

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КВАРЦА ЗОЛОТОРУДНОГО  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ БАЗОВСКОЕ (ВОСТОЧНАЯ ЯКУТИЯ, РОССИЯ)**

**В.Ю. Фридовский<sup>1</sup>, С.Г. Кряжев<sup>2</sup>, Н.А. Горячев<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>ФГБУН Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, ул. Ленина 39, г. Якутск, 677980;  
e-mail: [fridovsky@diamond.ysn.ru](mailto:fridovsky@diamond.ysn.ru)

<sup>2</sup>ФГБУ Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, ул. Варшавское шоссе 129, корп.1 г. Москва, 117545; e-mail: [s34@mail.ru](mailto:s34@mail.ru)

<sup>3</sup>ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, ул. Портовая 16, г. Магадан, 685000; e-mail: [goryachev@neisri.ru](mailto:goryachev@neisri.ru)

Поступила в редакцию 22 января 2019 г.

На основе данных по составу и свойствам флюидных включений в жильном кварце прослежена эволюция гидротермальной системы, сформировавшей Базовское золоторудное месторождение. Образование золотоносных кварцевых жил протекало на фоне небольшого снижения температуры от 290 до 230 °С и значительного снижения давления от 0.75 до 0.25 кбар. Установленный сброс давления сопровождался объемной кристаллизацией кварца из насыщенных по отношению к SiO<sub>2</sub> гидротерм с образованием остаточной флюидной фазы. Состав флюида при этом изменялся от водно-углекислотного до водно-углекислотно-метанового с ростом концентрации хлоридов щелочных и щелочноземельных металлов (от 1 до 8 мас.% NaCl-экв.), а также рудогенных элементов (As, Sb, Fe, Zn и др.). Давление, при котором завершилось образование золото-кварцевых жил (около 0.25 кбар), позволяет ограничить глубину формирования месторождения Базовское интервалом от 1 км (в случае литостатического градиента) до 2.5 км (при гидростатическом градиенте).

**Ключевые слова:** самородное золото, кварц, флюидные включения, месторождение Базовское, Верхояно-Колымская складчатая система, Восточная Якутия, Россия.

**ВВЕДЕНИЕ**

Базовское золоторудное месторождение было открыто в начале 50-х годов. В этот период основное внимание уделялось разведке кварцевых жил, являющихся источником золота богатых россыпей. В 2004–2009 гг. изучались минерализованные зоны дробления с жильно-прожилковой золото-кварцевой минерализацией, что позволило увеличить рудный потенциал месторождения. По данным АО «ГРК Западная» прогнозные ресурсы золота Базовского рудного поля составляют 182 т, запасы – 8.6 т. Геолого-структурные и минералого-геохимические сведения о месторождении обсуждались в ряде публикаций [5, 9, 13, 14, 18, 23]. Имеются данные о флюидном режиме формирования некоторых золоторудных месторождений Верхне-Индибирского района [1, 2, 6, 15–17]. Полученные характеристики состава и РТ параметров формирования кварца рудных жил соответствуют установленным для орогенных золоторудных месторождений

[24]. К этому типу на Северо-Востоке России относятся крупные золоторудные месторождения – Наталкинское, Павлик, Нежданинское, Дрожное, Мало-Тарынское и другие. Особенностью Базовского месторождения является наличие полостей с крупными кристаллами друзовидного кварца. С целью установления эволюции состава, температуры и давления минералообразующей среды в процессе формирования месторождения Базовское авторами впервые выполнены термобарогеохимические исследования различных зон крупных кристаллов друзовидного кварца, а также образцов молочно-белого кварца из рудных жил, для которых ранее методом вакуумной декрепитации была получена оценка температуры в 290 °С и давления 0.8 кбар [7].

**ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Месторождение расположено на северо-западе Эльгинского рудного узла Яно-Колымского золото-

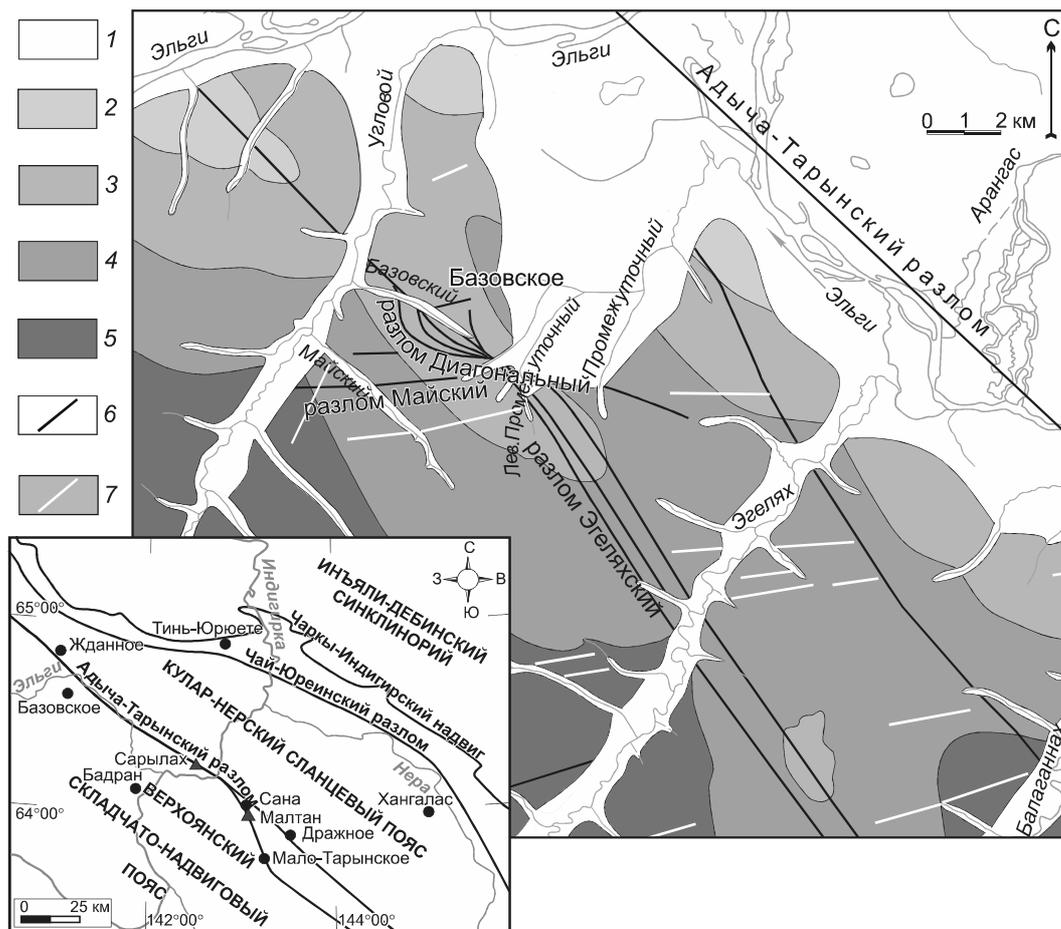


Рис. 1. Схема геологического строения северо-западной части Эльгинского рудного узла.

