высокосернистых многоэлементных Au-Cu-Zn-Bi-Pb-Sb рудоносных растворов с резким преобладанием Pb-Sb системы в конце рудного процесса. Таким образом, в формировании руд турмалин-сульфидно-кварцевой стадии отмечается четко выраженная направленность изменения состава рудного флюида: Au-As → Au-Bi-Pb-Sb → Pb-Sb.

Заключительная кварц-сульфидно-карбонатная стадия характеризуется преимущественно Pb-Sb специализацией руд. Наличие в ее составе буланжерита в тесной ассоциации с робинсонитом свидетельствует об относительно высокотемпературных (400–350 °С) близнеитральных или щелочных условиях гидротермального рудообразования [3]. Верхний же предел устойчивости игольчатых сульфоантимонитов свинца, по экспериментальным данным, оценивается гораздо выше: робинсонита и цинкениита – 583 °С и 546 °С [47], джемсонита – 545 °С [34]. Таким образом, в многостадийных рудах Средне-Голготайского месторождения отчетливо выявляется эволюционная последовательность кристаллизации минералов Pb-Bi-Sb-S и Pb-Bi-S систем: висмутин и сульфотеллуриды висмута → висмутсодержащий галенит и сложные сурьмяно-висмутовые сульфосоли свинца → галенит и простые сульфоантимониты свинца.

Рассматривая характер поведения основных рудных элементов в общем процессе рудогенеза, следует отметить, что от ранних к поздним стадиям в составе руд уменьшается роль Au-Bi-Te и, соответственно, увеличивается значение Pb и Sb минерализаций, что отчетливо видно по характеру изменения минерального состава руд.

С этих позиций, вероятней всего, основной причиной появления в рудах месторождения широкого спектра минеральных соединений из группы Sb-Bi сульфосолей свинца является относительно высоко-

температурный режим рудообразования, а также пространственная совмещенность и возрастная близость формирования ранней Au-Bi-Te и поздней собственно сульфосольной сурьмяной минерализации, что отчетливо фиксируется даже в пределах одной золотоносной стадии. Это подтверждается наличием следов сурьмяной минерализации в ранних Au-Bi рудах, что отчетливо фиксируется в составе висмутинов месторождения. На других золоторудных объектах восточной части Монголо-Охотского орогенного пояса эти разностадийные или разноэтапные рудные образования либо пространственно разобщены, что приводит к формированию собственно антимонитовых карбонат-кварцевых жил (Кировское, Итакинское месторождения), либо значительно оторваны друг от друга во временном диапазоне (Балейское месторождение).

Временная близость формирования разностадийных рудных образований находит свое подтверждение в широком развитии на месторождении процессов телескопирования руд, обусловленных наложением поздних ассоциаций на более ранние, что часто приводит к образованию рудных тел сложного, комбинированного минерального состава [28]. В этой связи наложение высокотемпературных обогащенных сурьмой рудных растворов заключительной карбонатной стадии на минеральные ассоциации первой и второй стадий, вероятней всего, следует рассматривать как один из возможных механизмов, способствующих формированию разнообразных по составу Sb-Bi сульфосолей свинца. С этих позиций их образование можно рассматривать как результат взаимодействия ранней Au-Bi минерализации с более поздними гидротермальными флюидами, обогащенными Pb и Sb, с последующей мобилизацией висмута в рудный флюид в растворенной или частично расплавленной форме. Возможность появления в высокотемпературной гидротермальной системе сложных расплавов, способствующих формированию сульфосолей, вполне допустимо, так как Bi, Pb и Sb относятся к халькофильным элементам низкой температуры плавления [37]. При этом Bi имеет одну из самых низких точек плавления среди этих элементов (271 °С), а соединения мальдонита с висмутом и того ниже – 241 °С [44]. Предполагается, что предложенный механизм формирования сульфосолей Bi за счет процессов частичного плавления самородного висмута в рудах вполне применим для объяснения природы многообразия сульфосолей висмута. Частично это находит свое подтверждение в формах выделений сульфосолей в рудах рассматриваемого месторождения, представленных в основном распадом твердых растворов минеральных систем Pb-Bi-Sb-S, а также их типохимическими особенностями состава.

