



СОСТАВ ЗОЛОТА И РТХ-УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНО-КВАРЦЕВОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ ТАРДАН-2 В БЕРЕЗИТАХ (ВОСТОЧНАЯ ТУВА)

Р. В. Кужугет¹, Н. Н. Анкушева^{2,3}, А. А. Редина⁴, И. Р. Прокопьев^{4,5},
Ю. В. Бутанаев¹, Х. Х. Ондар⁶

¹Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, Кызыл; ²Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, Миасс, Россия; ³Южно-Уральский государственный университет (филиал), Миасс, Россия; ⁴Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия; ⁵Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия; ⁶ООО «Объединенная геологическая компания», Москва, Россия

Рассмотрены минералого-геохимические особенности самородного золота, условия образования руд и генезис рудопроявления золота Тардан-2, локализованного в березитизированных плагиогранитах и гранодиоритах. Определено, что Тардан-2 относится к малосульфидной золото-кварцевой березит-лиственитовой формации, для него характерны широкие вариации пробыности золота (834–201 ‰, в среднем 607 ‰) и эволюция составов от среднепробного золота до ртутистого кюстелита. По составу продуктивной минеральной ассоциации рудопроявление отвечает золото-висмут-сульфосолюно-халькопиритовому минеральному типу с висмутовой минерализацией и минералами ряда Au – Ag – Hg. Установлено, что минеральные ассоциации продуктивной стадии рудопроявления отлагались в условиях гипабиссальной фации глубинности (0,73–0,98 кбар; 2,1–3,0 км) из хлоридных растворов Na, K и Mg с соленостью 8,7–1,7 мас. % NaCl-экв. при температурах 280–120 °С.

Ключевые слова: самородное золото, минералы ряда Au – Ag – Hg, месторождения золота, Тува, флюидные включения, условия формирования.

GOLD COMPOSITION AND PTX FORMATION CONDITIONS OF THE TARDAN-2 GOLD-SULPHIDE-QUARTZ ORE MANIFESTATION IN BERESITES (EASTERN TUVA)

R. V. Kuzhuget¹, N. N. Ankusheva^{2,3}, A. A. Redina⁴, I. R. Prokopyev^{4,5}, Yu. V. Butanayev¹,
Kh. Kh. Ondar⁶

¹Tuva Institute for the Integrated Development of Natural Resources SB RAS, Kyzyl; ²Institute of Mineralogy, SU FSC MG UB RAS, Miass, Russia; ³South Ural State University, Miass Branch, Miass, Russia; ⁴V.V.Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia; ⁵Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia; ⁶United Geological Company LLC, Moscow, Russia

We considered the mineralogical and geochemical peculiarities of native gold, the conditions of ore formation and genesis of Tardan-2 gold occurrence situated in beresitized plagiogranites and granodiorites. We identified that Tardan-2 belongs to low-sulfide gold-quartz beresite-listwänite formation type with the wide variations in the gold fineness from 834 to 201 ‰ (607 ‰, in average) and evolution of native gold composition from medium-fineness gold to mercury kustelite. According to the composition of the Au-bearing assemblages, the Tardan-2 corresponds to the gold-bismuth-sulfosalt-chalcopyrite mineral type with Bi mineralization and minerals of the Au-Ag-Hg series. We determined that the Au-bearing assemblages was formed in the hypabyssal facies environment (depth 2,1–3,0 km; P 0,73–0,98 kbar) due to Na, K and Mg chloride fluids with salinity of 8,7–1,7 wt. % NaCl equiv. and temperatures of 280–120 °C.

Keywords: native gold, Au–Ag–Hg minerals, gold fields, Tuva, fluid inclusions, formation conditions.

DOI 10.20403/2078-0575-2019-4-89-104

Тарданский рудный узел (ТРУ) расположен на юге Алтае-Саянской складчатой области в пределах Каахемской подзоны Восточно-Тувинской структурно-фациальной зоны и одноименной зоны глубинных разломов. Он приурочен к краевой северо-западной части крупного Каахемского гранитного батолита, внедрившегося в разновозрастные отложения вулканогенно-терригенно-карбонатного состава. На площади ТРУ в результате геолого-съёмочных и поисковых работ 1963–1971 гг. выявлены золоторудные объекты в гидротермально измененных скарнах (Тардан, Копто, Соруглуг-Хем, Барсучий, Правобережное) и березитах (Тардан-2), а также ряд мелких проявлений золота. Большинство известных месторождений и рудопроявлений при-

урочены к зоне контакта Копто-Байсютского габбро-диорит-плагиогранитного массива раннетаннуольского комплекса ордовика (O_1tn) с вулканогенно-карбонатными породами туматтайгинской ($R-E_1tt$) и тапсинской свит (E_1tp), где выражены ороговикование и скарнирование. Контакты массива извилистые и большим количеством выступов и заливов. ореол контактовых изменений достигает 200–300 м [10].

Нами установлено, что все продуктивные минеральные ассоциации на золото, в том числе развитые в скарново-магнетитовых образованиях (катаклазированных участках магнетитовых руд, в микротрещинах и межзерновом пространстве магнетита), на месторождениях Тардан и Барсучий имеют гидротермальный генезис и с магнетит-



скарновой формацией связаны только пространственно [4, 6].

Соответственно, золотое оруденение здесь является гидротермальным и постскарновым, т. е. в ТРУ развиты дозолоторудные образования магнетит-скарновой формации (этап I), которые сменяются малосульфидной золото-кварцевой формацией (этап II).

На раннем этапе (магнетит-скарновая формация) в связи с внедрением интрузий раннетаннуольского комплекса на контакте диоритов и карбонатных и пород позднего рифея – раннего кембрия образованы магнезиальные и известковые скарны. С понижением температуры скарнового процесса формировались магнетитовые руды, которые являются сопутствующим оруденением. Магнетитовые руды сопровождаются апоскарновыми тремолит-актинолит-хлоритовыми, магнетит-актинолит-тремолитовыми, серпентиновыми, кварц-гематитовыми метасоматитами, которые появляются на участках магнезиальных и известковых скарнов, подвергшихся дроблению [10, 21].

Собственно гидротермальный золоторудный этап сопровождается интенсивным тектоническим дроблением скарнов, магнетит-тремолитовых метасоматитов, магнетитовых руд и внедрением даек аплитов и гранит-порфиоров раннетаннуольского комплекса, с которыми связан постмагматический рудоносный гидротермальный процесс. Наложенная гидротермальная минерализация золота в скарнах и апоскарновых метасоматитах локализуется в зонах дробления скарнов вдоль контактов интрузивных пород и известняков, а также в зонах дробления в известняках. Околорудные процессы выражены в лиственизации скарнов и, в меньшей степени, березитизации гранит-порфиоров (до 20–40 см), пронизанных тонкими прожилками (реже жилами), просечками и рассеянной вкрапленностью карбонатов, кварца, сульфидов и теллуридов [10, 21]. Ранние продуктивные стадии месторождений рудного узла представлены золото-пирротин-пирит-халькопирит-кварцевыми ассоциациями, поздние – золото-висмут-теллуридными [6, 21].

Возраст плагиогранитов Копто-Байсютского массива, определенный по биотиту Ar/Ar методом, составляет $485,7 \pm 4,4$ млн лет [21], по цирконам U-Pb методом – 479 ± 2 млн лет [30]. Возраст штоков и даек гранит-порфиоров раннетаннуольского комплекса, парагенетически связанных с минерализацией золота, определенный Ar/Ar методом по биотиту составляет $484,2 \pm 4,3$ млн лет, а возраст золото-висмут-теллуридной минерализации месторождения Тардан, определенный тем же методом по серициту, – $481 \pm 6,1$ млн лет, что соответствует раннему ордовики [21]. Предполагается, что золоторудные объекты ТРУ являются производными единой рудно-магматической системы [10].

Ранее золоторудные месторождения Тардан, Копто, Соруглуг-Хем и Барсучий в скарнах были

отнесены к золото-скарновой формации, которой в ТРУ придавалось ведущее значение [5]. По этой причине кварцево-жильное и прожилковое оруденение штокверкового типа рудопроявления Тардан-2 не изучалось с точки зрения большеобъемных штокверковых месторождений.

Целью данной работы стало установление минералого-геохимических особенностей и условий формирования руд золото-сульфидно-кварцевого рудопроявления Тардан-2.

Методика исследований

Оптические исследования проведены на микроскопах Olympus BX41 и ПОЛАМ П-213М (Тув ИКОПР СО РАН, Кызыл). Химический состав минералов определен методом сканирующей электронной микроскопии (Tescan Vega 3 sbu с ЭДС Oxford Instruments X-act, аналитик И. А. Блинов, ИМин ЮУ РАН, Миасс). Для типизации золота по пробности использована классификация Н. В. Петровской [8]: весьма высокопробное (1000–950 ‰), высокопробное (950–900 ‰), среднепробное (900–800 ‰) и низкопробное (800–700 ‰); минеральные формы золота – электрум (700–300 ‰) и кюстелит (300–100 ‰), а также Au-содержащее серебро – менее 100 ‰. Для сравнительного анализа блеклых руд использованы три модуля, рассчитываемых по формульным коэффициентам: железистость $Fe^* = 100Fe/(Fe+Zn)$, сурьмянистость $Sb^* = 100Sb/(Sb+As+Te+Bi)$ и формальная медистость $Cu^* = 100(Cu-10)/(Fe+Zn)$ [13]. Исследования флюидных включений проведены в лаборатории термобарогеохимии ЮУрГУ (Миасс) и Аналитического центра ИГМ СО РАН (Новосибирск) методами микротермометрии и рамановской спектроскопии. Термометрические измерения проведены в микротермокамере TMS-600 (Linkam). Интерпретация температур эвтектики флюидных включений проводилась согласно [1]. Концентрация растворов включений рассчитывалась по температуре плавления последнего кристалла льда [17]. Давление флюида рассчитано посредством программы FLINCOR с использованием температур гомогенизации CO₂. Состав газовой фазы установлен на спектрометре Ramanor U-1000 с детектором Horiba DU420E-OE-323 (JobinYvon), лазер MillenniaPro (Spectra-Physics).

Геологическое строение рудопроявления

Рудопроявление Тардан-2 расположено в междуречье Копто – Бай-Сют (Бай-Соот) в пределах мощной тектонически ослабленной зоны северо-западного направления, приуроченной к эндоконтактной зоне Копто-Байсютского габбро-диорит-плагиогранитного массива таннуольского комплекса, вблизи контакта с известняками тапсинской свиты. Полоса развития трещиноватых пород в плагиогранитах и гранодиоритах прослеживается по азимуту 130° и имеет значительную ширину (до 1,5 км) и длину (более 5 км) (рис. 1).