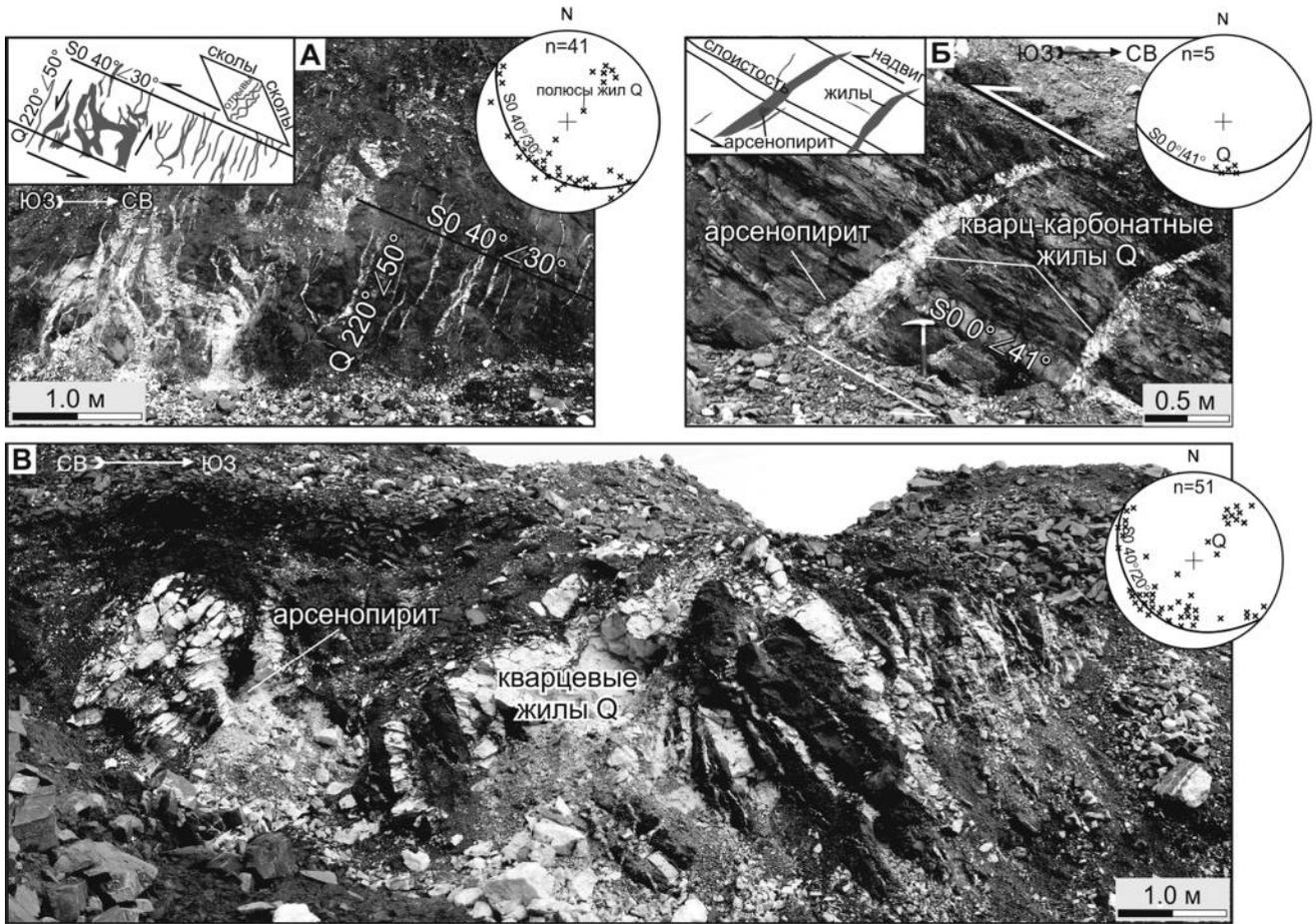
1 – четвертичные отложения; 2–5 – верхнетриасовые отложения: 2–4 – черняйская свита: 2 – верхняя подсвита, 3 – средняя подсвита, 4 – нижняя подсвита; 5 – быйттахская свита; 6 – разломы; 7 – позднеюрские дайки диоритовых порфиров. На врезке кружки – Au месторождения, треугольники – Au-Sb месторождения.

носного пояса в юго-западном крыле Адыча-Тарынского разлома (рис. 1). Разлом отделяет структуры Адыча-Эльгинского антиклинория Верхоянского складчато-надвигового пояса от Тарынского синклинория и Нера-Омчугского антиклинория Кулар-Нерского сланцевого пояса.

Месторождение сформировано при позднеюрских-раннемеловых аккреционно-коллизийных процессах на восточной окраине Сибирского кратона. Вмещающими породами месторождения Базовское являются норийские отложения черняйской свиты. Она сложена переслаиванием преимущественно мелко- и среднезернистых песчаников, песчаных алевролитов и алевролитов. Черняйская свита подстилается алевролитами, алевропесчаниками быйттахской свиты и перекрывается пачками переслаивания алевролитов, алевропесчаников и песчаников былиньинской свиты. Магматические образования представлены редкими дайками позднеюрских диоритовых

порфиров близширотного простирания нера-бохапчинского комплекса.

Складчато-надвиговый стиль деформаций пород месторождения Базовское определяется положением в лежачем крыле Адыча-Тарынского разлома в месте пересечения основных разломов СЗ и поперечных разломов СВ (поперечные ramпы) и близширотного (косые ramпы) простирания [14]. Отмеченная закономерность характерна также для других рудных полей Верхне-Индигорского района. Минерализованные зоны дробления с жильно-прожилковой минерализацией являются основными рудоконтролирующими структурами. Они образуют чешуйчатый веер с фронтальной последовательностью [18]. На месторождении выделяется разлом Диагональный и ответвляющиеся от него в висячем крыле рудные зоны Восточная, Центральная, Средняя и Западная. Разлом Диагональный, мощностью до десяти метров, сложен черными флюидально-линзовидными милонитами,



**Рис. 2.** Жильно-прожилковые рудные тела месторождения Базовское.

А, Б – лестничные жилы в пластах песчаников; В – кварцевые жилы с гнездами арсенопирита. На диаграммах (верхняя полусфера сетки Вульфа) показаны полюса кварцевых жил Q (крестики) и проекции слоистости S0.

