
**МИНЕРАЛЫ
И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ**

**УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
БОДОРНО, САХА (ЯКУТИЯ)**

© 2020 г. д. чл. В. Н. Кардашевская¹, *, д. чл. Г. С. Анисимова¹, д. чл. Е. В. Баданина²,
В. Н. Бочаров², д. чл. Н. И. Пономарева²

¹*Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН
пр. Ленина, 39, Якутск, Республика Саха (Якутия), 677980 Россия*

²*Санкт-Петербургский государственный университет
Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034 Россия*

**e-mail: kardashevskaya92@mail.ru*

Поступила в редакцию 18.11.2019 г.

После доработки 23.04.2020 г.

Принята к публикации 23.04.2020 г.

Статья посвящена оценке условий образования малоизученного золоторудного месторождения Бодорно, расположенного на юго-востоке Республики Саха (Якутия), на территории Алдано-Станового щита. Изучение флюидных включений в кварце из золото-полиметаллической ассоциации месторождения показало, что ее формирование происходило при температуре 270–300 °С и давлении 0.8–1 кбар, при участии газовой фазы состава: CO₂ 68%, CH₄ 32%. Изучение флюидных включений в кварце из золото-теллур-висмут-кварцевой ассоциации позволило установить, что параметры минералообразования в этом случае соответствовали 145–200 °С, 0.4–0.6 кбар при составе газовой фазы: CO₂ 95%, N₂ 3%, CH₄ 2%.

Ключевые слова: золоторудное месторождение, кварц, флюидные включения, условия минералообразования

DOI: 10.31857/S0869605520030028

Месторождение Бодорно расположено на юго-востоке Алдано-Станового щита, который с начала 20-го века является одним из древних регионов золотодобычи, где сконцентрированы различные по формационному типу месторождения и проявления золота (Бойцов и др., 2010; Ветлужских и др., 2002; Хомич, Борискина, 2010). На сегодняшний день на территории щита известно около 50 перспективных золотоносных районов. Большинство исследователей связывают их с мезозойским этапом тектономагматической активизации. Здесь выделяют 2 крупные золотоносные провинции: Алданскую и Становую (Моисеенко, Эйриш, 1996; Молчанов и др., 2017).

Золотое оруденение Алданской провинции связано с тремя структурными уровнями: верхней частью фундамента, нижней частью разреза венд-кембрийского карбонатного чехла и подошвой терригенной юры (Эйриш, 2013). Большинство крупных золоторудных проявлений в Алданской провинции расположено на территории Центрально-Алданского района (ЦАР), который характеризуется хорошей изученностью и экономической рентабельностью. Среди наиболее известных месторождений ЦАР – Куранахское, Лебединское и Эльконское, относящиеся соответственно к золоторудному, золотоурановому и молибденовому типам оруденения.

Становая провинция включает многочисленные золоторудные месторождения, приуроченные к двум геолого-структурным этапам – кристаллическому фундаменту

и нижним частям вулканических построек (Эйриш, 2013). Наиболее известны месторождения Колчеданный Утес, Бамское, Кировское, Ледяное, Золотая Гора с рудами золото-сульфидной и золото-кварцевой формации.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Золоторудное месторождение Бодороно находится в Нерюнгринском районе (Южная Якутия), в 300 км к юго-востоку от г. Нерюнгри и в 30 км от ж/д станции Улак-Эльга (рис. 1) Оно локализовано в Становой золотоносной провинции Алдано-Станового щита, где также находятся такие известные месторождения, как Золотая Гора и Колчеданный Утес, относящиеся к сопредельной территории Приамурья (Моисеенко, Эйриш, 1996; Мельников и др., 2017).

Месторождение расположено в Верхне-Алгоминском золотоносном районе на стыке Тыркандинской тектонической зоны и зоны Станового разлома (Анисимова, Соколов, 2014а). Вмещающие породы представлены комплексом архейских зеленокаменных образований – переслаивающихся основных кристаллических сланцев и гнейсов, диопсидовых кальцифиров, гранулитов. Породы смяты в сжатые изоклинальные складки северо-западного простирания и прорваны многочисленными раннемеловыми дайками долеритов, диоритовых порфиритов, лампрофиров. Структурный план месторождения определяется системой разрывных нарушений субсогласного северо-западного простирания (310–350°). В зонах разломов вмещающие породы милонитизированы и рассланцованы с образованием тектонитов – кварц-хлоритовых, хлорит-актинолитовых, серицит-хлоритовых тектоносланцев, вмещающих пучки разлинзованных даек, останцы метаморфических пород, а также хлорит-кварцевые и карбонат-хлорит-кварцевые жилы. Наибольшее сгущение даек и кварцевых жил наблюдается на участках пересечения тектонитов с плоскостями взбросов. Мощность даек составляет 0.5–1 м, протяженность обычно не превышает первых десятков мет-

Рис. 1. Географическое положение (а) и геологическая карта (б) месторождения Бодороно (по Е.П. Соколову и Е.П. Тихонову, 2012 г., с изменениями и дополнениями). I – месторождение Бодороно, II – железнодорожная станция Эльга, III – железная дорога Улак-Эльга, IV – геологические базы, V – автозимник, VI – территория работ Верхне-Алгоминской партии. 1 – голоценовые аллювиальные отложения русел, низкой и высокой пойм I надпойменной террасы; 2 – верхнеплейстоцен–голоценовые делювиально-солифлюкционные, пролювиальные отложения; верхнеплейстоцен–голоценовые аллювиальные и флювиогляциальные отложения I и II надпойменной террас, верхнеплейстоценовые аллювиальные и флювиогляциальные отложения II и III надпойменной террас; 3 – финальные магматиты; 4 – тыркандинский (бодоронинский) комплекс умеренно щелочных и щелочных метадиабазов; 5 – учурский метапироксенит-диабазовый комплекс; 6 – гранулитогнейсовый цоколь (желтулинская серия нерасчлененная, переслаивание гнейсов и мраморов), 7 – меланократовый фундамент (курультино-гонамская толща); 8 – зона меланжа; 9–11 – интрузивные образования: 9 – кварцевые порфиры, монцодиорит-порфиры, гранодиорит-порфиры, 10 – диорит-порфириты, спессартиты, 11 – долериты, долеритовые порфириты; 12 – геологические границы: достоверные (а), предполагаемые (б); 13–19 – разрывные нарушения: 13–15 – взбросо-надвиги и взбросы: 13 – главные, 14 – второстепенные, 15 – рудоконтролирующие; 16–18 – сдвиги и сдвиго-взбросы: 16 – главные, 17 – второстепенные, 18 – рудоконтролирующие, 19 – скрытые под вышележащими отложениями; 20 – кварцевые жилы; 21 – рудные зоны; 22 – контур обработки россыпей; 23 – аллювиальная долинная россыпь золота с оцененными прогнозными ресурсами руч. Левый Агинок.