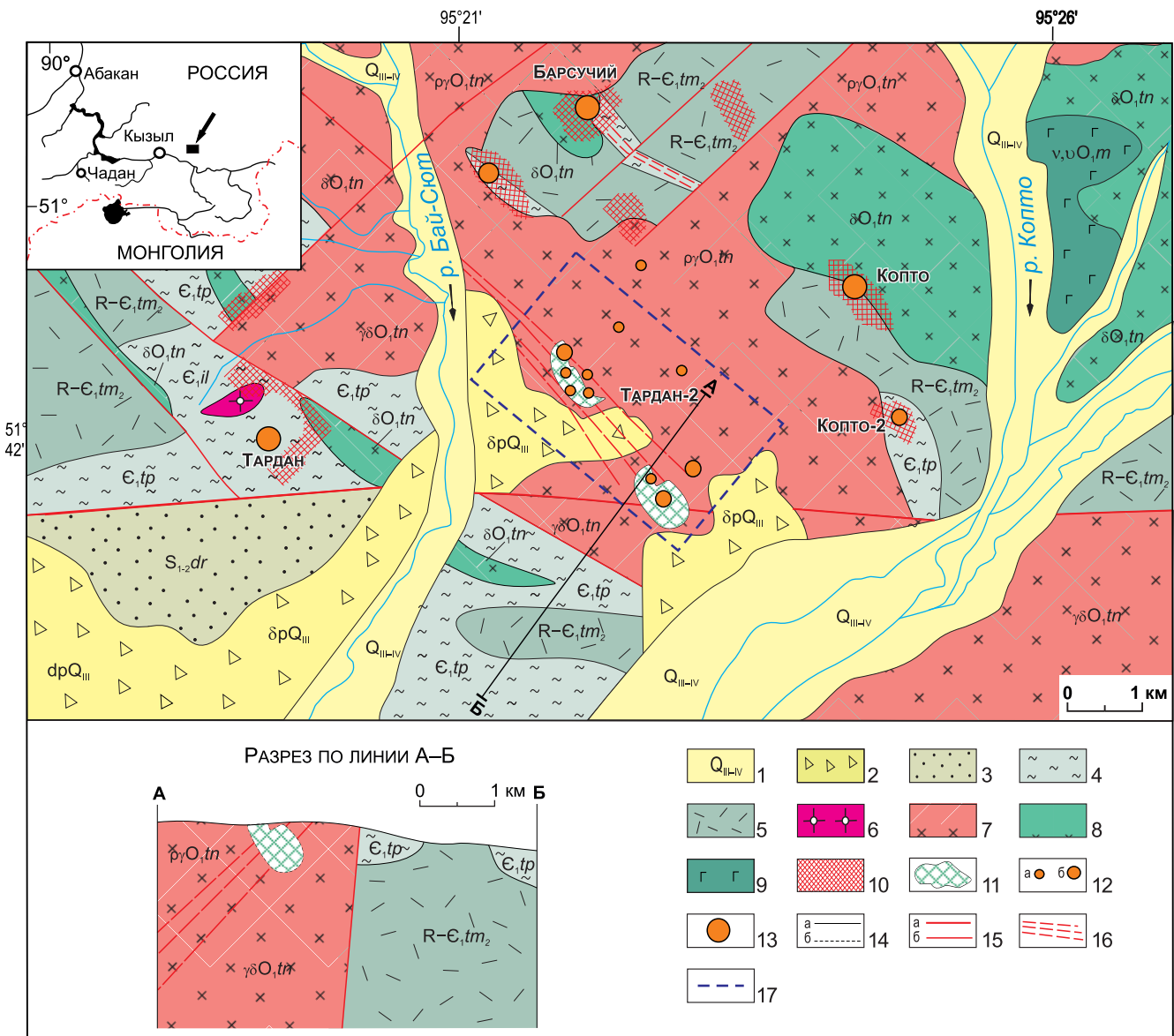


Рис. 1. Геологическая схема строения центральной части Тарданского золоторудного узла по данным [5]

1 – аллювиальные отложения пойм (Q_{III-IV}); 2 – делювиально-пролювиальные отложения (Q_{III}); 3 – красноцветные песчаники, гравелиты, конгломераты с прослоями известняков дерзигской свиты ($S_{1-2}dr$); 4 – песчаники, туфопесчаники, туфогравелиты, алевролиты, конгломераты, кристаллические сланцы, амфибол-хлоритовые сланцы и известняки тапсинской свиты (ϵ_1tp); 5 – базальтовые, андезитовые порфириты с прослоями известняков верхней подсвиты туматтайгинской свиты ($R-\epsilon_1tm_2$); 6–8 – раннетаннуольский диорит-тоналит-плагιοгранитный комплекс (O_1tn): 6 – гранит-порфиры ($\gamma\delta$); 7 – плагιοграниты (γ) и гранодиориты ($\gamma\delta$); 8 – диориты (δ), кварцевые диориты ($q\delta$); 9 – габброиды мажалькского перидотит-пироксенит-габброноритового комплекса ($v,\upsilon O_1m$); 10 – скарны; 11 – березиты; 12 – точки минерализации (а) и рудопоявления золота (б); 13 – месторождения золота; 14 – границы геологические: установленные (а), предполагаемые (б); 15 – региональные (а) и локальные (б) разломы; 16 – зоны дробления; 17 – контур рудопоявления Тардан-2

Переход от гранодиоритов к плагιοгранитам постепенный.

К рудопоявлению Тардан-2 относятся две группы точек минерализации, расположенные в междуречье Копто – Бай-Сют. Одна группа (Северный участок), включающая семь точек минерализации, тяготеет к р. Бай-Сют; вторая (Южный или Южно-Тарданский участок), состоящая из девяти пунктов минерализации, включая жилы «Чудская» и «Студенческая», – к р. Копто. Расстояние между ними 2 км [5]. По минералого-геохимическим осо-

бенностям руд и по составу самородного золота оба участка близки и различаются только степенью развития золотопроодуктивной минерализации: на Восточном участке она проявлена более широко.

Площадь рудопоявления (1,2×3,4 км) сложена среднезернистыми бело-серыми плагιοгранитами и гранодиоритами, которые вмещают многочисленные кварцевые и сульфидно-кварцевые жилы (протяженностью 10–80 м и мощностью 0,1–0,8 м) и штокверковые жильно-прожилковые зоны (10–180 м и 1–(10–18) м соответственно).



Простираение жильно-прожилковых зон и жил северо-западное, реже северо-северо-восточное. Они сложены бело-серым крупнозернистым, местами гребенчатым и друзовидным кварцем с вкрапленниками и гнездами сульфидов, сульфосолей и карбонатов (кальцит, анкерит).

Кварцевые жилы и жильно-прожилковые зоны сопровождаются пластообразными телами гидротермально-измененных пород, сложенных серицитом (до 15–45 %), кварцем (30–50 %), карбонатом (кальцитом и анкеритом) (до 10–30 %) и пиритом в виде хорошо ограненных кубических кристаллов (до 5–20 %). По минеральному составу и характеру проявления это типичные березиты. Протяженность зон интенсивной березитизации 40–130 м, мощность от 0,3–0,4 до 5–10 м, что несколько превышает размеры кварцево-жильных тел [5].

Минералого-геохимические особенности руд и состав золота

Содержание Au в жилах варьирует от 0,01–5 до 12–18 г/т, в березитах с многочисленными субпараллельными и пересекающимися кварцевыми прожилками – от 0,1–0,3 до 25 г/т, составляя в среднем, 18,5 г/т для маломощных (1–1,8 м) тел. В составе жил также присутствуют Ag (от следов до 40 г/т), Cu (0,03–1 %), Pb (0,01–0,3 %), Zn (0,01–0,3 %), As (до 0,3 %), Bi (до 0,1 %), Mo и V (до 0,003 %). В отдельных штучных пробах выявлены содержания Au (до 46,4 г/т), Bi (500 г/т), Ag (300 г/т), Mo (100 г/т), Zn (>1 %), Cu (1 %), Sb (1 %), Pb (0,5 %), As (0,5 %) [5].

Минералого-геохимическими исследованиями установлено, что формирование рудопроявления происходило в течение четырех стадий: 1) дорудная березитовая; 2) продуктивная золото-сульфосолюно-сульфидно-кварцевая; 3) пострудные анкерит-кальцит-кварцевая; 4) хлорит-кварцевая (рис. 2).

Золото-сульфосолюно-сульфидно-кварцевая прожилково-вкрапленная минерализация представлена халькопиритом, пиритом, галенитом (Ag до 1,18 мас. %), Bi-содержащими минералами ряда теннантит-тетраэдрит (Ag до 1,62 мас. %, Bi до 9,33 мас. %), матильдитом $AgBiS_2$, акантитом-I, золотом, электрумом, ртутистым электрумом, кюстелитом, ртутистым кюстелитом, айкинитом $CuPbBiS_3$, берриитом $Cu_3Ag_2Pb_3Bi_7S_{16}$, баритом, пирротином, сфалеритом, висмутином и самородным висмутом. Цвет рудного кварца серовато- и молочно-белый. К главным рудным минералам относятся халькопирит, пирит, галенит и блеклые руды (рис. 3). Нередко отмечаются полости с гнездами друзовидного полупрозрачного кварца. К полостям тяготеют крупные выделения пирита, халькопирита и золота. Общее количество сульфидов достигает 3–7 %, в среднем 3 % от объема жил.

Продуктивная стадия включает две минеральные ассоциации: 1) золото-пирротин-теннантит-халькопирит-кварцевую (пирит, галенит, халькопирит, пирротин, Bi-содержащий теннантит, золото,

Минерал	Этап				Гипергенный
	Гидротермальный золото-сульфидно-кварцевый				
	Стадия				
	1	2	3	4	
Кварц	■	■	■	■	
Кальцит	■		■		
Доломит	■				
Сидерит	■				
Анкерит	■		■		
Серицит	■				
Пирит	■	■			
Пирротин		■			
Халькопирит		■			
Галенит		■			
Сфалерит		■			
Блеклые руды		■			
Золото		■			■
Электрум		■			
Hg-электрум		■			
Кюстелит		■			
Hg-кюстелит		■			
Берриит		■			
Матильдит		■			
Висмутин		■			
Айкинит		■			
Акантит		■			
Барит		■			
Самородный Bi		■			
Хлорит				■	
Ковеллин				■	
Халькозин				■	
Дигенит				■	
Малахит				■	
Азурит				■	
Церуссит				■	
Гетит				■	
Гематит				■	
Бисмит				■	
Скородит				■	
Куприт				■	
Миметит				■	
Байлдонит				■	
Иодаргирит				■	
I-Br-хлораргирит				■	
I-Cl-бромаргирит				■	

Рис. 2. Парагенетическая схема рудопроявления Тардан-2 (толщина линий указывает на относительную степень распространенности минерала)

Стадии: допродуктивная березитовая (1); продуктивная золото-сульфосолюно-сульфидно-кварцевая (2); пострудные карбонатно-кварцевая (3) и хлорит-гематит-кварцевая (4)

электрум, ртутистый электрум, кюстелит, матильдит, айкинит, висмутин, барит); 2) золото-тетраэдрит-халькопирит-кварцевую (халькопирит, галенит, Bi-содержащий тетраэдрит, матильдит, айкинит, золото, электрум, ртутистый электрум, ртутистый кюстелит, берриит, барит, висмутин, самородный висмут и акантит-I). Минеральные ассоциации продуктивной стадии отчетливо рассекаются поздними анкерит-кальцит-кварцевыми и хлорит-кварцевыми прожилками мощностью до 0,4 см.

Сульфидно-кварцевые жилы рудопроявления интенсивно окислены и сложены гипергенными минералами, в том числе азуритом, малахитом, халькозином, ковеллином, скородитом, гетитом, гидрогетитом, бисмитом, бисмутитом, акантитом-II, купритом, байлдонитом, миметитом, иодаргиритом, I-Br-хлораргиритом, I-Cl-бромаргиритом и т. д. В интенсивно окисленных рудах пирит и халькопирит сохранились в виде реликтовых ксеноморфных зерен в лимоните и гематите.