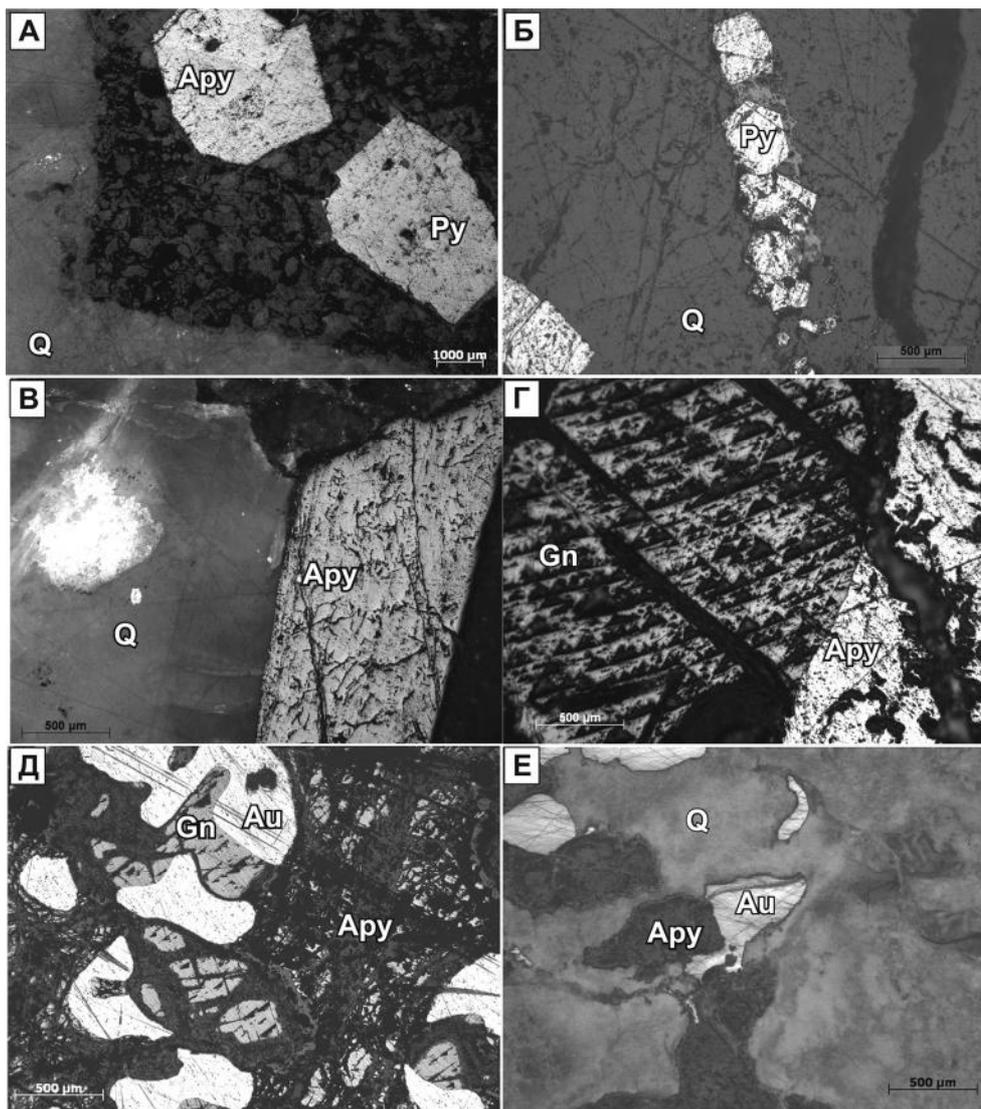
блоками окварцованных песчаников и редко будинами даек основного состава. Рудные зоны имеют угол падения от  $40\text{--}60^\circ$  до вертикального и преимущественно северо-восточное падение. Мощность рудных зон изменяется от первых м до  $50\text{--}60$  м.

Структурный план месторождения Базовское определяется преобладающим пологим ( $20^\circ\text{--}30^\circ$ ) падением пород на северо-восток, осложненным в крыльях минерализованных зон дробления складками нескольких генераций. Проявлены открытые, реже сжатые линейные складки концентрического типа северо-западного простирания и юго-западной вергентности. В крыльях разрывных нарушений отмечаются опрокинутые складки. С послонными срывами на контактах пород разной компетентности тесно связаны локальные складки. Осевые поверхности ранних складок незначительно изгибаются, что указывает на коаксиальные наложенные деформации или может быть отражением прогрессивной деформации одного этапа. Наложенные деформации представлены сдви-

гами, в основном наследующими положение ранних надвигов, а также поперечными складками северо-восточного и близширотного простирания.

В крыльях минерализованных зон преимущественно в пластах песчаников развиты многочисленные жильно-прожилковые тела лестничного типа [18]. Выделяется несколько систем кварцевых жил и прожилков, образующих линейные и пластовые штокверки и их комбинации, тесно связанные с надвиговыми движениями по рудоконтролирующим разломам (рис. 2).

Минеральный состав рудных тел идентичен малосульфидной золото-кварцевой минерализации центральной части Яно-Колымского пояса, для которой типичны ранняя (пирит-арсенопирит-серицит-кварцевая метасоматическая, пирит-арсенопирит-кварцевая жильная минеральные ассоциации), средняя (халькопирит-сфалерит-галенитовая минеральная ассоциация) и поздняя (сульфосолюно-карбонатная минеральная ассоциация) стадии минералообразования [5]. Рудные тела сложены кварцем –  $85\text{--}95\%$ ,



**Рис. 3.** Минеральный состав руд месторождения Базовское.

А – вкрапленность пирита (Py) и арсенопирита (Apy) в околожильно измененном песчанике; Б – пиритовый (Py) прожилок в кварце; В – выделение арсенопирита (Apy) в кварце (Q); Г – срастание галенита (Gn) и арсенопирита (Apy); Д – включения субграфические галенита (Gn) и золота (Au) в корродированном агрегате арсенопирита (Apy); Е – выделение самородного золота (Au) в арсенопирит-кварцевом агрегате. Сокращенные обозначения минералов по работе [27].

анкеритом – 5–15 %, количество рудных минералов около 1–3 % (арсенопирит, пирит, халькопирит, сфалерит, галенит, сульфосоли, золото и др.) (рис. 3). Характерны серицит-анкерит-кварцевые, хлорит-кварцевые и альбит-хлорит-кварцевые околорудные гидротермальные изменения [9]. Среди рудных минералов преобладает арсенопирит. Ранний арсенопирит – метасоматический, формирует вкрапленность в околорудном пространстве, часто ассоциируя с пиритом (рис. 3 А). В кварцевых жилах арсенопирит-2 обычно образует метакристаллы размером 1–7 мм, реже гнезда размером до 10–30 см (рис. 3 В). В зернах арсенопирита отмечаются включения кристаллов

пирита и дендритоподобных агрегатов золота, а также вкрапленность галенита, ильменита. Арсенопирит существенно сернистый, отношение S/As составляет 0.96–1.16, в среднем 1.06, величина  $\delta^{34}\text{S}$  изменяется от -0.86 до +2.30 ‰, что характерно для золото-кварцевых месторождений Верхояно-Колымской складчатой области [5, 6].

Самородное золото тесно связано с галенит-халькопирит-сфалеритовой ассоциацией (рис. 3 Д, Е). Оно представлено дендритоподобными, интерстициальными, комковидными, реже ленточными формами. Пробность золота в среднем составляя 823 ‰. Бонанцевые концентрации золота характерны для трещино-

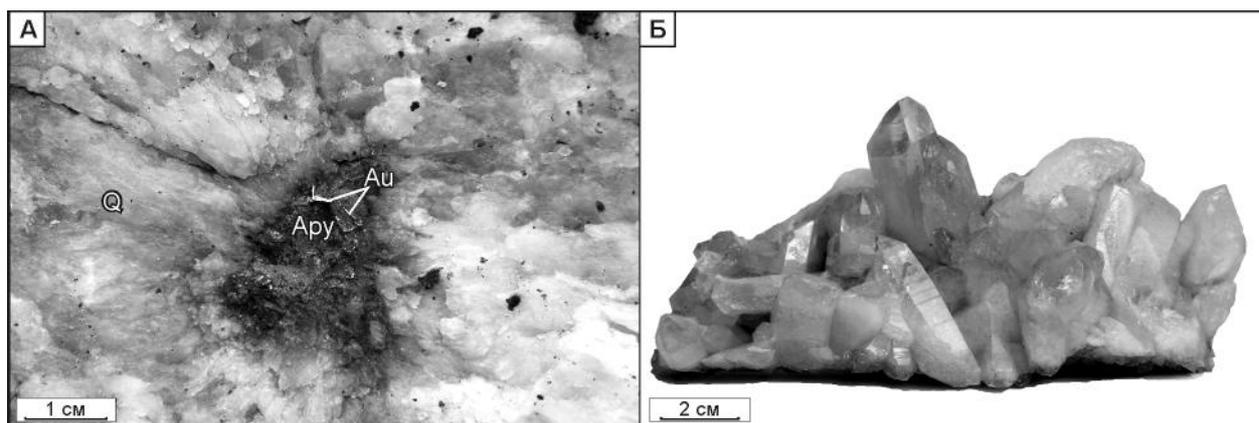


Рис. 4. Кварц месторождения Базовское.