Рассмотрение эволюционной последовательности формирования рудной минерализации показывает, что гидротермальный процесс на рассматриваемом месторождении был многоактным, а растворы, генерирующие золото-редкометалльное оруденение, на ранних стадиях рудного процесса имели не только мышьяковую специализацию, но и борную. При этом следует особо отметить роль бора в формировании золотой минерализации Средне-Голготайского месторождения. Широкое развитие турмалина в золотоносных рудах является характерной особенностью разнотипных месторождений Восточного Забайкалья и Верхнего Приамурья. Однако на большинстве золоторудных месторождений «золото-турмалинового» типа взаимосвязь между турмалиновой и золотой минерализацией не всегда очевидна. В большинстве случаев эта взаимосвязь рассматривается как пространственная, но не как генетическая, поскольку основная масса турмалина слагает крупнообъемные тела, сложенные турмалинитами, либо турмалиновыми брекчиями (Дарасунское, Ключевское, Дмитриевское и др.), которые формируются на ранних стадиях рудного процесса и зачастую содержат в своем составе рассеянную пиритовую вкрапленность с относительно убогой золотой минерализацией. В рудах Средне-Голготайского месторождения борная минерализация присутствует в обоих продуктивных стадиях рудного процесса, однако основная масса турмалина, локализованного в кварц-сульфидных рудах, несомненно, была сформирована гораздо позже основной массы Au-Bi минерализации. Эта особенность процесса рудообразования в значительной мере отличает Средне-Голготайское месторождение от подобных гранитогенных жильных месторождений «золото-турмалинового» типа восточной части Монголо-Охотского орогенного пояса, которая может рассматриваться как доказательство генетической взаимосвязи золото-висмутовой и борной минерализации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Средне-Голготайское золоторудное месторождение Восточного Забайкалья является одним из ярких представителей жильных рудных объектов гранитогенного золото-висмутового типа Востока России. Пространственно и генетически рудно-магматические системы таких месторождений генетически связаны с магматическими комплексами I-S типа, как это проявлено не только в Восточном Забайкалье и на Северо-Востоке России [8, 15, 25], но и в структурах золоторудного пояса Тинтина восточной части Центральной Аляски [33, 41].

Широко развитая в рудах месторождения висмутовая и теллуридная минерализация тесно ассоцииру-

ет с золотым оруденением. Эта минерализация представлена преимущественно минеральными системами Pb-Bi-Sb-S и Bi-Te-S, в составе которых выделяются следующие минеральные соединения: твердый раствор висмутин – стибнита; сурьмяно-висмутовые сульфосоли свинца (сурьмянистый лиллианит, сурьмянистый кобеллит, сурьмянистый галеновисмутит, яскульскийит, минералы изоклейкит-гиссенитовой и тинтинаит-кобеллитовой гомологических серий, висмутовый джемсонит, висмутсодержащий буланжерит, висмутсодержащий тинтинаит, а также сульфотеллуриды висмута (жозеит-А, жозеит-В, минерал X, близкий по составу к фазе Bi_2TeS_2 , минералы переменного состава тетрадимит-ингодитового ряда).

Проявленные на месторождении ассоциации минералов Bi-Te-S и Pb-Bi-Sb-S систем отражают эволюционную направленность развития процесса рудообразования и временную последовательность кристаллизации минералов: сульфиды висмута и сульфотеллуриды висмута → сложные Bi-Sb сульфосоли свинца → простые сульфоантимониты свинца. Формирование выделенных ассоциаций минералов обусловлено пространственной совмещенностью и временной близостью ранней Au-Bi и поздней собственно сурьмяной минерализаций в процессе эволюционного развития единой рудно-магматической системы. В качестве одного из возможных механизмов формирования Bi-Sb сульфосолой свинца предполагается заимствование Bi из руд ранней Au-Bi стадии гидротермальным флюидом, обогащенным Pb и Sb, с последующей мобилизацией и перераспределением этих элементов в частично растворенной или расплавленной форме.

Пространственное совмещение в пределах рудных тел высокотемпературных разностадийных образований с различными по составу минералами системы Pb-Bi-Sb-S является характерной особенностью не только гранитогенных жильных золоторудных месторождений Au-Bi типа, но и Cu-W скарновых рудных объектов Дальнего Востока России (Восток-2, Лермонтовское, Агылки и др.).

Авторы выражают благодарность В.Е. Тупякову и А.М. Спиридонову за организацию полевых работ и предоставление необходимой информации по геологии Средне-Голготайского месторождения, а также сотрудникам лаборатории рентгеновских методов Аналитического центра Г.Б. Молчановой и Н.И. Екимовой за выполнение аналитических исследований.

