

Золоторедкометалльное (Au-Mo-Te-Bi) оруденение Верхнеалгоминского золотоносного района (Южная Якутия)

Г.С.АНИСИМОВА (Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН); 677980, г.Якутск, проспект Ленина, д. 39),
Е.П.СОКОЛОВ (Акционерное общество «Якутскгеология»; г. Якутск, ул.Кальвица, д. 24),
В.Н.КАРДАШЕВСКАЯ (Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения Российской академии наук (ИГАБМ СО РАН); 677980, г.Якутск, проспект Ленина, д. 39)

Приведены данные по геолого-структурным, минералого-геохимическим особенностям и физико-химическим параметрам образования золотого оруденения Верхнеалгоминского золотоносного района. Выявлены ранее неизвестные минералы – Ni-содержащий пирит, глаукоdot, доломит, анкерит, апатит, мусковит, шеелит – в ранней кварц-пирит-пирротиновой, самородный висмут, висмутин, галеновисмутит, хедлейит, ингодит, Se-содержащий галенит, гессит, барит – среди золото-теллур-висмут-кварцевой ассоциации. Для данной ассоциации установлен более широкий диапазон (643–993‰) колебания пробы золота. Данные термобарогеохимических исследований указывают на то, что золото-полиметаллически-кварцевая ассоциация месторождения Бодорono формировалась при температуре от 270°–300°C и давлении 760×10^5 Па, а золото-теллур-висмут-кварцевая ассоциация – при более низких диапазонах температуры 150°–200°C и давлении 300×10^5 Па. Промышленная золотоносность связана с золото-полиметаллической и золото-теллур-висмутовой минеральными ассоциациями. В Дывоковском рудопоявлении наряду с золото-кварцевым оруденением развито кварц-сульфидное (молибденовое) оруденение. Район перспективен на Au и сопутствующие элементы – Bi, Te, Mo.
Ключевые слова: Верхнеалгоминский золотоносный район, месторождение Бодорono, рудопоявление Дывок, редкометалльная минерализация, минералы висмута, теллура и свинца, молибдена, самородное золото, термобарогеохимические исследования.

Анисимова Галина Семеновна
Соколов Евгений Павлович
Кардашевская Вероника Николаевна



g.s.anisimova@diamond.ysn.ru
geopoisk@sakha.ru
kardashevskaya92@mail.ru

Gold-rare metal (Au-Mo-Bi-Te) mineralization of the Upper Algominsk gold deposit zone (Southern Yakutia)

G.S. ANISIMOVA, E.P.SOKOLOV, V.N.KARDASHEVSKAYA

Data on geological-structural, mineralogical-geochemical features and physicochemical parameters of gold mineralization formation of the Upper Algominsk gold deposit zone are given. Previously unknown minerals – Ni-containing pyrite, glaucodotite, dolomite, ankerite, apatite, muscovite, scheelite were found in early quartz-pyrite-pyrrhotine association and native bismuth, bismuthin, galenobismutite, headlite, ingodite, Se-containing galena, hessite, barite were revealed in the gold-tellurium-bismuth-quartz association. For this association, a wider range (643–993‰) of the gold sample fluctuation is established. Thermobarogeochemical data indicate that the gold-polymetallic-quartz association of the Bodorono deposit was formed at a temperature of 270°–300°C and a pressure of 760×10^5 Pa, and gold-tellurium-bismuth-quartz association was formed at lower temperature ranges of 150°–200°C and a pressure of 300×10^5 Pa. Economic gold content is associated with gold-polymetallic and gold-tellurium-bismuth mineral associations. Quartz-sulphide (molybdenum) mineralization is developed along with gold-quartz mineralization in the Dyvok ore occurrence. The region is promising for Au and the accompanying elements – Bi, Te, Mo.
Key words: Upper Algominsk gold-bearing area, Bodorono deposit, Dyvok ore manifestation, rare metal mineralization, minerals of bismuth, tellurium and lead, molybdenum, native gold, thermobarogeochemical studies.

В настоящее время отмечается повышенный интерес к комплексным месторождениям, включающим разную, нередко контрастную, минерализацию. Якутия относит-

ся к регионам, в которых есть как собственно золоторудные, так и полиметалльные месторождения, в которых благородные металлы играют определяющую роль.

Здесь выявлено значительное количество месторождений и проявлений золотовисмутового типа, которые в данное время не являются объектами промышленной эксплуатации. Несмотря на низкие средние содержания Au 1–2 г/т в руде, они рентабельны за счет переработки огромных масс руды открытым способом, низкого содержания сульфидов и извлечения висмута и теллура, содержащихся в рудах [5]. В Южной Якутии такие объекты локализуются в Верхнеалгоминском золотоносном районе. Это, в частности, месторождение Бодороно и рудопоявление Дывок. В последнем отмечаются также точки с развитием молибденовых руд. Эти объекты расположены в зоне влияния железной дороги Эльга-Улак, что делает их экономически привлекательными.

Рассматриваемая территория входит в состав Становой золотоносной провинции. В современной трактовке геологической карты 1:1 000 000 масштаба на территории выделяется Верхнеалгоминский золотоносный район площадью около 1300 км². Он расположен на стыке Тыркандинской тектонической зоны и зоны Станового разлома (Е.П.Соколов и др., 2006, 2012; А.В.Радьков и др., 2015). К аллохтону Агинокского взбросо-надвига приурочен Бодороно-Агинокский золоторудный узел и сопряженный с ним Агинокский золотороссыпной узел, где сконцентрированы наиболее промышленно значимые россыпные месторождения золота р. Агинок, ручьев Бодороно, Иван-Беренген, Левый Агинок, месторождение золота Бодороно, рудопоявление Агинок (Е.П.Соколов и др., 2006). На востоке с Бодороно-Агинокским рудным узлом граничит Дывоковский золоторедкометалльный рудный узел, включающий рудопоявление золота Дывок, россыпь золота руч. Дывок, рудопоявление золота Очеп, рудопоявление молибдена Тарыннах (рис. 1).

Из опознанных объектов золота наиболее значимыми являются месторождение Бодороно и рудопоявление Дывок (Е.П.Соколов и др., 2006), описанию геологической позиции, минералого-геохимических особенностей руд и физико-химическим параметрам рудообразования которых посвящена данная статья.

Бодороно-Агинокский рудный узел расположен в бассейне верхнего течения руч. Агинок, правого притока р. Нуям, в 30 км западнее железнодорожной магистрали Улак-Эльга и в 300 км к юго-востоку от г. Нерюнгри (см. рис. 1). Геологическое строение и структурная позиция рудного узла определяются расположением на территории Алгоминского блока Западно-Алданского кратона на площади развития докембрийских образований, относящихся к реликтам зеленокаменного пояса, фрагменты которого обнажаются во фронтальной части Становой надвиговой зоны, в автохтоне Станового надвига. Геология участка представлена комплексом архейских зеленокаменных образований: толщей переслаивания основных кристаллосланцев, гнейсов (метабазиты), кварц-полевошпатовых мигматитов (серо-голубокварцевые гранито-гнейсы), диопсидовых

кальцифиров и гранат-кварц-полевошпатовых пород (гранулитов). Породы смяты в сжатые изоклинальные складки общего северо-западного простирания, прорваны многочисленными раннемеловыми дайками долеритов – диоритовых порфиритов, лампрофиров (М.З.Глуховский, 1974, Е.П.Соколов и др., 2006, 2012).