Fig. 1. The location (a) and geological map (b) of the Bodorono deposit (after E.P. Sokolov, E.P. Tikhonov, 2012, with simplification and addition).

ров. Падение даек, как правило, крутое. По морфологии они представляют собой четковидные и линзовидные образования. Взаимоотношение даек и жил неоднозначно, отмечаются случаи пересечения жил дайками и наоборот.

Рудные тела представлены жильными образованиями – линзовидными, четковидными и бочковидными жилами и прожилками. Полого и крутопадающие жилы имеют северо-восточное простирание ($40\text{--}60^\circ$), согласное и секущее залегание. Мощность их составляет $0.1\text{--}1.2$ м, протяженность – до 2 км. Жилы сгруппированы в зоны кварцевого прожилкования. В общей сложности выделено 3 рудные зоны.

Рудная зона 1 расположена в верховье руч. Левое Бодороно (высота над уровнем моря около 1600 м). Зона имеет северо-восточное простирание ($10\text{--}20^\circ$) и включает два рудных тела, представленных зонами кварцевого прожилкования субширотного простирания. Мощность зон кварцевого прожилкования – 10 м, отдельных прожилков – $0.1\text{--}1.0$ м. Протяженность – до 2 км. Среднее содержание золота – 21 г/т.

Рудная зона 2 находится в верхнем течении руч. Бодороно. Ее простирание также северо-восточное ($10\text{--}20^\circ$). Здесь вскрыты два рудных тела, представленных зонами кварцевого прожилкования. Мощность рудных тел колеблется от $0.25\text{--}1.2$ м, протяженность составляет около 2 км. Среднее содержание золота – 14 г/т.

Рудная зона 3 отмечена на руч. Левый Агинок (абсолютная отметка 1450 м). Простирание зоны северо-восточное ($50\text{--}60^\circ$). Здесь также установлено два рудных тела, представляющих собой пологозалегающие линзовидные кварцевые жилы протяженностью 1 км. Их мощность – $0.1\text{--}0.4$ м. Среднее содержание золота – 6 г/т.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Химический состав минералов изучался с помощью электронного сканирующего микроскопа SEM-501 Hitachi S-3400N, оснащенного энергодисперсионным спектрометром Oxford X-max 20 (Ресурсный Центр СПбГУ “Геомодель”, аналитики Н.С. Влащенко, В.В. Шиловских, условия съемки: 20 кВ и 1.5 нА) и аналогичного микроскопа JEOL JSM-6480LV с энергетическим спектрометром фирмы OXFORD (ИГАБМ СО РАН, аналитики С.К. Попова, Н.В. Христофорова, условия съемки: напряжение 20 кВ, ток 1.7 нА, аналитические линии: $\text{Bi} - \text{M}_\alpha$; $\text{Te}, \text{Pb}, \text{Ag}, \text{Sb}, \text{S} - \text{L}_\alpha$; $\text{Cu}, \text{S} - \text{K}_\alpha$; эталоны: $\text{CuSbS} - \text{Cu}, \text{Sb}, \text{S}$; $\text{Bi}_2\text{S}_3 - \text{Bi}$; $\text{HgTe} - \text{Hg}, \text{Te}$; $\text{FeAsS} - \text{As}$; $\text{Ag} - 100\%$; аналитики С.К. Попова, Н.В. Христофорова).

Термобарогеохимические исследования проводились на кафедре минералогии СПбГУ в термокамере, установленной на микроскопе ПОЛАМ Р-211, а также в РЦ “Геомодель” на оптическом микроскопе Olympus BX53F в комплекте с термостоликом THMSG-600-ес с системой охлаждения образца жидким азотом LNP95 в диапазоне температур от -196 до $+600$ °С. Точность измерений температуры составляла ± 0.1 °С в интервале температур от -20 до $+20$ °С. Состав солей во флюидных включениях оценивался по температуре эвтектики (Борисенко, 1977). Концентрация солей рассчитывалась по температуре плавления льда на основе данных для системы $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ (Vodnar, Vityk, 1994). Давление оценивалось по пересечению изотермы и изохоры (Калюжный, 1982) для сингенетических газово-жидких и углекислотно-водных включений. Температура и давление для золото-полиметаллической ассоциации была оценена по геотермобарометру Куллеруда (Kullerud, 1953).

Состав газовой фазы флюидных включений в кварцах анализировался на рамановском спектрометре Horiba LabRam HR800 Ar-лазер с длиной волны 514.5 и 488 нм, время экспозиции 3 с, число повторений – 5, мощность лазера – 50 мВт, увеличение микроскопа – 50.

Таблица 1. Минеральный состав руд месторождения Бодорона
Table 1. Mineral composition of ores in the Bodorono gold deposit

Распространенность	Минералы		
	Гипогенные рудные	Гипогенные нерудные	Гипергенные
Главные	Пирит, пирротин, галенит, сфалерит	Кварц	
Второстепенные	Гематит, магнетит, халькопирит, висмутин, лиллианит, самородное золото	Анкерит, кальцит, сидерит, апатит	Гётит, церуссит
Редкие	Теллуровисмутит, тетрадимит, хедлейит, пильзенит, ильменит, глауколот, кобальтин	Фторапатит, монацит, циркон	Англезит, смирнит

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ РУД И МИНЕРАЛЬНЫЕ АССОЦИАЦИИ

Рудные тела сложены в основном кварцем. Из нерудных минералов в жилах установлены карбонаты, апатит, фторапатит, фосфаты редкоземельных элементов, циркон (табл. 1). Среди рудных минералов преобладают пирит, пирротин, галенит и сфалерит. Реже отмечаются халькопирит, гематит, магнетит, висмутин, лиллианит, самородное золото. Значительно реже встречаются теллуровисмутит, ильменит, самородный висмут, тетрадимит, хедлейит, пильзенит, глауколот, кобальтин. Рудные минералы в жилах распределены неравномерно, их содержание не превышает 1–3%. Гипергенные минералы представлены церусситом, англезитом, гётитом и смирнитом.