А – срastание самородного золота (Au) и арсенипирита (Apy) в молочно-белом кварце; Б – друзовидный прозрачный кварц.

ватых гнезд арсенипирита в кварцевых жилах, менее обогащены интервалы жильно-прожилкового окварцевания зон дробления. Золото в пределах рудных зон распределено крайне неравномерно, содержание в отдельных пробах колеблется от менее 0,2 до 698 г/т, среднее содержание 13 г/т [9].

Молочно-белый кварц представлен крупно- и среднезернистыми, преимущественно гипидиоморфными агрегатами (рис. 4 А). В молочно-белом кварце отмечается множество залеченных трещин различной ориентировки, что свидетельствует о многократных деформациях, связанных с тектоническими событиями. Кроме того, в жилах распространены удлиненные и изометричные полости размером от 3–4 до 20–30 см. Они заполнены друзовидным прозрачным кварцем (рис. 4 Б). Размер кристаллов обычно составляет 2–4 см, иногда достигает 6–8 см. Прозрачные и полупрозрачные короткостолбчатые кристаллы кварца ограничены с одного конца ромбодрамы. На гранях наблюдается штриховка.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Микротермометрические анализы проводились с использованием криотермокамеры конструкции ЦНИГРИ, позволяющей выполнять охлаждение и нагревание препаратов от  $-180$  до  $+650$  °С с измерением температуры посредством хромель-алюмелевой термодпары. Камеру периодически калибровали при температурах кипения азота ( $-196$  °С) и тройной точки чистой  $\text{CO}_2$  ( $-56.6$  °С), температурах плавления льда в стандартных растворах  $\text{NaCl}$  (от  $-18^\circ$  до  $-1$  °С), температурах плавления  $\text{AgNO}_3$  ( $210$  °С),  $\text{K}_2\text{CrO}_7$  ( $398$  °С) и  $\text{NaI}$  ( $651$  °С). Точность измерения температуры плавления льда составляла  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ , температур гомогенизации включений  $\pm 5$  °С. При интерпретации результатов использованы экспериментальные и расчетные

данные по свойствам систем  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2$  и  $\text{CO}_2-\text{CH}_4$  [12, 20, 22, 26].

В изученных образцах кварца присутствуют газожидкие включения, содержащие водно-солевой раствор и уголекислоту с примесью метана. Концентрацию солей оценивали по температуре плавления льда и /или газогидрата. Содержание уголекислотно-метановой фазы определяли на основе измерения ее объемной доли во включении и ее плотности. Последнюю оценивали по температуре плавления и гомогенизации  $\text{CO}_2$  с учетом влияния метана на температуры этих фазовых переходов.

По соотношению фаз включения разделяются на уголекислотно-водные и водно-уголекислотные. Подобные ассоциации газожидких и существенно газовых включений весьма характерны для орогенных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах. Это является следствием закономерной насыщенности водных растворов уголекислотой во всем диапазоне температур и давлений. Поскольку флюиды, захваченные одновременно во включения разной плотности, находятся на линии двухфазового равновесия, измеренные температуры гомогенизации являются температурами захвата (температурами минералообразования). Давление определяли по методу Калюжного [10] с использованием компьютерной программы [19] и с обязательным контролем правильности результата по растворимости  $\text{CO}_2$  в водно-солевых растворах [12].

Во многих пластинах наблюдались вторичные низкотемпературные включения, которые не изучались в связи с их малой информативностью и неясной генетической принадлежности. Относительно крупные флюидные включения, размеры которых позволяют выполнять микротермометрические измерения, в жильном кварце достаточно редки. В связи с этим

большое значение придается валовому анализу, который обеспечивает определение состава флюидной фазы в любом образце кварца. Анализ валового состава флюидных включений выполняли по методике [11], аналитик Ю.В. Васюта. Навеску минерала массой 1 г (фракция  $-0.5+0.25$  мм) очищали от посторонних примесей азотной кислотой и затем электролитически в потоке воды. Затем пробу нагревали в атмосфере гелия до  $500$  °С. Газы, выделившиеся из вскрытых флюидных включений, при помощи крана-дозатора вводили в хроматограф Agilent 6890, снабженный делителем потока для одновременного определения воды, углекислоты и углеводородов. Затем декрепитированную пробу заливали деионизированной водой и помещали в ультразвуковую ванну. Раствор вытяжки отделяли путем центрифугирования. Анионы ( $\text{Cl}$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{SO}_4$ ) в вытяжке анализировали на жидкостном хроматографе ЦВЕТ 3006, катионы и микроэлементы – масс-спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой (Elan 6100). Из результатов вычитали результаты анализа повторных (холостых) вытяжек. Одновременное извлечение солей и растворителя (воды) из одной навески позволило рассчитать концентрацию всех компонентов в растворах включений.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

В изученных образцах друзовидного кварца, показанных на рис. 5, присутствуют первичные и псевдоторичные включения. Первые образуют трехмерные кластеры, приуроченные к определенным зонам роста минерала-хозяина. Вторые залечивают короткие трещинки, не выходящие на поверхность кристалла. В друзовидном кварце в наибольшей степени насыщено первичными газожидкими включениями основание кристалла. В верхней хрусталевидной зоне встречаются редкие одиночные первичные включения и их небольшие группы. Все включения при комнатной температуре содержат водно-солевой раствор и газовый пузырек (рис. 5 А, Б).

Водно-солевой раствор имеет высокую температуру эвтектики (начало плавления содержимого наблюдается в интервале от  $-8$  до  $-5$  °С). После полного плавления нередко наблюдаются два-три газовых пузырька, сосуществующих достаточно долгое время, что указывает на высокую вязкость раствора. Предположительно, в его составе присутствуют кремниевые кислоты. Валовым анализом определены следующие основные компоненты растворов включений (средние по 9 анализам, г/кг  $\text{H}_2\text{O}$ ):  $\text{CO}_2$  (36),  $\text{CH}_4$  (0.7),  $\text{Si}$  (14),  $\text{Cl}$  (8.3),  $\text{Na}$  (1.9),  $\text{Ca}$  (1.4),  $\text{K}$  (0.3),  $\text{Mg}$  (0.3),  $\text{As}$  (1.9),  $\text{B}$  (0.4),  $\text{Fe}$  (0.2),  $\text{Zn}$  (0.1),  $\text{Sb}$  (0.1).

