

УДК 549.35

ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЗОЛОТО-ТЕЛЛУРИДНО-ВИСМУТОВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ ЭМИ (Хабаровский край, Россия)

Н. Е. Савва¹, И. А. Брызгалов², А. Г. Колесников³, Т. Л. Рассказова¹

¹Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило ДВО РАН,
г. Магадан

E-mail: savva@neisri.ru

²Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва

E-mail: bryz@geol.msu.ru

³ООО «ПД РУС», Хабаровский край, пос. Охотск

E-mail: antkol@inbox.ru

Теллуридно-висмутовая минерализация на рудопроявлении Эми, расположенном на северо-западном фланге золоторудного месторождения Светлое (Охотский район), характеризуется повышенной селенистостью и пониженной сернистостью руд, а также разнообразием минеральных ассоциаций, в составе которых, наряду с преобладающим теллуrowисмутитом, установлены промежуточные члены изоморфного ряда теллуrowисмутит-теллурантимонит и ассоциирующие с ним самородные теллур, золото, сильванит, голдфилдит и колорадоит. Особо следует отметить наличие в рудах тесных сростаний минералов теллура с касситеритом. Гистограмма температур гомогенизации кварца, вмещающего оруденение, имеет двумодальное распределение в областях 240–270 и 310–370°C, что указывает на двухэтапное формирование оруденения, а наличие минералов Bi и Sn – на его вулканоплутоногенный генезис.

Ключевые слова: оруденение, этапность, теллуrowисмутит, Sb-теллуrowисмутит, гомогенизация, минеральная ассоциация.

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на сравнительно небольшие размеры, золото-теллуридно-висмутовое рудопроявление Эми отличается весьма разнообразным набором соединений теллура с Bi, Sb, Pb, Hg и Au. Минеральные ассоциации рудопроявления отлагались в более высокотемпературных условиях по сравнению с вмещающими вторичными кварцитами вулканогенного Au-Ag месторождения Светлое, относящегося к кислотно-сульфатному типу (Мишин, 2011). Все это свидетельствует о сложной генетической обстановке, существовавшей в процессе рудоотложения.

Рудопроявление Эми находится в Охотском районе Хабаровского края в юго-западной части Ульинского прогиба Охотской ветви Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (рис. 1). В структурном отношении оно расположено на пересечении и сочленении Дюльбакинского регионального разлома с более мелкими – поствулканическими Алалиньдинским и Онемнинским. Структурный узел контролирует положение поля вторичных кварцитов месторождения Светлого и Алалиньдинского рудного поля (Колесников и др., 2007; Мишин, 2011). Площадь рудопроявления – 1,1 км². Оно приурочено к Сек-

чинской депрессии и образует локальное поле вторичных кварцитов (преимущественно монокварцевых) в андезитах, андезибазальтах хетанинской свиты, контролируемое узлом пересечения северо-западных и северо-восточных субмеридиональных разломов.

Гидротермальная прожилково-гнездовая зона установлена на рудопроявлении Эми в коренном обнажении на левобережье истоков руч. Алалиньдя и вскрыта в канаве, где определена мощность зоны – 10 м. Во вскрытом интервале задокументирована чашеобразная залежь пористых монокварцитов, в которой развиты прожилки (2–10 мм), неправильной формы кварцевые гнезда размером до 15 см и друзы. Прожилки располагаются хаотично, но, в общем, согласно с контактом ограничивающей монокварцитами зоной дробления (аз. пд. 80°, угол пд. 30°). Кварц в прожилках, гнездах и друзах мелкокристаллический (до 2 мм) полупрозрачный, прозрачный. В центральной части зоны интерстиционное пространство в кварце выполнено агрегатом теллуридов. Отдельные массивные скопления теллуридов достигают размера 4 см. Очень редко на сетках кварца развиты единичные мелкие агрегаты мелкокристаллического халькопирита.

Концентрации главных рудных компонентов: в самой обогащенной части рудопроявления –