Детальное изучение текстурно-структурных особенностей, взаимоотношений и пересечений минералов в жилах позволило выделить три минеральных ассоциации: 1) пирит-пирротин-кварцевую, 2) золото-галенит-сфалерит-кварцевую (золото-полиметаллическую) и 3) золото-теллур-висмут-кварцевую (Анисимова, Соколов, 2014а, 2014б). Преобладающими текстурами руд являются вкрапленная, прожилковая, прожилково-вкрапленная и трещиноватая (Анисимова, Соколов, 2014б).

Пирит-пирротин-кварцевая ассоциация характерна для руд с прожилково-гнездовой текстурой (рис. 2, а). Преобладающим минералом является пирит, встречающийся в виде идиоморфных кристаллов в кварце. Пирротин образует зерна неправильной формы и нередко находится в сростании с пиритом. Реже в составе этой ассоциации отмечаются халькопирит, глауколот и кобальтин. Самородное золото представлено выделениями округлой формы в кварце.

Золото-галенит-сфалерит-кварцевая (золото-полиметаллическая) ассоциация широко распространена в кварцевых жилах (рис. 2, б, в). Преобладающими текстурами руд, сложенных этой ассоциацией, являются прожилково-вкрапленные и прожилково-гнездовые. Кварц массивный, среднекристаллический. Галенит и сфалерит – мелкозернистые. Золото образует мелкие включения в галените в ассоциации со сфалеритом. Изредка встречается халькопирит в виде аллотриоморфных зерен.

Золото-теллур-висмут-кварцевая ассоциация широко распространена в рудной зоне 2 (рис. 2, д–е). Характерные текстуры руд, сложенных этой ассоциацией, – прожилково-

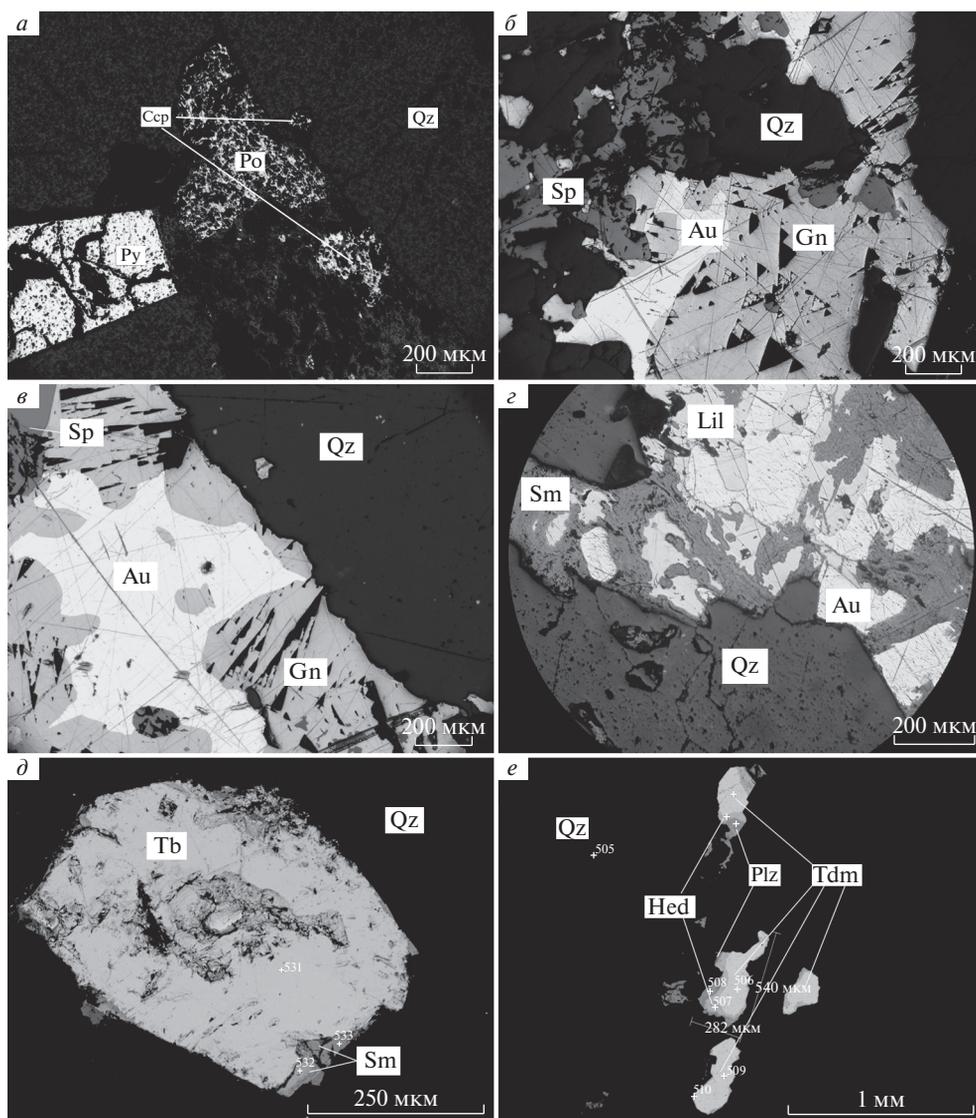


Рис. 2. Минеральные ассоциации месторождения Бодороно. *a* – пирит-пирротин-кварцевая, *б-в* – золото-полиметаллическая; *г-е* – золото-теллур-висмут-кварцевая. Gn – галенит, Au – золото, Qz – кварц, Lil – лиллианит, Plz – пильзенит, Py – пирит, Po – пирротин, Sm – смирнит, Sp – сфалерит, Tb – теллуrowисмутит, Tdm – тетрадимит, Ccp – халькопирит, Hed – хедлейит.

Fig. 2. Mineral assemblages of the Bodorono deposit (*a* – pyrite-pyrrhotite-quartz, *б-в* – gold-polymetallic, *г-е* – gold-tellurium-bismuth-quartz).

