



ФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГОЛЕЦ ВЫСОЧАЙШИЙ (ЛЕНСКИЙ ЗОЛОТОНОСНЫЙ РАЙОН)

Н. В. Сокерина, С. А. Онищенко, С. И. Исаенко

Институт геологии ИЦ УрО РАН, Сыктывкар, *sokerina@geo.komisc.ru*

Методами гомогенизации, криометрии и рамановской спектроскопии проведено изучение флюидных включений в кварце перекристаллизованных золотоносных сульфидных прослоев и в пирротин-кварцевом прожилке месторождения Голец Высочайший, приуроченного к углеродистым сланцам хомолхинской свиты рифейского возраста. Исследование позволило оценить условия метаморфогенно-гидротермального этапа образования руд. Минералообразование протекало в водных растворах с соленостью 7—13 мас. % экв. NaCl, содержащих азот, метан и углекислоту с небольшой примесью пропана и этана. Температура гомогенизации флюидных включений в кварце послойных сульфидных обособлений составляет 232—473 °С, чаще заключена в интервале 310—370 °С, более высокая температура гомогенизации (до 507 °С) отмечена во включениях в пирротин-кварцевом прожилке. Предполагается, что в зоне рудообразования происходило взаимодействие восстановленных ($\text{CO}_2/\text{CH}_4 < 0.3$) метан-азотных флюидов, генерируемых в черносланцевой толще, и окисленных углекислотно-водных флюидов, имеющих глубинное происхождение.

Ключевые слова: флюидные включения, золото, углеродистые сланцы.

FLUID FORMATION MODE OF THE GOLETS VYSOCHAYSHY GOLD FIELD (LENSKY GOLD REGION)

N. V. Sokerina, S. A. Onishchenko, S. I. Isaenko

Institute of Geology of Komi SC UB RAS, Syktyvkar, *sokerina@geo.komisc.ru*

We have studied fluid inclusions in the quartz of recrystallized gold sulfide layers and in a pyrrhotine-quartz vein of the Golets Vysochayshy field confined to carboniferous shales of Riphean khomolkhinskaya suite. Methods of homogenization, cryometry and Raman spectroscopy were used for the investigations. The study allowed estimating conditions of the metamorphogenic-hydrothermal stage of ore formation. The mineral formation proceeded in aqueous solutions with the salinity 7—13 wt. % NaCl eq., containing nitrogen, methane and carbon dioxide with a small amount of propane and ethane. The homogenization temperature of the fluid inclusions in the quartz of laminated sulfide segregations was 232—473 °C, usually within 310—370 °C; a higher homogenization temperature (up to 507 °C) was observed in the inclusions in a pyrrhotine-quartz vein. It was assumed that the recovered ($\text{CO}_2/\text{CH}_4 < 0.3$) methane-nitrogen fluids, generated in black shales, interacted with the abyssal oxidized carbon dioxide aqueous fluids in the mineralization zone.

Keywords: fluid inclusions, gold, carboniferous shales.

Введение

Золоторудные месторождения Ленского района (Байкало-Патомское нагорье) заключены в мощной (несколько километров) толще докембрийских углеродсодержащих карбонатно-терригенных отложений, слагающих Бодайбинский синклиниорий [4]. Горные массивы в серию линейных складок запад-северо-западного простирания. Золото концентрируется на нескольких стратиграфических уровнях, к отложениям хомолхинской свиты рифейского возраста приурочено месторождение Голец Высочайший (нижняя подсвита), а также крупнейшее месторождение России — Сухой Лог (верхняя подсвита). Условия образования золоторудной минерализации месторождения Сухой Лог неоднократно обсуждались в литературе. Близкое к нему территориально, по характеру локализации и времени образования месторождение Голец Высочайший в значительно меньшей степени привлекало внимание исследователей. Между тем более простое строение этого месторождения, которое проявляется в меньшей дислоцированности рудоносных отложений, незначительном развитии кварцево-жильной минерализации, полном отсутствии интрузивных пород в рудном поле, позволяет считать его эталоном метаморфогенно-гидротермальных золоторудных объектов в углеродисто-терригенных черносланцевых толщах.

Геологическое строение месторождения

Месторождение Голец Высочайший приурочено к северному пологому крылу антиклинальной складки, в ядре которой обнажаются терригенно-карбонат-

ные отложения угаханской свиты, а крылья сложены терригенными отложениями хомолхинской свиты. Горные массивы метаморфизованы в условиях фации зеленых сланцев и подверглись региональному расщеплению, плоскость которого под острым углом пересекает слоистость.

Золотоносными являются темно-серые и черные углеродистые сульфидсодержащие алевритистые сланцы нижней подсвиты хомолхинской свиты. Рудная залежь имеет субпластовую форму, осложнена раздувами и пережимами, при длине залежи около 2 км ее мощность колеблется от 5 до 120 м.

Рудоносные породы сложены агрегатом тонкокристаллического серицита, кварца и некоторого количества хлорита. Присутствуют карбонаты (2—10 мас. %), которые входят в состав тонких (2—3 см) прослоев карбонатсодержащих сланцев или образуют неравномерную вкрапленность в породе. Среди карбонатов преобладает анкерит, распространен кальцит, отмечается сидерит. Углеродистое вещество (0.6—2 мас. %, максимум 5 мас. %) находится в виде тонкодисперсной вкрапленности или мельчайших скоплений и ячеистых сгустков в цементе породы. Текстура породы слоистая, наложенная сланцеватая.

