

ФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМ ФОРМИРОВАНИЯ ОРОГЕННЫХ ЗОЛОТОРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЯНО-КОЛЫМСКОГО ПОЯСА**С.Г. Кряжев¹, В.Ю. Фридовский²**

¹ФГБУ Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, ул. Варшавское шоссе 129, корп. 1. г. Москва, 117545; e-mail: s34@mail.ru

²ФГБУН Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, пр-т Ленина 39, г. Якутск, 677980; e-mail: fridovsky@diamond.ysn.ru

Поступила в редакцию 11 мая 2023 г.

Представлены данные микротермометрических и валовых анализов флюидных включений в жильном кварце 16-ти золото-кварцевых месторождений, расположенных в различных секторах Яно-Колымского пояса. Установлено, что месторождения были сформированы в интервале температур 320–220 °С типичными для орогенных рудообразующих систем слабоминерализованными (< 5 мас. % NaCl-экв) углекислотно-водными флюидами. В составе солей доминирует гидрокарбонат натрия, микропримеси представлены К, В, As, Sb, Rb, Cs. Мольная доля CO₂ в зависимости от РТХ-условий варьирует от 0.19 до 0.03. Примесь метана в углекислоте не превышает 10 мольн. %. Интенсивная дегазация растворов в интервале 320–270 °С могла служить одной из причин рудоотложения. Золотоносные кварцевые жилы и прожилки были сформированы на глубинах 6–3 км при снижении давления от 1.5–1.0 до 0.9–0.8 кбар в процессе эволюции динамического режима орогенеза. На заключительном этапе открытие трещин привело к смене литостатического режима гидростатическим с падением давления до 0.5–0.1 кбар. Флюидные системы завершающих стадий минералообразования характеризуются повышенной минерализацией и существенно азотно-метановым составом газовой фазы, что указывает на их поступление из другого источника. Таким образом, параметры флюидных включений в кварце отражают длительную историю эволюции сопряженных с развитием орогена минерало- и рудообразующих процессов.

Ключевые слова: золото-кварцевые, орогенные золоторудные месторождения, флюидные включения, температура, давление, состав флюидов, Яно-Колымский пояс.

ВВЕДЕНИЕ

Орогенные золоторудные месторождения (ОЗМ) – экономически важный тип месторождений золота, к которому относится более 45 % золоторудных месторождений мира с запасами свыше 30 т [38, 40]. В нашей стране месторождения данного типа традиционно относят к золото-кварцевой рудной формации. Известны ОЗМ докембрийского, палеозойского и мезозойского возраста. Крупнейшие из них расположены в России (Наталка, Советское), Узбекистане (Мурунтау), Китае (Джяодунг), США (Аляска-Джуно), Австралии (Бендиго, Балларат) и в ряде других стран [41, 43]. На северо-востоке России ОЗМ локализируются преимущественно в Яно-Колымском металлогеническом поясе (ЯКМП), где известны крупные ОЗМ – Наталка, Дегдекан, Павлик, Дрожное и другие. Из месторождений Яно-Колымского металлогениче-

ского пояса добыто и учтено в запасах более 8300 т золота [14, 43].

Фанерозойские ОЗМ имеют значительный вертикальный размах (многие сотни метров), размещаются в зонах крупных трансформных разломов среди углеродисто-терригенных пород, метаморфизованных в фации зеленых сланцев. Руды характеризуются выдержанным минеральным составом (кварц, карбонаты, серицит, сульфиды Fe, As, Pb, Zn, Cu, самородное золото). Месторождения формировались на конвергентных окраинах континентов на поздних этапах эволюции аккреционно-коллизийных орогенов при участии низкосолёных углекислотно-водных растворов [39, 42, 45]. Источники рудоносных флюидов и золота (магматический, метаморфический, субкордовый) являются дискуссионными.

Состав, эволюция и происхождение гидротермальных флюидов ОЗМ ЯКМП обсуждались во многих работах [например, 3, 7, 12, 16, 24, 27]. На примере крупного месторождения Наталка обосновывается поступление воды из магматического источника [12]. Участие метаморфогенных флюидов в формировании ОЗМ региона предполагается в работе [7]. На основании изучения флюидных включений, изотопного состава O, C вмещающих пород, жильных минералов и S, Pb сульфидов для Au-Q месторождений Адычанского сектора ЯКМП установлена генерация флюидов при метагенезе и их последующая мобилизация при коллизионных событиях [4]. В исследовании [16] развиваются представления о формировании месторождения Бадран при эволюции метаморфогенно-гидротермальной системы с важным вкладом мантийных резервуаров. Результаты [36, 37] свидетельствуют о том, что рудообразующие флюиды имели как метаморфогенное, так и субкоровое происхождение.

Целью исследований авторов служило обобщение и сравнительный анализ термобарогеохимических данных, полученных в результате исследований состава и свойств флюидных включений в кварце широкого ряда орогенных золоторудных месторождений из различных секторов ЯКМП. Эти данные сравнительно немногочисленны и фрагментарны, что обусловлено весьма мелкими размерами флюидных включений в жильном кварце ОЗМ. Крупные включения (> 5 мкм), доступные для микротермометрических исследований, встречаются очень редко. Поэтому для более полной характеристики состава рудообразующих флюидов авторами выполнена серия валовых анализов флюидных включений с количественным определением газов, анионов, катионов и микроэлементов. Полученные РТХ-параметры золотоносных флюидных систем, сформировавших ОЗМ ЯКМП, позволят лучше понять их происхождение и закономерности эволюции.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Яно-Колымский металлогенический пояс выделяется в структурах Кулар-Нерского и Полоусно-Дебинского террейнов Яно-Колымского орогена и тыловой зоны Верхоянского складчато-надвигового пояса к юго-западу от позднеюрских Главного батолитового пояса (154–144 Ма, циркон, U-Pb SHRIMP-RG [1], SHRIMP-II [9]) и Уяндино-Ясачненской вулканической дуги (153–152 Ма, циркон, U-Pb SHRIMP [47]). Деформационные процессы и магматизм в Яно-Колымском орогене связаны с закрытием малого Оймяконского палеоокеана и последующей коллизией Колымо-Омолонского супертеррейна и восточной окраины Сибирского кратона [23, 43]. ЯКМП сложен

верхнепалеозойскими терригенными отложениями, измененными в условиях зеленосланцевой фации регионального метаморфизма. Породы смяты в линейные складки северо-западного простирания, нарушены региональными продольными разломами и интродуцированы позднеюрскими-раннемеловыми дайками основного, среднего и кислого состава, гранитоидами S-, I- и A-типа, а также вулканоплутоническими образованиями Тас-Кыстабытского пояса (151–148 млн лет, циркон, U-Pb SHRIMP-II [9, 18, 30, 35]).

В ЯКМП проявлено орогенное и связанное с магматизмом золотое, Sn-W жильное и грейзеновое, Au-Ag-Q оруденение [10]. В экономическом отношении наиболее важными являются орогенные золоторудные месторождения, вмещающие основные запасы рудного золота ЯКМП. Они же служили источниками многочисленных россыпей. Крупные объекты (Наталка, Павлик, Дегдекан, Ветренское, Дрожное, Базовское, Бадран, Мало-Тарынское, Хангалас, Лазовское и многие другие) представлены жильно-прожилковыми зонами и минерализованными зонами дробления с вкрапленной золотоносной пирит-арсенопиритовой минерализацией, мелкие (Талалах, Жданное, Сана, Диринь и др.) – отдельными кварцевыми жилами относительно простой морфологии.