Мезозойские магматические образования представлены раннемеловыми субщелочными дайками диоритового состава, достаточно широко развитыми на площади участка. По составу они отвечают субщелочному габбро, габбро-диоритам, диоритам.

Наибольшее количество даек встречается в верховьях руч. Бодороно и в левом борту руч. Левый Агинок, где их размещение контролируется нарушениями северо-восточного и широтного простирания. На участке Бодороно дайки, как правило, выполняют трещины северо-восточного простирания, на участке Левый Агинок большая часть даек имеет широтное, субширотное простирание. Мощность даек от 0,1 до 3,5 м, прослеженная протяженность первые десятки метров – сотни метров. Чаще всего это линзовидные непротяженные тела, с четкими резкими контактами и крутым падением.

В верховьях руч. Бодороно практически все встречаемые дайки изменены. Представлены они зеленоватыми, зеленовато-серыми мелкозернистыми, массивными породами, с тонкими прожилками эпидота и нередко с минерализацией пирита, в виде тонко распыленной «сыпи» или мелкокристаллических кубических вкраплений.

Месторождение Бодороно находится в верхнем течении руч. Бодороно, Иван-Беренген, Левый Агинок, левых притоков руч. Агинок. Оруденение приурочено к аллохтонной части Агинокского взбросо-надвига, разделяющего выходы архейских метаморфических образований гидатской и джелтулинской серий. Геолого-структурная позиция месторождения приведена в ранних работах [2, 3, 4]. На площади рудного поля выделено 3 рудные зоны с содержаниями золота, отвечающими промышленным кондициям [3]. *Рудная зона 1* расположена в верховье руч. Левое Бодороно, имеет северо-восточное простирание 10°–20°, здесь обнаружено два рудных тела, представленных зонами кварцевого прожилкования субширотного простирания. Мощность кварцевого прожилкования 10 м, отдельных прожилков – 0,1–1,0 м. Среднее содержание золота 21 г/т. *Рудная зона 2* находится в верхнем течении руч. Бодороно, простирание северо-восточное 10°–20°. Также в ее пределах вскрыто два рудных тела, представленных зонами кварцевого прожилкования, имеющих субмеридиональное простирание. Мощность рудных тел колеблется в пределах 0,25–1,2 м. Среднее содержание золота 14 г/т. *Рудная зона 3* отмечена на руч. Левый Агинок, где выявлено 2 рудных тела с видимым золотом. Характер минерализации, структурный контроль, состав вмещающих пород аналогичен рудной зоне 2.

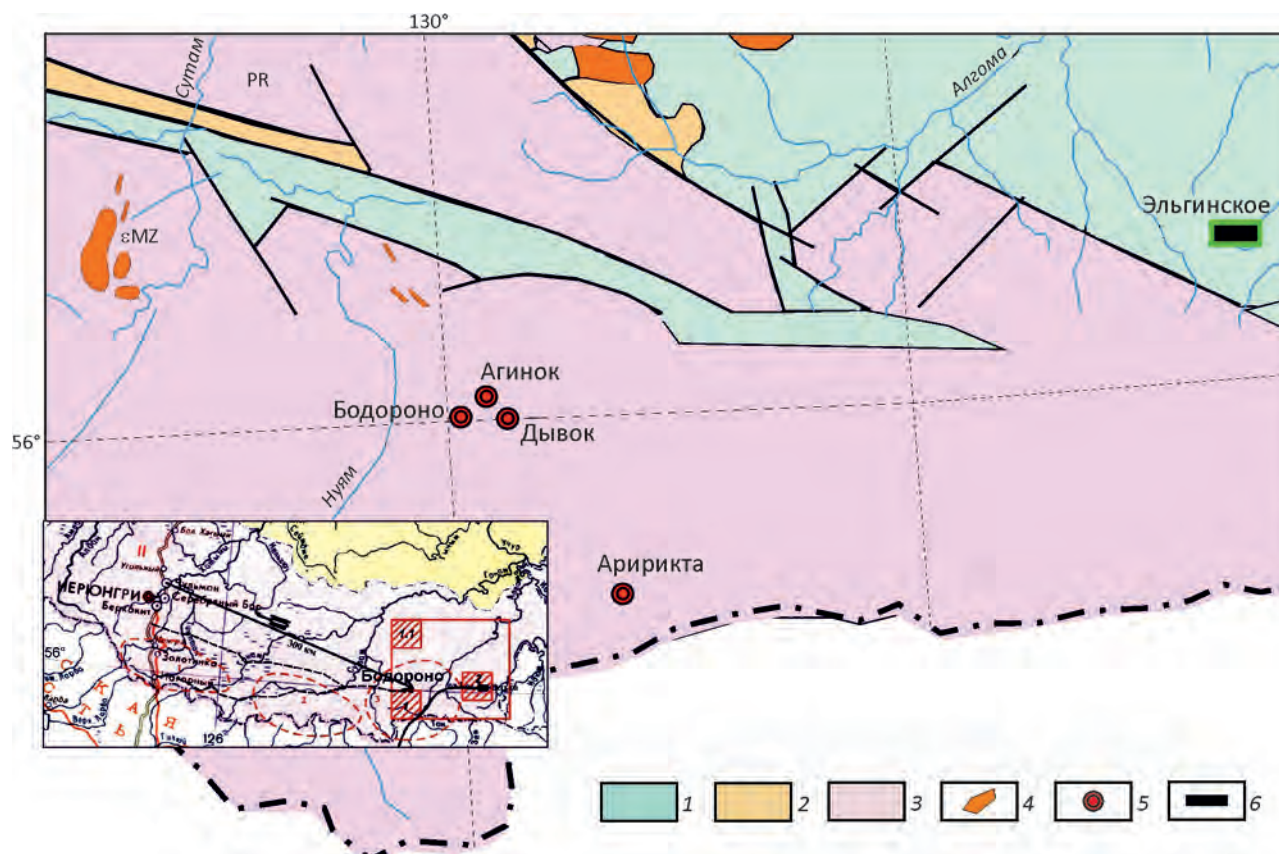


Рис. 1. Геологическая схема Верхнеалгоминского золотоносного района. На основе карты рудоносности Южной Якутии масштаба 1:1 000 000 (ВСЕГЕИ, 2010) с изменениями и дополнениями:

1 – терригенные, отчасти вулканогенные и угленосные, осадочные отложения юры и нижнего мела, J–K; 2 – терригенно-карбонатные осадочные образования венда и нижнего кембрия, PR–Є; 3 – метаморфические в различной степени гранитизированные сложно дислоцированные образования докембрийского фундамента, AR–PR; 4 – мезозойские вулканогенные и интрузивные породы алданского комплекса, εMZ; 5 – рудопроявления золота; 6 – месторождение угля

Рудные тела исполнены линзующимися пологозалегающими кварцевыми жилами, расположенными на крыльях и замках складок тектоносланцев. Мощность составляет 0,1–0,4 м. Простираение зоны 50°–60°, а протяженность 1 км. Среднее содержание Au – 6,1 г/т.