Наиболее яркой чертой руд месторождения являются сульфидные выделения, концентрирующиеся в виде прослоев монолитного или густовкрапленного строения, подчеркивающего слоистую текстуру породы. Содержание сульфидов в рудах составляет около 5 %, за пределами рудных залежей уменьшается до 2—2.5 %. Сульфиды представлены пиритом и пирротинном, их соотношение значительно варьирует от места к

месту, но в целом по месторождению эти минералы распространены примерно одинаково. В небольшом количестве присутствуют также халькопирит, арсенопирит, сфалерит и галенит, отмечаются сульфиды никеля.

Пирит-пирротиновые прослои имеют линзовидную форму, толщина их составляет 0.3–3 см, протяженность обычно изменяется от 0.3 до 2 метров. Для них наиболее характерна средне- и крупнозернистая гранобластовая структура с размером зерен в агрегате 0.5–5 мм, иногда до 1.0–1.2 см. Сульфидные прослои содержат гнезда и прожилки кварца, включения вмещающей породы и часто окружены тонкой (до 1.5 мм) кварцевой оторочкой. К сульфидным прослоям и линзам приурочена вкрапленность самородного золота, которое находится в сростании с сульфидами, а также в тонких кварцевых прожилках в сульфидном агрегате.

Строение сульфидных прослоев отражает многоэтапную историю их формирования, включающую седиментацию, диагенез и главным образом метаморфические преобразования. Породы смяты в складки и подверглись региональному расщеплению совместно с заключенными в них сульфидсодержащими прослоями. При метаморфизме происходила перекристаллизация пород и частичное перемещение сульфидного вещества, что наиболее заметно проявляется в замещении пирротина пиритом, а также разрастании сульфидных обособлений при сохранении их послонного распределения.

В рудной залежи присутствуют немногочисленные кварцевые и карбонат-кварцевые жилы мощностью до 15 см, иногда содержащие сульфидную минерализацию и золото.

Методы исследования

Изучение флюидных включений в кварце проводилось в полированных пластинах методами гомогенизации и криометрии с использованием термокриостата THMSG-600 фирмы Linkam. Соленость раство-

ров во включениях измерялась по температуре плавления льда [9]. Солевой состав включений определялся по температуре эвтектики водно-солевой системы [1].

Газовый состав индивидуальных включений изучался в полированных пластинах на высокоразрешающем рамановском спектрометре LabRam HR-800 (Horiba Jobin Yvon) при комнатной температуре. Для регистрации спектров применялась решетка спектрометра 600 ш/мм, размер конфокального отверстия составлял 300 и 500 мкм, щель — 100 мкм, мощность возбуждающего излучения He-Ne-лазера (длина волны 632.8 нм) — 20 мВт, Ar⁺ лазера — 120 мВт (514.5 нм). Все анализы были выполнены в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН.

Характеристика изученных образцов

Основное внимание было уделено изучению флюидных включений в мелкокристаллическом кварце сульфидных линзовидных прослоев, в которых, как указывалось, сосредоточена основная масса золота. Непосредственно золото выявлено в одном из изученных образцов (ГВ-5). Содержание кварца в сульфидных обособлениях составляет 5–20 %, иногда он сопровождается небольшим количеством карбонатов. Кварц образует тонкие (0.3–1.5 мм) каймы вокруг сульфидных прослоев, тонкие прожилки и неправильной формы выделения среди сульфидного агрегата. Характерно, что кварцевые прожилки не выходят за пределы сульфидных прослоев, даже если они ориентированы перпендикулярно слоистости. В некоторых случаях сульфидные прослои имеют отчетливую структуру с линзочками кварца. Самородное золото заключено как в сульфидах, так и в кварцевых обособлениях. Изученные образцы кварц-сульфидных послонных обособлений характеризуют основные их морфологические разновидности (рис. 1).

Кроме кварц-сульфидных прослоев, флюидные включения изучены в пирротин-кварцевом прожил-