Месторождения контролируются региональными (протяженностью несколько сотен км) транскоровыми СЗ зонами разломов (Адыча-Тарынский, Тенькинский, Чай-Юрьинский и др.) и/или опережающими их второстепенными разломами второго/третьего порядка. Данные структуры разделяют тектонические блоки/террейны и контролируют пути транзита региональных флюидных потоков и магматизм.

Большинство ОЗМ ЯКМП располагается в Верхне-Колымском (ВКС), Верхне-Индибирском (ВИС) и Адычанском (АС) секторах ЯКМП. Положение месторождений, охарактеризованных в статье, показано на рисунке 1.

Геологическое строение и вещественный состав руд всех рассматриваемых месторождений типичны для мезозойских орогенных месторождений золота [39, 40, 42]. Рудные тела ОЗМ локализуются, в основном, в терригенных породах и представлены кварцевыми жилами и прожилками с самородным золотом, сульфидами Fe, As, Pb, Zn, Cu и сульфосолями. В проксимальных серицит-хлорит-карбонат-кварцевых метасоматитах присутствует вкрапленность мышьяковистого пирита и арсенопирита с «невидимым» субмикроскопическим золотом. На отдельных месторождениях проявлена наложенная Ag, Sb и Hg эпитептерральная минерализация.

Имеющиеся $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, K-Ar, Rb-Sr, Re-Os датировки золоторудных месторождений ЯКМП харак-

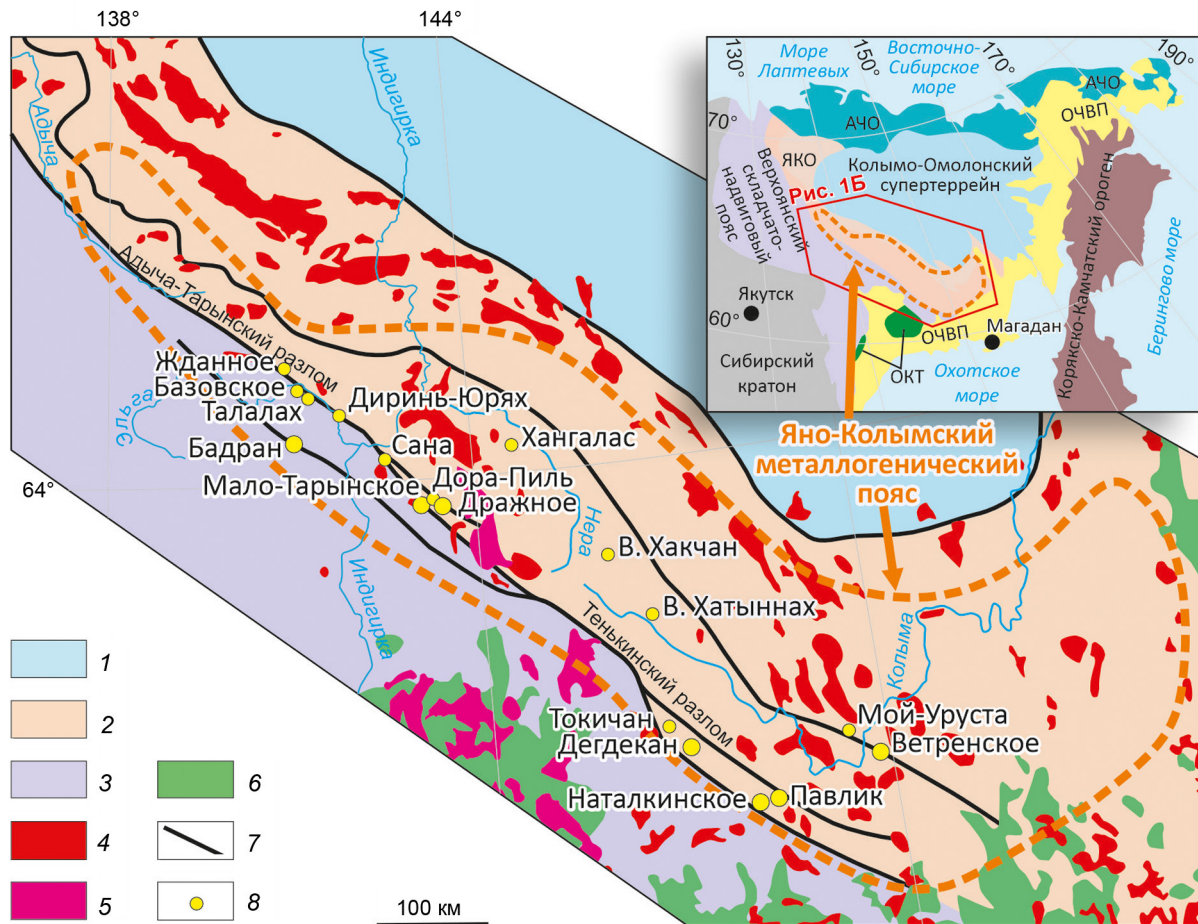


Рис. 1. Схема геологического строения Яно-Колымского металлогенического пояса и положение изученных золоторудных месторождений.

1 – Колымо-Омолонского супертеррейна; 2 – Яно-Колымский орогенный пояс; 3 – Верхоянский складчато-надвиговый пояс и Вилингинский террейн; 4 – гранитоиды; 5 – субвулканические массивы; 6 – Охотско-Чукотский вулканоплутонический пояс; 7 – разломы; 8 – золоторудные месторождения. Аббревиатуры на врезке: ОЧВП – Охотско-Чукотский вулканоплутонический пояс; АЧО – Арктическо-Чукотский ороген; ЯКО – Яно-Колымский орогенный пояс; ОКТ – Охотский кратонный террейн.

теризуются широким интервалом значений от 151 до 126 млн лет [15, 18, 29, 43, 44, 48]. Выделяется две позднеюрско-раннемеловые возрастные популяции месторождений. Ранняя (151–135 млн лет) характерна для ОЗМ ЯКМП. Эти месторождения формировались в связи с позднеорогенными событиями на СВ окраине Сибирского кратона в завершении становления титон-валанжинских интрузивных образований комплекса малых интрузий [12, 28, 29, 30]. Поздняя (131–126 млн лет) ассоциирует с тектоническими и магматическими процессами в тылу Удско-Мургальской дуги и структурами Охотско-Корякского орогена [8, 11]. Имеются данные о совмещении в пределах некоторых ОЗМ ЯКМП разновозрастных тектонотермальных событий, что может существенно осложнить анализ рудообразующих флюидных систем. Так на Мало-Тарынском золоторудном месторождении ран-

ний импульс рудогенеза по Re-Os возрасту самородного золота и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датировке серицита происходил на рубеже юры и мела ~148–143 млн лет назад, поздний (~126 млн лет) датирован $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом по серициту [26, 29].