Исследования выполнены при частичной поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (№ 16-05-00283, № 16-35-60098), а также гранта ДВО РАН № 18-2-001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамов Б.Н. Условия формирования, минералого-геохимические особенности пород и руд Средне-Голготайского золоторудного месторождения (Восточное Забайкалье) // Изв. вузов: Геология и разведка. 2012. № 3. С. 79–82.
- Балейское рудное поле (геология, минералогия и вопросы генезиса) / Ред. Н.П. Лаверов. М.: ЦНИГРИ Мингео СССР, 1984. 271 с.
- Бортников Н.С., Мозгова Н.Н., Некрасов И.Я., Бородаев Ю.С., Индолев Л.Н. Факторы, определяющие типоморфизм минеральных ассоциаций сульфоантимонитов и сульфостаннатов свинца // Новые данные о типоморфизме минералов. М.: Наука, 1980. С. 115–130.
- Бортников Н.С., Мозгова Н.Н., Некрасов И.Я., Розов Д.Н., Тупяков В.Е., Цепин А.И. Особенности висмутовой минерализации золоторудного месторождения в Восточном Забайкалье // Минерал. журн. 1982. Т. 4, № 4. С. 45–48.
- Бортников Н.С., Цепин А.И. Сурьмяно-висмутовые сульфосоли Средне-Голготайского месторождения (Восточное Забайкалье) // Изв. вузов. Серия геологическая. 1987. № 1. С. 86–95.
- Вах А.С., Гвоздев В.И., Горячев Н.А., Карабцов А.А., Федосеев Д.Г., Вах Е.А. Висмутовый джемсонит (сахароваит) в рудах Средне-Голготайского золоторудного месторождения (Восточное Забайкалье, Россия) // Зап. РМО. 2018. № 4. С. 68–84.
- Волков А.В., Черепанова Н.В., Прокофьев В.Ю., Смилгин С.В., Трубкин Н.В., Алексеев В.Ю. Месторождение золота в Бутарном гранитоидном штоке (Северо-восток России): геологическое строение, минералогия и условия формирования руд // Геология руд. месторождений. 2013. Т. 55, № 3. С. 214–237.
- Гамянин Г.Н., Некрасов И.Я., Самусиков В.П. Мальдонит из золоторудных проявлений Восточной Якутии // Минерал. журн. 1986. Т. 8, № 3. С. 65–71.
- Гамянин Г.Н., Гончаров В.И., Горячев Н.А. Золото-редкометалльные месторождения Востока России // Тихоокеан. геология. 1998. Т. 17, № 3. С. 94–103.
- Гвоздев В.И. Свинцово-сурьмяно-висмутовая минерализация в рудах скарново-шеллит-сульфидного месторождения Агылки (Якутия) // Геология руд. месторождений. 2002. Т. 44, С. 342–353.
- Гвоздев В.И., Цепин А.И. Висмутовая минерализация в рудах месторождения Восток-2 // Геология руд. месторождений. 2005. Т. 47, № 2. С. 148–163.
- Гвоздев В.И. Рудно-магматические системы скарновых шеллит-сульфидных месторождений Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2010. 338 с.
- Гвоздев В.И., Горячев Н.А., Вах А.С., Федосеев Д.Г., Семяняк Б.И. Минеральный состав и типоморфные особенности минералов золоторудных жил Кировского месторождения (Верхнее Приамурье) // Тихоокеан. геология. 2013. Т. 32, № 6. С. 40–51.
- Гвоздев В.И., Доброшевский К.Н., Вах А.С., Горячев Н.А., Степанов В.А., Федосеев Д.Г. Малиновское месторождение – новый тип золоторудной минерализации в Приморском крае, Россия (геология, минералогия, генезис) // Тихоокеан. геология. 2016. Т. 35, № 1. С. 37–53.