во-вкрапленные. Типичные минералы – теллуrowисмутит, тетрадимит, висмутин, хедлейит, пильзенит, смирнит, лиллианит. Кроме того, здесь установлены галенит и самородный висмут. В данной ассоциации золото встречается в виде округлых и гипидиоморфных выделений в кварце, а также в тесной ассоциации с висмутовыми минералами.

В рудах выделено три разновидности кварца. Кварц-I из пирит-пирротин-кварцевой ассоциации молочно-белый, халцедоновидный, массивный. Кварц-II из полиметаллической ассоциации серо-белый, среднезернистый, прозрачный. Кварц-III из золото-теллур-висмутовой ассоциации молочно-белый, халцедоновидный, тонкозернистый, сахаровидный.

Карбонаты представлены анкеритом, кальцитом, доломитом и сидеритом. Анкерит образует округлые выделения в кварце, встречается в интерстициях зерен фторапатита и в сростании с гётитом. Кальцит наблюдается в виде ксеноморфных зерен и часто окрашен за счет тонкодисперсной примеси оксидов железа. Доломит образует единичные натечные формы вокруг агрегатов кальцита. Сидерит отмечен в виде неправильных по форме зерен, приуроченных к интерстициям зерен пирита.

Пирит встречается во всех минеральных ассоциациях в виде идиоморфных кристаллов. Представлен тремя разновидностями. Пирит-I из пирит-пирротин-кварцевой ассоциации часто корродирован, катаклазирован, наблюдается в виде метакристаллов кубического габитуса размером от 10 мкм до 2.5 мм. По нему развивается гётит (рис. 2, а). Содержит примеси Ni (2.48 мас. %) и As (0.5 мас. %). Пирит-II из золото-полиметаллической ассоциации отмечается в виде пентагондодекаэдрических и кубических кристаллов, а также образует прожилки. Примеси в нем не установлены. Пирит-III из золото-теллур-висмут-кварцевой ассоциации характеризуется прожилковыми формами выделения. Примеси в двух последних разновидностях пирита не установлены.

Пирротин представлен двумя разновидностями. Пирротин-I из пирит-пирротин-кварцевой ассоциации встречается в форме идиоморфных и аллотриоморфных выделений размером от 50 мкм до 1 мм (рис. 2, а). Часто он встречается в сростании с пиритом, реже с халькопиритом. Иногда ассоциирует с кобальтином. Пирротин-II из золото-теллур-висмутовой ассоциации образует ксеноморфные агрегаты.

Галенит также представлен двумя разновидностями. Галенит-I находится в сростании со сфалеритом и пиритом (рис. 2, б, в), содержит включения самородного золота. Вокруг зерен галенита развиваются каемки англезита и церуссита. Галенит-II ассоциирует с висмутовыми минералами в кварцевой жиле рудной зоны 2, сростается с анкеритом. Содержит примесь Se (до 3.44 мас. %).

Сфалерит образует крупные (до 3 мм) выделения в кварце из золото-полиметаллической ассоциации (рис. 2, б, в). Форма зерен — изометричная, кубическая, округлая, местами прожилковидная. Часто сфалерит находится в тесном сростании с галенитом и самородным золотом. Содержит примеси Fe (7.53–8.65 мас. %) и Cd (1.59–2.17 мас. %).

Халькопирит наблюдается в виде среднезернистых агрегатов размером до 0.5 мм. Образует сростки с пиритом и пирротином. Часто катаклазирован. По нему развивается гётит, иногда зерна халькопирита окружены каемками глаукодота.

Глаукодот отмечен в виде ксеноморфных включений в пирите, реже находится в сростании с халькопиритом. Размер зерен этого минерала варьирует от 30 до 50 мкм. Глаукодот содержит примесь Ni (3.07–3.34 мас. %).

Кобальтин встречается в виде единичных зерен размером до 30 мкм в сростании с гётитом в кварце. Ассоциирует с пиритом и пирротином.

Самородный висмут образует ксеноморфные выделения в галените, замещая его. Мельчайшие включения самородного висмута отмечаются в катаклазированном висмутине. Реже наблюдаются удлиненные и ксеноморфные выделения этого минерала в хедлейите.

Таблица 2. Химический состав (мас. %) минералов висмута, теллура, селена и свинца месторождения Бодорона**Table 2.** Chemical composition (wt %) of minerals of Bi, Te, Se, and Pb in the Bodorono gold deposit

Минерал	Bi	Pb	Ag	Sb	Te	Se	S	Сумма	Кристаллохимическая формула
Хедлейит	80.14	—	—	—	19.71	—	—	99.85	$\text{Bi}_{2.14}\text{Te}_{0.86}$
Теллуровисмутит	51.67	—	—	—	47.70	—	—	99.37	$\text{Bi}_{1.97}\text{Te}_{3.03}$
Тетрадимит	59.32	—	—	—	35.84	—	4.84	100	$\text{Bi}_{1.98}\text{Te}_{1.97}\text{S}_{1.05}$
Висмутин	76.3	7.5	—	—	—	—	16.01	99.81	$\text{Bi}_{2.03}\text{Pb}_{0.20}\text{S}_{2.77}$
Se-содержащий галенит	—	81.97	—	—	—	3.41	19.83	99.55	$\text{Pb}_{0.75}\text{S}_{1.17}\text{Se}_{0.08}$
Лиллианит	32.98	47.82	3.62	1.02	—	—	15.16	100.61	$\text{Pb}_{2.81}\text{Bi}_{1.92}\text{Ag}_{0.41}\text{Sb}_{0.1}\text{S}_{5.76}$
	33.61	47.07	3.03	—	0.52	—	15.85	100.08	$\text{Pb}_{2.77}\text{Bi}_{1.96}\text{Ag}_{0.41}\text{Sb}_{0.1}\text{S}_{5.77}$
	32.47	47.66	2.99	1.48	—	—	15.17	99.77	$\text{Pb}_{2.82}\text{Bi}_{1.9}\text{Ag}_{0.34}\text{Sb}_{0.1}\text{S}_{5.8}$

Примечание. Анализы выполнены в сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6480LV.