При охлаждении в наиболее крупных включениях наблюдается вымораживание  $\text{CO}_2$  в газовом

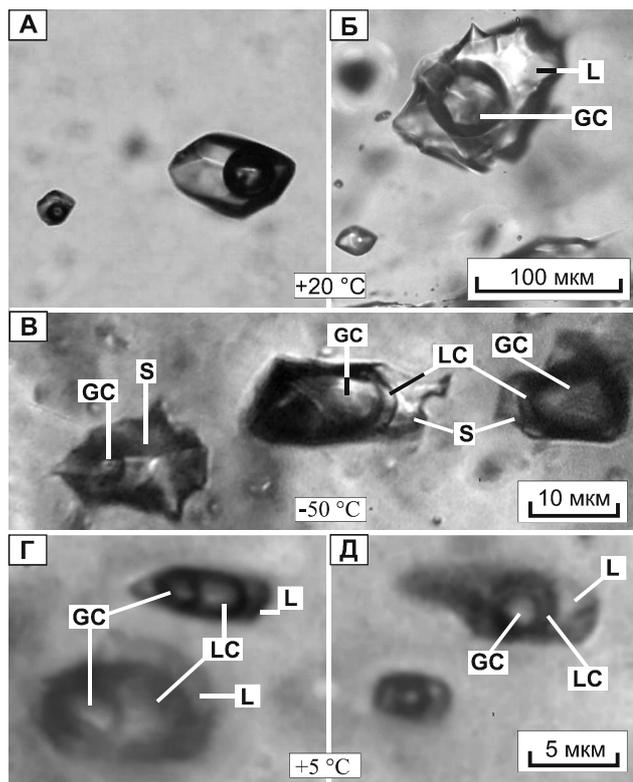


Рис. 5. Флюидные включения в кварце месторождения Базовское.

В друзовидном кварце, первичные: А – в верхней части кристалла, Б – в основании кристалла. В молочно-белом кварце: В – вторичные (при  $-50$  °С), Г – первичные водно-углекислотные, Д – первичные углекислотно-водные. Фазы: L – водный раствор, S – лед; флюид  $\text{CO}_2+\text{CH}_4$ : LC – жидкий, GC – газообразный.

пузырьке, а также образование газогидратов. Низкая температура плавления углекислоты (до  $-77$  °С) и высокая температура плавления газогидрата (до  $+14.5$  °С) однозначно указывают на присутствие в газовой фазе включений значительной доли метана [22, 26]. После плавления углекислоты происходит ее сублимация, жидкая фаза не просматривается.

Идентичность температур гомогенизации включений в верхней и нижней зонах ( $270 \pm 5$  °С, табл. 1) свидетельствуют о том, что кристалл рос практически в изотермических условиях. Псевдоторичные включения гомогенизируются при  $270-240$  °С, что указывает на снижение температуры на заключительной стадии кристаллизации кварца. Содержание газов в растворе включений не превышает 2–3 мол. %, соответствующее давление при температуре гомогенизации составляет 0.2–0.3 кбар.

В молочно-белом кварце находится большое число включений, которые по крио-термометрическим параметрам близко соответствуют вышеописанным

Таблица 1. Параметры флюидных включений в кварце месторождения Базовское

№ образца	Температуры фазовых переходов, °С					Расчетные параметры		
	T <sub>л</sub>	T <sub>гг</sub>	T <sub>пл</sub> CO <sub>2</sub>	T <sub>гом</sub> CO <sub>2</sub>	T <sub>гом</sub>	H <sub>2</sub> O:CO <sub>2</sub> :CH <sub>4</sub> моль. % [12, 26]	C <sub>солей</sub> , мас. % экв. NaCl [20, 22]	P, кбар [12]
Первичные и псевдвторичные включения в основании (о), средней (с) и верхней (в) части кристалла друзовидного кварца								
Бз-67(в)	-4.8	6.5	–	–	240–245	98:1:1	7.6	0.2–0.3
Бз-39(в)	-5.1	9.0	-61.8	–	265–275	97:1:2	8.0	
Бз-39(с)	-3.7	14.5	-77.0	–	250–270	97:1:2	6.0	
Бз-39(о)	-2.0	–	–	–	265–275	97:1:2	3.4	
Вторичные включения в молочно-белом кварце								
Бз-8	-4.0	13.0	–	–	240–275	97:1:2	6.5	0.2–0.3
Бз-46	-3.5	11.0	–	–	230–240	98:1:1	5.7	0.25
	–	11.0	-62.5	-35.5(г)	230–250(г)	60:10:30	–	
Бз-38	-1.5	–	–	–	215–230	100:00:00	2.5	–
Первичные включения в молочно-белом кварце								
Бз-8	–	9.2	-56.8	+19.5(ж)	280–300(г)	45:55:00	1.5	0.75
Бз-38	–	9.8	-57.5	+9.0(ж)	280–290	85:15:00	0.5	

*Примечание.* Температуры: T<sub>л</sub> – плавления льда ( $\pm 0.2$  °С), T<sub>гг</sub> – плавления газогидрата, T<sub>пл</sub>CO<sub>2</sub> – плавления углекислоты, T<sub>гом</sub>CO<sub>2</sub> – гомогенизации метаново-углекислотного флюида в газовую (г) или жидкую (ж) фазу, T<sub>гом</sub> – полной гомогенизации включения путем растворения метаново-углекислотного флюида в воде ((г) – путем испарения воды). В каждой группе проанализировано не менее 10 индивидуальных включений.

(табл. 1). Включения залечивают многочисленные системы трещин и по отношению к кварцу являются, несомненно, вторичными. Очевидно, в них содержится раствор, из которого росли кристаллы друзовидного кварца. Поскольку жильный кварц, согласно существующим представлениям, в основной массе формировался из насыщенных по отношению к SiO<sub>2</sub> гидротерм, остаточный флюид после его раскристаллизации формировал рудные минералы и кристаллы кварца в полостях [7]. Это предположение подтверждается результатами валовых анализов (табл. 2, рис. 6): изменчивость концентраций практически всех элементов в растворах включений из разных зон одного кристалла сопоставима с изменчивостью состава растворов включений в молочно-белом кварце для месторождения в целом. Ранее это было показано одним из авторов на ряде примеров из разных месторождений [7].

Для отдельных генераций вторичных включений в молочно-белом кварце установлено небольшое понижение температуры гомогенизации (до 230 °С) и появление в ассоциации с ними включе-

ний газообразного углекислотно-метанового флюида (рис. 5 В, обр. Бз-46 в табл. 1). Подобное свидетельство гетерогенизации флюидов указывает на то, что растворы при 240–275 °С находились вблизи линии двухфазового равновесия. Следовательно, температура и давление ( $0.25 \pm 0.05$  кбар) при гомогенизации включений соответствуют РТ-условиям их захвата.

Первичные включения в молочно-белом кварце встречаются относительно редко в виде единичных вакуолей и их изолированных кластеров, расположенных вне связи с трещинами. Они содержат весьма разбавленный водно-солевой раствор (концентрация солей  $1 \pm 0.5$  мас. % NaCl-экв.) и практически чистую плотную углекислоту (примесь метана в CO<sub>2</sub> не превышает 3 мол. %). По соотношению воды и углекислоты включения разделяются на углекислотно-водные (CO<sub>2</sub> около 30 об. % с плотностью 0.87 г/см<sup>3</sup>) и водно-углекислотные (CO<sub>2</sub> около 80 об. % с плотностью 0.78 г/см<sup>3</sup>), захваченные в гетерогенной минералообразующей среде при температуре 290  $\pm$  10 °С и давлении 0.75 кбар (рис. 5 Г, Д, табл. 1). Эти результаты практически совпали с оценкой, прове-

Таблица 2. Состав растворов флюидных включений в кварце месторождения Базовское (по данным валового анализа).