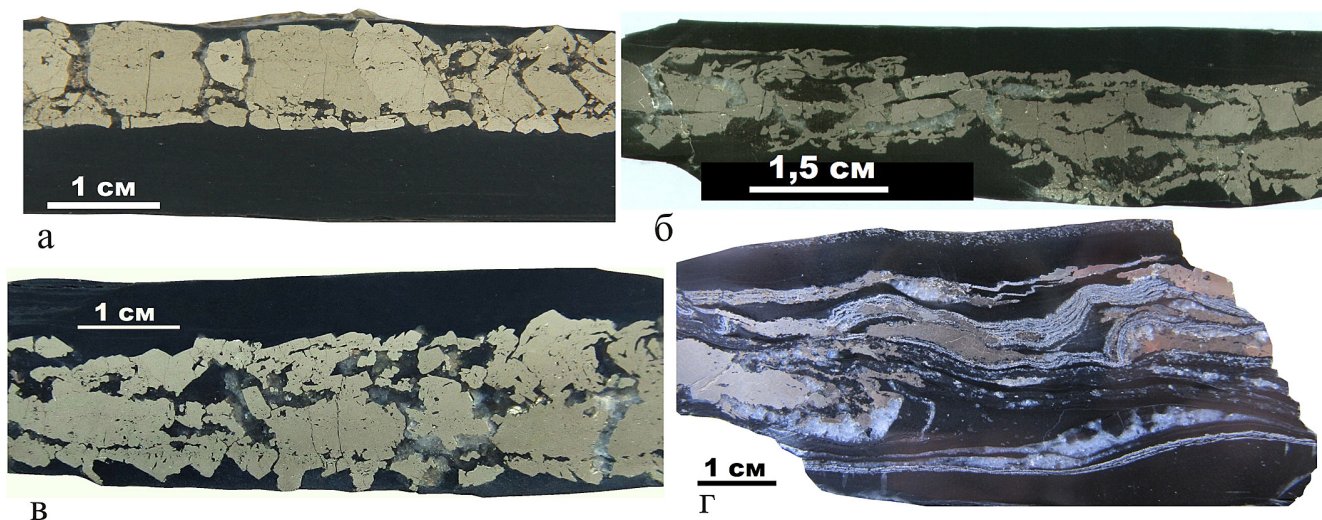


Рис. 1. Кварц-сульфидные послонные обособления: а — прослой пирита в филлите с поперечными прожилками карбонат-кварцевого состава (обр. ГВ-5); б — прослой пирита в филлите с гнездами и клиновидными прожилками кварца (обр. ГВ-14); в — прослой пирита в филлите с гнездами кварца (обр. 2184); г — дислоцированные карбонат-пирит-пирротиновые слои с жилным кварцем в полостях отслоения (обр. ГВ-16)

Fig. 1. Quartz-sulphide layered forms: а — interlayer of pyrite in phyllite with transverse veins of quartz-carbonate composition (sample ГВ-5.); б — interlayer of pyrite in phyllite with the nests and wedge-shaped quartz veins (sample ГВ-14.); в — interlayer of pyrite in phyllite with quartz nests (sample 2184); г — dislocated carbonate-pyrite-pyrrotine layers with vein quartz in detachment cavities (sample ГВ-16)



ке из рудной залежи (обр. ГВ-10). Прожилок неправильной формы толщиной 2–3 см сложен белым полупрозрачным крупнокристаллическим кварцем, содержит гнезда пирротина. Предполагается, что сульфидсодержащие кварцевые прожилки, как и кварц в сульфидных прослоях, формируются в ходе единого процесса метаморфизма руд.

Для общей характеристики метаморфогенно-гидротермального процесса изучены включения в кварцевой жиле из более древних отложений бужуихтинской свиты на участке «Барон» в 7 км к северу от месторождения. Кварцевая жила мощностью от 20 до 30 см, секущая напластование пород, содержит скопления галенита и кристаллы пирита. Кварц крупнокристаллический, полупрозрачный (обр. 107074). Золото в этой жиле и аналогичных ей не выявлено.

Результаты исследования

Изучение флюидных включений в золоторудном мелкокристаллическом кварце сульфидных обособлений показало, что во всех образцах распространены двухфазовые (водный раствор солей + газ) и однофазовые газовые включения (рис. 2 и 3, табл. 1 и 2). Среди газовых встречаются включения высокоплотного флюида с температурой гомогенизации от -101 до -121 °С чаще в жидкую фазу ($n = 5$), реже гомогенизация происходит в газ ($n = 3$), иногда межфазовая граница просто исчезает ($n = 2$). Такие включения наиболее характерны для обр. ГВ 5, который, как было отмечено выше, содержит видимое золото. В других образцах видимого золота не обнаружено, и такие включения встречаются значительно реже. Гомогенизация двухфазовых включений происходила как в жидкую, так и в газовую фазу. Температура