В рудах установлены четыре минерала группы тетрадимита. Тетрадимит образует зерна размером до 0.5 мм, угловатые по форме агрегаты в кварце в ассоциации с хедлейитом и пильзенитом (рис. 2, е). Последний окаймляет сростки тетрадимита и хедлейита. Теллуровисмутит образует идиоморфные пентагондодекаэдрические агрегаты, реже мелкие выделения в кварце размером до 0.5 мм (рис. 2, д). По нему развиваются псевдоморфозы хедлейита. Хедлейит встречается в кварце в сростках с тетрадимитом и теллуровисмутитом, в виде каемок обрамляет тетрадимит (рис. 2, д). Пильзенит наблюдается в сростании с хедлейитом и теллуровисмутитом (рис. 2, д).

Лиллианит образует аллотриоморфные выделения в кварце. Часто по нему развиваются смирнит и самородное золото (рис. 2, з). Размер индивидов достигает 1.5 мм. Содержит примеси Ag (3.03 мас. %), Sb (1.48 мас. %) и Te (0.52 мас. %) (табл. 2).

Висмутин наблюдается в виде раздробленных кристаллов и округлых выделений размером до 1 мкм с многочисленными мельчайшими включениями самородного висмута. Ассоциирован со сфалеритом и хедлейитом, образует включения в пирите. Содержит примеси Pb (до 8.58 мас. %), Sb (до 2.74 мас. %) и Se (3.59 мас. %).

Гипергенные минералы. Церуссит образует каймы вокруг зерен галенита и заполняет трещины в нем. Размер индивидов до 30 мкм. Англезит встречается в виде ксеноморфных зерен размером до 0.5 мм. Гематит и магнетит наблюдаются главным образом в составе пирит-пирротин-кварцевой и золото-полиметаллической ассоциаций, где образуют псевдоморфозы по пириту. Смирнит Bi_2TeO_5 обнаружен в виде фестончатых сростков с теллуровисмутитом, лиллианитом и самородным золотом (рис. 2, з, д). Размер его выделений — до 0.4 мм.

Таблица 3. Результаты термо- и криометрических исследований флюидных включений в кварце из двух продуктивных ассоциаций месторождения Бодорона
Table 3. Results of thermo- and cryometry studies of fluid inclusions in quartz from two productive assemblages of the Bodorono gold deposit

Номер образца и тип включения	<i>n</i>	$T_{\text{гом}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{эвт}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{плавл льда}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{гом CO}_2\text{ж}}, ^\circ\text{C}$	Соленость, мас. % экв. NaCl	$d, \text{г/см}^3$	$P, \text{кбар}$
Золото-полиметаллическая ассоциация								
001-15 (II)	18	270–300	+20.5... –23.8	–1.5–3	29–30	2.6–5.0	0.63– 0.60	0.8–1
009/1 (II)	15							
017/1 (II)	22							
Золото-теллур-висмут-кварцевая ассоциация								
1-A (II)	17							
1-K-16 (II)	11							
052/1 (II)	14	145–200	–	–	28–29	–	0.65– 0.63	0.4–0.6

Самородное золото входит в состав двух продуктивных минеральных ассоциаций. В полиметаллической ассоциации форма его выделений неправильная, комковито-угловатая. Размер частиц варьирует от 10 мкм до 3 мм. Золото наблюдается в сростании с галенитом и сфалеритом (рис. 2, б, в). Содержит примесь серебра (12.1–14.8 мас. %). Характеризуется средней пробностью 857‰. В теллур-висмут-кварцевой ассоциации самородное золото встречается в кварце в изометричных выделений размером (в среднем) 150 мкм. Иногда наблюдается в сростании с висмутином, хедлейитом, лиллианитом, теллуrowисмутитом (рис. 2, г). Более крупные выделения самородного золота встречаются в ассоциации с лиллианитом. Его пробность изменяется в широких пределах (663–993‰).

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕРМОБАРОГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для оценки образования сульфидов был использован геотермометр Куллеруда (Kullerud, 1953; Пономарева, 2014). Как известно, экспериментальные работы по смеси пирротина и сфалерита позволили Г. Куллеруду установить, что содержание железа в сфалерите, находящемся в равновесии с пирротинном, тем больше, чем выше температура его образования. Исследователем были предложены диаграммы, позволяющие оценить температуру и давление равновесия пирротин–сфалерита в зависимости от содержания пирротина в последнем при условии, что содержание элементов-примесей (Mn, Cd, Cu) в сфалерите не превышает 2 мас. %. Эффективность этого геотермометра была подтверждена П. Бартоном (Геохимия..., 1970).

По данным микронзондового анализа содержание примеси кадмия в изученном сфалерите не превышает 1.74 мас. %. Содержание FeS в нем составляет 39.2 мол. %. Рассчитанные оценки температуры и давления равновесия пирротина и сфалерита в золото-полиметаллической ассоциации равны 300 °C, 1 кбар.

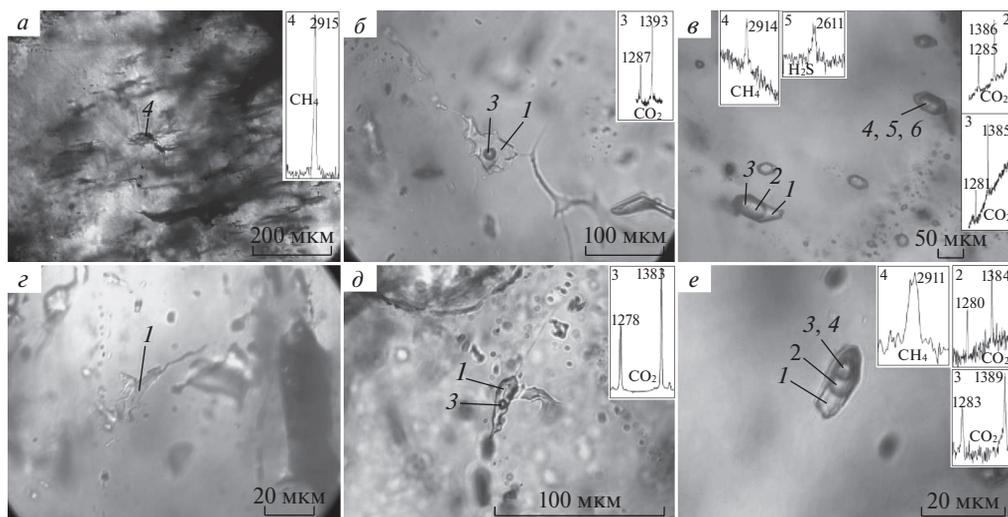


Рис. 3. Типы первичных флюидных включений в кварце из золото-полиметаллической (а–в) и золото-теллур-висмут-кварцевой (з–е) ассоциаций: а, з – однофазные; б, д – двухфазные, в, е – трехфазные. На врезках – пики рамановских спектров (Frezotti et al., 2012): 1 – H₂O, 2 – CO_{2ж}, 3 – CO_{2г}, 4 – CH₄, 5 – H₂S, 6 – N₂.