Кварц № пробы	Друзовидный									Молочно-белый	
	Бз-39/1			Бз-39			Бз-44			32 пробы	
	О	С	В	О	С	В	О	С	В	Min	Max
Главные компоненты, г / кг H <sub>2</sub> O											
CO <sub>2</sub>	21.21	42.19	90.66	34.42	26.45	12.32	45.27	36.03	15.70	16.89	81.45
CH <sub>4</sub>	0.53	0.62	1.31	0.63	0.46	0.34	1.11	0.87	0.31	0.34	3.63
Si	0.00	0.00	2.71	24.83	1.63	1.00	44.84	22.36	32.54	0.78	43.80
Cl	2.19	4.77	17.19	2.66	5.20	10.23	18.46	6.23	7.88	1.03	9.30
Na	0.76	1.66	4.53	1.58	1.50	1.10	2.14	2.32	1.82	0.54	2.33
Ca	0.30	0.48	0.43	0.01	1.75	3.25	5.59	0.40	0.75	0.00	0.47
K	0.43	0.08	0.07	0.09	0.52	0.43	0.10	0.20	1.05	0.06	8.63
Mg	0.03	0.00	1.05	0.05	0.33	0.20	0.09	0.25	0.51	0.01	0.25
B	0.10	0.16	2.21	0.05	0.07	0.08	0.08	0.21	0.16	0.01	0.26
As	0.06	0.96	15.23	0.02	0.05	0.38	0.00	0.04	0.07	0.00	5.12
Zn	0.01	0.00	0.06	0.26	0.23	0.26	0.00	0.00	0.41	0.00	1.64
Fe	0.29	0.00	0.77	0.00	0.00	0.00	0.02	0.27	0.04	0.01	0.09
Микроэлементы, мг/кг H <sub>2</sub> O											
Sb	1.2	4.2	34.2	3.4	21.4	106.6	4.1	7.7	382.8	0.8	151.9
Mn	2.1	3.9	151.1	0.0	4.4	0.0	5.8	0.0	9.0	0.2	11.7
Ni	1.0	4.6	27.9	6.0	3.4	12.7	0.0	5.5	18.5	0.1	142.8
Li	3.8	28.5	63.7	0.8	2.8	2.8	3.4	3.5	6.9	0.1	321.5
Sr	0.7	3.4	18.9	1.4	2.7	2.2	3.5	0.0	3.1	0.3	36.8
Ba	4.4	0.6	12.8	2.7	2.0	1.6	1.8	2.8	9.8	0.2	12.8
Mo	0.0	0.0	0.0	3.7	3.3	5.3	4.5	0.0	11.0	0.1	6.5
W	0.2	0.1	10.2	1.3	0.0	0.9	1.4	2.0	2.3	0.1	8.1
Cr	2.6	0.3	0.0	2.4	0.0	2.8	3.0	1.2	12.9	0.2	9.1
Cu	3.4	0.0	0.0	0.8	2.7	2.6	0.0	0.9	0.5	0.0	5.0
Pb	0.6	0.0	0.0	0.1	0.1	1.8	0.2	0.0	0.3	0.0	9.7
Co	0.0	0.9	1.3	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.5	0.0	0.6
Rb	0.4	0.1	2.3	0.2	0.5	0.6	0.3	0.6	0.5	0.1	1.2
Cs	0.2	0.3	3.0	0.2	0.2	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.5

Примечание. Зоны кристаллов друзовидного кварца: О – основание, С – середина, В – верх. Min – Max – пределы изменчивости содержаний элементов по данным анализа 32 проб.

денной ранее для жильного кварца Базовского месторождения [7].

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Состав флюида, участвовавшего в формировании руд месторождения Базовское, типичен для ортогенных месторождений [3, 4]. Он изменялся от низкосолевого ( $1 \pm 0.5$  мас. % NaCl-экв.) водно-углекислотного (H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>) до водно-углекислотно-метанового (H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>) с умеренной соленостью (6–8 мас. % NaCl-экв.). Температуры минералообразования и концентрация солей в рудообразующих флюидах месторождения Базовское соответствуют установленным для золоторудных месторождений Адыча-Тарынской зоны (рис. 7).

Анализ соотношения температур гомогенизации ( $T_{\text{гом}}$ ) и концентрации солей ( $C_{\text{солей}}$ ) во флюидных включениях месторождения Базовское показал наличие двух трендов (рис. 7, табл. 1, 2). На фоне неболь-

шого падения температуры от 300–280 °С (формирование жил молочно-белого кварца) до 275–240 °С (рост кристаллов друзовидного кварца) в растворах происходило увеличение концентрации хлоридов щелочных и щелочноземельных металлов, а также рудогенных элементов (As, Sb, Fe, Zn и др.). Этот тренд (I), вероятно, отражает участие магматогенных флюидов в деятельности гидротермальной системы. При дальнейшем снижении температуры до 230–215 °С (по вторичным включениям) соленость растворов уменьшается (до 2.5 мас. % NaCl-экв.). Данный тренд (II) может быть связан с поступлением в систему пресных метеорных вод на заключительных стадиях формирования месторождения.

Сравнение полученных барометрических данных с имеющимися сведениями о давлении при минералообразовании на других золоторудных месторождениях Адыча-Тарынской зоны [1, 2, 6, 7, 15–17] показало, что давление при формировании молочно-

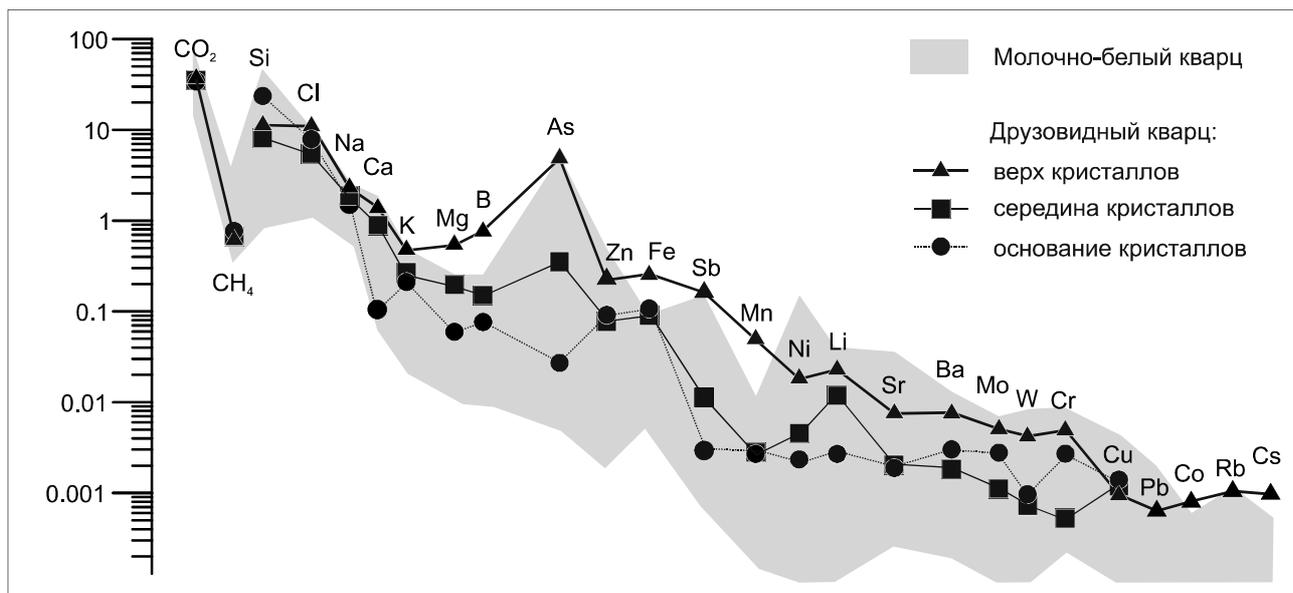


Рис. 6. Состав растворов флюидных включений (г/кг  $H_2O$ ) в молочно-белом (32 пробы) и друзовидном (средние по трем кристаллам) кварце месторождения Базовское по данным валового анализа.