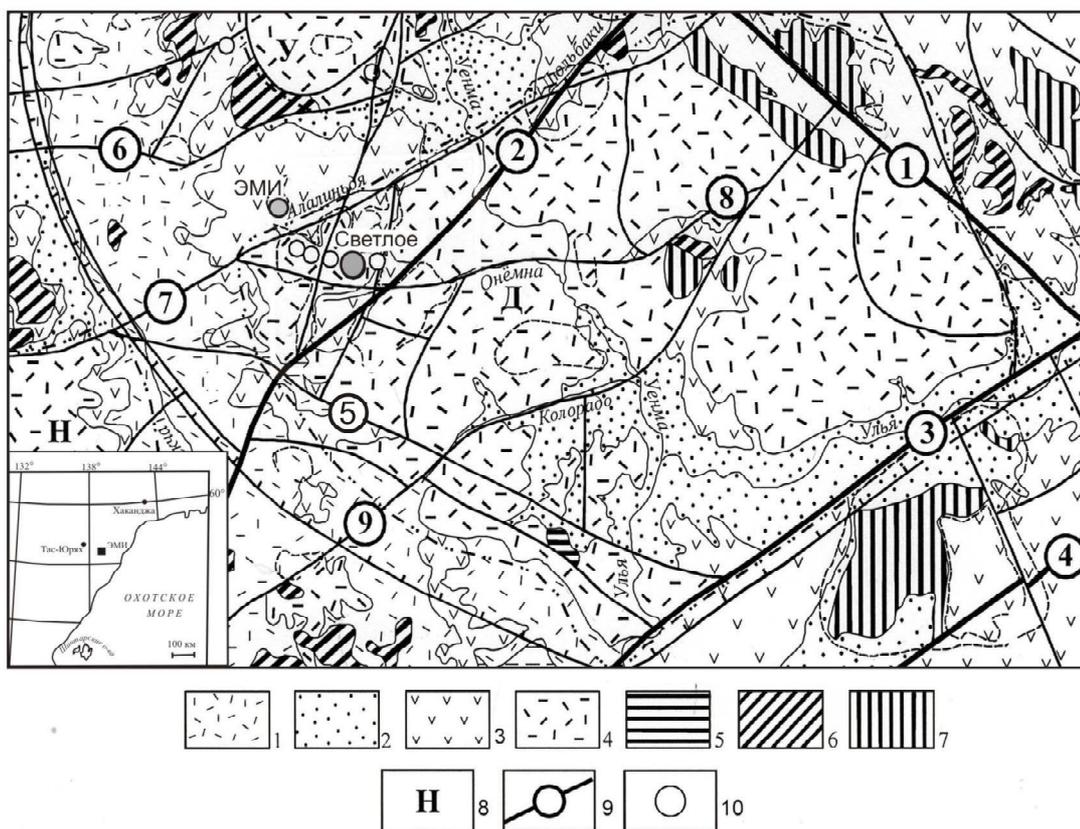


Рис. 1. Тектоническая схема Дюльбакинской вулкано-тектонической структуры оседания (по: А. Г. Колесникову, 2002 г.): 1 – раннемеловые лавы, туфы риолитов магейской свиты; 2 – ранне-позднемеловые лавы риолитов, дацитов, андезитов, туфы, туфопесчаники, туфоалевролиты амкинской свиты; 3 – 4 – поздне-меловые лавы андезитов, риолитов, дацитов, туфы: 3 – хетанинской и 4 – уракской свит; 5 – 7 – поздне-меловые субвулканические штоки, дайки: 5 – хакаринского базальтового, 6 – уракского дацит-риолитового, 7 – хетанинского андезибазальто-андезитового комплексов; 8 – вулкано-тектонические структуры: Н – Нудымийская, У – Уснминская, Д – Дюльбакинская; 9 – основные швы региональных разломов: 1 – Мати-Уснминского, 2 – Дюльбакинского, 3 – Ульинского, 4 – Право-Ульинского, 5 – Центрального, 6 – Майокского, 7 – Алалиньдинского, 8 – Онемнинского, 9 – Колорадского; 10 – золоторудные объекты

Fig. 1. Tectonic scheme of the Dyulbakinsky volcano-tectonic subsidence structure (after A. Г. Колесников, 2002): 1 – Early Cretaceous lavas, tufts of the Magey Suite rhyolites; 2 – Early to Late Cretaceous lavas of rhyolites, dacites, andesites, tufts, tuffaceous sandstones, tuffaceous aleurolites of the Amkinsky Suite; 3–4 – Late Cretaceous lavas of andezites, rhyolites, dacites, tufts: 3 – of the Khetaninsky and 4 – of the Urakasky suites; 5–7 – Late Cretaceous subvolcanic bunches, dykes: 5 – of the Khakarinsky basalt, 6 – of the Uraksky dacite-rhyolite, 7 – of the Khetaninsky andesibasalt-andesite complexes; 8 – volcano-tectonic structures: Н – Nudymiisky, У – Usnminsky, Д – Dyulbakinsky; 9 – basic sutures of regional faults: 1 – Mati-Usnminsky, 2 – Dyulbakinsky, 3 – Ulyinsky, 4 – Pravo-Ulyinsky, 5 – Central, 6 – Mayoksky, 7 – Alalin'dinsky, 8 – Onemninsky, 9 – Colorado, 10 – gold ore objects

Au – 194,03, Ag – 96,37, Te – 0,583 г/т. Содержания элементов-спутников, %: Sb – 0,0279–0,262, Bi – 0,0129–0,357, Se – 0,00272–0,0362, Hg – 0,00112–0,0441, Cu – 0,0118–0,0844, As – 0,0058–0,0259, Sn – 0,00159.

Теллуровая минерализация на рудопроявлении Эми наблюдалась также в делювильных развалах монокварцитов и на правом берегу Алалиньди.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Диагностика минерального состава теллуридно-висмутовой минерализации выполнена под микроскопом «Аxioplan imagin» с применением микрозондового анализатора «Camebax SX50». Качественный анализ выполнен на микрозондовой приставке к микроскопу «CameScan» с блоком «Quantax». Тер-

модинамические параметры рудообразования определены по кварцу методом гомогенизации первичных и мнимо вторичных флюидных включений. Изучение включений минералообразующих сред проводили в полированных пластинках и монокристаллах по кварцу. Термометрические исследования были проведены методом гомогенизации в высокотемпературной термокамере (погрешность $\pm 50^\circ\text{C}$), позволяющей использовать высокократные объективы и проводить замеры в условиях минимального теплообмена с окружающей средой. Замеры делали главным образом по первичным и мнимо вторичным включениям. Установка отградуирована по точкам плавления хлорида железа III гексагидрата, хлорида олова II дигидрата, тетраказана, калия двуххромовокислого, серы, винной кислоты, олова, кадмия, цинка и др.

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РУДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Теллуриды висмута как по степени распространенности, так и по видовому разнообразию, несомненно, преобладают в рудах проявления Эми. Нередко количество их в кварце достигает 70%. Агрегат существенно теллуридно-висмутового состава представляет собой сростки самородного теллура и селенсодержащего теллуrowисмутита, окаймленных теллурантимонитом с редкими отдельными включениями Au-Ag теллурида сильванита, теллуристой блеклой руды – голдфилдита, тетраэдрита, халькопирита. В кварце встречаются единичные кристаллы и сростки кристаллов касситерита. Гипергенные минералы представлены большим количеством окиси Те, горчичным золотом, ковеллином, борнитом, малахитом.

Среди теллуридов висмута в свою очередь определяющим является теллуrowисмутит, представленный селенистой и сурьмянистой разновидностями, в ассоциации с которыми иногда встречаются селенистый тетрамит и еще более редкие сильванит, голдфилдит, серебросодержащий клаусталит и колорадоит. Несмотря на единичные находки теллуридов Au и Hg, последние, наряду с селеном и сурьмой, имеют важное индикаторное значение, свидетельствуя о меняющейся физико-химической обстановке в процессе рудоотложения. Наличие касситерита в ассоциации с теллуридами висмута также подтверждает это предположение (Heald et al., 1987). Минеральный состав руд по степени распространенности приведен в табл. 1.

образования. Кварц II – шестоватый, развит среди пористых трещиноватых и катаклазированных вторичных кварцитов, нередко раздробленных и сцементированных кварцем II. Последний слагает гнезда и прожилки мощностью 2–3, иногда до 8–10 мм, секущих кварц I, размер гнезд 5–10, до 15 см. Структура кварца идиоморфная, мелко-среднекристаллическая. Размер кристаллов в поперечнике 0,5–2,0 мм, а по удлинению – до 5 мм. Кварц II также обрастает стенки небольших друзовых пустот, где характеризуется белым и светло-серым цветом и прозрачностью.

Кварц II, наряду с флюидными включениями, содержит включения идиоморфных кристалликов теллуридов и касситерита (рис. 2, а–з). По кварцу, как по одному из индикаторов условий рудообразования, нами были определены температуры гомогенизации первичных и мнимо вторичных флюидных включений.