Структурные наблюдения [33] с учетом новых $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и Re-Os датировок минералов из рудных жил [18, 29] и U-Pb из магматических пород [1, 9, 30, 35, 47] позволили объяснить последовательность деформационных событий и связь с ними ОЗМ западной части ЯКМП [25, 34]. Предложена трехстадийная деформационная история. Прогрессивная компрессия D1 привела к формированию складок и разломов северо-западного простирания. На завершающей стадии аккреционно-коллизионных процессов в конце юры–начале мела в ЯКМП были сформированы орогенные золоторудные месторождения. Послерудные

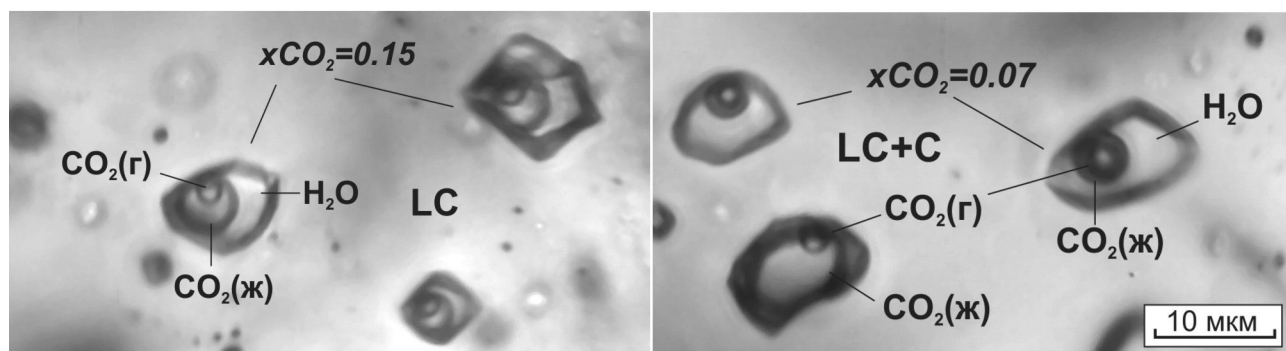


Рис. 2. Типы флюидных включений в кварце орогенных золоторудных месторождений ЯКМП.

Типы включений: LC – углекислотно-водные, LC+C – ассоциация углекислотно-водных и существенно углекислотных включений. Фазы: H₂O – водно-солевой раствор, CO₂ – углекислота жидкая (ж) и газообразная (г). xCO₂ – мольная доля углекислоты в углекислотно-водных включениях, рассчитанная по ее относительному объему и плотности. Месторождение Дегдекан.

деформации проявлены левыми сдвигами этапа D2 и правыми сдвигами этапа D3 вдоль активизированных рудолокализирующих разломов СЗ простираения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В кварце всех изученных месторождений обнаружены достаточно однообразные по составу включения углекислотно-водных флюидов (рис. 2), типичных для золотоносных систем орогенного типа [45]. Как правило, подобные флюиды находятся в гетерогенном (кипящем) состоянии и представлены двумя равновесными фазами (жидкой и газообразной). При захвате во включения жидкой фазы образуются углекислотно-водные включения (тип LC). Захват газообразной фазы приводит к образованию существенно углекислотных включений (тип С). Поскольку на фазовой диаграмме состояние таких флюидов описывается линией двухфазового равновесия, измеренные по включениям температуры и давления точно соответствуют РТ-условиям минералообразования. Именно поэтому микротермометрия подобных систем является наиболее точным геотермометром-геобарометром из всех существующих методов.

Большинство проанализированных включений образуют в кварце изолированные кластеры, не связанные с трещинами. По этому признаку их можно отнести к первичным [19], но следует отметить, что данный критерий не является однозначным.

Результаты микротермометрических анализов, полученные разными авторами и использованные в статье, с учетом достигнутого совершенства конструкции современных криотермокамер являются абсолютно сопоставимыми. Такие анализы всегда выполняются по стандартной методике [19], которая заключается в измерении температур фазовых пере-

ходов во включениях в ходе их нагревания от температуры жидкого азота (-196 °С) до +600 °С. В рассматриваемом случае необходима регистрация температур следующих фазовых переходов.

1. Температура плавления CO₂, (*T_{пл} CO₂*) которая для чистой углекислоты составляет -56.6 °С. Если CO₂ плавится при более низкой температуре, это свидетельствует о присутствии примеси других газов (CH₄ ± N₂).

2. Температура плавления (разложения) гидрата CO₂ (*T_{пл} ГГ*). Образование газогидрата обязательно происходит в углекислотно-водных включениях. Этот процесс не позволяет точно измерить температуры начала и окончания плавления льда, а следовательно – определить тип солевой системы и соленость растворов. Поэтому концентрация солей в подобных включениях может быть оценена только по понижению температуры разложения газогидрата от +10 °С (чистая система H₂O-CO₂) вплоть до отрицательных температур (-13 °С для насыщенного раствора NaCl) с помощью экспериментально установленной зависимости [32]. В некоторых включениях с низким содержанием CO₂ была определена температура плавления льда.

3. Температура гомогенизации углекислоты в жидкую или газовую фазу (*T_{гом} CO₂ (Ж,Г)*). По температуре этого фазового перехода с высокой точностью определяют плотность CO₂ [6]. Однако для флюидов орогенных месторождений весьма характерна примесь метана, которая значительно понижает температуру гомогенизации углекислоты, приводит к существенному завышению оценки плотности CO₂ и, соответственно, давления при минералообразовании. Для корректировки данной ошибки необходимо пользоваться диаграммой, приведенной на рисунке 3.

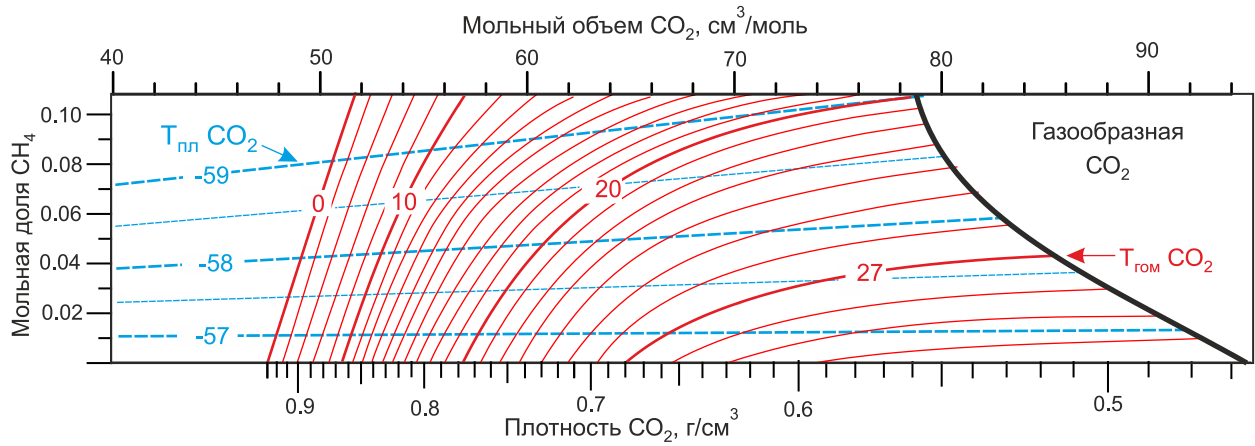


Рис. 3. Диаграмма для определения плотности CO_2 по температуре ее плавления и температуре гомогенизации в присутствии метана (построена по данным работы [46]).

4. Температура полной гомогенизации углекислотно-водных включений ($T_{\text{гом}}$), которая происходит в жидкую фазу путем исчезновения газового пузырька (растворения углекислоты в воде).

Давление при минералообразовании (P) наиболее точно можно оценить методом В.А. Калужного [13] на основе данных о плотности включений CO_2 (тип С) и температуре их захвата. Последняя соответствует температуре гомогенизации сингенетичных углекислотно-водных включений (тип LC). Вода, занимающая во включениях типа С менее 10 % объема, не оказывает существенного влияния на оценку давления.