Минеральный состав руд. Главным минералом выполнения руд является кварц. Сульфиды в рудных телах распределены неравномерно, и их содержание не превышает 1–3%. Среди рудных минералов преобладают пирротин, халькопирит, пирит и галенит, реже отмечаются висмутовый минерал из группы густавита, сфалерит, ильменит, гематит, магнетит, самородное золото, спорадически встречаются марказит и пентландит. Месторождение характеризуется комплексной полихронной рудной минерализацией, в которой совмещено золото-кварцевое оруденение пирротин-пиритового (ранний этап) и полиметаллического минеральных типов (средний этап) с эпитермальной (поздний этап)

Au-Ag-Te-Bi минерализацией [2, 3, 4]. Выделяется золото трех генераций: более высокопробное темно-желтое (ярко-желтое) раннего этапа, элементы-примеси в золоте не обнаружены, среднепробное ярко-желтого цвета, ассоциирующее с минералами среднего этапа, из примесей содержит Pb, Ni и Co, и позднее, связанное с висмутовыми минералами и представленное среднепробной разностью с примесью Cu, Pb и Hg, но более высокопробное, чем золото-II [3]. В результате дальнейшего изучения получены новые данные по вещественному составу руд, выявлена неоднородность состава самородного золота золото-висмутовой ассоциации. Минеральный состав руд дополнили самородный висмут, висмутин, галеновисмутит, хедлейит, ингодит, Se-содержащий галенит, Ni-содержащий пирит, глауколот, герсдорфит, доломит, анкерит, апатит, мусковит, шеелит, смитсонит, барит, минералы редкоземельных элементов (монацит, фторсодержащие редкоземельные карбонаты).

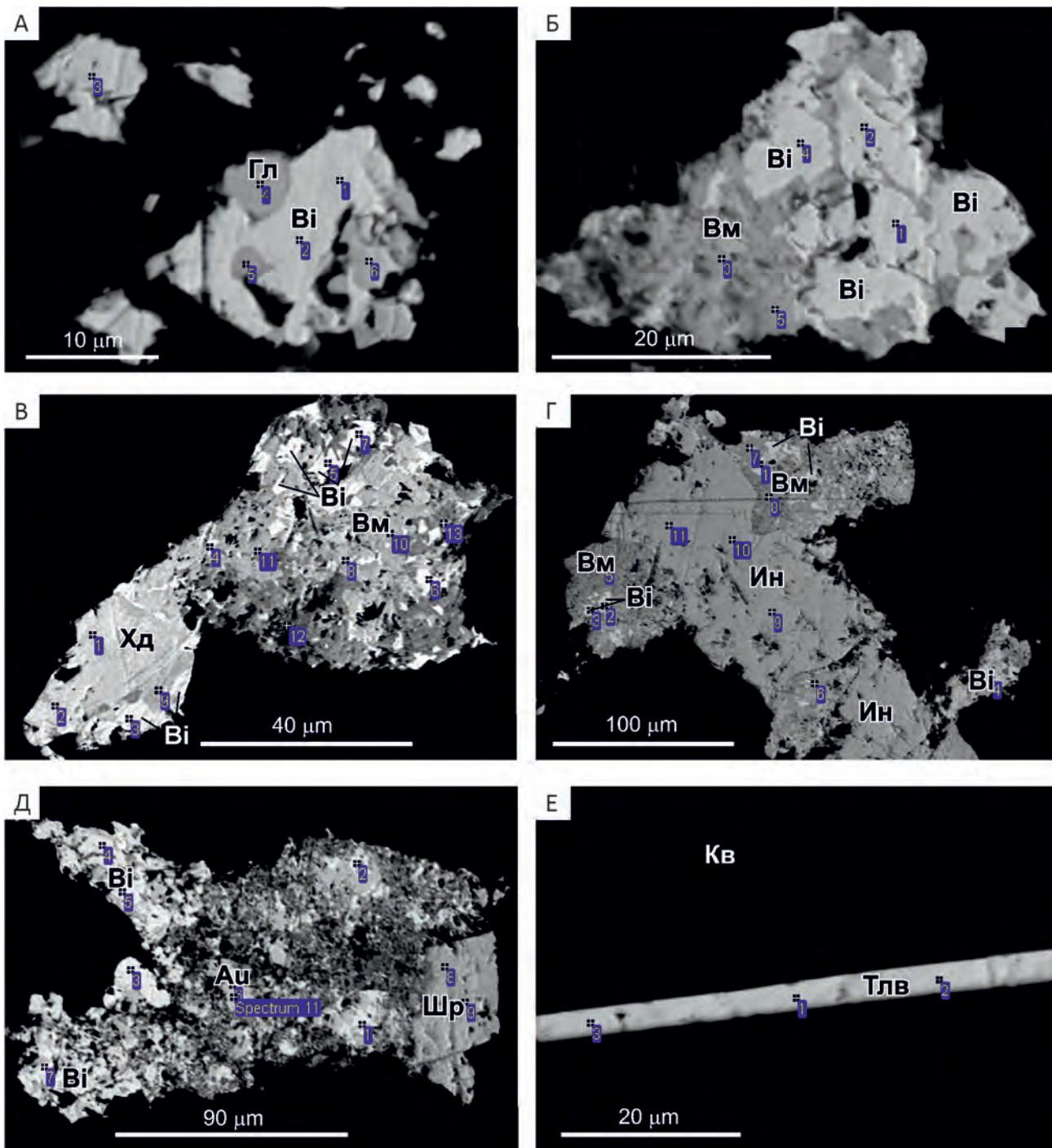


Рис. 2. Взаимоотношения минералов золото-теллур-висмутовой ассоциации:

А – самородный висмут (Ві) замещает галенит (Гл); Б – ксеноморфные выделения самородного висмута (Ві) среди висмутина (Вм); В – тесная ассоциация хедлейита (Хд) и висмутина (Вм) с многочисленными включениями самородного висмута (Ві); Г – замещение ингодитом (Ин) раздробленных кристаллов висмутина (Вм) с включениями самородного висмута (Ві); Д – раздробленный и катаклазированный кристалл висмутина (Вм) с интенсивными включениями самородного висмута (Ві) и единичными включениями разнопробного самородного золота (Аи); Е – вытянутое выделение теллуrowисмутита (Тлв) среди кварца

1. Химический состав минералов Вi и Те (в массовых долях %)

Минерал	Вi	Те	Pb	Sb	Se	S	Сумма	Формула
Самородный висмут	100,4							Вi
	100,9							Вi
Хедлейит	80,14	19,71					99,85	$\text{Bi}_{2,14}\text{Te}_{0,86}$
	80,91	17,28			4,25		102,45	$\text{Bi}_{2,01}\text{Te}_{0,71}\text{Se}_{0,28}$
	77,27	16,22			4,14		97,62	$\text{Bi}_{2,02}\text{Te}_{0,69}\text{Se}_{0,29}$
Ингодит	64,86	22,49	4,4			5,59	97,34	$\text{Bi}_{2,28}\text{Pb}_{0,15}\text{Te}_{1,29}\text{S}_{1,28}$
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	$(\text{Bi}_{2,03}\text{S}_{2,77})\text{Pb}_{0,20}$
	75,63		8,58			17,32	101,53	$(\text{Bi}_{1,92}\text{S}_{2,86})\text{Pb}_{0,22}$
	82,47			2,05		15,04	99,56	$(\text{Bi}_{2,24}\text{S}_{2,66})\text{Pb}_{0,10}$
Se-галенит			81,97		3,41	19,83	99,55	$(\text{Pb}_{0,75}\text{Se}_{0,08})\text{S}_{1,17}$
			82,91		13,4	5,56	101,88	$(\text{Pb}_{1,08}\text{Se}_{0,46})\text{S}_{0,47}$

Примечание. Анализы выполнены в ИГАБМ СО РАН на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6480LV с энергетическим спектрометром фирмы OXFORD при следующих условиях: напряжение – 20 кВ, ток – 1,7 нА; аналитические линии: Вi– Ма; Те, Pb, Ag, Sb, S – Lα; Cu, S – Kα; эталоны: CuSbS – Cu, Sb, S; Bi_2S_3 – Вi; HgTe – Hg, Те; FeAsS – As; Ag – 100%; погрешность анализа – 1,5%; аналитик С.К.Попова.