Генетически включения были подразделены на первичные, первично-вторичные и вторичные. По характеру заполнения вакуолей установлен однофазный и двухфазный типы. Большая часть включений двухфазные газожидкие ($J > G$), содержащие жидкости 90–70%, газа – 10–30%. Размеры вакуолей колеблются от 4 до 29 мкм. Преобладают плоские полуограненные включения с округлыми очертаниями, реже встречаются удлиненные и изометричные с овальными и угловатыми очертаниями, еще реже – идиоморфные (рис. 3). Наблюдалась гомогенизация I типа по схеме Н. П. Ермакова (1979) – в жидкую фазу, которая характеризует гидротермальное минералообразование с относительно плавным изменением соотношений фаз во включениях при нагревании. Гомогенизация сингенетических включений

Таблица 1. Минеральный состав руд участка Эми по степени распространенности

Table 1. Mineral composition of the Emy site ores by occurrence

Группа минералов	Главные	Второстепенные	Редкие
Жильные	Кварц	Каолинит Серицит	Карбонат
Рудные	Теллуrowисмутит Селенистый теллуrowисмутит Стибиотеллуrowисмутит	Колорадоит Голдфилдит* Сильванит Касситерит Халькопирит Пирротин	Рутил Самородный теллур Кюстелит* Клаусталит Электрум* Акантит Пирит Борнит
Гипергенные	Теллурит* Горчичное золото Валентинит	Лимонит Хлораргирит	Халькозин Теллурит Fe

* По данным Н. М. Alderton, F. C. Brameld (2007).

ХАРАКТЕРИСТИКА ГЛАВНЫХ МИНЕРАЛОВ

В текстурном отношении наиболее распространенными являются вкрапленный и прожилково-вкрапленный типы минерализации. Минералы теллура заполняют интерстиции кварца I, слагающего вторичные кварциты – «vuggy» кварц, и образуют в них стяжения и гнезда, а в тещинах – тонкопрожилковые

происходила в интервале 315–370°C, для эпигенетических – 240–270°C (Колесников и др., 2007). Замеры температур гомогенизации первичных включений сведены в гистограмму, где хорошо выделяются два температурных интервала (рис. 4). Наши данные оказались вполне сопоставимы с результатами, полученными по этому же объекту позднее (Alderton, Brameld, 2007).

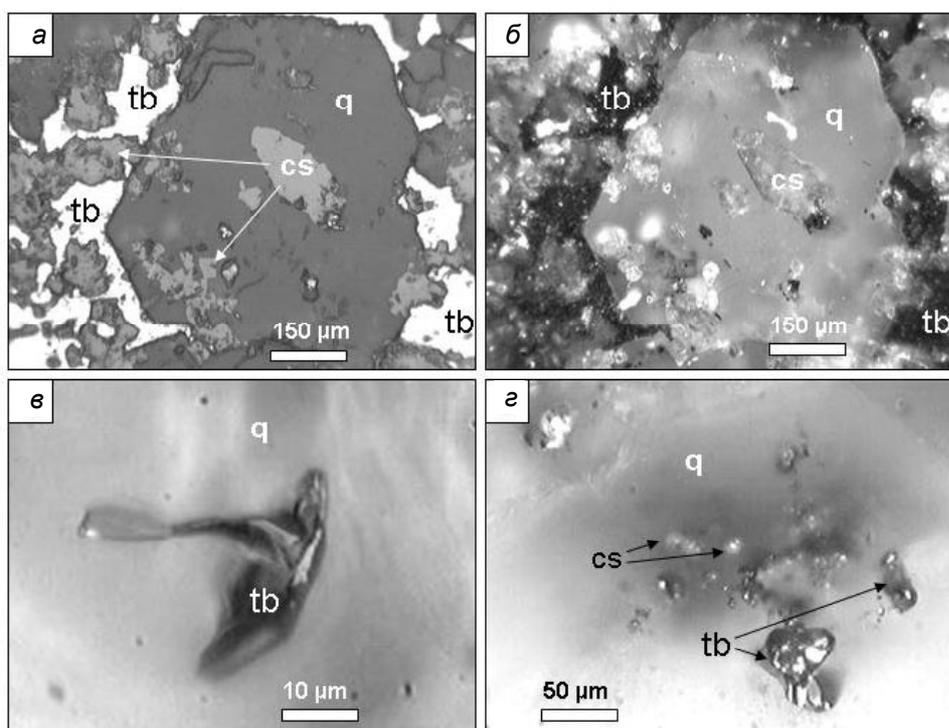


Рис. 2. Минеральные включения в кварце: а, б – включения касситерита (cs) в идиоморфном кристалле кварца (а – без анализатора, б – с анализатором); в – причудливое включение теллуровисмутита (tb); г – сингенетические (?) включения касситерита и теллуровисмутита в кварце

Fig. 2. Mineral enclaves in quartz: а, б – cassiterite (cs) enclaves in an idiomorphic quartz crystal (а – no analyzer, б – with analyzer); в – odd tellurobismuthite (tb) enclave; г – syngenetic enclaves of cassiterite and tellurobismuthite in quartz

По усредненным данным В. И. Гончарова (1983), для вулканогенно-плутоногенных месторождений Северо-Восточного региона России характерна концентрация растворов 300 г/л с преобладающими ком-

понентами $\frac{Cl^- - Na^+}{CO_2}$ жидкой фазы во включениях;

при этом оптимальные давления составляют порядка 1000 атм ($1000 \cdot 10^5$ Па).

Касситерит – диагностирован оптически по морфологии кристаллов, типичным коленчатым двойникам и зональной светло-коричневой окраске. Он выявлен в высокотемпературной генерации кварца (315–370°C), где образует включения идиоморфных удлиненно-призматических светло-окрашенных кристаллов (размером до 0,2 мм по удлинению), нередко непосредственно в идиоморфном шестоватом кварце, а также образует агрегаты касситерит-теллуровисмутитового состава во вторичном кварците (см. рис. 2, а, б).

Теллуровисмутит Bi_2Te_3 и *Sb-теллуровисмутит* $(Bi, Sb)_2Te_3$ наиболее распространенные рудные минералы, они слагают крупные гнезда до 1,5 см в поперечнике с отчетливо выраженной полигонально-зернистой

структурой, а также заполняют интерстиции и трещины в кварце, образуя прожилково-вкрапленную текстуру. Размер вкрапленников 0,5–2,0 мм. Обладая четко проявленной тенденцией к идиоморфизму, эти теллуровисмутиты образуют таблитчатые кристаллы с ясно выраженной спайностью и линейными ограничениями. Отмечается частое развитие ступенчатых трещин. Характерной особенностью рудной минерализации являются многочисленные и закономерные сростания теллуровисмутита со Sb-теллуровисмутитом, причем последний развивается, как правило, по периферии выделений минерала, образуя оторочки (рис. 5, а–е).