Для включений типа LC давление в момент гомогенизации можно оценить по диаграмме растворимости CO_2 в водно-солевых растворах соответствующей концентрации (рис. 4), построенной по экспериментальным данным. Содержание углекислоты во флюиде рассчитывают на основе измерения объемной доли CO_2 и определения ее плотности по температуре гомогенизации (рис. 2). Необходимо учитывать также долю углекислоты, находящейся в водном растворе (около 1 мольн. %). Если флюид был близок к состоянию насыщения углекислотой, что в целом закономерно для гидротермальных систем орогенных

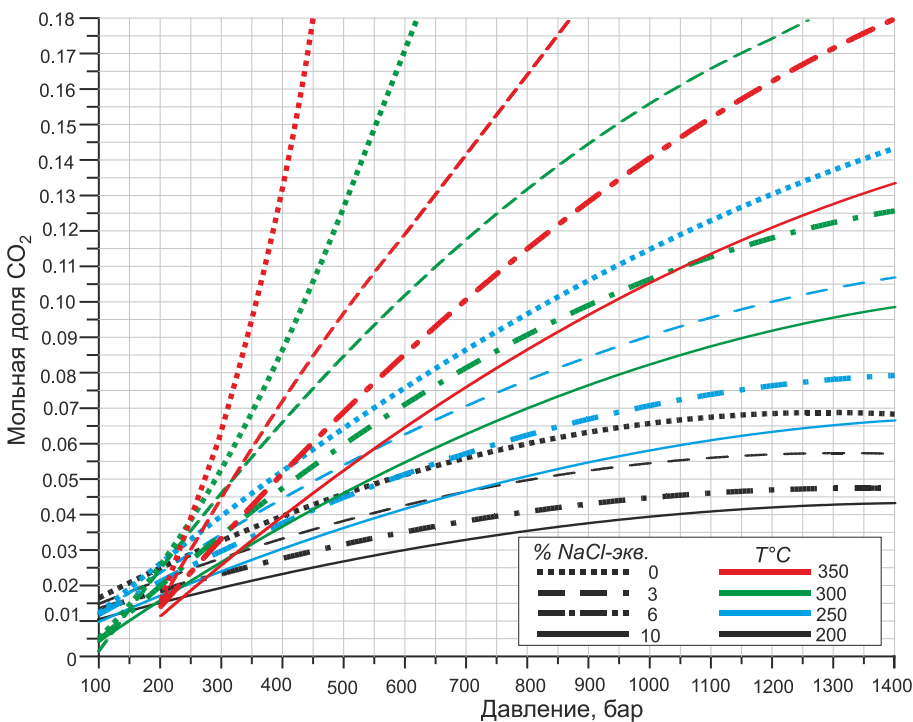


Рис. 4. Графики растворимости углекислоты (мольные доли) в водно-солевых растворах с концентрацией 0–10 мас. % NaCl-экв. в интервале температур 200–350 °C и давлений 0.1–1.4 кбар (построена по данным работы [22], при интерполяции и экстраполяции экспериментальных данных (0 и 6 % NaCl) использован закон И.М. Сеченова).

месторождений [45], полученное значение P может быть принято как флюидное давление при минералообразовании.

Перечисленные выше температуры фазовых переходов и рассчитанные на их основе показатели всегда определяют для групп сингенетичных включений, имеющих идентичные (или весьма близкие) микрометрические параметры. Каждая такая группа включает не менее 5 индивидуальных вакуолей (в большинстве случаев 10–15 и более).

С целью получения дополнительной информации по солевому составу и геохимическим особенностям рудообразующих растворов нами были выполнены валовые анализы состава флюидных включений в кварце орогенных месторождений ЯКМП.

Пробу кварца (1 г, фракция $-0.5+0.25$ мм) тщательно очищали сначала азотной кислотой, потом электролитически в потоке дистиллированной воды. Флюидные включения вскрывали в атмосфере гелия путем нагрева до 500 °С, выделившиеся газы (H_2O , CO_2 , CH_4) анализировали при помощи газового хроматографа Agilent 6890. Затем декрепитированную навеску заливали деионизированной водой (7 мл) и на 15 мин. помещали в ультразвуковую ванну. Раствор вытяжки отделяли на центрифуге и направляли на анализ анионов (жидкостный хроматограф ЦВЕТ3006), катионов и микроэлементов (ICP-MS, Elan 6100). Из результатов вычитали данные анализа повторных (холостых) вытяжек.

Кроме того, авторы сочли необходимым привлечение ранее опубликованных данных по месторождению Дрожное [2] и Базовское [27], которые были получены с использованием той же методики.

Авторы отдают себе отчет в том, что элементы могут поступать в вытяжку из включений разных генераций, в т.ч. из вторичных включений низкотемпературных водных растворов, происхождение которых неизвестно. Такие включения в кварце распространены достаточно широко. Нельзя полностью исключать и вероятность влияния матрицы (кварца). Однако до настоящего времени метод водных вытяжек для анализа состава мелких флюидных включений альтернативы не имеет.

Первичная обработка полученных данных заключалась в проведении корреляционного анализа. Представляется очевидным, что элементы, выделенные из флюидных включений, должны обнаруживать значимую корреляцию с такими компонентами углекислотно-водного флюида, как CO_2 , CH_4 , H_2O . Элементы, содержание которых от количества указанных компонентов не зависит, из дальнейшего рассмотрения были исключены.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты микротермометрических исследований индивидуальных флюидных включений сведены в таблице 1. Результаты валового анализа приведены в таблице 2.

Установлено, что минерало- и рудообразование на орогенных месторождениях ЯКМП протекало в широком диапазоне температур ($350-200$ °С). Однако следует отметить, что более половины из изученных групп включений было захвачено в относительно узком интервале от 320 до 270 °С.

Еще более значительные вариации установлены для флюидного давления (от 1.5 до 0.1 кбар). При этом генерации включений, захваченных в резко отличающихся по давлению обстановках, могут быть пространственно совмещены (Базовское, Мало-Тарынское, Дрожное, Хакчан, Дегдекан-Токичан.). Данный факт подтверждает принадлежность подобных генераций к разным этапам и стадиям минералообразования.

Соленость растворов относительно низкая и не превышает 10 мас. % NaCl-экв. Отчетливой зависимости между температурой и соленостью растворов не наблюдается. При этом отмечается зависимость концентрации солей от давления: включения, захваченные при 1.5–0.8 кбар имеют соленость 1–6 мас. % NaCl-экв., при 0.5–0.1 кбар – 5–10 мас. % NaCl-экв.

Концентрации хлор-иона и сульфат-иона в вытяжках оказались меньше предела обнаружения, что с учетом среднего уровня содержания воды в кварце (около 1 г/кг) приводит к выводу о весьма низких содержаниях данных компонентов в растворах включений ($Cl < 0.5$ г/кг H_2O , $SO_4 < 1$ г/кг H_2O). Среди катионов резко доминирует Na. Необходимо признать, что практически единственной солью в растворах включений является гидрокарбонат натрия.

В группу флюидных компонентов, обнаруживающих положительную корреляцию с CO_2 , CH_4 и H_2O , входят Na, K, Cs, Rb, B, As и Sb. Обособленную группу элементов, коррелирующих только между собой, образуют Ca, Mg, Sr, Ba, Cu, Li. Возможно, в вытяжку они извлекаются из вторичных включений низкотемпературных водных растворов.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Флюиды, сформировавшие золото-кварцевые месторождения ЯКМП, по своему составу и РТ-параметрам в полной мере соответствуют типичным рудообразующим растворам орогенных золоторудных месторождений [42, 45]. Они представлены относительно разбавленными (до 10 % NaCl-экв.), преимущественно гидрокарбонатно-натриевыми

Таблица 1. Параметры флюидных включений (ФВ) в кварце ОЗМ ЯКМП.