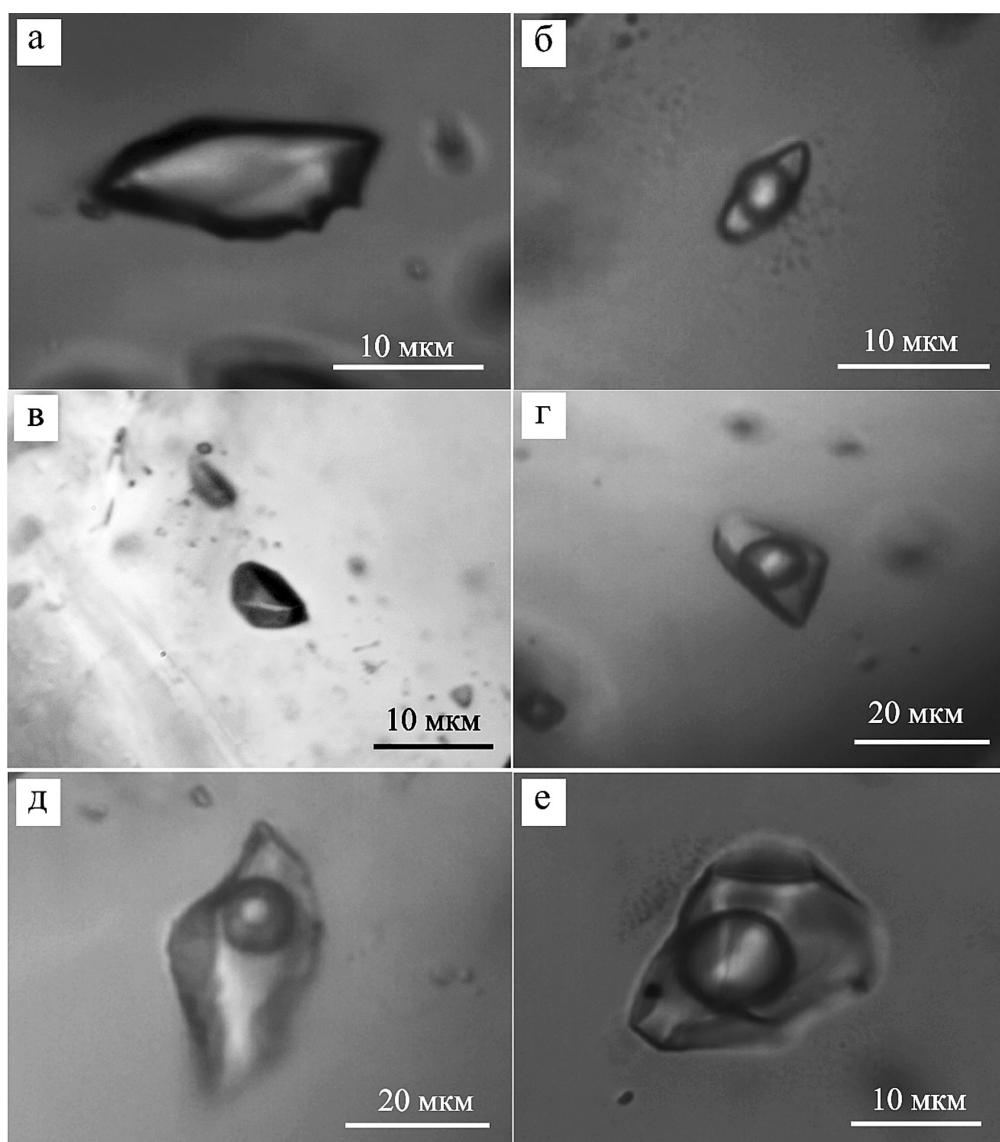


Рис. 2. Типичные флюидные включения в кварце. Месторождение Голец Высочайший: а, б — включения в мелкокристаллическом золоторудном кварце (обр. ГВ-16): а — однофазовое газовое; б — двухфазовое; в, г — включения в крупнокристаллическом золоторудном кварце (обр. ГВ-10): в — однофазовое газовое; г — двухфазовое, при пониженной температуре — трехфазовое. Участок Барон: д — трехфазовое включение в крупнокристаллическом кварце; е — трехфазовое включение в крупнокристаллическом кварце (третья фаза — темное включение — предположительно углеродистое вещество)

Fig. 2. Typical fluid inclusions in quartz. Golets Vysochayshy deposit: а, б — inclusions in fine crystalline gold quartz (sample GW-16), а — single-phase gas; б — two-phase; в, г — inclusions in coarse crystalline gold quartz (sample GW-10), в — single-phase gas; г — two-phase at a lower temperature — three phase. Baron Site: д — three-phase inclusion in coarse crystalline quartz; е — three-phase inclusion in coarse crystalline quartz (the third phase — dark inclusion — presumably carbonaceous substance)

Флюидные включения в кварце месторождения Голец Высочайший

Table 1

Fluid inclusions in quartz from Golets Vysochayshy deposit

Образец Sample	Одно- фазовые One- phase	Двухфазовые с гомогенизацией в газовую фазу Two-phase with homogenization to gas phase, °C	Двухфазовые с гомогениза- цией в жидкую фазу Two-phase with homogenization to liquid phase, °C	Включения высокоплотного флюида Highly dense inclusions			T _{эвт.} T _{eu} , °C	Солен., мас. %, NaCl Salt, wt% Equivalent NaCl
				T _{гом.} ГФ T _{hom} GP, °C	T _{пл.} ГФ T _m GP, °C	T _{гом.} T _{hom} , °C		
ГВ-5	МНОГО газовых many gas	473 (n = 1)	245–398 (n = 11)	–121 ... –110 6			–30 (n = 4) –37 (n = 1)	8–12
ГВ-14	МНОГО газовых many gas	399–400 (n = 3)	267–415 (n = 7)	не обн.			–25±3 (n = 5)	7–8.5
2184	МНОГО газовых many gas	нет	292–381 (n = 7)	–118 2			–34 (n = 1)	—
ГВ-16	МНОГО газовых many gas	400 (n = 1)	232–393 (n = 11)	–103 ... –101 2			–37.5±0.5 (n = 3) –28 (n = 5)	8.7
ГВ-10	МНОГО газовых many gas	400–507 (n = 7)	385–400 (n = 2)	мало / little			–26.5±0.5 (n = 3)	11–13 (n = 4)
				–47 ... –37 (n = 4)	~ –75 (n = 4)	~270*		
107074	мало газовых little gas	380–560 (n = 5)	320–420 (n = 15)	много / many			–26±2 (n = 17) –37.5±0.5 (n = 3)	8–10 (n = 14)
				–24 ... +23.1 (n = 14)	–62.8 ... –58.6 (n = 7)	270 (n = 1) 232–300*		

Примечание. * – взрыв включения до гомогенизации. В скобках указано количество измерений. Обр. 107074 – участок «Барон» за пределами месторождения; T_{гом} – температура гомогенизации; T_{пл} – температура плавления; T_{эвт} – температура эвтектики; ГФ – газовая фаза.