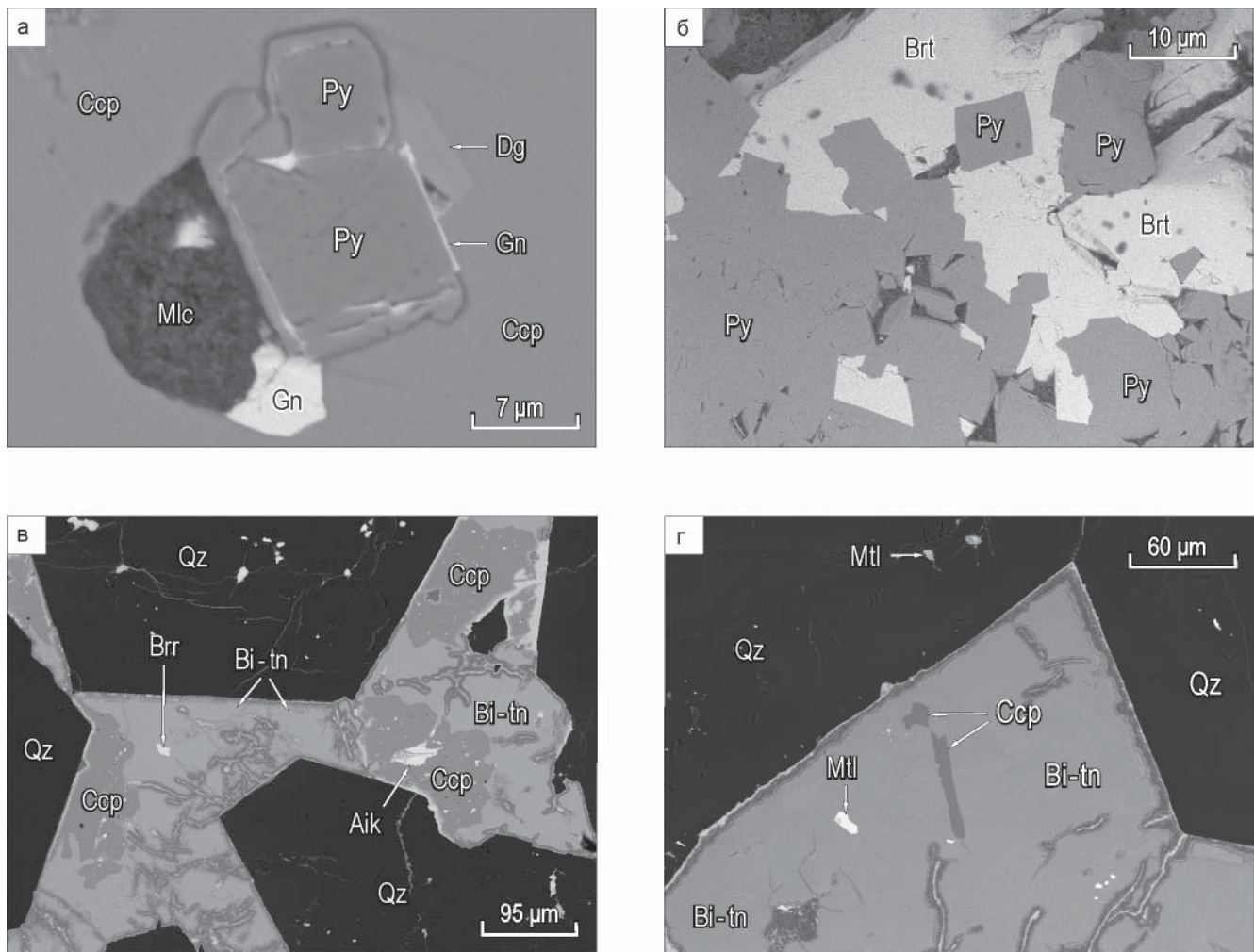


Рис. 3. Формы выделения пирита (Py), галенита (Gn), халькопирита (Ccp), барита (Brt), берриита (Brr), матильдита (Mtl) и айкинита (Aik) в кварце (Qz) и Bi-содержащем теннантите (Bi-tn); Mlc – малахит, Dg – дигенит. Фотографии в обратно-рассеянных электронах (BSE)

Золото в рудах (до 0,55 мм) отмечается в виде тонких вкраплений в кварце, халькопирите, блеклых рудах и гидроокислах железа. Оно имеет ксеноморфную, трещинно-прожилковую, комковато-ветвистую, ячеистую, удлиненную, уплощенную и дендритовидную форму, реже отмечаются идиоморфные зерна (рис. 4).

Гранулометрический состав золота из кварцевых жил варьирует незначительно, количественно преобладают фракции более 0,1 мм (73,7 %) и 0,25–0,1 (18,8 %), в меньшей степени – 0,5–0,25 мм (7,5 %) и 1–0,5 мм (0,4 %). В весовом отношении преобладают зерна размером 0,5–0,25 мм (51,44 %), в меньшей степени – 1–0,5 мм (12,03 %) (рис. 5).

Золото в кварце ассоциирует с галенитом, матильдитом, берриитом, акантитом-I, висмутином, айкинитом, самородным висмутом и блеклыми рудами (рис. 6). Халькопирит образует мономинеральные просечки (до 5 см) в кварце или сростания с блеклой рудой и галенитом. Пирит представлен рассеянной вкрапленностью одиночных кристаллов (до 1 мм) и их сростаний, реже слагает гнезда (1,5 см) с халькопиритом и галенитом. Галенит образует вкрапленность ксеноморфных, реже идио-

морфных зерен размером до 10 мкм, а также сростания с матильдитом и акантитом-I.

Акантит-I Ag_2S представлен мелкими ксеноморфными зернами размером до 15 мкм в сростаниях с галенитом и минералами висмута. Составы акантита-I ($Ag_{1,99-2,00}S_{1,00-1,01}$) и сульфидов не отклоняются от стехиометрии.

Айкинит $CuPbBiS_3$ (до 40 мкм) приурочен к кварцу, халькопириту, Bi-содержащему теннантиту и встречается в виде ксеноморфных агрегатов в сростаниях с галенитом и матильдитом (см. рис. 6, е; табл. 1, ан. 1–2).

Матильдит $AgBiS_2$ образует вкрапленность и скопления зерен до 30 мкм в кварце, халькопирите и блеклых рудах или сростания с галенитом, акантитом-I, берриитом, самородным висмутом и висмутитом (см. рис. 6, а–е; табл. 1, ан. 3–7).

Берриит $Cu_3Ag_2Pb_3Bi_7S_{16}$ (до 200 мкм) отмечается в кварце и образует сростания с акантитом-I, галенитом, матильдитом и Bi-содержащим тетраэдритом (Bi-td) (см. рис. 6, а; табл. 1, ан. 8–9).

Висмутин Bi_2S_3 (до 30 мкм) отмечается в виде мономинеральных включений в кварце, а также образует сростания с матильдитом, акантитом-I и са-

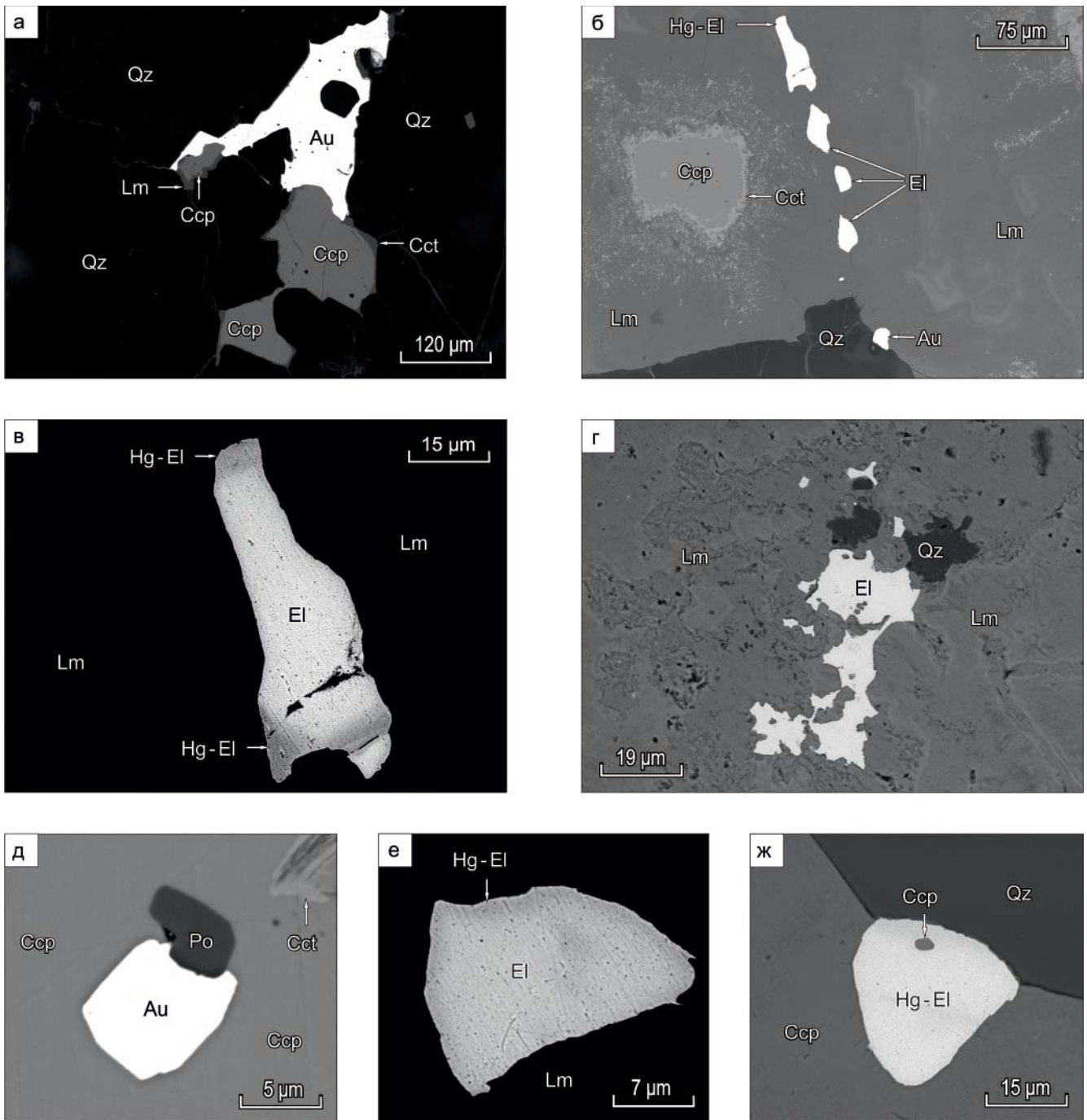


Рис. 4. Формы выделения минералов Au и Ag: а – сростания золота (Au) и халькопирита (Ccp) в кварце (Qz); б – золото (Au), электрум (EI), ртутистый электрум (Hg-EI), халькопирит (Ccp), халькозин (Cct) в лимоните (Lm), на контакте кварца (Qz) и лимонита (Lm); в, е – электрум (EI), на периферии переходящий в ртутистый электрум (Hg-EI) в лимоните (Lm); г – электрум (EI) и кварц (Qz) в лимоните (Lm); д – сростание золота (Au) с пирротинитом (Po) в халькопирите (Ccp); ж – ртутистый электрум (Hg-EI) на контакте кварца (Qz) и халькопирита (Ccp). Фотографии в обратно-рассеянных электро-нах (BSE)

морозным висмутом (см. рис. 6; табл. 1, ан. 10–11). Самородный висмут наблюдается в виде самостоятельных вкрапленников размером до 20 мкм или в сростаниях с акантитом-I, матильдитом и висмутином в кварце. В составе минерала примесей других элементов не обнаружено.