Fig. 3. Types of primary fluid inclusions in quartz from gold-polymetallic (a–в) and gold-tellurium-bismuth-quartz (з–е) assemblages: а, з – homogeneous, б, д – bi-phase, в, е – three-phase. Peaks in the boxes are Raman spectra (Frezotti et al., 2012): 1 – H₂O, 2 – CO_{2(lig)}; 3 – CO_{2(gas)}, 4 – CH₄, 5 – H₂S, 6 – N₂.

Микротермометрические исследования (определение морфологии и размеров флюидных включений, фазовых соотношений во включениях, составов газов) проводились в полированных пластинках кварца толщиной 0.3–0.5 мм из двух продуктивных ассоциаций. Флюидные включения были разделены на первичные и вторичные. Первичные включения расположены по зонам роста кварца и равномерно распределены в объеме зерен. Часто они обладают формой отрицательной огранки. Их размер изменяется от 5 мкм до 1 мм. Вторичные включения, как правило, очень мелкие и приурочены к трещинам в зернах кварца.

После оптических наблюдений были проведены эксперименты по крио- и термометрии первичных флюидных включений в термокамере. Данные экспериментов приведены в табл. 3.

По фазовому составу при комнатной температуре первичные включения подразделены на три типа (Реддер, 1987). К I типу относятся однофазные включения – преимущественно газовые, содержащие метан, либо заполненные водяным паром. К II типу относятся двухфазные – газовой-жидкие включения, в которых присутствуют жидкая вода и газообразная CO₂. III тип представлен трехфазными углекислотно-водными включениями, содержащими жидкую воду (H₂O_ж), жидкую углекислоту (CO_{2ж}) и газообразную углекислоту (CO_{2газ}) с примесями газообразных CH₄, H₂S и N₂.

Поскольку кварц из пирит-пирротин-кварцевой ассоциации практически непрозрачен, флюидные включения в нем не удалось обнаружить. В кварце из золото-полиметаллической ассоциации установлено три типа включений.

Таблица 4. Состав газовой фазы флюидных включений в кварце из двух продуктивных ассоциаций месторождения Бодороно по данным рамановской спектроскопии
Table 4. The composition of gas phase of fluid inclusions in quartz from two productive assemblages of the Bodorono gold deposit according to Raman-spectroscopy

Номер образца	Тип включения	Содержание, мол. %			
		CO ₂	CH ₄	H ₂ S	N ₂
Золото-полиметаллическая ассоциация					
001-15-1	I	0	100	0	0
001-15-2	III	68.4	31.6	0	0
001-15-3	III	68.1	31.9	0	0
009/1-1	III	67.9	32.1	0	0
009/1-2	III	68.9	31.1	0	0
017/1-1	I	0	100	0	0
017/1-2	III	68	31.7	0.3	0
Золото-теллур-висмут-кварцевая ассоциация					
1-A-1	III	95.2	1.9	0	2.9
1-A-2	III	95.7	1.7	0	2.6
1-K-16	III	97.1	2.9	0	0
052/1	III	97.4	2.6	0	0

I тип – однофазные существенно газовые размером от 10 до 300 мкм, чаще всего неправильной формы (рис. 3, а). Методом рамановской спектроскопии установлено, что включения содержат CH₄.

II тип – двухфазные газовой-жидкие (ГЖВ), в которых газовый пузырек занимает 20% от общего объема (рис. 3, б). Они имеют неправильные, угловатые и округлые формы. Их размер изменяется в пределах 20–100 мкм. Температура гомогенизации в жидкую фазу составляет 270–300 °С. Во флюидных включениях содержатся хлориды Na и K, температуры эвтектики изменяются от –20.5 до –23.8 °С. Температура плавления льда варьирует от –1.5 до –3 °С, что соответствует концентрации солей 2.6–5.0 мас. % экв. NaCl. Включения содержат воду и газовую фазу (CO₂).

III тип – трехфазные углекислотно-водные, в которых H₂O_ж занимает 25%, CO_{2ж} – более 70%, CO_{2газ} – до 15% от общего объема вакуоли (рис. 3, в). Включения обладают формой отрицательной огранки, реже – округлой формой. Их размер – до 1 мм. Температура гомогенизации жидкой CO₂ в газ составляет 29–30 °С. Плотность жидкой CO₂, оцененная по таблице Е. Амага (Пизнюр, 1983), составляет 0.60–0.63 г/см³. Давление, определенное по методу В.А. Калюжного (1982), равно 0.8–1 кбар. По данным рамановской спектроскопии в некоторых флюидных включениях в газовой фазе отмечаются примеси CH₄ и H₂S. Состав газовой фазы (мол. %): CO₂ 68.4, CH₄ – 31.6 (табл. 4).

В кварце из золото-теллур-висмут-кварцевой ассоциации обнаружено три типа включений:

I тип – однофазные существенно газовые размером от 5 до 100 мкм неправильной, угловатой формы (рис. 3, *з*).

II тип – двухфазные газовой-жидкие включения, по данным рамановской спектроскопии содержат воду и газообразную CO_2 (рис. 3, *д*). Включения имеют размер от 10 до 100 мкм. Они характеризуются неправильной и вытянутой формой. Температура их гомогенизации в жидкую фазу варьирует от 145 до 200 °С. Температуру эвтектики и плавления льда оценить не удалось.