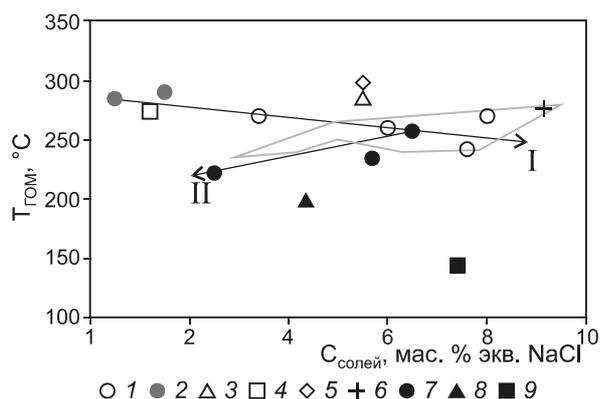


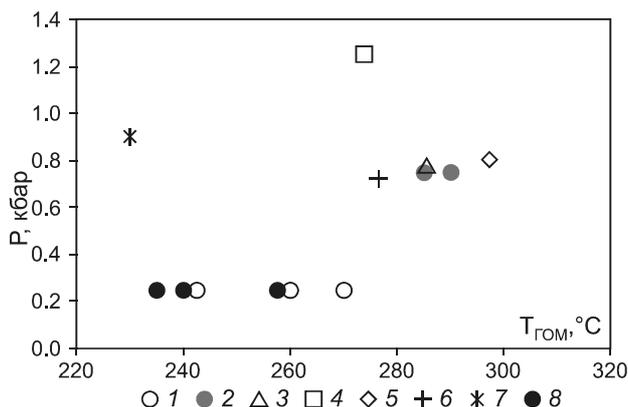
Рис. 7. Диаграмма температура гомогенизации–концентрация солей для флюидных включений месторождения Базовское и орогенных золоторудных месторождений Адыча-Тарынской зоны [1, 2, 6, 15–17].

1–6 – первичные включения в кварце месторождений: 1, 2 – Базовское: 1 – друзовидный кварц, 2 – молочно-белый кварц; 3 – Мало-Тарынское; 4 – Жданное; 5 – Пиль; 6 – Сана; 7–9 – вторичные включения: 7 – Базовское, молочно-белый кварц, 8 – Мало-Тарынское; 9 – Жданное. Контуром показана область изменения параметров флюидов первичных включений в кварце месторождения Дразное [1].

белого жильного кварца месторождения Базовское (0.75 кбар) сопоставимо (месторождения Мало-Тарынское, Пиль, Сана) или несколько ниже (месторождения Жданное, Дразное). Однако оно было существенно ниже при формировании заполненных друзовидным кварцем полостей рудных жил (0.25 кбар) (рис. 8).

Таким образом, формирование рудных жил Базовского месторождения протекало на фоне относительно небольшого и монотонного снижения температуры, но при резком снижении давления от 0.75 до 0.25 кбар. Установленные температуры рудообразования соответствуют, а давление ниже установленных для орогенных золоторудных месторождений Верхояно-Колымской складчатой области и других регионов [8, 20, 24 и ссылки в них]. Резкие колебания давления и скоростей потока флюида способствуют рудоотложению в контролирующих оруденение разломных системах (fault-related ore systems) [21, 25]. Наиболее вероятно, что установленный сброс давления сопровождался объемной кристаллизацией кварца из насыщенных по отношению к  $SiO_2$  гидротерм с образованием остаточной флюидной фазы [7]. В то же время не исключено, что снижение давления отражает и смену литостатического давления гидростатическим на глубинах 2.5–3 км. В любом случае, полученная оценка давления, при котором завершилось образование золото-кварцевых жил (около 0.25 кбар), позволяет ограничить глубину формирования месторождения Базовское интервалом от 1 км (в случае литостатического градиента) до 2.5 км (при гидростатическом градиенте).

Об этом в первую очередь свидетельствует рост общей минерализации растворов, который проявлен в понижении температуры плавления льда (табл. 1), росте концентрации хлор-иона и всех основных катионов во включениях от нижних частей кристаллов



**Рис. 8.** Диаграмма давление–температура гомогенизации для флюидных включений месторождения Базовское и орогенных золоторудных месторождений Адыча-Тарынской зоны [1, 2, 6, 15–17].

1–6 – первичные включения в кварце месторождений: 1, 2 – Базовское: 1 – друзовидный кварц, 2 – молочно-белый кварц; 3 – Мало-Тарынское; 4 – Жданное; 5 – Пиль; 6 – Сана; 7 – Дразное; 8 – вторичные включения, в кварце месторождения Базовское, молочно-белый кварц.

друзовидного кварца к верхним (рис. 6). Параллельно возрастает концентрация большинства микроэлементов. Наиболее важной устойчивой закономерностью, проявленной во всех изученных образцах, является значительное увеличение со временем концентрации As (на порядок и более) в минералообразующих растворах, что может быть связано с формированием пирит-арсенопирит-серцит-кварцевой метасоматической и пирит-арсенопирит-кварцевой жильной минерализации. Минералообразующий флюид, в котором росли кристаллы друзовидного кварца, пропитывал жилы молочно-белого кварца во всем их объеме и, таким образом, участвовал в концентрировании сульфидов и золота в рудных телах.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение флюидных включений в жильном кварце позволило установить физико-химические параметры рудообразования и проследить эволюцию гидротермальной системы золоторудного месторождения Базовское. Формирование месторождения происходило в условиях относительно устойчивого температурного режима (в интервале от 300 до 215 °C), но при существенных вариациях концентраций хлоридов щелочных и щелочноземельных металлов, метана, а также рудогенных элементов. При формировании жил молочно-белого кварца соленость растворов составляла  $1 \pm 0.5$  мас. % NaCl-экв., в процессе роста кристаллов друзовидного прозрачного кварца и отложения продуктивной минерализации повышалась до 6–8 мас. % NaCl-экв., а на заключительных стадиях

рудообразования снижалась до 2.5 мас. % NaCl-экв. Впервые для орогенных золоторудных месторождений Адыча-Тарынской зоны выявлено значительное падение давления рудообразующих флюидов в процессе их эволюции (от 0.75 до 0.25 кбар). Давление, при котором завершилось образование золото-кварцевых жил, позволяет ограничить глубину формирования месторождения Базовское интервалом от 1 км (в случае литостатического градиента) до 2.5 км (при гидростатическом градиенте).

Установленные параметры рудообразования указывают на минимальный уровень эрозионного среза золотоносных жильно-прожилковых зон Базовского месторождения и свидетельствуют в пользу определенных перспектив глубоких горизонтов на обнаружение золото-кварцевого оруденения в данном районе.