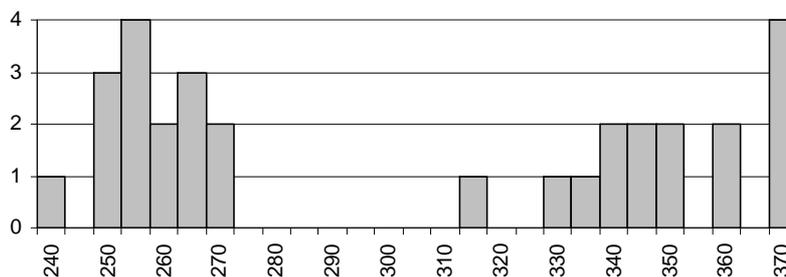


Рис. 3. Двумодальное распределение температур гомогенизации газово-жидких включений в кварце из руд месторождения Эми: по оси абсцисс – температура гомогенизации, Т°С; по оси ординат – частота встречаемости, %

Fig. 3. Bimodal distribution of homogenization temperatures of gas-fluid enclaves in quartz from the Emy Deposit ores: abscissa – homogenization temperature, Т°С; ordinate – occurrence frequency, %

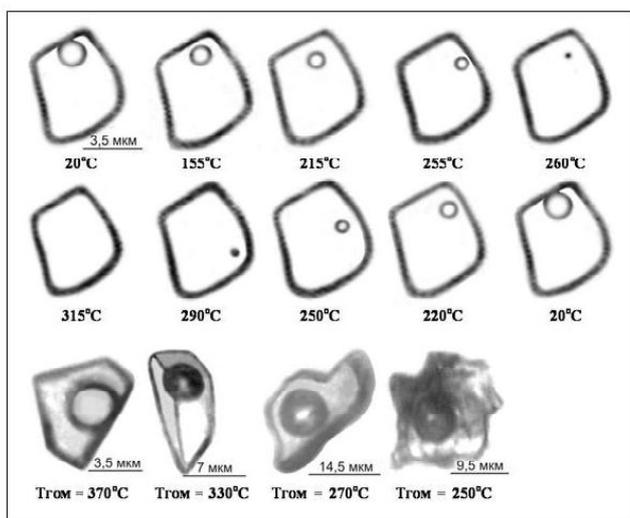


Рис. 4. Двухфазные первичные газожидкие включения: первый и второй ряды – гомогенизация флюидного включения в жидкую фазу с относительно плавным изменением соотношений фаз во включении при нагревании; третий ряд – плоские полуоугольные включения с округлыми очертаниями и изометричные с овальными и угловатыми очертаниями

Fig. 4. Biphase primary gas-fluid inclusions: first and second rows – homogenization of the fluid inclusion in the liquid phase with the relatively smooth alteration of the phase ratio in the inclusion being heated; third row – flat semi-faceted inclusions with rounded contours and isometric ones with oval and angular contours

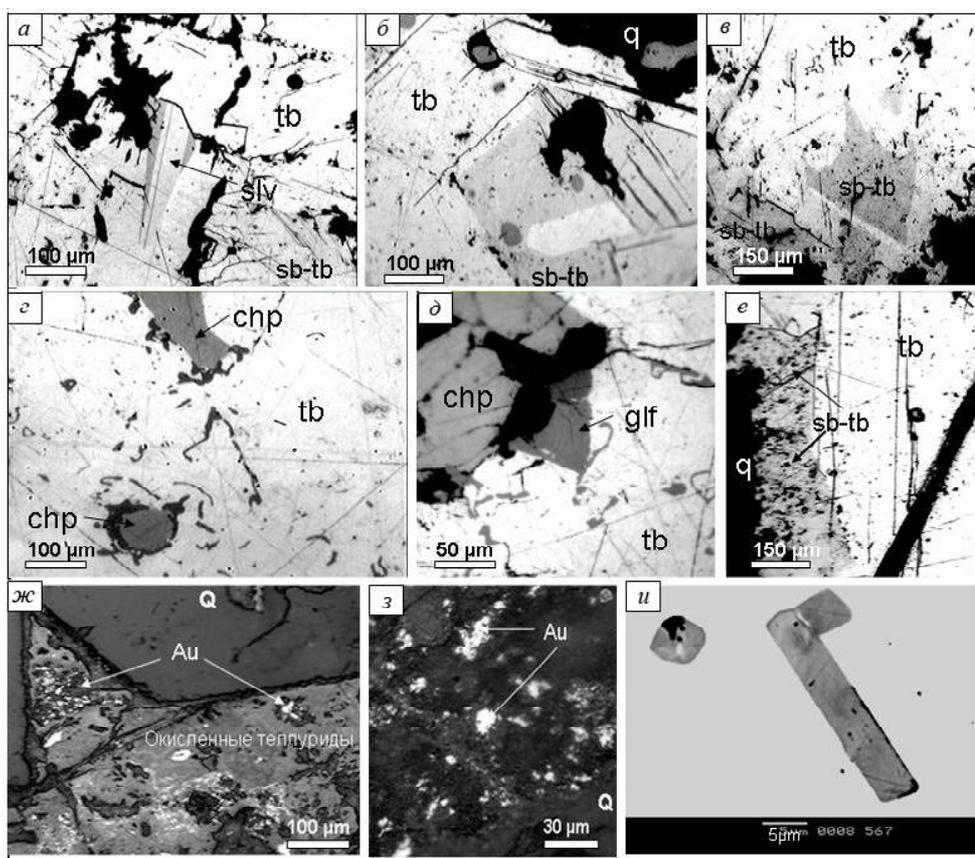


Рис. 5. Срастания рудных минералов: а – включения силванита (slv) (типичные полисинтетические двойники) в теллуовисмутите (tb), стибителлуовисмутите (sb-tb); б, в – срастание теллуовисмутита (tb) со стибителлуовисмутитом (sb-tb), имеющим более низкое отражение; г, д – включения халькопирита (chp) и голдфилдита (glf) в теллуовисмутите (tb); е – кайма стибителлуовисмутита (sb-tb) на теллуовисмутите (tb); ж, з – включения горчичного золота в окисленных минералах теллура; и – микровключения фазы BiSbTe_3 в колорадоите, продольное и поперечное сечения (фото в обратнорассеянных электронах)