- Горячев Н.А., Бердников Н.В. Типы рудоносных гранитоидов юго-восточной части мезозойда Северо-Востока России и их флюидная специализация // Тихоокеан. геология. 2006. Т. 25, № 3. С. 40–52.
- Горячев Н.А., Гамянин Г.Н. Золото-висмутовые (золото-редкометалльные) месторождения Северо-Востока России: типы и перспективы промышленного освоения // Золоторудные месторождения России. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2006. С. 50–62.
- Константинов М.М. Золоторудные провинции мира. М.: Науч. мир, 2006. 358 с.
- Лотина А.А. Золото-висмут-теллуровая минерализация участка Болотистого (Северо-Западный Сихотэ-Алинь) // Тихоокеан. геология. 2011. Т. 30, № 1. С. 97–107.
- Мозгова Н.Н., Бортников Н.С. О нестехиометрии игольчатых сульфоантимонитов свинца / Геохимия и минералогия. Докл. сов. геологов на XXVI сес. МГК. М.: Наука, 1980. С. 126–138.
- Некрасов И.Я. Геохимия, минералогия и генезис золоторудных месторождений. М.: Наука, 1991. 302 с.
- Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. М.: Изд-во ин. лит-ры, 1962. 1132 с.
- Сахарова М.С. О висмутовых сульфосолях Устарсайского месторождения // Тр. минерал. музея АН СССР. 1955. Вып. 7. С. 112–126.
- Сахарова М.С., Кривицкая Н.Н. Минералого-геохимическая характеристика свинцово-сурьмяно-висмутовых сульфосолей из золоторудных месторождений Восточного Забайкалья // Геология руд. месторождений. 1970. № 4. С. 56–70.
- Сахарова М.С. Типоморфизм ассоциаций минералов висмута и теллура в золотых месторождениях Восточного Забайкалья // Типоморфизм минералов и его практическое значение. М.: Недра, 1972. С. 233–240.
- Спиридонов А.М., Зорина Л.Д., Китаев Н.А. Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. Новосибирск: Академ. изд-во «ГЕО», 2006. 291 с.
- Татьяков И.Г., Дамдинов Б.Б., Гармаев Б.Л., Будяк А.Е. Комплексная геолого-геофизическая модель верхней части разреза Среднеголотайского золоторудного месторождения // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 3. Ч. 2. С. 77–80.
- Тимофеевский Д.А. Геология и минералогия Дарасунского золоторудного района // Тр. ЦНИГРИ. Вып. 98. М.: Недра, 1972. 259 с.
- Тупяков В.Е., Широкий О.И., Колдина В. М. Условия формирования сложных жил на золоторудном месторождении Средний Голготай // Вопросы региональной геологии и металлогении Забайкалья. Чита, 1968.
- Тупяков В.Е. Геология и эндогенная рудная зональность Средне-Голготайского золото-висмутового месторождения (Восточное Забайкалье): Автореф. ... канд. геол.-минер. наук. Иркутск: Изд-во ИПИ, 1978. 24 с.
- Химия сульфидных минералов / Воган Д.Дж., Крейг Дж.Р. / Пер. с англ. М.: Мир, 1981. 575 с.
- Юргенсон Г.А., Тупяков В.Е., Широкий О.И. Вариации состава и свойств жильного кварца месторождения золото-сульфидно-кварцевой формации как отражение рудной зональности и условий образования // Геология руд. месторождений. 1979. № 3. С. 56–67.
- Armbruster T., Hummel W. (Sb,Bi,Pb) ordering in sulfosalts:

- Crystal-structure refinement of a Bi-rich izoklakeite // *Amer. Mineral.* 1987. V. 72. P. 821–831.
33. Bakke A.A. The Fort Knox «porphyry» gold deposit – Structurally controlled stockwork and shear quartz vein, sulphide-poor mineralization hosted by a Late Cretaceous pluton, east-central Alaska / Ed. T.G. Schroeter // *Porphyry deposits of the Northwestern Cordillera of North America // CIM Spec.* 1995. V. 46. P. 795–802.
 34. Chang L.L.Y., Knowles C.R. Phase relations in the systems $PbS-Fe_1-xS-Sb_2S_3$ and $PbS-Fe_1-xS-Bi_2S_3$ // *Can. Mineral.* 1977. V. 15. P. 374–379.
 35. Cook N.J. Bismuth and bismuth-antimony sulphosalts from Neogene vein mineralisation, Baia Borsa area, Maramures, Romania // *Mineral. Magazine.* 1997. V. 61. P. 387–409.
 36. Cook N.J., Clobanu C.L., Wagner T., Stanley C.J. Minerals of the system Bi–Te–Se–S related to the teteradymite archetype: review of classification and compositional variation // *Can. Mineral.* 2007. V. 45. P. 665–708.
 37. Frost B.R., Mavrogenes J.A., Tomkins A.G. Partial melting of sulfide ore deposits during medium- and high-grade metamorphism // *Can. Mineral.* 2002. V. 40. P. 1–18.
 38. Ghosal S., Sack R.O. Bi–Sb energetics in sulfosalts and sulfides // *Mineral. Magazine.* 1999. V. 63. P. 723–733.
 39. Graeser S., Harris D.C. Giessenite from Giessen near Binn, Switzerland: new data // *Can. Mineral.* 1986. V. 24. P. 19–20.
 40. Harris D.C., Roberts A.C., Criddle A.J. Izoklakeite, new mineral species from Izok Lake, Northwest Territories // *Can. Mineral.* 1986. V. 24. P. 1–5.
 41. McCoy D.T., Newberry R.J., Layer P. et al. Plutonic-Related Gold Deposits of Interior Alaska // *Econ. Geol.* 1997. V. 9. P. 191–241.
 42. Moëlo Y., Roger G., Maurel-Palacin D., Marcoux E., Laroussi A. Chemistry of $Pb-(Cu, Fe)-(Sb, Bi)$ -sulfosalts from France and Portugal, and correlated substitutions in the Cu-poor part of the $Pb_2S_2-Cu_2S-Sb_2S_3-Bi_2S_3$ system // *Mineral. Petrol.* 1995. V. 53. P. 229–250.
 43. Moëlo Y., Makovicky E., Mozgova N.N., Jambor J.L., Cook N., Pring A., Paar W., Nickel E.H., Graeser S., Karup-Møller S., Balic-Žunic T., Mumme W.G., Vurro F., Topa D., Bindi L., Bente K., Shimizu M. Sulfosalt systematics: a review. Report of the sulfosalt sub-committee of the IMA Commission on Ore Mineralogy // *Eur. J. Mineral.* 2008. N. 20. P. 7–46.
 44. Okamoto H., Massalski T.B. Au-Bi (gold-bismuth) // *Binary Alloy Phase Diagrams.* Metals Park, OH: Am. Soc. for Metals, 1986. P. 238–240.
 45. Orlandi P., Yves Moëlo Y., Biagioni C. Lead-antimony sulfosalts from Tuscany (Italy). X. Dadsonite from the Buca della Vena mine and Bi-rich izoklakeite from the Seravezza marble quarries // *Per. Mineral.* 2010. V. 79, N. 1. P. 113–121.
 46. Pazout R., Sejkora J., Srein V. Bismuth and bismuth-antimony sulphosalts from Kutná Hora vein Ag–Pb–Zn ore district, Czech Republic // *J. Geosci.* 2017. V. 62. P. 59–76.
 47. Salanci B. Contribution to the system $PbS-Sb_2S_3$ in relation to lead-antimony-sulfosalts // *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen.* 1979. V. 135. P. 315–326.
 48. Wagner T., Jonsson E. Mineralogy of sulfosalt-rich vein-type ores, Boliden massive sulfide deposit, Skellefte district, Northern Sweden // *Can. Mineral.* 2001. V. 39. P. 855–872.
 49. Zakrzewski M., Makovicky E. Izoklakeite from Vena, Sweden, and the kobellite homologous series // *Can. Mineral.* 1986. V. 24. P. 7–18.
 50. Zhou H., Sun X., Fu Y., Lin H., Jiang L. Mineralogy and mineral chemistry of Bi-minerals: Constraints on ore genesis of the Beiya giant porphyry-skarn gold deposit, southwestern China // *Ore Geol. Rev.* 2016. V. 79. P. 408–424.

Рекомендована к печати В.Г. Хомичем
после доработки 06.05.2019 г.
принята к печати 06.09.2019 г.

V.I. Gvozdev, A.A. Grebennikova, A.S. Vakh, N.A. Goryachev, D.G. Fedoseev

Evolution of mineral formation process under formation of gold-rare-metal ores in Sredne-Golgotay deposit (Eastern Transbaikalia)

Based on the results of integrated geological and mineralogical-geochemical study of the ores of the Sredne-Golgotay gold-bismuth deposit using currently available analytical research methods, new data have been obtained reflecting typical features and nature of the manifestations of Au-Bi-Te mineralization.

In the ore of Sredne-Golgotay deposit formed in different stages of the gold mining process are widely developed combinations of Bi-Te-S and Pb-Bi-Sb-S mineral systems, which are closely associated with native gold and are typomorphic indicators of the conditions of gold mineralization conditions.

***Key words:* gold ore deposits, gold-bismuth mineralization, minerals, sulphosalts, typomorphism, genesis, Eastern Transbaikalia.**