Блеклые руды ряда теннантит-тетраэдрит на рудопроявлении отлагались в течение продуктивной золото-сульфосольно-сульфидно-кварцевой стадии, но по времени отложения выделяют две их гене-

рации. Блеклые руды-I наиболее распространены и слагают выделения разнообразных форм и скопления зерен до 1,5 см в ассоциации с халькопиритом в кварцевых жилах. В них отмечаются включения халькопирита, галенита, матильдита и айкинита. По химическому составу блеклые руды-I относятся к Bi-содержащему теннантиту (Bi до 7,78 мас. %), в котором значения медистости (Cu*) варьируют от –12,7 до 2,6, железистости (Fe*) – от 16,2 до 31,6 и сурьмянистости (Sb*) – от 25,7 до 28,9 (табл. 2).

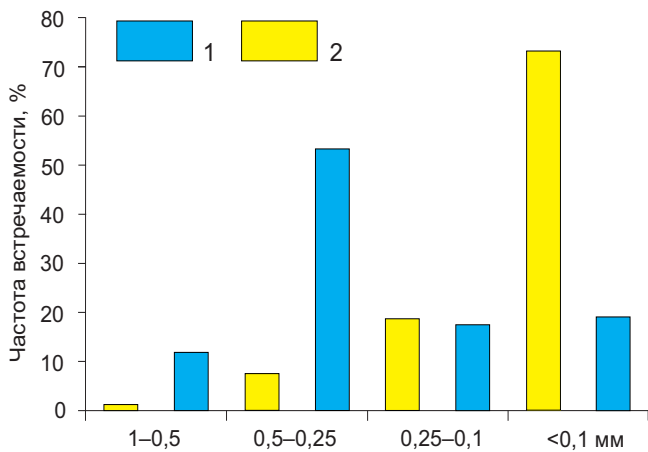


Рис. 5. Гранулометрический состав золота из кварцевых жил в количественном (1) и весовом отношении (2)

Блеклые руды-II образуют единичные включения (до 60 мкм) в кварце в ассоциации с акантитом-I, берриитом и баритом. По химическому составу они относятся к Bi-содержащему тетраэдриту (Bi до 9,33 мас. %), который, в отличие от Bi-содержащего теннантита, характеризуется высокими значениями Sb* (57,8) и низкими – Fe* (15,7) и Cu* (-18,5) (см. табл. 2). В целом, для блеклых руд рудопроявления Тардан-2 характерна скрытая плавная зональность, обусловленная увеличением содержания Sb и Bi, либо ее отсутствие.

Цвет золота варьирует от золотисто-желтого до серебристого с желтоватым оттенком. Окраска зерен золота, как правило, обусловлена значительной примесью Ag либо Ag и Hg.

Самородное золото по содержанию Ag и Hg представлено (мас. %):

- 1) среднепробным золотом с содержанием Ag до 20 мас. % (Au 80,02–83,55; Ag 16,57–20,09);
- 2) низкопробным золотом с Ag до 30 мас. % (Au 70,47–79,89; Ag 20,03–29,41; Hg 0,00–0,87);
- 3) электрумом с Ag до 63 мас. % (Au 37,58–69,12; Ag 29,99–62,58; Hg 0,00–0,91);
- 4) ртутистым электрумом с Ag до 65 мас. %, Hg до 8,45 мас. % (Au 32,80–65,40; Ag 32,11–65,74; Hg 1,10–8,45);
- 5) кюстелитом с Ag до 70 мас. % (Au 29,94; Ag 70,31);
- 6) ртутистым кюстелитом с Ag до 75 мас. %, Hg до 7,47 мас. % (Au 20,10–28,15; Ag 68,16–75,27; Hg 1,29–7,47).

Для зерен золота характерна зональность: содержание Au от центра зерна к периферии, как правило, закономерно уменьшается на 5–50 мас. % при увеличении количества Ag и Hg. В самородном золоте наблюдается обратная корреляция содержаний Hg с пробностью золота.

Для некоторых зерен золота от центра к периферии наблюдается изменение состава: 1) среднепробное золото (Au 80,45; Ag 20,09) → ртутистый электрум (Ag 65,74; Au 32,80; Hg 2,17) → ртутистый кюстелит (Au 71,86; Ag 27,47; Hg 1,29); 2) электрум (Ag 66,93; Au 32,81) → электрум (Ag 58,60; Au 39,22; Hg 2,44); 3) электрум (Ag 68,12; Au 26,99) → ртутистый кюстелит (Ag 72,42; Au 20,99; Hg 7,47) (табл. 3; см. рис. 4, в, е).

Минералого-геохимическими исследованиями установлено, что для самородного золота в рудопроявлении характерны широкие вариации пробности (834–201 ‰, в среднем 607 ‰) и эволюция составов от среднепробного золота до ртутистого кюстелита

Таблица 1

Химический состав айкинита, матильдита, берриита и висмутита, мас. %

Анализ	Bi	Ag	Pb	Cu	S	Сумма	Формула
Айкинит							
1	36,96	–	35,71	11,13	16,20	100	Cu _{1,02} Pb _{1,01} Bi _{1,03} S _{2,94}
2	36,67	–	36,37	10,83	16,14	100,01	Cu _{1,00} Pb _{1,03} Bi _{1,02} S _{2,95}
Матильдит							
3	55,58	28,61	–	–	15,81	100	Ag _{1,03} Bi _{1,04} S _{1,93}
4	54,38	28,12	–	–	16,57	99,07	Ag _{1,01} Bi _{1,00} S _{1,99}
5	54,33	28,21	–	–	16,76	99,30	Ag _{1,00} Bi _{1,00} S _{2,00}
6	54,91	27,43	–	–	17,35	99,69	Ag _{0,96} Bi _{0,99} S _{2,05}
7	55,10	27,25	–	–	17,08	99,43	Ag _{0,96} Bi _{1,01} S _{2,03}
Берриит							
8	48,64	7,11	21,20	6,91	16,42	100,28	Cu _{3,30} Ag _{2,00} Pb _{3,10} Bi _{7,06} S _{15,54}
9	47,76	7,86	20,42	6,32	17,26	99,62	Cu _{2,97} Ag _{2,18} Pb _{2,94} Bi _{6,83} S _{16,08}
Висмутит							
10	81,41	–	–	–	18,34	99,75	Bi _{2,03} S _{2,97}
11	80,98	–	–	–	19,01	99,99	Bi _{1,98} S _{3,02}

Примечание. Состав минералов определен на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 SBU с ЭДС Oxford Instruments X-act, аналитик И. А. Блинов, ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН. Прочерк – не обнаружено. Формула берриита рассчитана на 31 атом, матильдита – на 5 атомов, айкинита и висмутита – на 6 атомов.

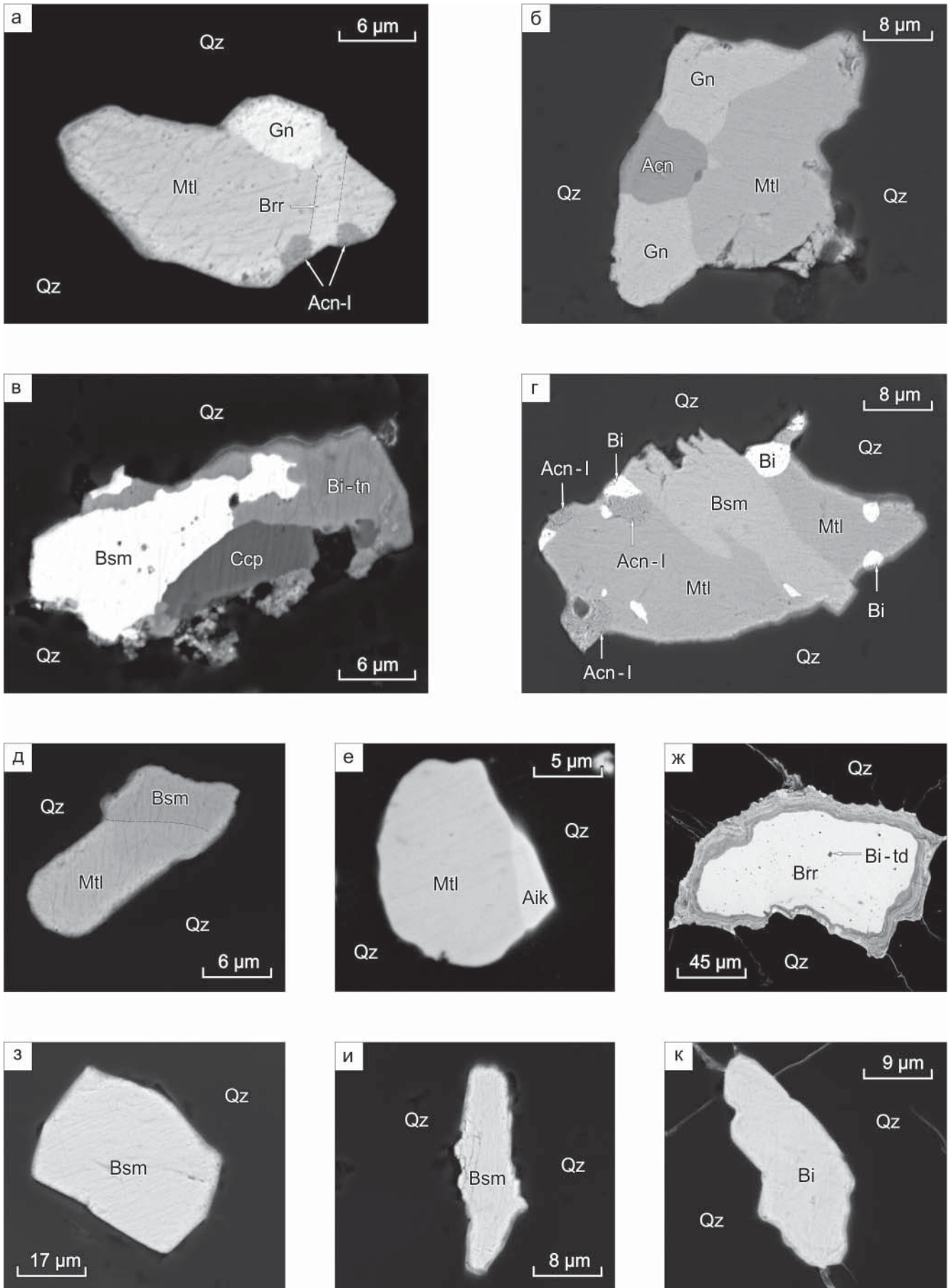


Рис. 6. Формы выделения галенита (Gn), матильдита (Mtl), берриита (Brr), акантита-I (Acn-I), висмутина (Bsm), халькопирита (Ccp), Bi-содержащего теннантита (Bi-tn), Bi-содержащего тетраэдрита (Bi-td), айкинита (Aik) и самородного висмута (Bi) в кварце (Qz). Фотографии в обратно рассеянных электронах (BSE)