Fig. 5. Ore mineral intergrowths: a – silvanite (slv) enclave (typical polysynthetic twins) in tellurobismuthite (tb), stibiotellurobismuthite (sb-tb); б, в – tellurobismuthite (tb) intergrowth with stibiotellurobismuthite (sb-tb) of lower reflection; г, д – chalcopyrite (chp) and goldfieldite (glf) inclusions in tellurobismuthite (tb); е – stibiotellurobismuthite (sb-tb) rim on tellurobismuthite (tb); ж, з – enclaves of mustard gold in oxidized tellurium minerals; и – microenclaves of the BiSbTe_3 phase in coloradoite, cross- and longitudinal sections (photo in back-scattered electrons)

Стибителлуовисмутит был выделен в 1941 г. (Odman, 1941) для теллуовисмутита с содержанием Sb 2,5–3,5 мас.%. Согласно наблюдениям О. Одма-

на, минерал практически не отличается по оптическим свойствам от стехиометричного теллуовисмутита. Различные колебания химического состава тел-

луровисмутита упоминаются в работах Э. М. Спиридонова, Е. Маркукса, И. Г. Магакьяна, Р. Дж. Торпа (Спиридонов, 1994; Магакьян, 1957; Marcoux, Milesi, 1993; Thorpe, Harris, 1973). Sb-теллуровисмутит, установленный на рудопроявлении Эми и содержащий сурьму в существенно больших количествах, отличается заметно пониженной отражательной способностью (см. рис. 4,е). Та же картина наблюдается на изображениях сростаний этих минералов в обратнорассеянных электронах (см. рис. 5,и).

На графике (рис. 6), представляющем тренд состава теллуровисмутита, отчетливо обособлены практически стехиометричный Bi_2Te_3 и Sb-теллуровисмутит из оторочек (см. рис. 4,е), в котором содержание сурьмы колеблется от 8–10 до 24,6 мас.%. В этом интервале находится фаза состава $BiSbTe_3$, обнаруженная в виде единичных микровключений призматической формы в колорадоите (см. рис. 4,и). По данным М. М. Стасовой и Н. Х. Абрикосова (1970), в рассматриваемом изоморфном ряду у крайних и промежуточного синтезированных членов сохраняется тригональная симметрия кристаллической решетки ($R\bar{3}m$), параметр a_0 увеличивается от 4,262 (Sb_2Te_3) – 4,33 ($BiSbTe_3$) до 4,39 Å (Bi_2Te_3), параметр c_0

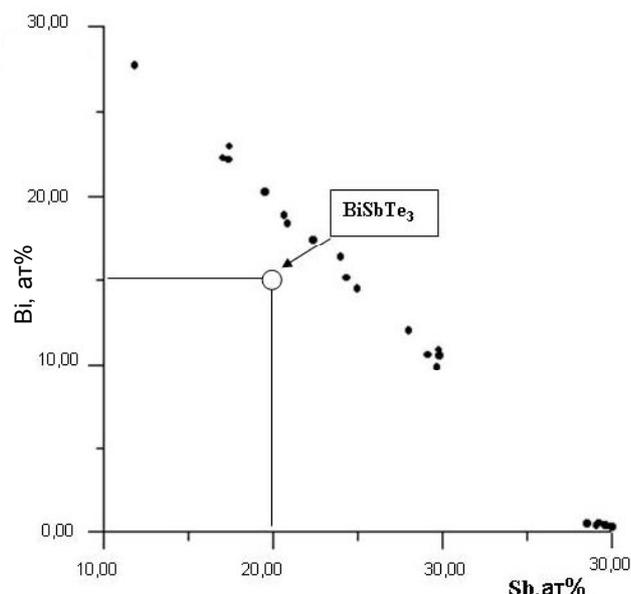


Рис. 6. Изоморфный ряд $Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3$ в рудах проявления Эми (кружком показана стабильная селенистая фаза $BiSbTe_3$)

Fig. 6. Isomorphous series $Bi_2Te_3 - Sb_2Te_3$ in the Emy occurrence (circle marks the stable selenious phase of $BiSbTe_3$)

Таблица 2. Химический состав минералов теллура

Table 2. Chemical composition of tellurium minerals

№	Концентрация элементов, мас.%									Сумма
	S	Sb	Te	Pb	Bi	Cu	Se	Au	Hg	
<i>Самородный теллур</i>										
1	0,00	0,66	98,11	0,00	0,18	0,07	0,00	0,00	0,19	99,24
2	0,00	0,73	97,93	0,00	0,09	0,13	0,11	0,00	0,00	98,99
3	0,00	0,74	99,68	0,10	0,00	0,00	0,03	0,06	0,00	100,60
<i>Колорадоит</i>										
1	0,0	0,35	38,98	0,04	0,00	0,03	0,00	0,02	61,30	100,84
2	0,0	0,28	39,53	0,00	0,16	0,14	0,00	0,00	59,60	99,79
3	0,0	0,27	38,94	0,00	0,00	0,02	0,00	0,09	59,02	98,38
4	0,0	0,26	39,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	59,78	99,66
<i>Сильванит</i>										
	S	Sb	Te	Pb	Bi	Ag	Se	Au	Hg	Сумма
1	0,0	0,3	63,2	0,0	0,2	10,3	0,00	26,4	0,1	100,5
2	0,0	0,1	64,1	0,0	0,1	8,1	0,00	26,3	0,1	98,7
3	0,0	0,3	64,5	0,0	0,1	11,3	0,00	23,5	0,0	99,7
<i>Селенистый теллуровисмутит</i>										
	S	Sb	Te	Bi	Se	Au	Сумма			
1	0,0	0,3	44,8	51,9	1,5	0,2	99,0			
2	0,0	0,3	45,4	52,4	1,6	0,3	100,3			
3	0,0	0,0	40,7	56,0	3,4	0,0	100,1			
4	0,0	0,0	42,5	54,5	2,9	0,0	99,9			
<i>Селенистый стибителлуровисмутит</i>										
	Sb	Te	Pb	Bi	Se	Hg	S	Сумма		
1	8,7	47,1	0,2	41,3	1,8	0,0	0,0	99,3		
2	8,5	49,1	0,1	41,3	0,7	0,2	0,0	99,9		
3	11,9	48,4	0,3	35,5	2,5	0,0	0,0	98,7		
4	13,7	49,0	0,3	34,8	1,8	0,5	0,0	100,5		
5	9,8	49,5	0,3	39,5	1,0	0,0	0,0	100,2		
6	18,7	49,9	0,0	29,1	2,2	0,0	0,0	99,9		
7	18,6	49,0	0,0	30,1	2,0	0,0	0,0	99,7		

Примечание. «Самебах», аналитик И. А. Брызгалов, МГУ. Режим проведения анализов, аналитические линии и эталоны: $CuKa - CuFeS$ (34,5 – Cu; 30,5 – Fe; 34,5 – S); $FeKa - FeS_2$ (46,55 – Fe); $PbMa - PbS$ (86,6 – Pb); $SbLa - Sb_2S_3$ (71,38 – Sb); $SeKa - PbSe$ (27,6 – Se); $TeLa - Bi_2Te_3$ (52,2 – Bi; 47,8 – Te); $HgLa - HgS$ (Hg – 86,2; S – 13,8); $AgLa -$ эталоны – сплавы различного состава.