Note. * – explosion of inclusion before homogenization. In brackets – number of measurements. Sample 107074 – Baron Site beyond the deposit. Thom – temperature of homogenization; Tm – temperature of melting, Teu – temperature of eutectics, GP – gas phase.

гомогенизации заключена в интервале 232–473 °C, чаще 310–370 °C. Температура эвтектики растворов во включениях изменялась в интервале от –22 до –30 °C, реже от –34 до –38 °C, что, вероятно, свидетельствует о присутствии в составе водной фазы хлорида натрия, реже хлорида магния. Соленость растворов 7–12 мас. % экв. NaCl. В составе газов преобладает азот и метан, в подчиненном количестве присутствует углекислый газ, причем однофазовые газовые включения отличаются незначительным со-

держанием CO₂ или его отсутствием (рис. 3). В некоторых включениях в очень малых количествах встречается этан и пропан.

Флюидные включения в крупнокристаллическом кварце пирротин-кварцевой жилки из рудной залежи (ГВ-10) разнообразны по составу. Распространены однофазовые газовые и двухфазовые включения (водный раствор солей + газ). Газовая фаза некоторых включений представлена сжиженной углекислотой, гетерогенизирующейся при охлаждении. Гомогенизация двух-

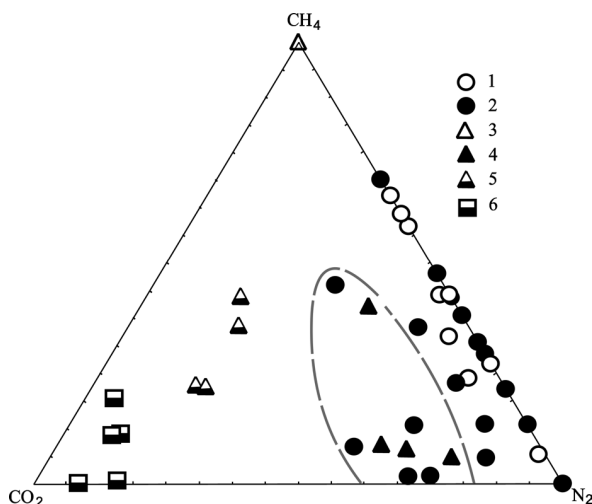


Рис. 3. Состав газовой составляющей флюидов: 1 – двухфазовые включения в кварце послейных сульфидных обособлений; 2 – однофазовые газовые включения в кварце послейных сульфидных обособлений; 3 – двухфазовые включения в пирротин-кварцевом прожилке; 4 – однофазовые газовые включения в пирротин-кварцевом прожилке; 5 – трехфазовые при охлаждении включения в пирротин-кварцевом прожилке; 6 – трехфазовые при охлаждении включения в кварцевой жиле с галенитом за пределами месторождения. Пунктиром отмечена область составов золотоносных флюидов

Fig. 3. Composition of gas component in fluid inclusions: 1–2 – in quartz of sulphide layers: 1 – single-phase gas, 2 – two-phase; 3–5 – in pyrrhotine-quartz veinlet: 3 – single-phase gas, 4 – two-phase, 5 – three-phase during cooling; 6 – three-phase while cooling in quartz vein with halenite beyond the deposit. Dashed line marks expected area of compositions of gold-bearing fluids



Таблица 2

Состав газов во флюидных включениях в кварце месторождения Голец Высочайший (мол. %)

Table 2

Gas composition in fluid inclusions of Golets Vysochayshy deposit (mol. %)