Месторождение	Температуры фазовых переходов, °С						Параметры флюида		
	Тип С		Тип LC				C _c %	x CO ₂	P кбар
	T _{пл} CO ₂	T _{гом} CO ₂	T _{пл} CO ₂	T _{гом} CO ₂	T _{гг}	T _{гом}			
Наталка [5]	-58.0	24 (ж)	-57.4	26 (ж)	7.5	325–330	5	0.10	1.0
	-58.5	19 (ж)	-58.0	23 (ж)	5.0	280–290	9	0.07	1.0
Дегдекан	–	–	-58.5	17.5 (ж)	9.0	270–280	2	0.15	1.3
	-58.5	17 (ж)	-58.0	24.5 (ж)	8.5	220–230	3	0.07	0.9
Токичан	-59.0	20 (ж)	–	27.0 (г)	7.2	200–225	5.5	0.04	0.5
Хакчан-Q2 [5]	–	–	-56.8	20 (г)	7.0	340–360	6	0.05	0.4
	-57.0	30 (г)	-56.9	21 (г)	7.0	240–260	6	0.03	0.3
Хакчан-Q1 [5]	-56.7	16 (ж)	-56.7	16.5 (ж)	7.5	295–305	5	0.12	1.5
Хатыннах [5]	–	–	-56.8	16 (ж)	6.5	295–300	6.5	0.13	1.5
	-57.0	15 (ж)	-56.8	14 (ж)	6.5	260–265	6.5	0.08	1.4
Ветренское [17]	-58.9	8 (ж)	-58.7	10.5 (ж)	9.0	280–290	2	0.19	1.4
Мой-Уруста [17]	-56.6	23 (ж)	-56.6	24.0 (ж)	9.2	310–320	1.7	0.18	1.3
Жданное [3]	-57.0	23 (ж)	-56.7	28.5 (г)	9.4	260–290	1	–	1.1
Талалах	–	–	-58.5	15 (ж)	9.5	275–285	1	0.13	1.0
Сана	-58.0	18 (ж)	-57.0	24.5(ж)	8.0	225–230	4	0.08	0.9
Диринь [20]	–	–	-61.5	24 (ж)	7.5	290–300	5	0.13	1.1
Хангалас (q1Au)	-58.0	25 (ж)	-58.0	22 (гж)	8.0	315–330	4	0.12	0.8
Базовское (q1) [27]	–	–	-57.5	9 (ж)	9.8	280–290	0.5	0.15	0.8
Базовское (q2) [27]	–	–	-61.8	–	-5.0*	265–275	8	0.03	0.3
Бадран (q1)	–	–	-59.6	15.5 (гж)	8.3	270–290	3.4	0.05	0.3
Бадран (q2)	-62.0	-47(г)*	–	–	-6.6*	215–225	10	0.01	0.1
М-Тарыньское	–	–	-57.5	26 (г)	8.5	290–300	3	0.08	0.5
М-Тарыньское [24]	-59.0	20 (ж)	-58.0	18 (ж)	8	280–320	4	0.13	0.8
Дражное	-60.8	-6 (г)*	-59.0	–	-3.0*	250–255	5	0.02	0.2
[2, 21]	–	–	-59.0	21 (ж)	7	265–280	6	0.07	0.8
	-58.0	22.5(ж)	-57.5	19 (ж)	9	290–330	2	0.18	1.1

Примечание. Тип ФВ: LC – углекислотно-водные, С – углекислотные. Измеренные температуры: T_{гг} – плавления газогидрата (* – плавления льда), T_{гом}CO₂ – гомогенизации углекислоты в газовую (г) или жидкую (ж) фазу (* – температура гомогенизации смеси CO₂+N₂-CH₄), T_{гом} – полной гомогенизации включений путем растворения углекислоты в воде. Расчетные параметры: C_c – концентрация солей в водном растворе (в мас. %-экв. NaCl), определенная по температуре плавления газогидрата [32] или льда [31]; xCO₂ – молярная доля углекислоты, оцененная по ее объемной доле во включениях и плотности, определенной по T_{гом}CO₂; P, кбар – давление, оцененное по методу В.А. Калужного [13] и по растворимости CO₂ в растворе NaCl при T_{гом} (см. рис. 4). В каждой группе проанализировано не менее 5 индивидуальных включений; q1 – массивный кварц; q2 – друзовидный кварц; q1Au – массивный кварц с самородным золотом, Re-Os возраст которого составляет 137 млн лет (обр. X-45-14 [29]).

водными растворами, в значительных количествах содержащими углекислоту (до 19 мол. %) с примесью метана.

Валовые анализы показали значительно (в 3–4 раза) меньшие значения концентраций главных компонентов (рис. 5), расчетные содержания NaHCO₃ в растворах включений варьируют от 0.2 до 3 мас. %, CO₂ – от 1 до 9 мол. %, в среднем 3 %. Отмеченное расхождение результатов, полученных разными методами, можно объяснить избыточным количеством воды, выделившейся при нагревании кварца из низкотемпературных вторичных водных включений, которые постоянно наблюдаются в образцах жильного кварца. В то же время нельзя

исключать и вероятность разделения компонентов в процессе их диффузии из декрепитированных вакуолей к поверхности частиц кварца по системе микротрещин. В любом случае, прямой расчет (нормирование на количество воды) приведет к заниженным оценкам концентраций большинства элементов в растворах включений. Для характеристики рудообразующих флюидов целесообразнее использовать отношения содержаний (As/Sb, CH₄/CO₂ и т.д.). Например, повышенной долей редких щелочей (по отношению (Rb + Cs)/K, рис. 5) характеризуются месторождения Жданное, Талалах, Сана, Пиль, Мало-Тарыньское – объекты, локализованные в осевой зоне Адыча-Тарыньского разлома.

Таблица 2. Результаты валового анализа включений в кварце ОЗМ ЯКМП.