Самородный висмут (Вi) найден в кварцевой жиле рудной зоны 2. Ксеноморфные выделения минерала замещают галенит (рис. 2, А). Мельчайшие вкрапления висмута часто отмечаются в раздробленном висмутине (см. рис. 2, В–Д). Реже удлиненные и ксеноморфные выделения самородного висмута локализуются в хедлейите (см. рис. 2, В). Примеси в самородном висмуте не установлены (табл. 1).

Хедлейит (Bi_2Te) в виде единичных выделений встречается в кварце рудной зоны 2. Выделение хедлейита с включениями самородного висмута тесно контактируют с висмутином с многочисленными вкраплениями самородного висмута (см. рис. 2, В). В хедлейите в виде примеси присутствует Se до 4,25% (см. табл. 1).

Ингодит (Bi_2TeS) отмечен в составе золото-теллур-висмут-кварцевой ассоциации по рудной зоне 2. Выделения ингодита замещают раздробленные кристаллы висмутина с интенсивными вкраплениями самородного висмута (см. рис. 2, Г). В сульфотеллуриде висмута отмечается примесь Pb до 4,40% (см. табл. 1).

Теллуrowисмутит (Bi_2Te_3) – редкий минерал месторождения. Вытянутые формы теллуrowисмутита найдены в кварцевой жиле рудного тела 2 (см. рис. 2, Е). Минерал ассоциирует с висмутином.

Висмутин (Bi_2S_3) обнаружен на данном месторождении впервые. Он наблюдается в тесной ассоциации со сфалеритом, хедлейитом, ингодитом (см. рис. 2, В–Г), а иногда – в виде мелких включений в пирите. Как более ранний минерал поздней ассоциации часто раздроблен

и в виде многочисленных вкраплений содержит самородный висмут (см. рис. 2, Б–Г). Висмутин содержит примесь Pb до 8,58% и Sb до 2,05% (см. табл. 1).

Se-содержащий галенит не образует больших скоплений и отмечается в тесной ассоциации с висмутовыми минералами в кварцевой жиле рудной зоны 2. Содержание Se колеблется от 3,41 до 13,40% (см. табл. 1).

Ni-содержащий пирит найден в околорудноизмененных породах по рудной зоне 1 в виде аллотриоморфных выделений в ассоциации с пентландитом, галенитом, цирконом и фторсодержащими редкоземельными карбонатами. Содержание Ni в пирите достигает 7,42%.

Глаукодом ((Co,Fe)AsS) встречается в составе ранней пирит-пирротиновой ассоциации в виде вкрапленных ксеноморфных включений в пирите, иногда в сростании с халькопиритом. Размер варьирует от 0,003 до 0,05 мм. В его составе в виде примеси обнаружен Ni 3,07–3,34 (массовых долей %).

Золото (Au) в кварцевых жилах и прожилках месторождения Бодороно встречается в виде комковидной, овальной и гипидиоморфной форм (рис. 3). Оно распределено неравномерно, образует включения в галените и прурочено к галенит-сфалеритовой минерализации (см. рис. 3, А). Размер его зерен колеблется от 10 мкм до 3 мм. По данным рентгеноспектрального микрозондового анализа пробность золота этой минеральной ассоциации 853–861%, в среднем 857% (Г.С.Анисимова, Е.П.Соколов, 2014). В теллур-висмут-кварцевой ассоциации золото встречается как в свободной форме

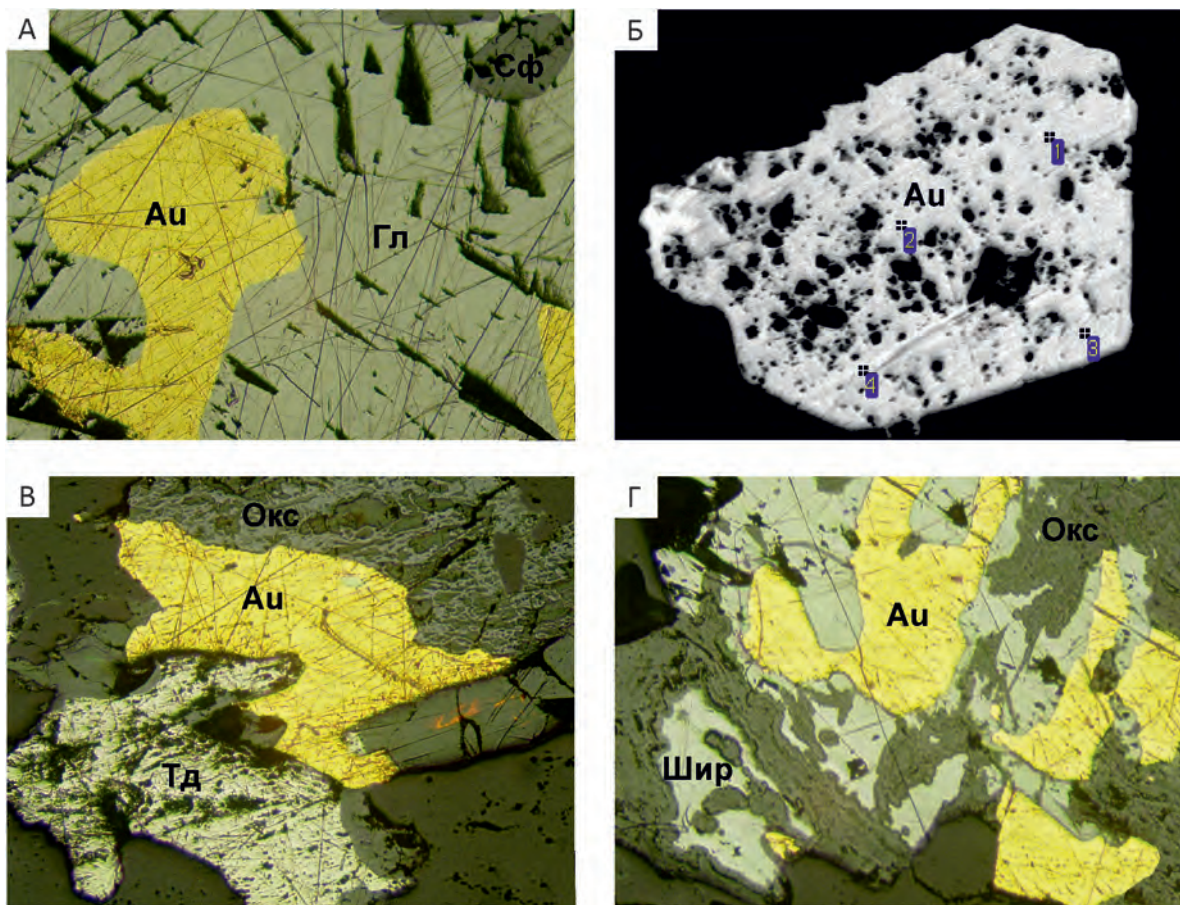


Рис. 3. Самородное золото месторождения Бодороно:

А – ксеноморфное выделение самородного золота (Au) и овальное включение сфалерита (Сф) в галените (Гл), обр. 001/12, ув.160; Б – среднепробное золото гипидиоморфного облика в кварце (Кв), обр. 3-К-16, ув.2000; В – взаимоотношение самородного золота (Au) с тетрадимитом (Тд) и оксидами Fe (Окс) среди кварца (Кв), обр. 815/2, ув.160; Г – развитие самородного золота среди ширмерита (Шир), замещаемого оксидами Fe (Окс), обр. 001/15, ув.160

в кварце, образуя округлые и гипидиоморфные выделения (см. рис. 3, Б), так и в тесном контакте с висмутовыми минералами (см. рис. 2, В–Г). Размер его зерен в среднем 150 мкм. Выявлен более широкий диапазон колебания пробы золота (табл. 2).

Карбонаты в кварцевых жилах представлены кальцитом $\text{Ca}(\text{CO}_3)$, анкеритом $\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$, доломитом $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, церусситом $\text{Pb}(\text{CO}_3)$, смитсонитом $\text{Zn}(\text{CO}_3)$. Редкоземельные минералы – монацитом, фторсодержащими карбонатами.

Кальцит образует ксеноморфные зерна и гнезда диаметром до 5–7 см. Он часто окрашен оксидами железа. Анкерит встречается в виде сплошных зернистых масс. Доломит образует натечные формы вокруг зерен кальцита. По трещинам доломита встречается гётит. Церуссит обнаружен в виде обрамляющей каемочной структуры в галените и заполняет в нем трещины. Размер его

зерен составляет от 10 до 30 мкм. Смитсонит образует скелетные и реликтовые структуры. Тесно ассоциирует со сфалеритом. Размер его зерен от 1 до 300 мкм.

Англезит ($\text{Pb}(\text{SO}_4)$) встречается в виде ксеноморфной, вкрапленной и реликтовой форм зерен. Он часто наблюдается в парагенетической ассоциации с галенитом, пиритом, гематитом и гётитом. Размер выделений колеблется от 5 мкм до 0,5 мм.

Шеелит ($\text{Ca}(\text{WO}_4)$) впервые был обнаружен на данном месторождении, размер его выделений составляет в среднем 50 мкм. Он чаще всего ассоциирует со сфалеритом.

Мусковит ($\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$) впервые был обнаружен на данном месторождении в виде пластинок, размером выделений от 10 мкм до 1 мм.

Барит (BaSO_4) – индикаторный минерал эпitherмальных месторождений, в виде таблитчатых и

2. Химический состав (в массовых долях %) самородного золота (новые данные)

Образец	Au	Ag	Fe	Сумма	Проба, ‰
3-К-16	63,08	35,00		98,08	643
	72,83	25,55		98,38	740
	75,20	23,86		99,06	759
	87,24	10,54		97,78	892
	96,88		0,52	97,50	993

Примечание. Анализы выполнены в ИГАБМ СО РАН на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6480LV с энергетическим спектрометром фирмы OXFORD при следующих условиях: напряжение – 20 кВ, ток – 17 нА; аналитические линии: Cu, Fe, Zn, Bi – K α ; Ag, Sb, S – L α , эталоны: CuSbS – Cu, Sb, S; ZnS – Zn; CuFeS₂ – Fe; Bi₂S₃ – Bi; HgTe – Hg, Te; FeAsS – As; Au – 750‰; Ag – 100‰; погрешность анализа – 1,5‰; аналитик С.К.Попова.

аллотриоморфных выделений рассеян в кварцевой жиле с просечками вмещающих пород среди рудной зоны 2. С минералом ассоциируют фтористые редкоземельные карбонаты и пирит. Примесь Sr в барите доходит до 7%.

Физико-химические параметры рудообразования месторождения Бодороно. Флюидные включения (ФВ) были изучены в кварцах из двух продуктивных (золотополиметаллической и золото-теллур-висмутовой) ассоциаций месторождения Бодороно. Кварц из золотополиметаллической и золото-теллур-висмутовой ассоциации представлен прозрачными агрегатами зерен, которые пригодны для исследования флюидных включений. В кварце из пирит-пирротиновой ассоциации ФВ не удалось обнаружить, так как он практически непрозрачен. Изучение флюидных включений проводилось в 10 прозрачно-полированных пластинках толщиной 400–500 мкм. Для термометрических исследований были выбраны первичные ФВ, расположенные как по зонам роста минерала-хозяина, так и равномерно распределенные по объему различных зерен кварца. Исследования выполнялись на базе кафедры минералогии и в ресурсном центре «Геомодель» Санкт-Петербургского государственного университета.

Для проведения эксперимента по гомогенизации флюидных включений использовалась термокамера, установленная на столике микроскопа ПОЛАМ-Р-211, с подключенной к ней хромель-алюмелевой термопарой, которая позволяла фиксировать температуры фазовых переходов с помощью пирометра (милливольтметра). Также для сравнения точности результатов исследования параллельно проводились на термостойке ТНMSG-600-ес, установленном на оптическом микроскопе Olympus BX53F.

Кварц из золотополиметаллической ассоциации представлен прозрачными и малопрозрачными (серыми, молочно-белыми, халцедоноподобными) агрегатами зерен. Включения, как правило, имеют каплевидную и овальную формы размером 5–600 мкм (рис. 4, А–В).

По фазовому составу их можно подразделить на следующие типы:

Тип I: включения существенно-газовые однофазные, преимущественно содержащие газовую фазу – CO₂ (см. рис. 4, А).

Тип II: включения газовой-жидкие (ГЖВ) двухфазные, в которых присутствуют жидкая вода и газовая фаза – CO₂ (см. рис. 4, Б).

Тип III: включения углекислотно-водные трехфазные, состоящие из жидкой воды, жидкой и газовой фазы – CO₂ (см. рис. 4, В).

Эксперименты по гомогенизации проводились для включений из обоих типов кварцев. Температура гомогенизации ($T_{\text{гом}}$) включений типа II изменяется в интервале 270°–300°С, при среднем значении $T_{\text{гом}}=278^\circ\text{C}$. Гомогенизация жидкой CO₂ во включениях III типа происходила при температурах 29°–30°С. Соответственно, плотность жидкой CO₂ составила 0,5 г/см³. По диаграмме и температуре полной гомогенизации ГЖВ, равной 278°С, находим давление, оно равно 700×10⁵ Па. Далее, с поправкой парциального давления водяного пара, давление при кристаллизации кварца составляет 760×10⁵ Па.

Кварц из золото-теллур-висмутовой ассоциации представлен молочно-белыми, халцедоноподобными и темноокрашенными агрегатами зерен, и лишь в отдельных участках он прозрачен. Включения характеризуются вытянутыми и изометричными округлыми формами. Размер их колеблется от 1 до 200 мкм (см. рис. 4, Г–Д).