	CO ₂	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	H ₂	H ₂ S	CO ₂ /CH ₄	Фазовый состав Phase composition
ГВ-5 — кварц в прослое пирита / quartz in pyrite layer									
1	1.9	55.5	42.6	—	—	—	—	<	Газ/ Gas
2	—	41.8	58.2	—	—	—	—	0.0	Газ/ Gas
3	—	78.6	21.4	—	—	—	—	0.0	ГФ (25 %) + ЖФ
4	—	70.7	29.3	—	—	—	—	0.0	ГФ (25 %) + ЖФ
5	20.3	34.4	44.3	1.0	—	—	—	0.5	ГФ (50 %) + ЖФ
6	35.4	56.3	8.3	—	—	—	—	4.2	ГФ (60 %) + ЖФ
ГВ-14 — кварц в прослое пирита / quartz in pyrite layer									
1	—	33.1	61.7	2.3	3.0	—	—	0.0	Газ/ Gas
2	—	62.0	38.0	—	—	—	—	0.0	Газ/ Gas
3	—	31.2	68.8	—	—	—	—	0.0	ГФ (30 %) + ЖФ
4	24.1	74.2	1.7	—	—	—	—	13.8	ГФ (60 %) + ЖФ
5	28.9	69.4	1.7	—	—	—	—	16.6	ГФ (60 %) + ЖФ
6	21.3	64.8	14.0	—	—	—	—	1.5	ГФ (70 %) + ЖФ
2184 — кварц в прослое пирита / quartz in pyrite layer									
1	—	100	—	—	—	—	—		Газ/ Gas
2	—	100	—	—	—	—	—		Газ/ Gas
3	—	72.9	27.1	—	—	—	—	0.0	Газ/ Gas
4	4.8	61.9	33.3	—	—	—	—	0.1	Газ/ Gas
5	—	100.0	—	—	—	—	—		ГФ (30 %) + ЖФ
6	—	68.1	31.9	—	—	—	—	0.0	ГФ (50 %) + ЖФ
7	9.6	55.0	35.4	—	—	—	—	0.3	ГФ + ЖФ
8	7.9	78.6	13.5	—	—	—	—	0.6	ГФ (50 %) + ЖФ
ГВ-16 — линзы кварца в дислоцированных карбонат-пирит-пирроотиновых слоях Quartz lenses in dislocated carbonate-pyrite-pyrrotine layers									
1	—	57.3	42.7	—	—	—	—	0.0	Газ/ Gas
2	—	39.0	61.0	—	—	—	—	0.0	Газ/ Gas
3	1.2	92.2	6.6	—	—	—	—	0.2	Газ/ Gas
4	6.0	70.3	23.7	—	—	—	—	0.3	Газ/ Gas
5	8.6	67.2	22.2	1.2	0.9	—	—	0.4	ГФ (50 %) + ЖФ
6	11.5	82.7	5.9	—	—	—	—	2.0	ГФ (50 %) + ЖФ
7	—	52.6	47.4	—	—	—	—	0.0	ГФ (50 %) + ЖФ
8	—	62.1	37.9	—	—	—	—	0.0	ГФ (50 %) + ЖФ
9	—	58.0	42.0	—	—	—	—	0.0	ГФ (50 %) + ЖФ
10	—	52.7	47.3	—	—	—	—	0.0	ГФ (70 %) + ЖФ
ГВ-10 — кварцевая жила с пирроотином / quartz vein with pyrrotine									
1	—	—	100.0	—	—	—	—	0.0	Газ/ Gas
2	16.2	42.4	39.4	1.2	—	0.9	—	0.4	ГФ (60 %) + ЖФ
3	—	86.5	13.5	—	—	—	—	0.0	ГФ (50 %) + ЖФ
4	25.2	65.9	7.8	<	—	1.1	—	3.2	ГФ (50 %) + ЖФ
5	17.8	76.0	6.2	—	—	—	—	2.9	ГФ (30 %) + ЖФ
6	29.2	60.1	8.7	0.2	—	1.8	—	3.4	ГФ + ЖФ
7	56.6	21.4	21.9	—	—	—	0.2	2.6	ГФ + ЖФ + жидкая CO ₂ при охлаждении Liquid CO ₂ at cooling
8	57.8	19.5	22.5	—	—	—	0.2	2.6	
9	43.5	20.8	35.4	0.4	—	—	—	1.2	
10	39.7	17.8	42.5	—	—	—	—	0.9	
107074 — кварцевая жила с галенитом (за пределами месторождения) / quartz vein with halenite (beyond deposit)									
1	75.2	5.6	18.9	—	—	—	0.3	4.0	ГФ + ЖФ + жидкая CO ₂ при охлаждении Liquid CO ₂ at cooling
2	79.1	9.9	10.8	—	—	—	0.3	7.3	
3	78.6	10.2	10.9	—	—	—	0.3	7.2	
4	86.6	13.0	0.4	—	—	—	—	211.1	
5	90,3	9,5	0,3	—	—	—	—	361,1	

Примечания. ГФ — газовая фаза; ЖФ — жидкая фаза. Прочерк — компонент не обнаружен.

Note. ГФ — gas phase; ЖФ — liquid phase. Dash — not detected.

фазовых включений происходила как в жидкую, так и в газовую фазу. Температура гомогенизации заключена в интервале 385–507 °С. Температура эвтектики растворов во включениях (-26.5 ± 0.5) °С, что, вероятно, свидетельствует о присутствии в составе водной фазы хлорида натрия и магния. Соленость растворов 11–13 мас. % экв. NaCl. В составе газов присутствуют азот, метан и углекислый газ. В отдельных включениях отмечаются примеси этана, водорода и сероводорода, а также наличие гидросульфид-иона.

Включения в крупнокристаллическом жильном кварце за пределами месторождения (обр. 107074) отличаются очень высоким содержанием CO_2 , что визуальнo фиксируется наличием во включениях трех фаз (водный раствор солей, жидкая углекислота и газовая фаза), наблюдаемых при комнатной температуре или, чаще, при их охлаждении.

Обсуждение полученных результатов

Наиболее важные результаты получены при изучении состава флюидов в кварце послонных сульфидных обособлений, в состав которых входят водный раствор солей, азот, метан, углекислота, в небольшом количестве также пропан и этан. Состав флюидов во включениях заметно варьирует (рис. 3). Присутствуют безводные включения метан-азотного состава (CO_2/CH_4 не превышает 0.3), а также водосодержащие включения, состав газов в которых изменяется от метан-азотного до метан-углекислотно-азотного со значительной долей (до 20–35 мол. %) углекислого газа. Отношение CO_2/CH_4 в таких флюидах достигает 17.