Месторождение	Номер пробы	Содержание флюидных компонентов в кварце									
		H ₂ O	CO ₂	CH ₄	Na	K	B	Rb	Cs	As	Sb
		Мкг / г					Мкг / кг				
Бадран	Б50	106	4.2	0.25	1.59	0.24	57	0.3	0.1	50.8	9.3
	Б34	2125	68.4	5.25	2.80	0.74	211	1.0	0.1	668.8	51.0
	Б36	2455	93.9	6.66	2.63	0.40	146	0.4	0.1	471.6	29.6
Мало-Тарыньское	МТ-Э8	1615	135.3	0.90	11.54	0.30	171	4.1	1.6	57.1	70.1
	МТ-Э27	1875	164.7	2.25	5.62	0.10	147	3.2	1.8	31.8	40.2
	МТ-Я20	1833	284.4	2.53	10.91	0.41	127	5.3	1.2	43.5	52.7
	МТ-Я33	1737	374.0	5.03	8.44	0.23	206	6.3	3.0	42.5	12.4
Пиль Жданное	ДП-К20	450	11.8	0.12	1.31	0.19	389	5.7	0.4	10.0	35.3
	Ж64	737	16.1	1.28	4.76	0.10	296	7.4	3.9	80.9	3.4
	Ж59	800	24.3	2.03	4.40	0.13	218	9.8	3.4	166.1	14.0
Талалах	Ж65	1174	81.9	3.87	4.03	0.10	277	5.0	3.4	91.9	11.5
	Т1	1433	98.0	4.64	4.93	0.18	205	4.5	3.0	55.5	17.6
	Т3	902	114.5	4.32	4.27	0.10	399	4.5	2.8	86.2	22.6
Сана	Т2	2608	232.6	12.22	9.32	0.22	797	2.9	2.2	52.1	19.6
	С7	594	30.3	0.97	0.48	0.14	46	3.1	0.7	17.0	51.2
	С8	635	25.3	0.90	0.78	0.18	59	2.5	0.7	10.1	24.8
Дражное [2]	505/209ф	216	6.9	0.47	1.27	0.22	465	0.6	0.1	18.5	30.5
	505/214Au	1128	51.5	0.85	6.94	0.21	537	0.8	0.1	41.6	106.4
Хангалас	Х-п1-4ф	445	77.8	0.44	2.08	0.13	418	2.4	1.2	9.4	3.5
	Х-44Au	1233	176.0	0.74	3.60	0.31	683	1.7	1.0	76.1	7.3
	Х-45Au	1787	170.3	0.80	4.83	0.29	186	1.2	0.9	17.4	11.7
Базовское q1 [27]	Бз-3302	617	13.1	0.39	0.61	0.13	25	0.1	0.1	19.1	2.0
	Бз2811	1328	37.0	0.66	0.72	0.35	27	0.2	0.5	18.3	7.0
	Бз27	1669	59.5	2.38	1.35	0.10	25	0.1	0.3	74.1	5.7
	Бз81	2011	80.5	3.68	1.62	0.10	51	0.1	0.3	10.9	4.0
Базов-ское q2 [27]	Бз5	2551	123.4	3.81	2.61	0.24	75	0.1	0.2	64.9	9.3
	Бз39в	484	6.0	0.16	0.53	0.21	36	0.3	0.1	185.3	51.6
	Бз39б	629	16.6	0.29	0.94	0.33	45	0.3	0.1	34.2	13.5
	Бз39а	1474	50.7	0.93	2.33	0.13	74	0.3	0.3	32.1	5.0
Хатыннах Наталка	ВХ426	495	117.9	0.32	1.37	0.57	775	0.9	0.1	73.8	23.9
	Н-1ф	323	3.8	0.23	0.45	0.10	4	0.2	0.1	18.6	15.8
	Н-2ф	253	2.7	0.05	0.25	0.10	3	0.2	0.1	25.9	13.8
	Н-3	315	30.1	0.18	1.18	0.38	428	0.7	0.5	53.7	87.7
	Н-4	1121	152.1	0.59	1.76	0.32	470	0.6	0.8	28.4	25.5
Дегдекан	Н-5	1437	213.7	0.68	1.90	0.31	542	0.6	1.2	45.7	35.2
	Д-ф	80	3.1	0.04	0.28	0.11	17	0.6	0.1	42.0	1.5
	Д-2	674	42.2	0.27	3.41	0.39	117	0.9	0.2	57.8	5.4
	Д-5	1857	95.7	0.69	12.64	0.85	104	1.3	0.1	110.9	15.4
	Д-71	1981	174.8	1.27	12.69	0.77	64	0.5	0.4	168.5	16.2

Примечание. символ «ф» в номере пробы означает, что образец был отобран за пределами золоторудных зон. Анализы выполнены в ЦНИГРИ. Аналитики С.Г. Кряжев, Ю.В. Васюта.

На РТ-диаграмме (рис. 6) изученные группы включений располагаются в дискретных температурных интервалах. Очевидно, что это обусловлено недостаточной полнотой полученных данных. Изученные сообщества включений характеризуют отдельные эпизоды непрерывной эволюции минералообразующих флюидных систем. Поэтому можно предполагать, что минералообразование протекало на фоне

постепенного снижения температур от 350–330 °С до 230–200 °С. В то же время обращает на себя внимание повышенная частота встречаемости включений с температурами захвата 320–270 °С. Данная особенность, вероятнее всего, является следствием резкого снижения растворимости углекислоты в системе CO₂-H₂O при падении температуры ниже 300 °С (рис. 4). Следствием этому служит интенсивная дегазация рас-

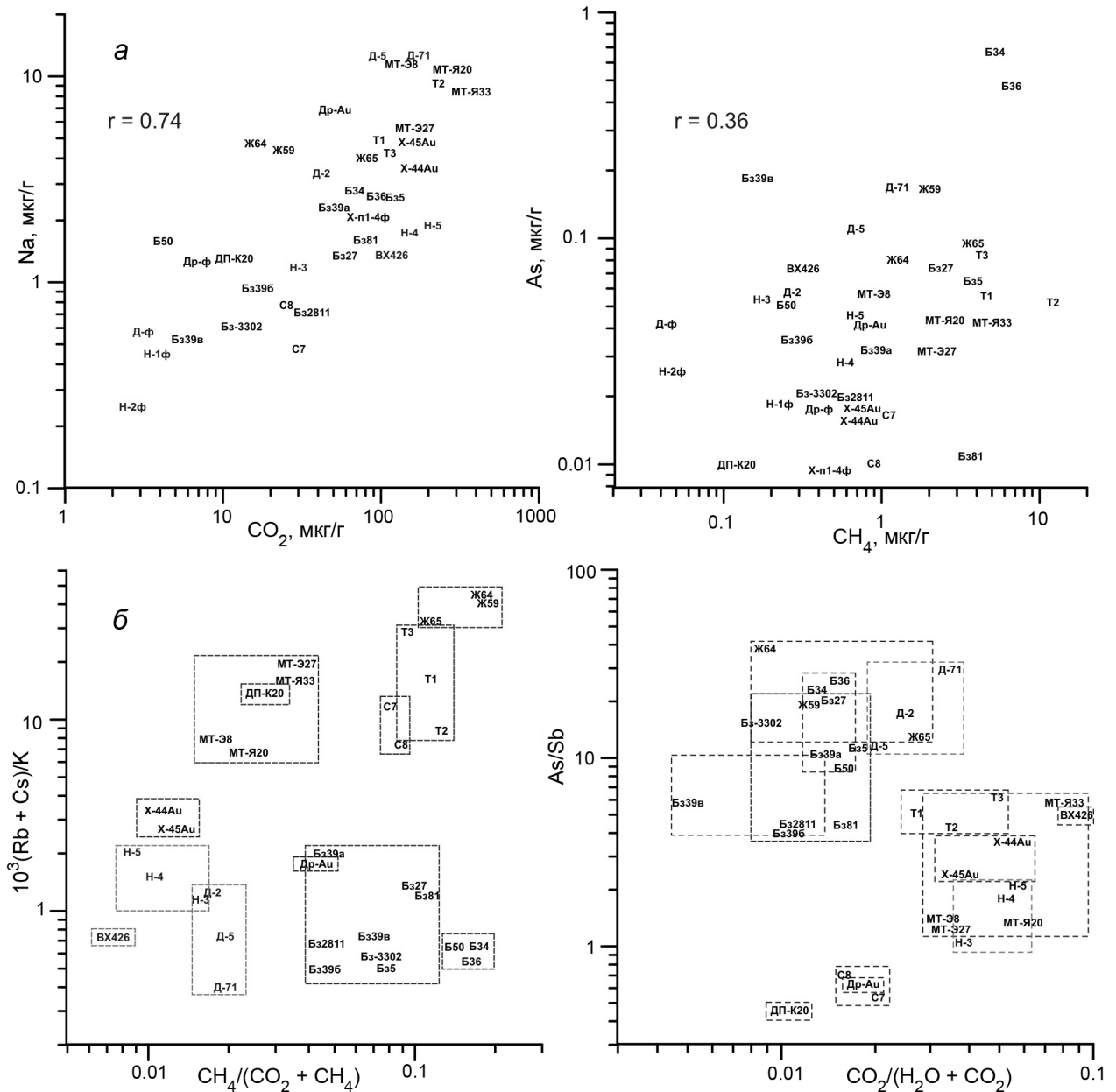


Рис. 5. Составы растворов флюидных включений в кварце орогенных золоторудных месторождений.