По фазовому составу их можно подразделить на следующие типы:

I тип: газовой-жидкие двухфазные, содержащие жидкую воду и газовую фазу CO₂ (см. рис. 4, Г).

II тип: углекислотно-водные трехфазные, в которых присутствуют жидкая вода, жидкая и газовая фаза CO₂ (см. рис. 4, Д).

При нагревании включений II типа гомогенизация происходила при температурах 150°–200°С, при среднем значении $T_{\text{гом}}=157^\circ\text{C}$. Жидкая CO₂ гомогенизировалась в диапазоне 28°–29°С. Плотность жидкой CO₂ равна 0,6 г/см³. По диаграмме [8] и температуре полной гомогенизации ГЖВ, равной 157°С, давление соответствует 300×10⁵ Па. С введением поправки на значение парциального давления водяного пара оно

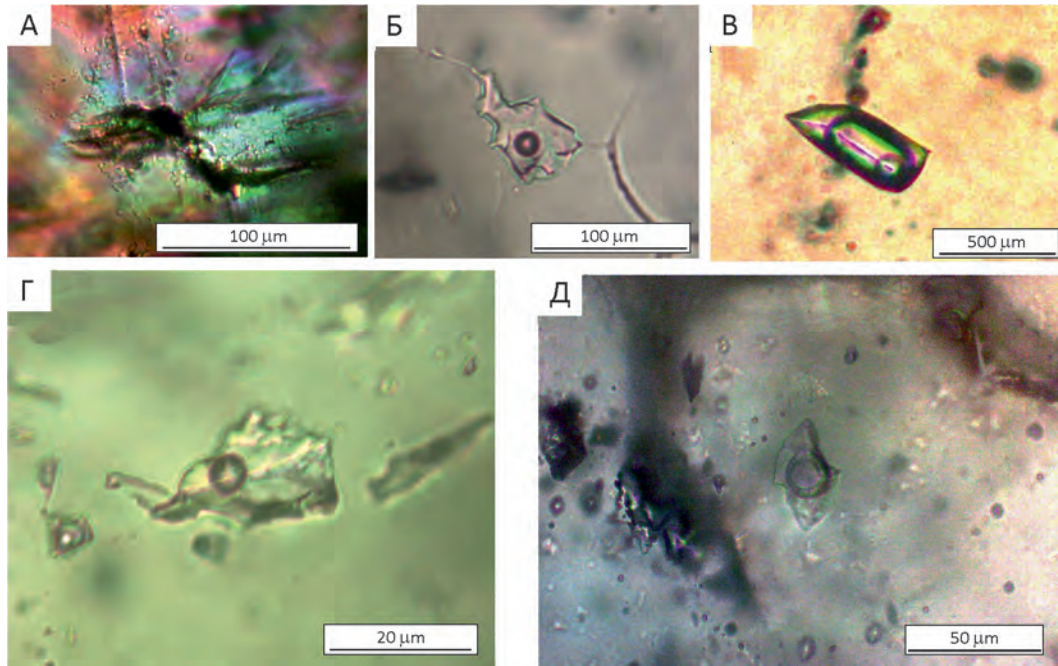


Рис. 4. Первичные флюидные включения в кварце из золотополиметаллической и золото-теллур-висмутовой ассоциаций:

А–В – кварц золотополиметаллической ассоциации: А – одно-, Б – двух- и В – трехфазные; Г–Д – кварц золото-теллур-висмутовой ассоциации: Г – двух- и Д – трехфазные

равно 400×10^5 Па при $T 278$ °С. Давление при кристаллизации кварца составляло 300×10^5 Па.

Таким образом, золотополиметаллическая ассоциация месторождения Бодороно формировалась при температуре 270 – 300 °С и давлении 700×10^5 Па, а золото-теллур-висмутовая ассоциация – при более низких диапазонах температуры 150 – 200 °С и давлении 300×10^5 Па. Аналогичные температуры (гомоенизации) формирования минеральных ассоциаций наблюдаются на месторождениях золотокварцевого типа (Кировское, Нежданинское) и колеблются в интервалах 300 – 250 °С [9, 10].

Дывоцкий золоторедкометалльный рудный узел.

Другим перспективным объектом Верхнеалгоминского района является Дывоцкий золоторедкометалльный рудный узел (Е.П.Соколов и др., 2006). Наибольший интерес представляет рудопоявление Дывок (см. рис. 1).

Рудопоявление Дывок приурочено к штоку меловых гранит-порфиров, представлено сульфидно-кварцевыми жилами и минерализованными зонами березитизированных пород с сульфидной и сульфидно-кварцевой минерализацией. Относится к золото-кварц-сульфидной формации, по содержанию сульфидов к малосульфидному типу. Золото тесно связано с пиритом и арсенипиритом, содержания от первых грамм до 69 г/т.

Впервые сульфидная (молибденовая) минерализация в верховьях руч. Дывок обнаружена в 1952 г.

(Е.П.Медведев, 1953). Рудная золотоносность участка установлена в ходе проведения поисково-оценочных работ в верховьях руч. Дывок, в центральной части рудного поля (М.З.Глуховский, 1974). Было установлено, что рудная золотоносность связана с золотоносными жилами и прожилками кварцевого, кварц-сульфидного, кварц-карбонат-баритового, карбонат-баритового состава и вмещающими их калишпат-кварцевыми метасоматитами, березитизированными и аргиллизированными породами.

Рудная зона 1 полностью пересекает площадь рудного поля с юго-востока на северо-запад. Общая протяженность 2300 м. Наиболее обоснованно выделяется северо-западный участок рудной зоны, субмеридионального север-северо-западного простирания, протяженностью 1300 м, объединяющий рудное тело «Жила Полиметаллическая», участок с золоторудной минерализацией на северо-западном фланге в районе высоты 1616,3 м, эпицентр высококонтрастной аномалии золота и мультипликативных показателей $Ag \times Pb$ в левом борту руч. Молибденитовый, опробованный штучком (проба 267/5). На юго-восточном фланге рудная зона 1 включает участок с золоторудной минерализацией в левом борту руч. Сюрприз. Содержание золота по рудной зоне от 0,16 до 69,9 г/т, в пересчете на средневзвешенное, на мощность 2,0 м содержание золота 1,3 г/т (Е.П.Соколов и др., 2006).

Рудное тело 1 «Жила Полиметаллическая» расположено в левом борту руч. Полиметаллический, правого притока руч. Правый Дывок. Выявлено в ходе поисковых работ 2001 г. Представлено кварц-сульфидными жилами в экзоконтактах лежачего и висячего бока дайки долеритов. Мощность жил 0,1–0,2 м до 0,5 м, залегание согласное с залеганием дайки. Азимут падения 60° – 80° , угол 60° – 80° . Кварц серый, мелко-среднезернистый, массивно-друзовидный. Рудная минерализация представлена пиритом, галенитом, халькопиритом, сфалеритом, арсенопиритом, слагающими до 30–50% жилы, образуя массивные, сливные прожилки, линзы мощностью 1–5 см по зальбандам жилы. Преобладают сфалерит, арсенопирит. Дайка долеритов освещена, цвет меняется от темно-серого, зеленоватого до светло-серого, белесого, тонко-мелкозернистая. Дайка рассечена многочисленными тонкими поперечными трещинами, выполненными кварц-карбонатными и сульфидными прожилками пирита, халькопирита, последние образуют гнезда размером до 5 см, выполненные пиритом, халькопиритом, ковеллином, борнитом. Общая ориентировка поперечных трещин широтная. Азимут падения дайки меняется от 50° – 55° на южном фланге рудного тела, до 80° – 100° на северном фланге, угол падения 60° – 80° . Вмещающие породы представлены кварц-кашлишпатовыми метасоматитами, содержащими тонкие прожилки кварца, с минерализацией пирита, сфалерита, арсенопирита, биотитовыми милонитами, содержащими прожилково-вкрапленную минерализацию пирита (1–5%).