также увеличивается, но менее заметно – от 30,45 (Sb_2Te_3) до 30,60 Å (Bi_2Te_3).

Набор элементов-примесей в теллуровисмутите несколько необычен: помимо типичного для него Pb (0,1–0,3 мас.%) в большинстве анализов минерала, кроме отмеченной выше Sb, установлены Au (до 0,4 мас.%), Hg (до 3,0 мас.%) и Se (0,7–2,4 мас.%) (табл. 2).

Химический состав самородного теллура и колорадоита в целом близок к стехиометрии, можно отметить в обоих минералах постоянную примесь сурьмы 0,3–0,6 мас.% – в колорадоите и 0,6–0,8 мас.% – в теллуре.

Соотношения теллуровисмутита с остальными рудными минералами однообразны. Превосходство теллуровисмутита над остальными минералами в количественном отношении, с одной стороны, и дефицит свободного пространства в процессе рудоотложения, с другой, привели к тому, что пустоты в пористых кварцитах, так же как и интерстиции в кристаллическом кварце, оказались выполненными в основном теллуровисмутитом. Остальные минералы наблюдаются в нем преимущественно в виде разобленных микровключений округлой формы (*халькопирит*, *пирротин*) либо в виде мелких ксеноморфных выделений по периферии его зерен (*колорадоит*, *сильванит*, *голдфилдит*) (см. рис. 5,а–е).

Колорадоит HgTe – образует характерные червеобразные выделения – ламели (см. рис. 5,з–д). Минерал изотропен, имеет низкое отражение, коричневатый оттенок. Размеры выделений до 0,15 мм. Не исключено, что он отлагается в теллуровисмутите как продукт распада твердого раствора.

Сильванит $\text{Au}(\text{Ag}_{1-x}\text{Au}_x)\text{Te}_4$ – образует зерна неправильной формы, цвет желтовато-кремовый, обладает сильным двуотражением и характерным полисинтетическим двойникованием (см. рис. 5,а), которое хорошо заметно без анализатора. Сильванит сростается с теллуровисмутитом и стибиотеллуrowисмутитом. Размеры пластинчатых выделений – 0,2–0,5 мм по удлинению.

Голдфилдит $\text{Cu}_{10}\text{Cu}_2(\text{Te}, \text{Sb}, \text{As}, \text{Bi})_4(\text{S}, \text{Se})_{13}$ – диагностирован Н. М. Alderton, F. C. Brameld (2007). Минерал образует тетраэдрические кристаллы размером не более 0,2 мм, низкоотражающий, изотропный, имеет зеленовато-голубой оттенок. Сростается с теллуровисмутитом (см. рис. 5,д).

Самородный теллур – образует ксеноморфные выделения в ассоциации с окисленным сильванитом. Отражение высокое, анизотропия и двуотражения хорошо заметны. Содержит примесь Sb до 76 мас.%. Размеры обособлений – 0,2–0,3 мм.

Халькопирит, *борнит*, *сфалерит*, *галенит* встречаются значительно реже, чем теллуриды висмута, и являются более ранними по отношению к ним, т. к. катаклазированы, залечены по трещинам теллуrowисмутитом и корродированы поздним высокотемпературным кварцем. Размеры выделений – до 1,5 мм. В теллуrowисмутите предположительно встречен халькопирит второй генерации, представленный идиоморфными выделениями с округленными очер-

таниями кристаллов размером 0,05–0,2 мм (см. рис. 5,б,г,д).

Самородное золото – встречается исключительно редко. Оно имеет низкое отражение, характерное для электрума с пробностью 600–650‰, приурочено к пустоткам в раннем низкотемпературном кварце и не обнаруживает сростаний с другими минералами. Размер выделений не более 20 мкм. По данным Х. М. Альдертона, Ф. С. Брамельда (Alderton, Brameld, 2007), самородное золото постоянно содержит примеси Te и Bi.

Пространственное совмещение сближенных по времени минеральных ассоциаций осложняет реконструкцию последовательности процесса минералообразования. Можно предположить, что рудоотложение началось с сульфидов железа и меди, поскольку халькопирит и сфалерит (предположительно, минералы раннего этапа) в отдельных случаях обнаруживают значительный катаклаз, но в большинстве случаев наблюдаются в виде изолированных микровключений в теллуrowисмутите при отсутствии обратных соотношений между минералами. Сульфиды, отложившиеся в незначительном количестве, сменились рудообразующими теллуридами, в составе которых постоянно фиксируются селен (до 2,5 мас.%) и сурьма, содержание которой в теллуrowисмутите к концу процесса увеличивается до 24,6 мас.%. Локально селен отлагается в виде микровключений серебросодержащего *клаусталита* PbSe (до 3,3 мас.% Ag) в теллуrowисмутите. В заключительную фазу минералообразования повышается активность ртути, которая до этого нередко фиксировалась в качестве элемента-примеси в теллуrowисмутите (до 3,0 мас.%) и самородном теллуре (до 0,3 мас.%) (см. табл. 2). В результате образуется колорадоит, содержащий иногда микровключения Sb-теллуrowисмутита (см. рис. 5,и).

Отметим, что, несмотря на достаточно высокие содержания в рудном теле золота и серебра (Au – от 12,8 до 451,0 г/т и Ag – до 275 г/т), в первичных рудах были обнаружены единичные выделения самородной минеральной формы. Из минералов-носителей Au и Ag наблюдались лишь единичные выделения акантита, сильванита и Ag-содержащего клаусталита (Ag до 3,3 мас.%).