а – зависимости между содержаниями компонентов, входящих в состав флюидных включений; б – мольные отношения компонентов рудообразующих растворов для разных месторождений. Обозначения фигуративных точек соответствуют номерам проб в таблице 2.

творов, повышение рН, осаждение растворенного минерального вещества и захват относительно крупных флюидных включений.

По уровню давления при минералообразовании изученные флюидные системы отчетливо разделяются на три группы (рис. 6). Каждому уровню можно поставить в соответствие определенный этап развития орогена и сопутствующего оруденения.

I группа – уровень 1.5–1.0 кбар (6–4 км от палеоповерхности). Характеризует условия формирования кварца практически всех жильных месторождений. В ВКС это месторождения Ветренское, Мой-Уруста, В. Хакчан, В. Хатыннах (ранние альбит-кварцевые прожилки), Дегдекан (ранний кварц). В ВИС – Талалах, Жданное, Диринь, Сана, Дрожное (ранний кварц). Минералообразование протекало в режиме

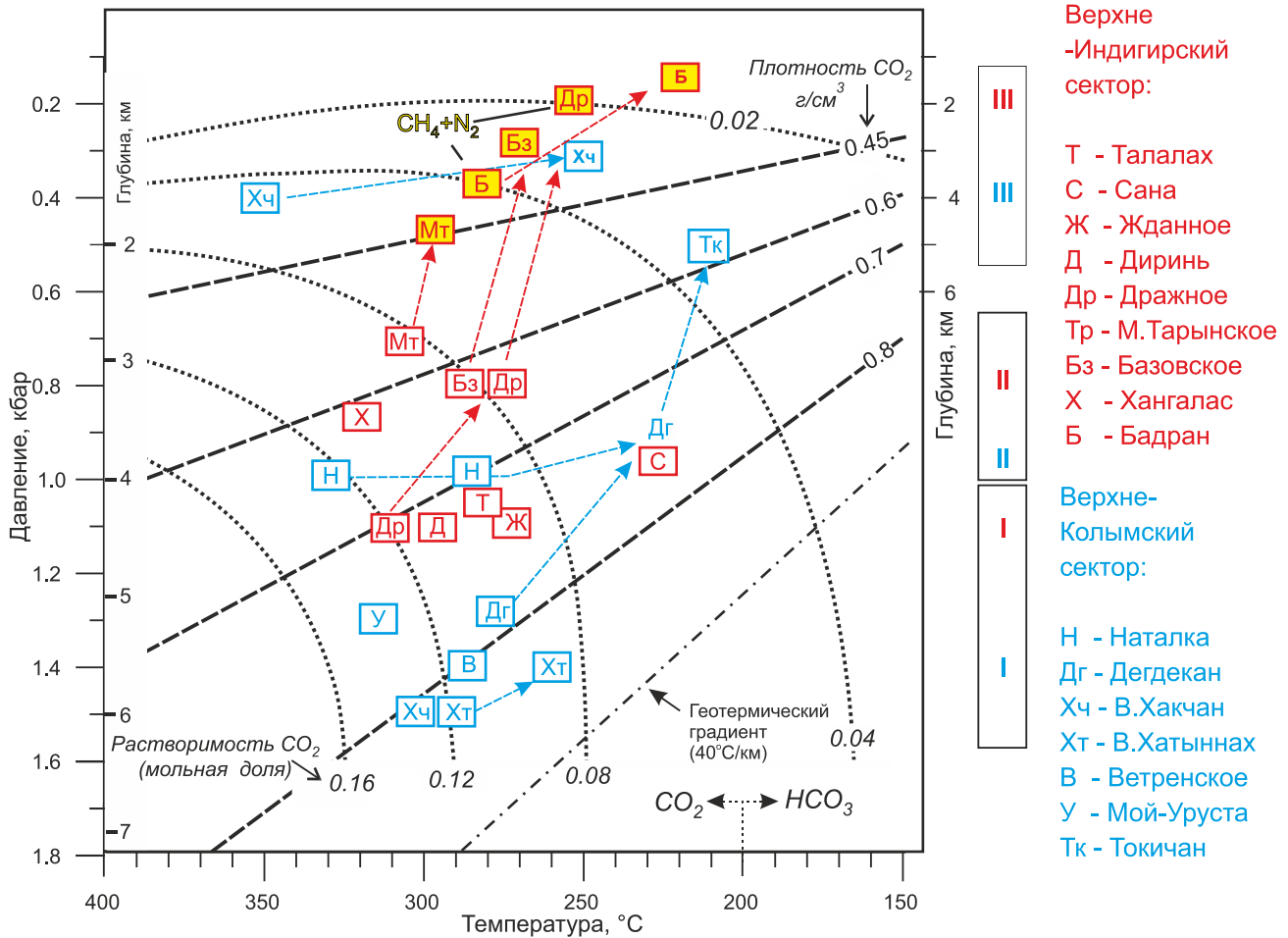


Рис. 6. РТ-условия формирования орогенных золоторудных месторождений Яно-Колымского пояса.

Изолинии плотности CO_2 – по [13], растворимости CO_2 (в 6 % растворе NaCl) – по [22]. Указаны глубины, отвечающие литостатическому (слева) и гидростатическому (справа) давлению. Стрелками показаны возможные тренды остывания растворов. I, II, III – группы флюидных систем по уровню давления при минералообразовании.

сжатия, в период коллизионных событий, возможно, при участии метаморфогенных растворов.

II группа – уровень 0.9–0.8 кбар. В этом диапазоне давлений были захвачены включения в золотоносном кварце крупных месторождений (типа минерализованных зон): в ВКС это Наталка и Дегдекан (золотоносные сульфидно-кварцевые прожилки), в ВИС – Дражное (линейные золотоносные прожилки), Базовское (молочно-белый кварц), Мало-Тарынское, Хангалас (образец с самородным золотом, по которому была получена Re-Os изохрона с возрастом 137 млн лет [29]). Таким образом, термобарогеохимические параметры включений данного типа характеризуют завершающий этап формирования золоторудных тел орогенных месторождений ЯКМП. Наблюдаемое (относительно предыдущего уровня) падение давления может быть обусловлено снижением глубинности рудообразования (до 4–3 км). Однако не менее веро-

ятно, что спад давления был обусловлен изменением динамического режима в процессе орогенеза (например, сменой режима сжатия на транспрессионный).

Следует отметить, что месторождения ВИС были сформированы при относительно более низких температурах и главное – давлениях (рис. 6). Это может быть связано с различным уровнем современного эрозионного среза данных структур (в ВКС на поверхность выведен пермский уровень разреза, в ВИС – триас-юрский).

III группа – уровень 0.5–0.1 кбар. Включения, захваченные в низкобарических обстановках, присутствуют на месторождениях Базовское (друзовидный кварц), Бадран, Мало-Тарынское, Дражное, В. Хакчан (поздние золото-анкерит-кварцевые прожилки), Токичан (друзовидный кварц в ассоциации с золотом и сульфидами полиметаллов).

Резкий скачкообразный характер снижения давления и признаки роста кристаллов кварца в открытых полостях позволяют считать основной причиной данного явления не уменьшение глубинности минералообразования (до 1–2 км), а смену литостатического режима гидростатическим [19] вследствие открытия трещин на глубинах 5–3 км.