Содержание золота в кварц-сульфидной жиле, в бороздовых пробах – 1,02–6,26 г/т, в задривковых пробах – 4,48–24,4 г/т. По данным штуфного опробования – 6,1–69,9 г/т. Содержание золота в минерализованной дайке 0,48–1,26 г/т, во вмещающих кварц-кашлишпатовых метасоматитах 0,61–2,38 г/т, в биотитовых милонитах 0,16–0,58 г/т. В пересчете на среднюю мощность 2,0 м, средневзвешенное содержание золота по рудному телу «Жила Полиметаллическая» составляет 2,7 г/т (Е.П.Соколов и др., 2006)

Основным попутным компонентом золота на рудопроявлении является молибден (до 0,1%) в березитизированных гранодиорит-порфирах. Наиболее высокие концентрации молибдена приурочены к аргиллизированным зонам дробления в эндоконтактах штока.

Минеральный состав рудных тел изучался в образцах, отобранных на западном и восточном флангах рудопроявления. По результатам изучения рудных тел выделяются три последовательно отлагавшиеся минеральные ассоциации, относящиеся к золото-кварц-сульфидному оруденению: арсенопирит-пирит-кварцевая, золото-пирит-сфалеритовая и кварц-буланжеритовая.

Арсенопирит-пирит-кварцевая минеральная ассоциация слагает основной объем рудных тел и представлена метасоматической и жильной формами.

Наиболее ранний минерал ассоциации – *пирит*, наблюдающийся в виде метакристаллов пентагондодекаэдрического габитуса в реликтах рассланцованных вмещающих пород, в жильном кварце или в виде включений в арсенопирите. В арсенопирите пирит наблюдается также в виде крупных (несколько миллиметров) бесформенных включений, являющихся, по-видимому, обломками жильного пирита.

Арсенопирит наблюдается в изученных образцах в виде призматических кристаллов и их сростков длиной до 1–2 мм в жильном кварце и во включениях вмещающих пород. Начиная кристаллизоваться несколько позже пирита, так как постоянно содержит включения его кристаллов и бесформенных зерен, нередко окаймляя выделение жильного пирита, но чуть раньше кварца, так как в нем арсенопирит идиоморфен.

Основная масса кварца, главного жильного минерала руд, отлагалась в конце стадии в виде друзовидного средне- или мелкозернистого агрегата, нарастающего на пирит и арсенопирит и содержащего их идиоморфные зерна.

Золото-пирит-халькопирит-сфалеритовая ассоциация в изученных образцах большей частью выполняет друзовые полости в кварце и ранних сульфидах, реже наблюдаются явления пересечения и коррозии минералов арсенопирит-пирит-кварцевой ассоциации.

Главный минерал ассоциации *сфалерит* представлен черной железистой разновидностью. Постоянно содержит вкрапленность пирротина, нередко располагающуюся вдоль трещин спайности сфалерита, реже наблюдающуюся в виде пятнообразных скоплений. Сфалерит обрастает зерна пирита, кварца и арсенопирита, иногда корродирует зерна последнего. Размер выделений сфалерита определяется в основном размером друзовых полостей и в отдельных случаях достигает 3–4 мм.

Пирит данной ассоциации имеет кубический габитус, размер кристаллов не превышает 0,01–0,02 мм. Наблюдается на контакте сфалерита с арсенопиритом или в виде микропрожилков, секущих арсенопирит.

Изредка наблюдается *халькопирит*, секущий жильные пирит и арсенопирит вместе с кварцем 2-й генерации, объем которого в целом невелик (первые проценты), или образующий сростки со сфалеритом, имеющие аллотриоморфную структуру. Еще более редок галенит, также наблюдающийся в сростках со сфалеритом.

Золото изредка встречается в интерстициях среди пирита и арсенопирита (рис. 5, А–Б). Размер золотинок 0,02–0,04 мм. Взаимоотношения золота со сфалеритом и пиритом не наблюдались, основанием отнесения золота к данной ассоциации является его встречаемость в одном образце со сфалеритом и пиритом при отсутствии минералов поздней кварц-буланжеритовой ассоциации. Средняя пробность 800 ‰.

Минералы кварц-буланжеритовой ассоциации встречаются только в одном образце, в котором буланжерит

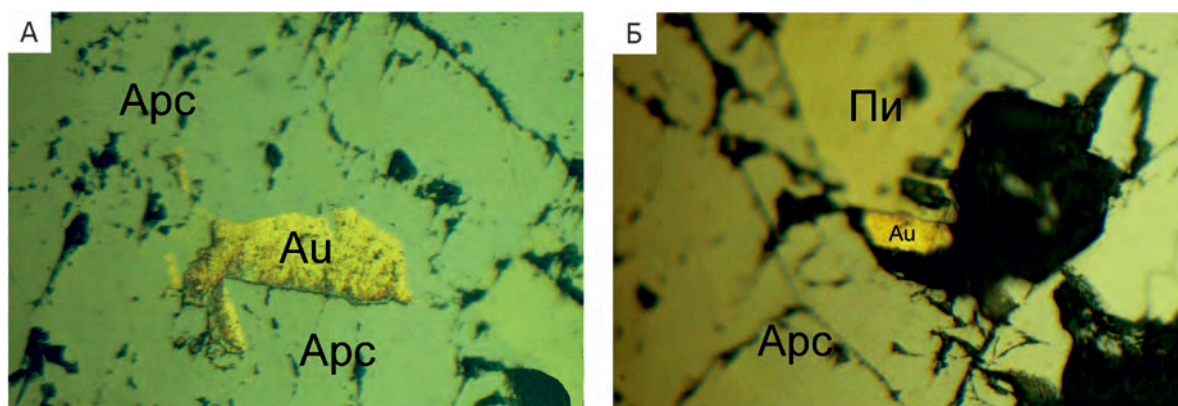


Рис. 5. Самородное золото рудопроявления Дывок:

А – золото (Au) и жильный арсенопирит (Arc), обр. 0014/2, ув. 120; Б – золото (Au) в пустоте, образованной метакристаллом пирита (Пи) и обрастающим его арсенопиритом (Arc), обр. 0014/2, ув. 120

или целиком выполняет кварцевые друзовые полости, в которых рассекает и корродирует зерна пирита и сфалерита, или выполняет их вместе с поздним кварцем, в котором буланжерит наблюдается в виде одиночных иголочек.

Обсуждение результатов. Дальнейшее изучение минерального состава руд месторождения Бодороно показывает, что обнаружение глаукодота, Ni-содержащего пирита, шеелита в ранней пирит-пирротин-кварцевой ассоциации свидетельствует о глубинности и высокой температуре ее образования.