Привлекает внимание высокое содержание азота в газовой составляющей включений в кварце послонных сульфидных обособлений, отмечены также чисто азотные включения. Ранее богатые азотом включения в кварц-сульфидных образованиях были выявлены на месторождении Сухой Лог. По данным Э. А. Развозжаевой и др. [7], газовые включения плотного азота ($0.57\text{--}0.09$ г/см³) с небольшой примесью углекислоты (3–5 мол. %) присутствовали в кварц-сульфидных прожилках и не наблюдались в кварцевых жилах, где преобладали включения гетерогенного метано-азотно-углекислотно-водного флюида. Наличие включений азота с примесью углекислоты в кварц-пиритовых прожилках этого месторождения отмечено также В. Л. Русиновым и др. [8], мольные доли компонентов $\text{N}_2/\text{CO}_2 = 0.85/0.15$.

В пирротин-кварцевом прожилке месторождения Голец Высочайший наблюдаются водосодержащие включения со значительной (16–57 мол. %) долей углекислоты в составе газовой фазы, отношение CO_2/CH_4 во флюиде заключено в интервале 0.4–3.4.

Эти данные в целом соответствуют результатам, приводимым В. Л. Русиновым и др. [8] и С. Г. Кряжевым и др. [5] по месторождению Голец Высочайший. В кварцевой жиле в рудной зоне присутствуют двухфазовые включения с температурой гомогенизации 245–370 °С, по данным газохроматографического анализа $\text{CO}_2/\text{CH}_4 = 4$. В кварцевой жиле в безрудных породах двухфазовые включения гомогенизируются при 230–310 °С, отношение $\text{CO}_2/\text{CH}_4 = 0.6$ [8].

В сравнении с месторождением Сухой Лог, минералообразование на месторождении Голец Высо-

чайший происходило в относительно восстановительной среде, CO_2/CH_4 флюида, суммируя все данные, заключено в интервале 0.1–17. На месторождении Сухой Лог в составе флюида углекислый газ значительно преобладает над метаном, CO_2/CH_4 флюида, по данным газохроматографического анализа, заключено в интервале 19–86 [5].

Таким образом, состав флюида в золоторудных месторождениях имеет свои индивидуальные особенности, но величина отношения CO_2/CH_4 сама по себе, видимо, не имеет решающего значения для оценки рудообразования.

На месторождении Голец Высочайший в газовой составляющей флюида в кварце послонных сульфидных обособлений преобладают метан и азот, образование которых связано, по нашему мнению, с деструкцией органического вещества при метаморфизме пород. Углекислота в основной части включений практически отсутствует. В некоторой части водосодержащих включений доля углекислоты достигает 20–35 мол. %, что может свидетельствовать о дополнительном ее поступлении. Такие включения присутствуют в двух образцах, в том числе с наличием видимого золота (обр. ГВ-5).

В открытых дренируемых системах, фиксируемых кварцевыми прожилками, в газовом составе флюидов значительна роль углекислоты, которая доминирует в более мощных кварцевых жилах.

Таким образом, в зоне рудообразования присутствовали два флюида, один из которых — метан-азотный (и метан-азотно-водный) — генерировался в самой черносланцевой толще, второй — углекислотно-водный — имеет, возможно, глубинное происхождение. Взаимодействие этих флюидов между собой и окружающей породой создавало условия для мобилизации и отложения золота. При такой интерпретации полученных данных состав водного флюида, осуществляющего транспортировку золота, описывается областью перекрытия составов флюидов в кварце золотоносных послонных сульфидных обособлений и флюидов в золотоносном пирротин-кварцевом прожилке. Отношение CO_2/CH_4 в золотоносном флюиде варьирует от 0.4 до 17.

На примере золоторудных месторождений Ленского района (Сухой Лог, Голец Высочайший и др.) предложена модель метаморфогенно-гидротермального рудообразования [2, 3]. Согласно этой модели, рудообразование связано с региональным метаморфизмом исходно металлоносных углеродистых толщ, причем в первичном накоплении сульфидов и золота в осадке значительная роль отводится гидротермально-осадочными процессам. При последующем метаморфизме пород первичное оруденение подвергалось трансформации и переотложению с образованием промышленных руд.

Реалистичность этой модели была показана для месторождения Сухой Лог на основании данных по распределению золота в последовательно формировавшихся генерациях пирита. Золото в обогащенных органическим веществом глинистых сланцах фиксировалось в структуре диагенетического мышьяковистого пирита. При перекристаллизации диагенетического пирита в процессе метаморфических преобразований пород золото высвобождалось и концентриро-



валось в виде свободного золота в метаморфическом пирите и деформированных послойных пирит-кварцевых прожилках [10].

Результаты изучения месторождения Голец Высочайший вписываются в концепцию первичной концентрации золота в углеродисто-терригенных черносланцевых отложениях с последующим их преобразованием в результате метаморфогенно-гидротермальных процессов [6].

Выводы

Исследование флюидных включений в кварце пекристаллизованных сульфидных прослоев и в пирротин-кварцевом прожилке позволило оценить условия этого метаморфогенно-гидротермального этапа образования руд.

Минералообразование протекало в водных растворах с соленостью 7–13 мас. % экв. NaCl, содержащих азот, метан и уголекислоту с небольшой примесью пропана и этана. Температура гомогенизации флюидных включений в кварце послойных сульфидных обособлений заключена в интервале 232–415 °C (до 473 °C), более высокая температура гомогенизации (до 507 °C) отмечена во включениях в пирротин-кварцевом прожилке.