Таблица 2

Химический состав блеклых руд, мас. %

Анализ	Cu	Ag	Zn	Fe	As	Sb	Bi	S	Сумма	Fe*	Sb*	Cu*
I генерация												
1	38,53	0,17	6,18	1,33	12,14	8,93	6,82	25,32	99,42	20,2	27,4	-7,8
2	38,89	0,39	6,46	1,31	11,69	9,04	5,77	25,49	99,04	19,2	28,7	-4,5
3	39,1	–	6,07	1,34	10,9	9,07	7,73	25,23	99,44	20,4	28,9	2,6
4	38,92	1,62	6,57	1,09	10,63	7,86	7,78	24,64	99,11	16,2	26,4	-12,6
5	39,05	0,37	6,51	1,24	12,69	8,36	6,17	25,61	100	18,4	25,7	-6,6
6	39,11	0,73	5,98	2,35	12,99	8,23	4,65	25,96	100	31,6	25,7	-11,3
7	38,56	0,46	6,4	2,27	11,55	8,78	6,88	25,7	100,6	29,4	27,9	-12,7
II генерация												
8	36,68	0,60	5,84	0,93	4,39	17,2	9,33	25,56	100,53	15,7	57,8	-18,5
Формула												
1	$(Cu_{9,85}Ag_{0,03})_{9,88}(Zn_{1,54}Fe_{0,39})_{1,93}(As_{2,63}Sb_{1,19}Bi_{0,53})_{4,35}S_{12,84}$											
2	$(Cu_{9,91}Ag_{0,06})_{9,97}(Zn_{1,60}Fe_{0,38})_{1,98}(As_{2,53}Sb_{1,20}Bi_{0,45})_{4,18}S_{12,87}$											
3	$Cu_{10,00}(Zn_{1,52}Fe_{0,39}Cu_{0,05})_{1,96}(As_{2,38}Sb_{1,21}Bi_{0,60})_{4,19}S_{12,85}$											
4	$(Cu_{9,75}Ag_{0,25})_{10,00}(Zn_{1,66}Fe_{0,32}Cu_{0,34})_{2,32}(As_{2,34}Sb_{1,06}Bi_{0,61})_{4,01}S_{12,67}$											
5	$(Cu_{9,87}Ag_{0,06})_{9,93}(Zn_{1,60}Fe_{0,36})_{1,96}(As_{2,71}Sb_{1,10}Bi_{0,47})_{4,28}S_{12,83}$											
6	$(Cu_{9,76}Ag_{0,11})_{9,87}(Zn_{1,45}Fe_{0,67})_{2,12}(As_{2,75}Sb_{1,07}Bi_{0,35})_{4,17}S_{12,84}$											
7	$(Cu_{9,72}Ag_{0,07})_{9,79}(Zn_{1,56}Fe_{0,65})_{2,21}(As_{2,47}Sb_{1,16}Bi_{0,53})_{4,17}S_{12,84}$											
8	$(Cu_{9,67}Ag_{0,09})_{9,76}(Zn_{1,50}Fe_{0,28})_{1,78}(Sb_{2,37}As_{0,98}Bi_{0,75})_{4,10}S_{13,36}$											

Примечание. Состав блеклых руд определен на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 SBU с ЭДС Oxford Instruments X-act, аналитик И. А. Блинов, ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН. Прочерк – не обнаружено. Формулы блеклых руд рассчитаны на 29 атомов. Fe* = Fe/(Fe+Zn), Sb* = Sb/(As+Bi+Te+Sb), Cu* = 100(Cu-10)/(Fe+Zn).

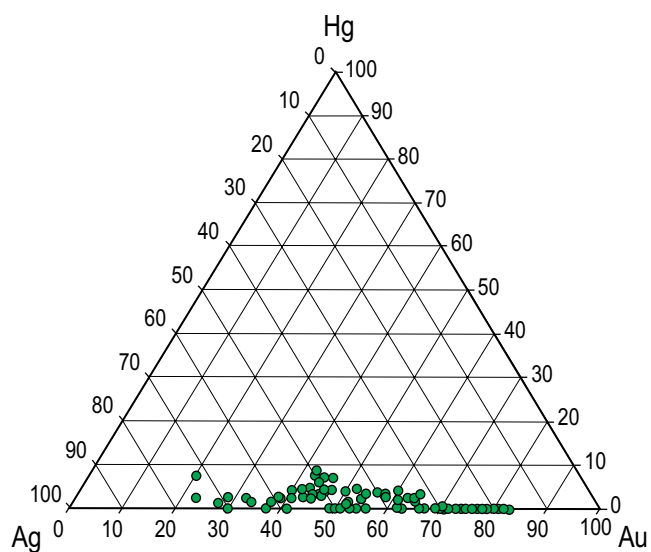


Рис. 7. Состав золота рудопоявления Тардан-2

(рис. 7). Тренд самородного золота: среднепробное золото (834–800 ‰) + галенит (Ag до 1,18 мас. %) + Bi-содержащий теннантит (Ag до 1,62 мас. %) → низкопробное золото с Hg до 0,87 мас. % (799–705 ‰) + берриит $Cu_3Ag_2Pb_3Bi_7S_{16}$ + Bi-содержащий тетраэдрит (Ag до 0,60 мас. %) → электрум с Hg до 0,91 мас. % (691–375 ‰) + акантит-I Ag_2S + матильдит $AgBiS_2$ → ртутистый электрум с Hg до 8,45 мас. % (657–326 ‰) → ртутистый кюстелит с Hg до 7,47 мас. % (299–201 ‰). В рудах количественно преобладают низкопробное золото (29,4 %), электрум (28,7 %)

и ртутистый электрум (29,4 %) и в меньшей степени среднепробное золото (8,8 %) и ртутистый кюстелит (3,7 %) (рис. 8).

В наиболее окисленных рудах отмечается весьма высокопробное гипергенное золото, которое выполняет межзерновые прожилки мощностью до 2 мкм или обособления до 7 мкм на поверхности низкопробного золота, электрума и ртутистого электрума в ассоциации с гетитом, иодаргиритом и т. д. Гипергенное золото часто ассоциирует со ртутистым электрумом и кюстелитом как продукт их выветривания.

Условия образования жил

Для определения условий образования прожилково-вкрапленного оруденения в золото-сульфидно-кварцевых жилах рудопоявления Тардан-2 были исследованы флюидные включения в кварце. Оптическая микроскопия показала наличие первично-вторичных и вторичных флюидных включений [9]. Первично-вторичные флюидные включения наблюдаются в виде групп, маркирующих залеченные трещины в кварце; включения сингенетичны вкрапленной рудной минерализации. Реже первично-вторичные включения встречаются обособленно от рудных минералов или в виде малочисленных упорядоченных в линию групп, однако локализация их сходна. По оптическим наблюдениям при комнатной температуре первично-вторичные включения, согласно классификации Э. Реддера [9], можно разделить по фа-



Таблица 3

Химический состав зональных зерен золота, мас. %

Анализ	Зона	Au	Ag	Hg	Сумма	Формула	Пробность
1	Центр	83,54	16,57	–	100,11	(Au _{0,73} Ag _{0,27}) _{1,00}	834
2	Край	63,24	36,61	–	99,85	(Ag _{0,51} Au _{0,49}) _{1,00}	633
3	Центр	81,17	17,85	–	99,02	(Au _{0,71} Ag _{0,29}) _{1,00}	820
4	Край	74,81	25,04	–	99,85	(Au _{0,62} Ag _{0,38}) _{1,00}	749
5	Центр	81,67	18,25	–	99,92	(Au _{0,71} Ag _{0,29}) _{1,00}	817
6	Край	49,40	49,75	–	99,15	(Ag _{0,65} Au _{0,35}) _{1,00}	498
7	Центр	80,45	20,09	–	100,54	(Au _{0,69} Ag _{0,31}) _{1,00}	800
8	«	32,80	65,74	2,14	100,69	(Ag _{0,78} Au _{0,21} Hg _{0,01}) _{1,00}	326
9	Край	27,47	71,86	1,29	100,62	(Ag _{0,82} Au _{0,17} Hg _{0,01}) _{1,00}	273
10	Центр	78,02	21,64	–	99,66	(Au _{0,66} Ag _{0,34}) _{1,00}	783
11	«	67,14	32,68	–	99,82	(Au _{0,53} Ag _{0,47}) _{1,00}	673
12	Край	55,57	40,51	3,34	99,42	(Ag _{0,56} Au _{0,42} Hg _{0,02}) _{1,00}	559
13	Центр	77,78	22,38	–	100,16	(Au _{0,66} Ag _{0,34}) _{1,00}	778
14	«	54,56	44,52	0,76	99,84	(Ag _{0,59} Au _{0,40} Hg _{0,01}) _{1,00}	546
15	Край	53,38	43,77	2,18	99,33	(Ag _{0,59} Au _{0,39} Hg _{0,02}) _{1,00}	537
16	Центр	78,22	22,16	–	100,38	(Au _{0,66} Ag _{0,34}) _{1,00}	779
17	«	60,08	34,78	4,17	99,03	(Ag _{0,50} Au _{0,47} Hg _{0,03}) _{1,00}	607
18	Край	44,19	52,70	3,51	100,40	(Ag _{0,67} Au _{0,31} Hg _{0,02}) _{1,00}	440
19	Центр	75,32	24,61	–	99,93	(Au _{0,63} Ag _{0,37}) _{1,00}	754
20	«	41,62	57,43	0,81	99,86	(Ag _{0,71} Au _{0,28} Hg _{0,01}) _{1,00}	417
21	Край	22,83	75,27	2,32	100,42	(Ag _{0,85} Au _{0,14} Hg _{0,01}) _{1,00}	227
22	Центр	70,82	27,73	0,87	99,42	(Au _{0,58} Ag _{0,41} Hg _{0,01}) _{1,00}	712
23	Край	56,14	42,95	0,91	100,00	(Ag _{0,58} Au _{0,41} Hg _{0,01}) _{1,00}	561
24	Центр	61,85	36,10	1,46	99,41	(Ag _{0,51} Au _{0,48} Hg _{0,01}) _{1,00}	622
25	«	42,21	49,78	7,28	99,27	(Ag _{0,65} Au _{0,30} Hg _{0,05}) _{1,00}	425
26	Край	41,86	53,16	4,56	99,57	(Ag _{0,68} Au _{0,29} Hg _{0,03}) _{1,00}	420
27	Центр	69,12	29,99	–	99,11	(Au _{0,55} Ag _{0,44}) _{1,00}	697
28	«	40,46	56,86	2,38	99,70	(Ag _{0,71} Au _{0,27} Hg _{0,02}) _{1,00}	406
29	Край	20,10	72,42	7,47	99,99	(Ag _{0,83} Au _{0,12} Hg _{0,05}) _{1,00}	201
30	Центр	66,93	32,81	–	99,74	(Au _{0,53} Ag _{0,47}) _{1,00}	671
31	Край	39,22	58,60	2,44	100,26	(Ag _{0,72} Au _{0,26} Hg _{0,02}) _{1,00}	391
32	Центр	65,40	32,11	1,98	99,49	(Au _{0,52} Ag _{0,46} Hg _{0,02}) _{1,00}	657
33	Край	44,03	51,41	3,8	99,24	(Ag _{0,66} Au _{0,31} Hg _{0,03}) _{1,00}	444
34	Центр	63,57	34,41	1,33	99,32	(Au _{0,50} Ag _{0,49} Hg _{0,01}) _{1,00}	640
35	«	43,56	52,75	2,92	99,23	(Ag _{0,67} Au _{0,31} Hg _{0,02}) _{1,00}	439
36	«	42,65	52,30	4,76	99,70	(Ag _{0,67} Au _{0,30} Hg _{0,03}) _{1,00}	428
37	Край	40,13	55,33	4,22	99,68	(Ag _{0,69} Au _{0,28} Hg _{0,03}) _{1,00}	403
38	Центр	49,51	46,21	4,02	99,74	(Ag _{0,61} Au _{0,36} Hg _{0,03}) _{1,00}	496
39	Край	43,78	50,37	5,98	100,13	(Ag _{0,65} Au _{0,31} Hg _{0,04}) _{1,00}	437
40	Центр	44,18	52,25	3,21	99,64	(Ag _{0,67} Au _{0,31} Hg _{0,02}) _{1,00}	443
41	«	44,16	52,59	2,56	99,31	(Ag _{0,67} Au _{0,31} Hg _{0,02}) _{1,00}	444
42	Край	42,81	48,83	8,45	100,09	(Ag _{0,64} Au _{0,30} Hg _{0,06}) _{1,00}	423

Примечание. Состав золота определен на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 SBU с ЭДС Oxford Instruments X-act, аналитик И. А. Блинов, ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН. Прочерк – не обнаружено. Формулы рассчитаны на Au+Ag+Hg = 1.