III тип – трехфазные углекислотно-водные включения, содержащие жидкую воду, жидкую и газообразную CO_2 , иногда с примесями CH_4 и N_2 (рис. 3, *е*). Включения имеют округлую, вытянутую и угловатую форму, размер – до 50 мкм. Температура гомогенизации жидкой углекислоты в газ составила 28–29 °С. Плотность жидкой CO_2 – 0.63–0.65 г/см³. Давление оценено в 0.4–0.6 кбар. Состав газообразной фазы (мол. %): CO_2 95.2, N_2 2.9, CH_4 1.9 (табл. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате выполненных исследований установлено, что на месторождении проявлена висмутовая и теллуридная минерализация эпиптермального генезиса, наложенная на полиметаллические руды. Самородное золото чаще всего встречается в галениите, входящем в состав полиметаллической ассоциации, имеет относительно низкую пробность (870‰) и образует более крупные выделения (размером до 3 мм). В составе теллур-висмут-кварцевой ассоциации золото образует зерна размером до 150 мкм и характеризуется более высокой пробностью (993 промилле). Образование выделенных минеральных ассоциаций (пирит-пирротин-кварцевой, золото-полиметаллической, золото-теллур-висмут-кварцевой), по-видимому, связано со стадийностью формирования месторождения.

Изучение флюидных включений в кварце из двух продуктивных минеральных ассоциаций позволило установить, что рудообразующие флюиды месторождения Бодорно характеризуются углекислотно-водным составом с примесями метана, азота и сероводорода. Для ранней пирит-пирротин-кварцевой ассоциации P – T параметры оценить не удалось. Можно предположить, что эта ассоциация образуется в условиях, близких к тем, которые установлены для более поздней золото-полиметаллической ассоциации. Температура минералообразования для этой ассоциации, оцененная методом гомогенизации флюидных включений, составляет 270–300 °С (табл. 3), с помощью геотермобарометра Куллера – 300 °С. Давление, определенное разными методами, также близко: по температуре гомогенизации флюидных включений оно составляет 0.8–1 кбар, по геотермобарометру Куллера – 1 кбар.

Формирование золото-полиметаллической ассоциации происходило из водно-солевых низконцентрированных (2.6–5.0 мас. % экв. NaCl) флюидов с примесями газообразных CO_2 и CH_4 при средних температурах (270–300 °С). Поздняя ассоциация образовалась при низких температурах (145–200 °С) и давлении до 0.4 кбар при участии газообразной CO_2 с незначительными примесями CH_4 и N_2 , что указывает на более окислительные условия минералообразования.

В настоящее время на территории Алдано-Станового щита не обнаружено месторождений с золото-теллур-висмутовым оруденением. В пределах Восточной Якутии сходные объекты проявлены в Верхоянском складчато-надвиговом поясе (Задерж-

нинское, Нежданинское). Эти полихронные комплексные месторождения расположены в Центральной и Северной структурных зонах Южно-Верхоянского синклиналии и сложены пермскими терригенными породами. В составе руд преобладают арсенипирит, пирит, самородный висмут, висмутин, хедлейит и сульфотеллуриды висмута. Предполагается их генетическая связь с гранитоидным магматизмом (Бортников и др., 2007; Кондратьева и др., 2018).

Присутствие в рудах месторождения минералов халько- и сидерофильных элементов (Te, Bi, Se, Sb, Ni, Co) дает основание классифицировать его как золото-редкометалльное. С учетом геологического строения месторождения (приуроченности кварцевых жил к выходам пород дайкового комплекса монцоидоритов), можно связать редкометалльную минерализацию с проявлением щелочно-базальтоидного магматизма.

Таким образом, полученная в результате проведенных исследований характеристика минералообразующей среды отражает условия формирования нового для Становой золотоносной провинции типа оруденения – золото-редкометалльного (Au–Te–Bi). Это оруденение связано с докембрийскими зеленокаменными поясами восточной окраины Западно-Алданского супертеррейна, что позволяет отнести его к гидротермально-метаморфогенному типу.

Авторы благодарны главному геологу КГПП АО “Якутскгеология” Е.П. Соколову за предоставленный каменный материал и д.г.-м.н., профессору, директору ИГАБМ СО РАН В.Ю. Фридовскому за всестороннюю поддержку. Статья подготовлена при поддержке грантов РФФИ (№ 18-45-140045 p_a, 19-35-90051).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анисимова Г.С., Соколов Е.П. Золото-редкометалльно-полисульфидный тип минерализации месторождения Бодороно (Ю. Якутия) / Сб. докл. 3-й Всероссийск. научно. конф. “Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии”. **2014a**. С. 53–55.

Анисимова Г.С., Соколов Е.П. Месторождение Бодороно – новый золоторудный объект Южной Якутии // Руды и металлы. **2014b**. № 5. С. 49–57.

Бойцов В.Е., Верчеба А.А., Пилипенко Г.Н., Жданов А.В. Металлогеническое районирование Центрально-Алданского рудного района Республики Саха (Якутия) // Известия высш. учебн. заведений. Геол. разведка. **2010**. № 5. С. 23–32.

Борисенко А.С. Изучение солевого состава газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. **1977**. № 8. С. 16–27.

Бортников Н.С., Гамянин Г.Н., Викентьева О.В., Прокофьев В.Ю., Алпатов В.А., Бахарев А.Г. Состав и происхождение флюидов в гидротермальной системе Нежданинского золоторудного месторождения (Саха-Якутия, Россия) // Геол. рудн. месторожд. **2007**. Т. 49. № 2. С. 99–145.

Геохимия рудных месторождений / Под ред Х. Барнса, М.: Мир, **1970**. 543 с.

Ветлужских В.Г., Казанский В.И., Кочетков А.Я. Золоторудные месторождения Центрального Алдана // Геол. рудн. месторожд. **2002**. Т. 44. № 6. С. 467–499.

Кондратьева Л.А., Анисимова Г.С., Зайцев А.В. Задержнинское золоторудное месторождение: минеральный состав, флюидные включения, возраст формирования (Южное Верхоянье) // Геология и геофизика. **2018**. Т. 59. № 10. С. 1606–1622.

Мельников А.В., Степанов В.А., Вах А.С., Вьюнов Д.Л., Дементюенко А.И., Пересторонин А.Е. Месторождения рудного золота Приамурской провинции. Благовещенск: Амурский государственный университет, **2017**. 1500 с.

Моисеенко В.Г., Эйриш Л.В. Золоторудные месторождения Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, **1996**. 352 с.