Предполагается, что в метаморфогенно-гидротермальной системе в зоне рудообразования происходило взаимодействие восстановленных ($\text{CO}_2/\text{CH}_4 < 0.3$) метан-азотных флюидов, генерируемых в черносланцевой толще, и окисленных уголекислотно-водных флюидов, имеющих глубинное происхождение.

Золотоносные флюиды имели метан-уголекислотно-азотно-водный состав, отношение CO_2/CH_4 заключено в интервале 0.4–17.

Исследования проведены на базе Центра коллективного пользования «Геонаука» при частичной финансовой поддержке Программы УрО РАН № 15-18-5-46.

Литература

1. Борисенко А. С. Изучение солевого состава растворов газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
2. Буряк В. А. *Метаморфизм и рудообразование*. М.: Недра, 1982, 256 с.
3. Буряк В. А., Хмелевская Н. М. Сухой Лог — одно из крупнейших золоторудных месторождений мира (генезис, закономерности размещения оруденения, критерии прогнозирования). Владивосток: Дальнаука, 1997. 156 с.
4. Иванов А. И. Основные черты геологического строения и золотоносность Бодайбинского рудного района // Руды и металлы. 2008. № 3. С. 43–61.
5. Кряжев С. Г., Устинов В. И., Гриненко В. А. Особенности флюидного режима формирования золоторудного месторождения Сухой Лог по изотопно-геохимическим данным // Геохимия. 2009. № 10. С. 1108–1117.
6. Онищенко С. А. Геохимия золотоносных черных сланцев (месторождение Голец Высочайший, Ленский золо-

тоносный район) // Геохимия литогенеза: материалы рос. совещ. с междунар. участием (Сыктывкар, 17–19 марта 2014 г.). Сыктывкар, 2014. С. 302–306.

7. Развозжаева Э. А., Прокофьев В. Ю., Спиридонов А. М., Мартихаева Д. Х., Прокочук С. И. *Благородные металлы и углеродистое вещество в рудах месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь, Россия) // Геология рудных месторождений*. 2002. Т. 44. № 2. С. 116–124.

References

1. Borisenko A. S. *Izuchenie solevogo sostava rastvorov gazovo-zhidkih vklyuchenii v mineralah metodom kriometrii* (Study of salt composition of gas-liquid solutions in minerals by cryometry). *Geologiya i geofizika*, 1977, No. 8, pp. 16–27.
2. Buryak V. A. *Metamorfizm i rudoobrazovanie* (Metamorphism and ore formation). Moscow, Nedra, 1982, 256 pp.
3. Buryak V. A., Hmelevskaya N. M. *Suhoy Log — odno iz krupneishih zolotorudnyh mestorozhdenii mira (genезis, zakonornosti razmescheniya orudneniya, kriterii prognozirovaniya)* (Sukhoy Log — one of the largest gold deposits of the world (genesis, mineralization rules, prognosis criteria). Vladivostok, Dalnauka, 1997, 156 pp.
4. Ivanov A. I. *Osnovnye cherty geologicheskogo stroeniya i zolotonosnost' Bodaibinskogo rudnogo raiona* (Main features of geological structure and gold content of Bodaybinsky ore region). *Rudy i metally*, 2008, No. 3, pp. 43–61.
5. Kryazhev S. G., Ustinov V. I., Grinenko V. A. *Osobennosti flyuidnogo rezhima formirovaniya zolotorudnogo mestorozhdeniya Suhoy Log po izotopno-geohimicheskim dannym* (Features of fluid mode of formation of gold deposit Sukhoy Log according to isotope data). *Geohimiya*, 2009, No. 10, pp. 1108–1117.
6. Onischenko S. A. *Geohimiya zolotonosnyh chernyh slantsev (mestorozhdenie Golets Vysochaishtii, Lenskii zolotonosnyi raion)* (Geochemistry of gold-bearing black shales (Golets Vysochayshy deposit, Lena gold province). *Geohimiya litogeneza: Proceedings of conference* (Syktyvkar, 17–19 March 2014), Syktyvkar, 2014, pp. 302–306.
7. Razvozzhaeva E. A., Prokofev V. Yu., Spiridonov A. M., Martihaeva D. H., Prokopchuk S. I. *Blagorodnye metally i uglerodistoe veschestvo v rudah mestorozhdeniya Suhoy Log (Vostochnaya Sibir, Rossiya)* (Noble metals and carbonaceous substance in ores of Sukhoy Log deposit (East Siberia, Russia). *Geologiya rudnyh mestorozhdenii*, 2002, V. 44, No. 2, pp. 116–124.
8. Rusinov V. L., Rusinova O. V., Kryazhev S. G., Schegolkov Yu. V., Alysheva E. I., Borisovskii S. E. *Okolorudnyi metasomatizm terrigennyh uglerodistykh porod v Lenskom zolotorudnom raione* (Wallrock metasomatism of terrigenous carbonaceous rocks in Lena gold province). *Geologiya rudnyh mestorozhdenii*, 2008, V. 50, No. 1, pp. 3–46.
9. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions // *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Pontignano, Siena, 1994, pp. 117–130.
10. Large R. R., Maslennikov V., Robert F., Danyushevsky L. V. and Chang, Z. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoy Log deposit, Lena gold province, Russia. *Economic Geology*, 2007, v. 102, pp. 1233–1267.