зовому составу на следующие типы: двухфазные газовой-жидкие (VL) и трехфазные газовой-жидкие с высокоплотной углекислотой (VLC). Примечательно, что каждый тип включений встречается обособленно от других. Вторичные включения траассируют трещины, секущие кварцевые зерна,

и по фазовому составу являются газовой-жидкими (VL).

В кварце золото-пирротин-теннантит-халькопирит-кварцевой жилы рудопроявления диагностированы первично-вторичные включения VL (рис. 9, а) и VLC (см. рис. 9, б) типов, а также множество вто-

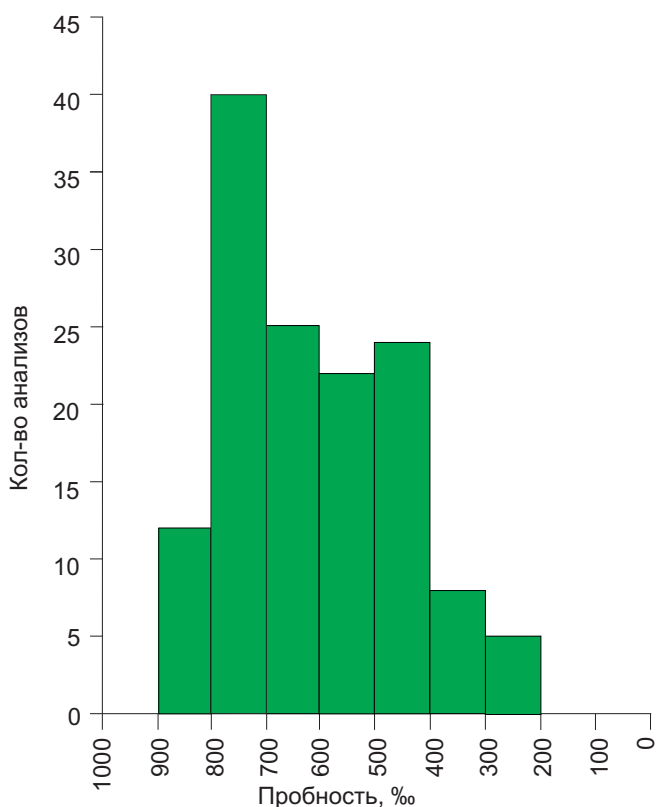


Рис. 8. Частота встречаемости значений пробности самородного золота

ричных VL включений. Первично-вторичные VL включения характеризуются удлиненной, округлой или изометричной формой и размерами 5–20 мкм. Доля газовой фазы при комнатной температуре составляет около 20–30 % объема включения. В составе газовой фазы, по данным спектроскопии КР, содержится только CO₂. Температуры гомогенизации включений (в жидкую фазу) составили 245–280 °С, эвтектики – от –15 до –12 °С, плавления последнего кристалла льда – от –2 до –1 °С (табл. 4).

Согласно полученным данным флюид имеет Na-K-хлоридный солевой состав с невысокими концентрациями солей (1,7–3,4 мас.% NaCl-экв.). Включения VLC-типа имеют удлиненную форму, размеры 5–15 мкм, содержат до 30 % объема газовой фазы. Температуры гомогенизации углекислоты в газовую фазу составили 27–28 °С, температуры полной гомогенизации (в жидкую фазу) – 260–270 °С. Рас-

считанные плотность углекислоты и давление равны 0,27–0,29 г/см³ и 730–980 бар соответственно. Вторичные включения VL-типа отличаются извилистой формой, их размеры также 5–15 мкм. Температуры их гомогенизации (в жидкую фазу) составили 115–160 °С; температуры эвтектики (от –11 до –10 °С) соответствуют водному раствору хлорида калия. Концентрации солей (температуры плавления льда от –0,4 до –0,1 °С) составляют 0,2–0,7 мас. % NaCl-экв. (см. табл. 4).

В кварце золото-тетраэдрит-халькопирит-кварцевой жилы диагностированы первичные и первично-вторичные VL включения, а также однофазные существенно газовые и жидкостные включения размером до 3 мкм. Первые имеют изометричную, округлую, удлиненно-треугольную форму и размеры до 25 мкм (см. рис. 9, в–г). Газовая фаза составляет до 40 % объема включения. Температуры гомогенизации этих включений варьируют в интервале от 120 до 180 °С; температуры эвтектики – от –23,1 до –39,8 °С, что указывает на содержание в водном растворе хлоридов Na, K и Mg. Температуры плавления последнего кристалла льда находятся в интервале от –3,2 до –5,3 °С, т. е. соленость флюида составляет 4–8,4 мас. % NaCl-экв. (см. табл. 4).

Обсуждение результатов

Рудные тела рудопроявления Тардан-2, локализованные в березитизированных плагиогранитах и гранодиоритах, представлены кварцевыми, сульфидно-кварцевыми жилами и минерализованными зонами дробления с прожилково-вкрапленной минерализацией. Рудопроявление характеризуется малосульфидным (не более 3 %) составом руд. По составу продуктивной минеральной ассоциации Тардан-2 отвечает золото-висмут-сульфосолюно-халькопиритовому типу с матильдитом, висмутином, айкинитом, берриитом, баритом и минералами ряда Au – Ag – Hg. Для самородного золота характерны широкие вариации его пробности (834–201 ‰, в среднем 607 ‰), значительные примеси Hg (до 8,45 мас.%) и эволюция составов от среднепробного золота до ртутистого кюстелита.

По минералого-геохимическим особенностям продуктивная минерализация Тардан-2 близка поздней продуктивной стадии Тарданско-

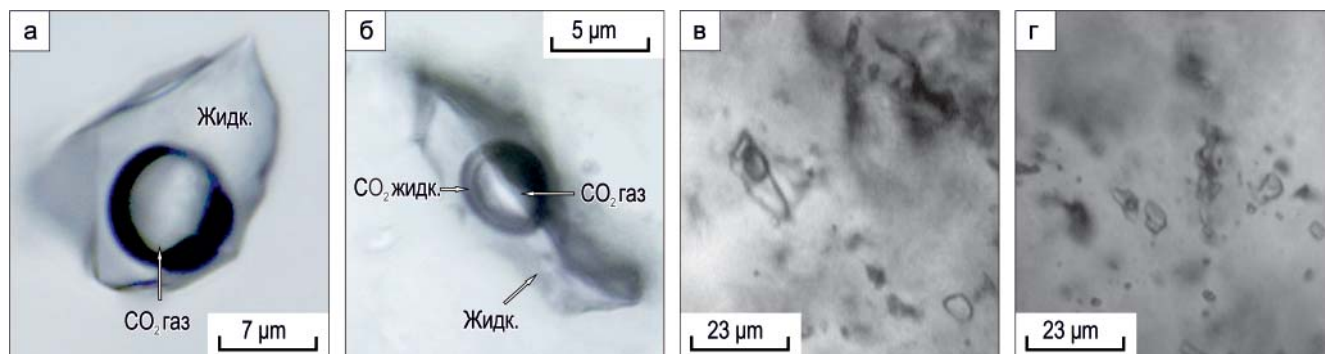


Рис. 9. Флюидные включения в кварце золото-сульфидно-кварцевых жил



Таблица 4

Результаты изучения флюидных включений в кварце

Образец	ЧД-2			ТРД-2-1	ТРД-2-2а	ТРД-2-2б
	ПВ	ПВ	В	ПВ	ПВ	ПВ
Генерация	ПВ	ПВ	В	ПВ	ПВ	ПВ
Количество	10	5	11	27	25	28
Тип	VL	VLC	VL	VL	VL	VL
$T_{эвт}, ^\circ\text{C}$	12–15	–	10,5–11	31,3–34,4	32,7–39,8	23,1–36,4
$T_{пл}, ^\circ\text{C}$	1–2	–	0,1–0,4	–	3,2–5,3	–
Соленость (мас. % NaCl-экв.)	1,7–3,4	–	0,2–0,7	4–6,5	5,3–8,3	4,2–8,4
$T_{гом}, ^\circ\text{C}$	245–280	260–270	115–160	140–160	150–180	120–160
$T_{гом\text{CO}_2}, ^\circ\text{C}$	–	27–28	–	–	–	–
Давление, бар	–	730–980	–	–	–	–
Состав газовой фазы	CO ₂	CO ₂	–	–	–	–

Примечание. ПВ – первично-вторичные включения, В – вторичные включения; $T_{эвт}$ – температура эвтектики, $T_{пл}$ – температура плавления льда, $T_{гом}$ – температура гомогенизации, $T_{гом\text{CO}_2}$ – температура гомогенизации CO₂. Прочерк – не определено.

го месторождения с кварцем, кальцитом, халькопиритом, пиритом, галенитом, Se-галенитом (Se до 5 мас. %), сфалеритом (Fe до 7,45 мас. %), арсенопиритом, золотом (Ag до 28,21 мас. %, Hg 0,87 мас. %), электрумом (Ag до 37,74 мас. %, Hg 0,81 мас. %), ртутистым электрумом (Ag до 50,69 мас. %, Hg 4,12 мас. %), гесситом, акантитом, висмутином, самородным висмутом, пильзенитом Bi₄Te₃, матильдитом AgBiS₂, цумоитом BiTe и баритом [6, 21]. Это подтверждает предположение А. Ф. Коробейникова с соавторами [10] о том, что объекты ТРУ являются производными одной рудно-магматической системы.