Молчанов А.В., Терехов А.В., Шатов В.В., Петров О.В., Кукушкин К.А., Козлов Д.С., Шатова Н.В. Золоторудные районы и узлы Алдано-Становой металлогенической провинции // Региональная геология и металлогения. **2017**. № 71. С. 93–111.

Пизнор А.В. Основы термобарогеохимии. Львов: Вища шк. изд-во при Львов. ун-те, **1986**. 200 с.

Пономарева Н.И. Оценка P – T параметров процессов минералообразования на основе геотермобарометров СПб, СПбГУ, 2014. 40 с.

Реддер Э. Флюидные включения в минералах. М.: Мир, 1987. Т. 1. 560 с.

Хомич В.Г., Борискина Н.Г. Структурная позиция крупных золоторудных районов Центрально-Алданского (Якутия) и Аргунского (Забайкалье) супертеррейнов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 6. С. 849–862.

Эйриш Л.В. Эволюция золоторудных систем Дальнего Востока России // Руды и металлы. 2013. № 1. С. 6–13.

The Formation Conditions of the Bodorono Gold Deposit, Sakha (Yakutia)

V. N. Kardashevskaya^{a,*}, G. S. Anisimova^a, E. V. Badanina^b,
V. N. Bocharov^b, and N. I. Ponomareva^b

^aDiamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch RAS,
Yakutsk, Sakha Republic (Yakutia), Russia

^bSaint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

*e-mail: kardashevskaya92@mail.ru

In the present paper we consider the formation conditions of the Bodorono gold deposit that is located in South Yakutia. There are three mineral assemblages in metamorphic rocks associated with gold ores: (1) pyrite-pyrrhotite-quartz, (2) gold-galena-sphalerite-quartz (gold-polymetallic), and (3) gold-tellur-bismuth-quartz. According to the research of fluid inclusions in quartz, formation conditions of the gold-polymetallic assemblage were 270–300 °C and 0.8–1 kbar wherein participated gases consisted of CO₂ (68%) and CH₄ (32%). When the gold-tellurium-bismuth-quartz assemblage was formed, mineral formation conditions corresponded to 145–200 °C and 0.4–0.6 kbar wherein participated gases composed of CO₂ (95%), N₂ (3%), CH₄ (2%).

Keywords: gold deposit, quartz, fluid inclusions, mineral formation conditions

REFERENCES

Anisimova G.S., Sokolov E.P. Gold-rare metal-polysulfide type of mineralization of the Bodorono Deposit (Yakutia) In: *Proc. 3rd All-Russian Sci. Conf. "Geology and integrated development of natural resources of East Asia"*. 2014a. P. 53–55 (in Russian).

Anisimova G.S., Sokolov E.P. The Bodorono auriferous deposit as a new auriferous location in South Yakutia. *Ores and metals*. N 5. 2014b. P. 49–57 (in Russian).

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

Boitsov V.Ye., Vercheba A.A., Pilipenko T.N., Zhdanov A.V. Metallogenic zoning of the Central Aldan ore region of Sakha Republic (Yakutia). *Proc. Higher Education. Establish. Geol. Explor.* 2010. N 5. P. 23–32 (in Russian).

Borisenko A.S. Study of the salt composition of gas-liquid inclusions in minerals by the cryometric method. *Geol. Geophys.* 1977. N 8. P. 16–27 (in Russian).

Bornikov N.S., Vikent'eva O.V., Prokof'ev V.Yu., Gamyanin G.N., Alpatov V.A., Bakharev A.G. Composition and origin of fluids in the hydrothermal system of the Nezhdaninsky gold deposit, Sakha (Yakutia), Russia. *Geol. Ore Deposits*. 2007. Vol. 49. N 2. P. 87–128 (in Russian).

Eirish L.V. Evolution of gold ore systems in the Russian Far East. *Ores and metals*. 2013. N 1. P. 6–13 (in Russian).

Frezotti M.L., Tecce F., Casagli A. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *J. Geochem. Explor.* 2012. Vol. 112. P. 1–20.

Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. Ed. H. Barnes. New York: John Wiley & Sons, 1997. 972 p.

Khomich V.G., Boriskina N.G. Structural position of large gold ore districts in the Central Aldan (Yakutia) and Argun (Transbaikalia) superterrane. *Russian Geol. Geophys.* 2010. Vol. 51. N 6. P. 661–671.

- Kondrat'eva L.A., Anisimova G.S., Zaitsev A.I.* The Zaderzhninskoe gold deposit: mineral composition, fluid inclusions, and age (South Verkhoyansk region). *Russian Geol. Geophys.* **2018**. Vol. 59. N 10. P. 1288–1300.
- Kullerud G.* The FeS-ZnS system, a geological thermometer. *Norsk. Geol. Tidsskr.* **1953**. N 32. P. 61–147.
- Melnikov A.V., Stepanov V.A., Vakh A.S., Vyunov D.L., Dementienko A.I., Perestoronin A.E.* Deposits of ore gold in the Amur province. Blagoveshchensk: Amur State University, **2017**. 1500 p. (*in Russian*).
- Moiseenko V.G., Eirish L.V.* Gold Deposits of the Far East, Russia. Vladivostok: Dalnauka, **1996**. 352 p. (*in Russian*).
- Molchanov A.V., Terekhov A.V., Shatov V.V., Petrov O.V., Kukushkin K.A., Kozlov D.S., Shatova N.V.* Gold ore districts and ore clusters of the Aldanian metallogenic province. *Region. Geol. Metall.* **2017**. N 71. P. 93–111 (*in Russian*).
- Piznur A.V.* Fundamentals of thermobarogeochemical. Lvov: Lvov State University Press, **1986**. 199 p. (*in Russian*).
- Ponomareva N.I.* Evaluation of P–T parameters of the processes of mineral formation on the basis of geothermobarometric. Saint Petersburg, **2014**. 40 p. (*in Russian*).
- Roedder E.* Fluid Inclusions in Minerals. *Rev. Miner.* **1984**. Vol. 12. 644 p.
- Vetluzhskikh V.G., Kazanskyi V.I., Kochetkov A.Ya.* Gold deposits of Central Aldan. *Geol. Ore Deposits.* **2002**. Vol. 44. N 6. P. 467–499 (*in Russian*).