Колорадоит: HgTe

- 1 – $(\text{Te}_{0,994} \text{Sb}_{0,008} \text{Ag}_{0,003})_{1,005} \text{Hg}_{0,992}$
- 2 – $(\text{Te}_{1,011} \text{Sb}_{0,007} \text{Ag}_{0,003})_{1,021} \text{Hg}_{0,969}$
- 3 – $(\text{Te}_{1,013} \text{Sb}_{0,007} \text{Ag}_{0,002})_{1,022} \text{Hg}_{0,978}$
- 4 – $(\text{Te}_{1,013} \text{Sb}_{0,007} \text{Ag}_{0,002})_{1,024} \text{Hg}_{0,976}$

Сильванит: AuAgTe_4

- 1 – $\text{Au}_{1,11} \text{Ag}_{0,79} \text{Te}_{4,09} \text{Sb}_{0,02}$
- 2 – $\text{Au}_{1,10} \text{Ag}_{0,63} \text{Te}_{4,23} \text{Sb}_{0,01}$
- 3 – $\text{Au}_{0,85} \text{Ag}_{0,84} \text{Te}_{4,14} \text{Sb}_{0,02}$

Селенистый теллуrowисмутит: $\text{Bi}_2(\text{Te}, \text{Se})_3$

- 1 – $\text{Bi}_{2,004}(\text{Te}, \text{Se})_{2,996}$
- 2 – $\text{Bi}_{2,000}(\text{Te}, \text{Se})_{3,000}$
- 3 – $\text{Bi}_{2,128}(\text{Te}, \text{Se})_{2,872}$
- 4 – $\text{Bi}_{2,071}(\text{Te}, \text{Se})_{2,929}$

Селенистый стибитотеллуровисмутит: $(\text{Sb}, \text{Bi})_2(\text{Te}, \text{Se})_3$

1	–	(Sb _{0,542} Bi _{1,488}) _{2,030}	(Se _{0,175} Te _{2,795}) _{2,970}
2	–	(Sb _{0,526} Bi _{1,490}) _{2,016}	(Se _{0,050} Te _{2,934}) _{2,984}
3	–	(Sb _{0,721} Bi _{1,248}) _{1,969}	(Se _{0,228} Te _{2,803}) _{3,031}
4	–	(Sb _{0,814} Bi _{1,201}) _{2,015}	(Se _{0,160} Te _{2,825}) _{2,985}
5	–	(Sb _{0,599} Bi _{1,411}) _{2,010}	(Se _{0,092} Te _{2,898}) _{2,990}
6	–	(Sb _{1,081} Bi _{0,977}) _{2,058}	(Se _{0,195} Te _{2,747}) _{2,942}
7	–	(Sb _{1,084} Bi _{0,975}) _{2,059}	(Se _{0,178} Te _{2,763}) _{2,941}

Зона окисления рудопроявления Эми не отличается разнообразием минеральных видов (см. табл. 1) и представляет интерес в связи с наличием в ней заметных количеств *горчичного золота* (см. рис. 5, ж, з), которое, вероятно, является продуктом собирательной перекристаллизации тонкодисперсного Au при разложении минерала-хозяина, подобно тому, как это происходит при окислении пирита в отвалах колчеданных месторождений. В составе горчичного золота установлены также серебро в количестве 4,08–5,88 мас.% и примесь Te – до 2,12 мас.%. Теллуровисмутит и Sb-теллуровисмутит, содержащие включения силванита, частично преобразованы в землистые агрегаты, в которых качественно определены Fe, Te, Au, и к которым нередко присоединяются Ag, Sb, Bi (аналитик Е. М. Горячева, прибор «Camscan», СВКНИИ ДВО РАН).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Детальное минералогическое исследование и геологическая позиция участка Эми позволяют говорить о двухэтапном (двухстадийном) формировании руд и широком развитии гипергенных процессов. В первую очередь на это указывает дву模альное распределение температур гомогенизации – два кварца – низко- и высокотемпературный (см. рис. 3). Наличие ртутистых, сурьмянистых и селенистых теллуридов указывает на поздние дифференциаты Hg, Sb, Se в рудообразующей системе. Об этом свидетельствуют каймы селенистого и высокосурьмянистого теллуровисмутита, образовавшиеся на безсурьмянистой рудности.

Рудопроявление находится на фланге золото-серебряного месторождения Светлое, относящегося к типу «high sulfidation» (Мишин, 2011). Для этого типа характерна удаленная генетическая связь с медно-порфиоровыми интрузиями и при значительных масштабах минерализации – относительно низкие концентрации золота и серебра. В минералогическом плане это может проявляться в повышенном содержании медных минералов. Так что ранний этап рудопроявления Эми вполне соответствует этой характеристике – чаще других сульфидов отмечаются халькопирит (Cu Fe S_2) и борнит ($\text{Cu}_3 \text{Fe S}_4$), а также типичные для вулканогенного оруденения минералы – Sb, Hg, Se. Поздняя оловоносная интрузия свойственна этой металлогенической зоне в Охотско-Чукотском вулканогенном поясе не только на Светлом, но и в Прикарамкенье (Савва и др., 2009). Повышение температуры, привнос олова, висмута и теллура и

частичное перераспределение вещества раннего этапа могут выражаться в образовании экзотических минеральных фаз.

Очевидно, что ранняя стадия отложения минералов, образовавшихся в вулканогенный этап минерализации, была более низкотемпературной. Она сопровождалась отложением тонких (10–50 мкм) сульфидов в пустотах и интерстициях кварца I. Затем произошел разогрев системы за счет пострудного внедрения оловоносной гранитоидной интрузии, не вскрытой на поверхности, с отложением высокотемпературного кварца совместно с касситеритом и теллуридной минерализацией. Все это позволяет говорить о том, что оруденение генетически связано с вулcano-плутонической системой. Это подтверждается также многочисленными включениями мелкозернистого касситерита и мелких кристалликов теллуровисмутита с идиоморфной огранкой в позднем шестоватом кварце друзовых пустот. Висмут, по мнению некоторых исследователей (Минцер, 1969; Савва, 2006; Горячев, Гамянин, 2010), относится к гранитогенным элементам и его привнос в данном случае однозначно связан с оловоносной интрузией.