Наибольшее число новых минералов найдено среди золото-теллур-висмут кварцевой ассоциации позднего этапа рудообразования. Такие минералы, как самородный висмут, висмутин, галеновисмутит, хедлейит, ингодит, Se-содержащий галенит, гессит дополнили вещественный состав руд данной ассоциации. При этом часто отмечаются примеси Pb и Sb в висмутине, Se – хедлейите и галените. По набору, составу и примесям теллуридов висмута руды месторождения Бодороно соответствуют таковой полихронного золоторудного месторождения Задержнинское, локализованного в структурах Южного Верхоянья [1, 6], и некоторым золоторудным месторождениям Приморья [7]. Выявление селена в виде примесей в минералах, присутствие гессита и частое обнаружение барита в ассоциации с минералами этой ассоциации указывают на эпитемальность и близповерхностность условий образования описываемой ассоциации позднего этапа.

Самородное золото трех минеральных ассоциаций различается по пробе и элементам-примесям. Золото раннего этапа высокопробное и не содержит примесей. Золото среднего этапа рудообразования среднепробное, элементы-примеси представлены Pb, Ni и Co.

Золото, связанное с теллур-висмут-кварцевой ассоциацией позднего этапа, характеризуется наиболее широким диапазоном колебания пробы (от 643 до 993‰) и примесями Cu, Pb и Hg.

Термобарогеохимические исследования флюидных включений кварца указывают на то, что золотополиметаллически-кварцевая ассоциация месторождения Бодороно формировалась при температуре 270°–300°C и давлении 760×10^5 Па, а золото-теллур-висмут-кварцевая ассоциация – при более низких диапазонах температуры 150°–200°C и давлении 300×10^5 Па. Эти данные согласуются с результатами минералогического изучения руд, которые свидетельствуют о среднеглубинности и мезотермальности среднего этапа и близповерхности и эпитемальности позднего этапа рудообразования.

Аналогичные температуры (гомогенизации) формирования минеральных ассоциаций наблюдаются на месторождениях золото-кварцевого типа (Кировское, Неждановское, Задержнинское) и колеблются в интервалах 300°–250°C [6, 9, 10].

По материалам статьи можно сделать следующие выводы:

1. Дальнейшее изучение вещественного состава руд показало более разнообразный состав и неоднородную пробу самородного золота золото-теллур-висмут-кварцевой ассоциации, свидетельствующий об образовании комплекса висмутовых минералов в нестабильных физико-химических условиях малых глубин формирования месторождения Бодороно.

2. Минералогические данные и результаты термобарогеохимических исследований указывают на то, что золотосульфидно-кварцевая ассоциация месторождения Бодороно формировалась при среднетемпературных условиях (270°–300°C) на средней глубине,

а золото-висмут-кварцевая ассоциация – при более низких диапазонах температуры (150°–200°С) в близповерхностных условиях.

3. По минеральному составу руд и по условиям образования месторождение Бодороно сопоставимо с Задержнинским полихронным золоторудным объектом Аллах-Юньского горнорудного района и с некоторыми золотовисмутовыми рудопроявлениями Приморья.

4. В Дывокском рудопроявлении наряду с золото-кварцевым оруденением развито кварц-сульфидное (молибденовое) оруденение.

5. В вышеописанных объектах развито редкометалльное оруденение, представленное теллур-висмутовой минерализацией на месторождении Бодороно и кварц-молибденовой минерализацией в рудопроявлении Дывок, с которой связана промышленная золотоносность.

6. Приведенные данные свидетельствуют о перспективности рудопроявлений Бодороно и Дывок Верхнеалгоминского района для дальнейшего изучения комплексом поисковых геолого-геофизических методов.

Статья подготовлена по результатам проекта «Стратегически важные виды минерально-сырьевых ресурсов и особенности геологического строения инвестиционно привлекательных территорий Республики Саха (Якутия): металлогения, тектоника, магматизм, геоэкология, совершенствование поисковых и прогнозных технологий» Программы комплексных научных исследований в Республике Саха (Якутия), направленных на развитие ее производительных сил и социальной сферы на 2016–2020 гг.» и по плану НИР ИГАБМ СО РАН, проект № 0381-2016-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анисимова Г.С., Кондратьева Л.А. Золото-теллур-висмутовая минерализация месторождения Задержнинское (Южное Верхоянье, В.Якутия) // *Минералогия*. 2016. № 2. С. 10–19.
2. Анисимова Г.С., Соколов Е.П. Золоторедкометаллополисульфидный тип минерализации месторождения Бодороно (Ю.Якутия) // *Мат-лы научн. конф. Вопросы геологии и комплексного освоения природных ресурсов Восточной Азии*. – Благовещенск, 2014. С. 53–55.
3. Анисимова Г.С., Соколов Е.П. Месторождение Бодороно – новый золоторудный объект Южной Якутии // *Руды и металлы*. 2014. № 5. С. 49–57.
4. Анисимова Г.С., Соколов Е.П. Особенности минерализации месторождения Бодороно (Ю.Якутия) // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы всероссийской научно-практической конференции, 2–4 апреля 2013 г.* – Якутск: ИПК СВФУ, 2013. Т. I. С. 38–41.
5. Гамянин Г.Н., Викентьева О.В., Прокофьев В.Ю. Изотопно-геохимические особенности рудообразующего флюида золотовисмутовых месторождений Северо-Востока России // *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: мат-лы VII всероссийской науч.-практич. конф., посвященной 60-летию Института геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН, 5–7 апреля 2017 г.* – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2017. Т. I. С. 46–51.
6. Кондратьева Л.А. Закономерности локализации, минералого-геохимические особенности и возраст золотого оруденения месторождения Задержнинское (Южное Верхоянье) // *Автореф. дис. ... канд. геол.-минер. наук.* – Новосибирск, 2013.
7. Лотина А.А. Висмут-теллуровая минерализация участка Болотистый (Северо-Западный Сихотэ-Алинь) // *Тихоокеанская геология*. 2011. Т. 30. № 1. С. 97–107.
8. Пономарева Н.И., Гордиенко В.В. Физико-химические условия образования // *Записки РМО*. 1991. Ч. 120. № 5. С. 31–39.
9. Приамурская золоторудная провинция // В.А.Степанов, А.В.Мельников, А.С.Вах и др. – Благовещенск: Изд-во АмГУ, 2008. С. 232.
10. Состав и происхождение флюидов в гидротермальной системе Нежданнинского золоторудного месторождения (Саха-Якутия, Россия) / Н.С.Бортников, Г.Н.Гамянин, О.В.Викентьева и др. // *Геология рудных месторождений*. 2007. № 2. С. 99–146.
11. Условия образования золотосульфидной ассоциации месторождения Бодороно (Южная Якутия) / В.Н.Кардашевская, Е.В.Баданина, Н.И.Пономарева и др. // *Мат-лы VI Российской молодежной научно-практической школы с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования», 28 ноября–2 декабря 2016.* – М.: ИГЕМ РАН, 2016. С. 139–140.
12. Физико-химические параметры золотосульфидной ассоциации месторождения Бодороно (Южная Якутия) / В.Н.Кардашевская, Е.В.Баданина, Н.И.Пономарева и др. // *Мат-лы XVII всерос. конф. по термобарогеохимии, посвященной 80-летию со дня рождения д-ра геол.-минер. наук Ф.Г.Рейфа.* – Улан-Удэ, 2016. С. 73–75.