Исследование выполнено по плану НИР ИГАБМ СО РАН (проект № 0381-2019-0004), плану НИР СВКНИИ ДВО РАН (тема № 1АААА-А17-117022850032-9), Программе Дальний Восток ДВО РАН (проект № 18-2-001) и при частичной поддержке РФФИ – РС(Я) – р\_а (грант 18-45-140040).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аристов В.В., Прокофьев В.Ю., Имамендинов Б.Н., Кряжев С.Г., Алексеев В.Ю. Особенности рудообразования на золото-кварцевом месторождении Дразное (Восточная Якутия, Россия) // Докл. АН. 2015. Т. 464, № 1. С. 65–70.
2. Аристов В.В., Бабарина И.И., Григорьева А.В., Алексеев В.Ю., Прокофьев В.Ю., Узюнокян А.А., Заболотская О.В., Титов С.Г. Золото-кварцевые месторождения Жданинского рудно-россыпного узла (Восточная Якутия): структурный контроль и условия образования // Геология руд. месторождений. 2016. Т. 58, № 6. С. 559–594.
3. Бортников Н.С. Геохимия и происхождение рудообразующих флюидов в гидротермально-магматических системах в тектонически активных зонах // Геология руд. месторождений. 2006. Т. 48, № 1. С. 1–26.
4. 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 Нежданского золоторудного месторождения (Саха-Якутия, Россия) // Геология руд. месторождений. 2007. Т. 49, № 2. С. 99–145.
5. Гамянин Г.Н. Минералого-генетические аспекты золотого оруденения Верхояно-Колымских мезозоид. М.: ГЕОС, 2001. 221 с.
6. Гамянин Г.Н., Фридовский В.Ю., Викентьева О.В. Благороднометалльная минерализация Адыча-Тарынской металлогенической зоны: геохимия стабильных изотопов, флюидный режим и условия рудообразования // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 10. С. 1586–1605.
7. Горячев Н.А. Жильный кварц золоторудных месторождений Яно-Колымского пояса. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1992. 136 с.
8. Горячев Н.А., Викентьева О.В., Бортников Н.С., Прокофьев В.Ю., Алпатов В.А., Голуб В.В. Наталкинское золоторудное месторождение мирового класса: распределение

- РЗЭ, флюидные включения, стабильные изотопы кислорода и условия формирования руд (Северо-Восток России) // Геология руд. месторождений. 2008. Т. 50, № 5. С. 414–444.
9. Золоторудные месторождения России // Ред. Константинов. М.: Акварель, 2010. 349 с.
  10. Калужный В.А. Основы учения о минералообразующих флюидах. Киев: Наук. думка, 1982. 237 с.
  11. Кряжев С.Г., Прокофьев В.Ю., Васюта Ю.В. Использование метода ICP MS при анализе состава рудообразующих флюидов гидротермальных рудных месторождений // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2006. № 4. С. 30–36.
  12. Кряжев С.Г. Современные проблемы теории и практики термобарогеохимии // Руды и металлы. 2010. № 2. С. 38–45.
  13. Третьяков Ф.Ф. Структурные исследования в зонах золоторудных месторождений Базовское и Лазурное (Восточная Якутия) // Отеч. геология. 2006. № 5. С. 91–96.
  14. Фридовский В.Ю. Анализ деформационных структур Эльгинского рудного узла (Восточная Якутия) // Отеч. геология. 2010. № 4. С. 39–45.
  15. Фридовский В.Ю., Гамянин Г.Н., Полуфунтикова Л.И. Дора-Пильское рудное поле: строение, минералогия и геохимия среды рудообразования // Руды и металлы. 2012. № 5. С. 7–21.
  16. Фридовский В.Ю., Гамянин Г.Н., Полуфунтикова Л.И. Золото-кварцевое месторождение Сана Тарынского рудного узла // Разведка и охрана недр. 2013. № 12. С. 3–7.
  17. Фридовский В.Ю., Гамянин Г.Н., Полуфунтикова Л.И. Структуры, минералогия и флюидный режим формирования руд полигенного Малотарынского золоторудного поля (Северо-Восток России) // Тихоокеан. геология. 2015. Т. 34, № 4. С. 39–52.
  18. Фридовский В.Ю., Полуфунтикова Л.И., Горячев Н.А., Кудрин М.В. Рудоконтролирующие надвиги золоторудного месторождения Базовское (Восточная Якутия) // Докл. АН. 2017. Т. 474, № 4. С. 462–464.
  19. Bakker R. J. Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusions data and for modeling bulk fluid properties // Chem. Geol. 2003. V. 194. P. 3–23.
  20. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions / De Vivo B, Frezzotti ML (eds.) Fluid inclusions in minerals, methods and applications // Blacksburg, Virginia Tech. 1994. P. 117–130.
  21. Cox S. Injection-driven swarm seismicity and permeability enhancement: Implications for the dynamics of hydrothermal ore systems in high fluid-flux, overpressured faulting regimes // Econ. Geol. 2016. V. 111, N 3. P. 559–587.
  22. Darling R.S. An extended equation to calculate NaCl contents from final clathrate melting temperatures in H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl fluid inclusions: implications for PT-isochors location // Geochim. Cosmochim. Acta. 1991. V. 55. P. 3869–3871.
  23. Fridovsky V.Y. Structural control of orogenic gold deposits of the Verkhoyansk-Kolyma folded region, northeast Russia // Ore Geol. Rev. 2018. V. 103. P. 38–55.
  24. Goldfarb R.J., Groves D.I. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time // Lithos. 2015. V. 233. P. 2–26.
  25. Sibson R.H., Robert F., Poulson K.H. High-angle reverse faults, fluid pressure cycling and mesothermal gold-quartz deposits // Geol. 1988. N 16. P. 551–555.
  26. Thiery R., Kerkhof A.M., Dubessy J. vX properties of CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> fluid inclusions: modeling for T < 31 °C and P < 400 bars // Europ. J. Mineral. 1994. N 6. P. 753–771.
  27. Whitney D.L., Ewans B.W. Abbreviations of names of rock-forming minerals // Am. Miner. 2010. V. 95. P. 185–187.

*Рекомендована к печати В.Г. Хомичем  
после доработки 21.03.2019 г.  
принята к печати 24.05.2019 г.*

*V.Y. Fridovsky, S.G. Kryazhev, N.A. Goryachev*

### **Physical-chemical conditions of quartz formation of the Bazov gold deposit (Eastern Yakutia, Russia)**

Based on the data on composition and features of fluid inclusions in vein quartz, evolution of hydrothermal system is traced, which formed the Bazov gold deposit. Gold-bearing quartz veins were formed against a background of insignificant decrease in temperature from 290 to 230 °C and significant pressure decrease from 0.75 to 0.25 kbar. Identified depressurization involved bulk quartz crystallization from hydrotherms enriched relative to SiO<sub>2</sub> with formation of a residual fluid phase. The fluid composition in this case changed from hydrocarbon dioxide to hydrocarbon dioxide – methane with an increase in the concentration of chlorides of alkali and alkali-earth metals (from 1 to 8 wt. % NaCl-equivalent.), as well as ore-forming elements (As, Sb, Fe, Zn etc.). The pressure, at which formation of gold-quartz veins was completed ( $\approx$  0.25 kbar), allows the depth of the Bazov deposit formation to be limited to the interval from 1 km (in case of lithostatic gradient) to 2.5 km (at hydrostatic gradient).

**Key words:** native gold, quartz, fluid inclusions, Bazov gold deposit, Verkhoyansk-Kolyma folded region, Eastern Yakutia, Russia.