Обильную теллуридную минерализацию, подобную описанной на Эми и в таких же кварцитах, мы наблюдали в Охотско-Чукотском вулканогенном поясе (Савва, Шаповалов, 1974) на рудопроявлении кл. Флюоритового (Тенькинский район). Формирование этого рудопроявления, локализованного во вторичных кварцитах в экзоконтакте гранитоидной интрузии, протекало в сложном температурном режиме, и главная его особенность – резкое повышение температур минералообразования в стадию отложения теллуридно-висмутовой минерализации с преобладанием в рудах теллуровисмутита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Генетическими особенностями золото-теллуридно-висмутовой минерализации на рудопроявлении Эми следует считать ее локализацию в надьнтрузивной зоне и двухэтапность формирования. В ранний эпitherмальный этап – образование вмещающих оруденение золотоносных вторичных кварцитов («vuggy» кварц) в условиях кислотно-сульфатного метасоматоза при температурах 270–240°C, с медной специализацией руд (связь с медно-порфиоровой системой), с относительно низкими концентрациями золота и серебра, с сопутствующими вулканогенному оруденению Sb, Hg, Se. В поздний этап – разогрев системы до температуры 370–315°C в связи с внедрением оловоносной интрузии, формирование жил и гнезд гребенчатого и шестоватого кварца, привнос олова, висмута, теллура, ассимиляция золота и серебра, возгон Sb, Hg, Se с образованием сурьмянистых, ртутистых и селенистых фаз в группе минералов теллура и висмута.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты: № 12-05-00443-а; 11-05-00007-а; 11-05-00504-а; ДВО РАН–12-II-0-08-28).

ЛИТЕРАТУРА

Безмертная М. С., Логинова Л. А., Соболева Л. Н. Определение теллуридов под микроскопом. – М. : Наука, 1969. – 175 с.

Гончаров В. И. Гидротермальное рудообразование в краевых вулканогенных поясах. – М. : Наука, 1983. – 215 с.

Горячев Н. А., Гамянин Г. Н. Висмут в орогенных золоторудных месторождениях Северо-Востока Азии // Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований : материалы Всерос. конф. (с междунар. участием) памяти Н. В. Петровской (1910–1991 гг.). – М. : ИГЕМ РАН, 2010. – Т. 1. – С. 159–161.

Ермаков Н. П., Долгов Ю. А. Термобарогеохимия. – М. : Недра, 1979. – 272 с.

Колесников А. Г., Брызгалов И. А., Рассказова Т. Л., Савва Н. Е. К условиям формирования редкометалльного рудопроявления Эми (Ульинская структурно-металлогеническая зона) // Чтения памяти академика К. В. Симакова : тез докл. Всерос. науч. конф. (Магадан, 27–29 нояб. 2007 г.). – Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 2007. – С. 90–91.

Магакьян И. Г. Сурьмянистый теллурувисмутит Зодского золоторудного месторождения // Зап. ВМО. – 1957. – Т. 81, № 3. – С. 343–346.

Мицнер Э. Ф. Геохимические особенности поведения висмута в гипогенных процессах // Форма нахождения и особенности распределения висмута в гидротермальных месторождениях. – М. : Наука, 1969. – С. 6–52.

Мишин Л. Ф. Вторичные кварциты и их связь с золоторудной минерализацией месторождения Светлое (Ульинский прогиб, Охотско-Чукотский вулканогенный пояс) // Тихоокеан. геология. – 2011. – Т. 39, № 4. – С. 32–48.

Савва Н. Е., Шаповалов В. С. К минералогии и температурным условиям образования Au-редкометалль-

ного месторождения кл. Флюоритового // Тр. ВНИИ-1. – 1974. – Т. 34. – С. 34–42.

Савва Н. Е. Золото-редкометалльная формация Северо-Востока России, источники вещества // Рудогенез и металлогения Востока Азии : материалы конф. к 100-летию Б. Л. Флерова (Якутск, 21–23 марта, 2006 г.). – Якутск : ЯГУ, 2006. – С. 157–159.

Савва Н. Е., Брызгалов И. А., Тюкова Е. Э. Оловопорфировая формация Прикарамкенья (геолого-структурные и минералогические особенности) // Вестник СВНЦ ДВО РАН. – 2009. – № 4. – С. 2–17

Спиридонов Э. М. Условия образования мышьяковистого теллуритимонита в вулканогенных гидротермальных месторождениях золота // Вестник Москов. ун-та. Сер. 4. Геология. – 1994. – № 4. – С. 73–78.

Стасова М. М., Абрикосов Н. Х. Экспериментальные исследования системы Sb-Te-Bi // Изв. АН СССР. Неорган. материалы. – 1970. – Т. 6, № 6. – С. 1090–1094.

Alderton H. M., Brameld F. C. Telluride mineralization at the Svetloye gold prospect, Khabarovsk Krai, eastern Russia // Conference on tellurides in Izmir. – Turkey, 2007. – P. 304–309.

Heald P., Foley N. K., Hayba D. O. Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid-sulphate and adularia-sericite types // Econ. Geol. – 1987. – Vol. 82. – P. 1–26.

Maroux E., Milesi J.-P. Noteworthy mineralogy of the Au-Ag-Sn-W(Bi) epithermal ore deposit of Cirotan, west Java, Indonesia // Canad. Mineral. – 1993. – Vol. 31. – P. 727–744.

Odman O. Geology and ores of the Boliden-deposit, Sweden // Sver. geol. undersokn, Arsbok. – 1941. – Vol. 35.

Thorpe R. J., Harris D. C. Mattagamite and tellurantimony, two new telluride minerals from Mattagami area, Quebec // Canad. Mineral. – 1973. – Vol. 12, No. 1. – P. 55–60.

Поступила в редакцию 13.03.2013 г.

GENETIC PECULIARITIES OF THE GOLD-TELLURIUM-BISMUTH MINERALIZATION AT THE EMY ORE OCCURRENCE (Khabarovsk Kray, Russia)

N. E. Savva, I. A. Bryzgalov, A. G. Kolesnikov, T. L. Rasskazova

Tellurium-bismuth mineralization at the Emy ore occurrence, located on the northwestern flank of the Svetloye gold deposit (Ohotsky District), is characterized by higher selenium and lower sulfur content in ores as well as by the variety of mineral associations found to contain, along with prevailing tellurobismuthite, intermediary members of an isomorphic tellurobismutite-tellurantimony sequence and native tellurium, gold, silvanite, goldfieldite, and coloradoite associated with them. The close accretions of tellurium minerals with cassiterite available in ores should be specifically noticed. The histogram of homogenization temperatures of the quartz containing metallization has bimodal distribution in areas 240–270 and 310–370°C, which indicates the two-stage metallization formation, while Bi and Sn minerals presence imply its volcano-plutonogenic genesis.

Key words: metallization, stages, tellurobismuthite, homogenization, mineral association.