На рудопроявлении Тардан-2 парагенезис сульфидов с висмутитом и самородным висмутом контролируется параметрами среды вблизи поля стабильности пирротина, т.е. минералогические особенности предполагают $\lg f(S_2) = 10^{-18} - 10^{-9}$ (при $T = 200^\circ\text{C}$) [15, 16]. Отсутствие в рудах минералов теллура, включая теллуриды висмута, может свидетельствовать о низких значениях $f\text{Te}_2$ и служить маркером восстановительных условий рудообразования. Наличие позднего акантита-I, твердых растворов минералов ряда Au – Ag – Hg (ртутистых электрума и кюстелита) указывают на то, что на заключительной стадии рудоносные растворы отличались следующими параметрами: $\text{Ag}/\text{Au} > 10$ [29], повышенное содержание Hg и низкое fS_2 [12, 27]. Этим объясняется отсутствие киновари и наличие металлической Hg в виде ртутистого электрума и кюстелита. Наличие минералов ртути предполагает участие глубинных (магматических) флюидов в процессе минералообразования, что является признаком ртутной дегазации мантии [7, 17].

По результатам термобарогеохимических исследований установлено, что кристаллизация минеральных ассоциаций продуктивной стадии происходила в условиях гипабиссальной фации глубинности (0,73–0,98 кбар; 2,1–3,0 км) из водных растворов со-

става NaCl–H₂O, KCl–H₂O, NaCl–KCl–H₂O и MgCl₂–H₂O с низкой и средней соленостью, изменяющейся от 1,7 до 8,3 мас. % NaCl-экв. при понижении температур от 280 до 120 °C. Повышение солености в процессе рудоотложения и появление солей Mg в составе гидротермального раствора также может быть связано с вовлечением магматических флюидов-рассолов. Низкие концентрации (0,7–0,2 мас. % NaCl-экв.), зафиксированные во вторичных флюидных включениях, могут быть вызваны разбавлением гидротермального раствора слабоминерализованными вадозными водами [31].

Согласно генетической классификации Э. М. Спиридонова [12], рудопроявление Тардан-2 близко к вулканогенно-плутоногенной малосульфидной золото-кварцевой березит-лиственитовой формации гипабиссальной фации глубинности. Для блеклых руд характерна скрытая плавная зональность, обусловленная увеличением содержания Sb и Bi, а также повышенные концентрации Bi (от 4,6 до 9,33 мас. %), типичные для блеклых руд вулканогенных и вулканогенно-плутоногенных месторождений золота. По данным [11, 13, 27], кристаллы блеклых руд ряда теннантит-тетраэдрит плутоногенных месторождений не обладают резко выраженной зональностью, поскольку формируются в закрытой системе при относительно устойчивых давлениях и плавном снижении температур, содержание Bi в блеклых рудах составляет не менее 0,4 мас. %, а Te – менее 0,12 мас. %. В то же время для кристаллов блеклых руд вулканогенных и вулканогенно-плутоногенных месторождений характерна резко выраженная зональность, часто осцилляционная, так как они формируются при изменчивых условиях рудоотложения (колебаниях fO_2 , fS_2 , fSe_2 , fTe_2 , вариациях давления и температуры), т.е. системах открытого «выкипающего» или полуоткрытого типов [11]. Зональность блеклых руд вулканогенно-плутоногенных месторождений



обусловлена вариациями содержаний As–Sb, характерно также замещение As–Sb висмутом: Хаак-Саир (Тува) до 1,55 мас. %; Дарасун (Забайкалье) до 2,96 мас. %; Лебединое (Алдан) до 9,7 мас. % [18, 19, 22, 27]; вулканогенных – вариациями содержаний As–Sb–Te–Bi, S–Se, Cu–Ag и Zn–Fe–Cu–Hg–Cd [13, 27].

Вулканогенно-плутоногенные золото-сульфидно-кварцевые березит-лиственитовые месторождения имеют промежуточные характеристики между типичными плутоногенными (мезотермальными) и вулканогенными (эпитермальными) месторождениями (Дарасун, Хаак-Саир, Чармитан-Зармитан) [12, 19, 29]. Некоторые месторождения данной формации (Куранах, Лебединое на р. Алдан) по особенностям состава близки к вулканогенным с селенидно-теллуридной минерализацией, голдфилдитом, аннивитом (богатые висмутом теннантит или тетраэдрит), колуситом и киноварью [8, 13, 18].

По минералого-геохимическим особенностям Тардан-2 и другие объекты ТРУ близки к месторождениям золото-висмутового геохимического типа [2, 24], которые, согласно зарубежной классификации [26], отвечают классу месторождений золота, парагенетически связанных с интрузиями («intrusion related gold deposits»), т. е. плутоногенно-гидротермальному генетическому классу золоторудных месторождений [12]. В России это Пограничное (Восточный Саян), Эргелях, Курумское, Тугучак, Басагуньинское, Чугулук, Неннели и Галечное (Северо-Восток России) жильные и Леводыбинское, Тэутеджак (Северо-Восток России) штокверковые месторождения, которые приурочены к апикальным либо краевым приконтактным зонам гранитоидных плутонов [2, 3, 20, 21, 25].

Выводы

Таким образом, формирование минерализации золота на рудопроявлении Тардан-2 происходило в течение одной продуктивной стадии и отвечает золото-висмут-сульфосольно-халькопиритовому типу с матильдитом, висмутином, айкинитом, берриитом, самородным висмутом, баритом и минералами ряда Au – Ag – Hg. Исходя из вещественного состава рудопроявления и типоморфных особенностей минералов (золота и блеклых руд), можно констатировать, что Тардан-2 относится к малосульфидной золото-кварцевой березит-лиственитовой формации гипабиссальной фации глубинности (Р около 0,73–0,98 кбар; глубина примерно 2,1–3,0 км). По геохимической типизации рудопроявление относится к золото-висмутовому типу орогенных месторождений, генетически связанных с гранитоидами. Комплексный хлоридный состав растворов и наличие минералов ртути и висмута предполагают участие магматических флюидов в процессе минералообразования.

В связи с установлением гидротермального генезиса месторождений ТРУ в скарнах требуется

проведение поисковых работ в Тапса-Каахемском рудном районе по выявлению и изучению крупно-объемных золоторудных месторождений золото-кварцевой формации, т. е. месторождений традиционных формационных типов. По мнению авторов, к первоочередной перспективной площади проведения поисковых работ следует отнести район месторождения Проездной (Тапсинский потенциальный рудный узел), расположенный в 24 км к северу от рудопроявления Тардан-2.

Авторы признательны И. А. Блинову за проведение электронно-микроскопических исследований. Геолого-минералогические исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (№ 17–45–170970 p_a); термобарогеохимические исследования выполнены в рамках государственного задания ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (2019–2020), экспедиционные работы – в рамках НИР государственного задания ТувИКОПР СО РАН (0384–2016–0012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисенко А. С.** Анализ солевого состава растворов газово-жидких включений в минералах методом криометрии / Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений / отв. ред. Н. П. Лаверов. – М.: Недра, 1982. – С. 37–46.
- Гамянин Г. Н., Гончаров В. И., Горячев Н. А.** Золото-редкометалльные месторождения Северо-Востока России // Тихоокеанская геология. – 1998. – Т. 17, № 3. – С. 94–103.
- Горячев Н. А., Гамянин Г. Н.** Золото-висмутовые (золото-редкометалльные) месторождения Северо-Востока России: типы и перспективы промышленного освоения // Золоторудные месторождения Востока России. – Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2006. – С. 50–62.
- Золото-сульфидно-кварцевое** месторождение Барсучий (Северо-Восточная Тува): минералого-геохимические особенности и условия образования / Р. В. Кужугет, И. Р. Прокопьев, А. А. Редина, Н. Н. Анкушева // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 10. – С. 181–196.
- Кильчичаков К. М., Токунов В. Ф., Плеханов А. И.** Результаты оценки Тарданского золоторудного месторождения и поисков золота в бассейне р. Бай-Сют. – Кызыл: ТГРЭ, 1967. – 150 с.
- Кужугет Р. В., Ооржак Ш. Н.** Золотоносные минеральные ассоциации Тарданского гидротермального месторождения (Восточная Тува) // Региональная экономика: технологии, экономика, экология и инфраструктура: матер. II Междунар. науч.-практ. конф. (18–20 октября 2017 г., Кызыл, Россия). – Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2017. – С. 181–186.
- Озерова Н. А.** Ртуть и эндогенное рудообразование. – М.: Наука, 1986. – 231 с.
- Петровская Н. В.** Самородное золото. – М.: Наука, 1973. – 348 с.



9. **Реддер Э.** Флюидные включения в минералах. Т. 1. – М.: Мир, 1978. – 360 с.

10. **Рудно-метасоматическая** и геохимическая зональность золоторудных полей и месторождений складчатых поясов Сибири / А. Ф. Коробейников, Ю. С. Ананьев, А. И. Гусев, В. Г. Ворошилов. – Томск: ТПУ, 2013. – 458 с.

11. **Спиридонов Э. М.** Вулканогенные эпиптермальные, мезотермальные, гипотермальные (ксенотермальные) месторождения золота и их минерально-геохимические особенности // Вулканизм и геодинамика. Т. 2. – Петропавловск-Камчатский, 2009. – С. 814–817.

12. **Спиридонов Э. М.** Обзор минералогии золота в ведущих типах Au минерализации // Золото Кольского полуострова и сопредельных регионов: тр. Всерос. (с междунар. участием) науч. конф., посвящ. 80-летию Кольского НЦ РАН. – Апатиты: Изд-во K&M, 2010. – С. 143–171.

13. **Спиридонов Э. М.** Типоморфные особенности блеклых руд некоторых плутоногенных, вулканогенных, телетермальных месторождений золота // Геология рудных месторождений. – 1987. – Т. 29, № 6. – С. 83–91.

14. **Степанов В. А., Моисеенко В. Г.** Геология золота, серебра и ртути. Ч. 1. Золото-ртутные месторождения. – Владивосток: Дальнаука, 1993. – 227 с.

15. **Affif A. M., Kelly W. C., Essene E. J.** Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: I. Thermochemical data and calculated equilibria // *Economic Geology*. – 1988. – Vol. 83. – P. 377–394.

16. **Barton P. B., Skinner B. J.** Sulfide mineral stabilities // *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* / ed. by H. L. Barnes. – New York: John Wiley and Sons, 1979. – P. 278–403.

17. **Bodnar R. J., Vityk M. O.** Interpretation of microthermometric data for H₂O–NaCl fluid inclusions // *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. – Pontignana-Siena, 1994. – P. 117–130.

18. **Dobrovolskaya M. G., Razin M. V., Prokofiev V. Yu.** New data on the mineral composition of the ores of the Lebedinoye gold deposit and the Joyous ore occurrence (Central Aldan, Russia) // *New Data on Minerals*. – 2015. – Vol. 50. – P. 38–49.

19. **Fahlоре** and Sphalerite from the Darasun Gold Deposit in the Eastern Transbaikal Region, Russia: I. Mineral Assemblages and Intergrowths, Chemical Composition, and Its Evolution / N. G. Lyubimtseva, N. S. Bortnikov, S. E. Borisovsky, et al. // *Geology of Ore Deposits*. – 2018. – Vol. 60, no. 2. – P. 93–120.

20. **Garmaev B. L., Damdinov B. B., Mironov A. G.** Pogranchnoe Au-Bi occurrence, Eastern Sayan: Composition and link to magmatism // *Geology of Ore Deposits*. – 2013. – Vol. 55, no. 6. – P. 445–466.

21. **Gaskov I. V.** New data on the correlation of skarn and gold mineralization at the Tardan deposit (northeastern Tuva) // *Russian Geology and Geophysics*. – 2008. – Vol. 49, no. 12. – P. 923–931.

22. **Gold** mineralization of the Khaak-Sair gold-quartz ore occurrence in listwanites (western Tuva) / R. V. Kuzhuget, V. V. Zaikov, V. I. Lebedev, A. A. Mongush // *Russian Geology and Geophysics*. – 2015. – Vol. 56. – P. 1332–1348.

23. **Gold-bismuth** mineralization in the southeastern part of the Eastern Sayan / B. B. Damdinov, B. L. Garmaev, A. G. Mironov, Z. B. Dashinimaev // *Doklady Earth Sciences*. – 2009. – Vol. 425, no. 2. – P. 256–259.

24. **Granitoid-related** gold lode deposits over the Northern Pacific marginal areas / N. A. Goryachev, R. J. Newberry, G. N. Gamyranin, et al. // *Metallogeny of the Pacific Northwest. Tectonics, Magmatism and Metallogeny of active continental margins. Proceedings of the Interim IAGOD Conference (1–20 September, 2004)*. – Vladivostok: Dalnauka Publ., 2004. – P. 199–201.

25. **Intrusion-related** gold-bismuth deposits of North-East Russia: PTX parameters and sources of hydrothermal fluids / O. V. Vikenteva, V. Yu. Prokofiev, G. N. Gamyranin, et al. // *Ore Geology Reviews*. – 2018. – Vol. 100. – P. 240–259.

26. **Lang J. R., Baker T.** Intrusion related gold systems: the present level of understanding // *Mineralium Deposita*. – 2001. – Vol. 36. – P. 477–489.

27. **Minerals** of Fahlore group: Indicators of Ore Genesis / E. Spiridonov, M. Maleev, V. Kovachev, et al. // *Bulgarian Geological Society, 80th Anniversary. Proceedings of the Jubilee International Conference*. Bulgarian Geological Society. – Sofia, 2005. – P. 79–82.

28. **Palyanova, G. A., Kokh K. A., Seryotkin Yu. V.** Formation of gold-silver sulfides and native gold in Fe – Ag – Au – S system // *Russian Geology and Geophysics*. – 2012. – Vol. 53, no. 4. – P. 347–355.

29. **Prokofiev V. Yu.** Types of Hydrothermal Ore-Forming Systems (from Fluid Inclusion Studies) // *Geology of Ore Deposits*. – 1998. – Vol. 40, no. 6. – P. 457–470.

30. **Rudnev S. N., Kiseleva V. Y., Serov P. A.** Vendian-Early Paleozoic granitoid magmatism in Eastern Tuva // *Russian Geology and Geophysics*. – 2015. – Vol. 56, no. 9. – P. 1232–1255.

31. **Wilkinson J. J.** Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits // *Lithos*. – 2001. – Vol. 55. – P. 229–272.

REFERENCES

1. Borisenko A.S. [Cryometric analysis of the salt composition of solutions of gas-liquid inclusions in minerals]. *Ispol'zovanie metodov termobarogeokhimi pri poiskakh i izuchenii rudnykh mestorozhdeniy* [The use of methods of thermobarogeochemistry in searching for and studying ore deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1982, pp. 37–46. (In Russ.).

2. Gamyranin G.N., Goncharov V.I., Goryachev N.A. [Gold-rare-metal deposits of the North-East of Russia]. *Tikhookeanskaya geologiya*, 1998, vol. 17, no. 3, pp. 94–103. (In Russ.).

3. Goryachev N.A., Gamyranin G.N. [Gold-bismuth (gold-rare-metal) deposits of the North-East of Russia:



types and prospects of industrial development]. *Zolotorudnyye mestorozhdeniya Vostoka Rossii* [Gold deposits of the East of Russia]. Magadan, SVNTs DVO RAN Publ., 2006, pp. 50–62. (In Russ.).

4. Kuzhuget R.V., Prokopiev I.R., Redina A.A., Ankusheva N.N. [Barsuchiy gold-sulfide-quartz deposit (Northeast Tuva): mineralogical and geochemical peculiarities and formation conditions] *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2019, vol. 330, no. 10, pp. 181–196. (In Russ.).

5. Kilchichakov K.M., Tokunov V.F., Plekhanov A.I. *Rezultaty otsenki Tardanskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya i poiskov zolota v bassejne r. Bay-Syut* [Assessment results of the Tardan gold deposit and gold prospecting in the Bai Suit River basin]. Kyzyl, TGRE Publ., 1967. 150 p. (In Russ.).

6. Kuzhuget R.V., Oorzhak Sh.N. [Gold-bearing mineral associations of the Tardan hydrothermal deposit (Eastern Tuva)]. *Regional'naya ekonomika: tekhnologii, ekonomika, ekologiya i infrastruktura: Materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (18–20.10.2017, Kyzyl, Russia)* [Regional economy: technology, economics, ecology and infrastructure: Materials of the II Intern. scientific-practical conf. (October 18–20, 2017, Kyzyl, Russia)]. Kyzyl, TuvIKOPR SB RAS Publ., 2017, pp. 181–186. (In Russ.).

7. Ozerova N. A. *Rtut' i endogennoe rudoobrazovanie* [Mercury and endogenous ore formation]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 231 p. (In Russ.).

8. Petrovskaya N.V. *Samorodnoe zoloto* [Native gold]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 348 p. (In Russ.).

9. Redder E. *Flyuidnye vklyucheniya v mineralakh* [Fluid inclusions in minerals]. Moscow, Mir Publ., 1978, vol. 1. 360 p. (In Russ.).

10. Korobeynikov A.F., Ananyev Yu.S., Gusev A.I., Voroshilov V.G. *Rudno-metasomaticheskaya i geokhimicheskaya zonal'nost' zolotorudnykh poley i mestorozhdeniy skladchatykh poyasov Sibiri* [Ore-metasomatic and geochemical zoning of gold ore fields and deposits of the folded belts of Siberia]. Tomsk, TPU Publ., 2013. 458 p. (In Russ.).

11. Spiridonov E.M. [Volcanogenic epithermal, mesothermal, hypothermal (xenothermal) gold deposits and their mineral-geochemical features]. *Vulkanizm i geodinamika. T. 2* [Volcanism and geodynamics. Vol. 2]. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2009, pp. 814–817. (In Russ.).

12. Spiridonov E.M. [A review of gold mineralogy in the leading types of Au mineralization]. *Zoloto Kol'skogo poluostrava i sopredel'nykh regionov: tr. Vseros. (s mezhdunar. uchastiem) nauch. konf., posvyashch. 80-letiyu Kol'skogo NTs RAN* [Gold of the Kola Peninsula and adjacent regions: Proc. All-Russian (with international participation) scientific Conf. 80th anniversary of the Kola Science Center RAS]. Apatity, K&M Publishing House, 2010, pp. 143–171. (In Russ.).

13. Spiridonov E.M. [Typomorphic features of fahl ores of some plutogenic, volcanogenic, telethermal

gold deposits]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy – Geology of ore deposits*, 1987, vol. 29, no. 6, pp. 83–91. (In Russ.).

14. Stepanov V.A., Moiseenko V.G. *Geologiya zolota, serebra i rtuti. Ch. 1. Zoloto-rtutnye mestorozhdeniya* [Gold, silver and mercury geology. Part 1. Gold-mercury deposits]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 1993. 227 p. (In Russ.).

15. Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: I. Thermochemical data and calculated equilibria. *Economic Geology*, 1988. vol. 83, pp. 377–394.

16. Barton P.B., Skinner B.J. Sulfide mineral stabilities. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* / ed. by H. L. Barnes. New York, John Wiley and Sons, 1979. pp. 278–403.

17. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H₂O–NaCl fluid inclusions. *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Pontignana-Siena, 1994, pp. 117–130.

18. Dobrovolskaya M.G., Razin M.V., Prokofiev V. Yu. New data on the mineral composition of the ores of the Lebedinoye gold deposit and the Joyous ore occurrence (Central Aldan, Russia). *New Data on Minerals*, 2015, vol. 50, pp. 38–49.

19. Lyubimtseva N.G., Bortnikov N.S., Borisovsky S.E., et al. Fahlore and Sphalerite from the Darasun Gold Deposit in the Eastern Transbaikalian Region, Russia: I. Mineral Assemblages and Intergrowths, Chemical Composition, and its Evolution. *Geology of Ore Deposits*, 2018, vol. 60, no. 2, pp. 93–120.

20. Garmaev B.L., Damdinov B.B., Mironov A.G. Pogradichnoe Au-Bi occurrence, Eastern Sayan: Composition and link to magmatism. *Geology of Ore Deposits*, 2013, vol. 55, no. 6, pp. 445–466.

21. Gaskov I.V. New data on the correlation of skarn and gold mineralization at the Tardan deposit (northeastern Tuva). *Russian Geology and Geophysics*, 2008, vol. 49, no. 12, pp. 923–931.

22. Kuzhuget R.V., Zaikov V.V., Lebedev V.I., Mongush A.A. Gold mineralization of the Khaak-Sair gold-quartz ore occurrence in listwanites (western Tuva). *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, pp. 1332–1348.

23. Damdinov B.B., Garmaev B.L., Mironov A.G., Dashinimaev Z.B. Gold-bismuth mineralization in the southeastern part of the Eastern Sayan. *Doklady Earth Sciences*, 2009, vol. 425, no. 2, pp. 256–259.

24. Goryachev N.A., Newberry R.J., Gamyagin G.N., et al. Granitoid-related gold lode deposits over the Northern Pacific marginal areas. *Metallogeny of the Pacific Northwest. Tectonics, Magmatism and Metallogeny of active continental margins. Proceedings of the Interim IAGOD Conference (1–20 September, 2004)*. Vladivostok: Dalnauka Publ., 2004, pp. 199–201.

25. Vikenteva O.V., Prokofiev V.Yu., Gamyagin G.N., et al. Intrusion-related gold-bismuth deposits of North-East Russia: PTX parameters and sources of hydro-



thermal fluids. *Ore Geology Reviews*, 2018. vol. 100, pp. 240–259.

26. Lang J.R., Baker T. Intrusion related gold systems: the present level of understanding. *Mineralium Deposita*, 2001, vol. 36, pp. 477–489.

27. Spiridonov E., Maleev M., Kovachev V., et al. Minerals of Fahlore group: Indicators of Ore Genesis. *Bulgarian Geological Society, 80th Anniversary. Proceedings of the Jubilee International Conference*. Sofia, 2005, pp. 79–82.

28. Palyanova, G.A., Kokh K.A., Seryotkin Yu.V. Formation of gold-silver sulfides and native gold in Fe –

Ag – Au – S system. *Russian Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, no. 4, pp. 347–355.

29. Prokofiev V. Yu. Types of Hydrothermal Ore-Forming Systems (from Fluid Inclusion Studies). *Geology of Ore Deposits*, 1998, vol. 40, no. 6, pp. 457–470.

30. Rudnev S.N., Kiseleva V.Y., Serov P.A. Vendian-Early Paleozoic granitoid magmatism in Eastern Tuva. *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, no. 9, pp. 1232–1255.

31. Wilkinson J.J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 2001, vol. 55, pp. 229–272.

© П. В. Кужугет, Н. Н. Анкушева, А. А. Редина,
И. Р. Прокопьев, Ю. В. Бутанаев, Х. Х. Ондар, 2019