Однако при давлении 0.3–0.1 кбар включения могли быть захвачены только на глубинах не более 3–1 км от палеоповерхности, т.е. после значительной денудации орогена. Таким образом, весьма вероятно, что по крайней мере часть низкобарических включений относится к более позднему этапу рудообразования, не связана с «орогенными» рудообразующими системами и имеет иные источники вещества. В пользу данного предположения свидетельствует увеличение солености растворов (не менее 5–10 мас. % NaCl-экв) и их повышенная восстановленность (существенно азотно-метановый состав газовой фазы). Следует отметить также скачкообразное повышение (до 350 °С) температуры захвата включений в позднем кварце месторождения Верхний Хакчан (рис. 6). В целом данный вопрос заслуживает дальнейших исследований и привлечения других методов, в первую очередь изотопно-геохимических.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований свидетельствуют о том, что золото-кварцевые месторождения Яно-Колымского пояса были сформированы преимущественно в интервале температур 320–220 °С типичными для орогенных рудообразующих систем слабоминерализованными углекислотно-водными флюидами. В составе солей доминирует гидрокарбонат натрия, микропримеси представлены К, В, As, Sb, Rb, Cs. Мольная доля CO₂ в зависимости от РТХ-условий варьирует от 0.19 до 0.03. Примесь метана в углекислоте не превышает 10 мольн. %.

Снижение давления во флюидных системах от 1.5 до 0.1 кбар отражает длительную историю эволюции минерало- и рудообразующих процессов. Эти процессы на этапе формирования основной массы золотоносных кварцевых жил и прожилков протекали на глубинах 6–3 км при давлении 1.5–0.8 кбар. Указанные вариации давления могут отражать как изменение глубинности минералообразования, так и изменение динамического режима орогенеза (например, смену режима сжатия на транспрессионный).

Последующий резкий спад давления до 0.5–0.1 кбар является следствием раскрытия трещин и смены литостатического режима гидростатическим, а также уменьшения глубинности минералообразования до уровня 3–1 км от палеоповерхности. Флюиды

на данной стадии характеризуются повышенной минерализацией и существенно азотно-метановым составом газовой фазы, что указывает на их поступление из другого источника.

Таковы особенности флюидного режима формирования орогенных золоторудных месторождений Яно-Колымского пояса.

Полевые работы выполнены при частичной поддержке проекта (№ FUEM-2019-0004) по плану НИР ИГАБМ СО РАН, интерпретация аналитических данных выполнена при поддержке гранта РФФ (№ 23-47-00064).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акинин В.В., Прокопьев А.В., Торо Х., Миллер Э.Л., Вуден Дж., Горячев Н.А., Альшевский А.В., Бахарев А.Г., Трунилина В.А. U-Pb-SHRIMP-возраст гранитоидов Главного батолитового пояса (Северо-Восток Азии) // Докл. АН 2009. Т. 426, № 2. С. 216–221.
2. Аристов В.В., Прокофьев В.Ю., Имамендинов Б.Н., Кряжев С.Г., Алексеев В.Ю., Сидоров А.А. Особенности рудообразования на золото-кварцевом месторождении Дразное (Восточная Якутия, Россия) // Докл. АН. 2015. Т. 464, № 1. С. 65–70.
3. Аристов В.В., Бабарина И.И., Григорьева А.В., Алексеев В.Ю., Прокофьев В.Ю., Узюнкоян 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.
4. Аристов В.В., Кряжев С.Г., Рыжов О.Б., Вольфсон А.А., Прокофьев В.Ю., Сидорова Н.В., Сидоров А.А. Источники флюидов и рудного вещества золотой и сурьмяной минерализации Адычанского рудного района (Восточная Якутия) // Докл. АН. 2017. Т. 476, № 2. С. 174–180.
5. Арифуров Ч.Х., Кряжев С.Г., Арсентьева И.В., Имамендинова М.А., Цымбалюк Н.В. Золотоносные литолого-стратиграфические уровни и условия локализации прожилково-вкрапленных руд в Хакчанском и Верхне-Хатыннах-Олботском рудных узлах (Магаданская область) // Отч. геология. 2017. № 4. С. 24–43.
6. Вукалович М.П., Алтунин В.В. Теплофизические свойства двуокиси углерода. М.: Атомиздат, 1965. 455 с.
7. Гамянин Г. Н., Фридовский В. Ю., Викентьева О. В. Богороднометалльная минерализация Адыча-Тарынской металлогенической зоны: геохимия стабильных изотопов, флюидный режим и условия рудообразования // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, №. 10. С. 1586–1605.
8. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 2. С. 573–981.
9. Герцева М.В., Лучицкая М.В., Сысоев И.В., Соколов С.Д. Этапы формирования Главного Батолитового пояса Северо-Востока России: U–Th–Pb-Sims и Ar–Ar-геохронологические данные // Докл. РАН. Науки о Земле. 2021. Т. 499, № 1. С. 5–10.
10. Горячев Н.А. Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1998. 210 с.

11. Горячев Н.А. Удско-Мургальская магматическая дуга: геология, магматизм, металлогения // Проблемы металлогении рудных районов Северо-Востока России / Отв. ред. В.И. Гончаров, В.М. Кузнецов. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2005. С. 17–38.
12. Горячев Н.А., Викентьева О.В., Бортников Н.С., Прокофьев В.Ю. 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.
13. Каложный В.А. Основы учения о минералообразующих флюидах. Киев: Наук. думка, 1982. 237 с.
14. Михайлов Б.К., Стружков С.Ф., Аристов В.В., Наталенко М.В., Цымбалюк Н.В., Тямисов Н.Е., Узюнкоян А.А. Золотоносность Яно-Колымской провинции // Руды и металлы. 2007. № 5. С. 4–17.
15. Ньюберри Р. Дж., Лейер П. У., Ганз П. Б. и др. Предварительный анализ хронологии мезозойского магматизма, тектоники и оруденения на Северо-Востоке России с учетом датировок $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и данных по рассеянным элементам изверженных и оруденелых пород // Золотое оруденение и гранитный магматизм Северной Пацифики. Т. 1. Геология, геохронология и геохимия; (Тр. Всерос. совещ.) Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2000. С. 181–206.
16. Оболенский А.А., Гушина Л.В., Анисимова Г.С., Серкебаева Е.С., Томиленко А.А., Гибшер Н.А. Физико-химическое моделирование процессов минералообразования Бадранского золоторудного месторождения (Якутия) // Геология и геофизика. 2011. Т. 52, № 3. С. 373–392.
17. Пачерский Н.В., Кряжев С.Г., Наумов Е.А., Десятова Д.Ю., Двуреченская С.С., Самойленко М.В. Новые данные по золото-редкометалльному оруденению Центрально-Колымского золотоносного района: возраст, условия образования, состав, рудоконтролирующие факторы // Руды и металлы. 2021. № 2. С. 69–90. DOI: 10.47765/0869-5997-2021-10011
18. Прокопьев А.В., Борисенко А.С., Гамянин Г.Н., Фридовский В.Ю., Кондратьева Л.А., Анисимова Г.С., Трунилина В.А., Васюкова Е.А., Иванов А.И., Травин А.В., Королева О.В., Васильев Д.А., Пономарчук А.В. Возрастные рубежи и геодинамические обстановки формирования месторождений и магматических образований Верхояно-Колымской складчатой области // Геология и геофизика. 2018. № 10. С. 1542–1563.
19. Реддер Э. Флюидные включения в минералах. (в двух томах). М: Мир, 1987. 1160 с.
20. Родионова А.В., Кряжев С.Г., Князева Е.А., Войтенко В.Н., Алексеев И.А. Новые данные об условиях формирования руд Малтанского и Диринь-Юряхского рудных полей (Восточная Якутия) // Новое в познании процессов рудообразования: Труды молодых учёных, посвящённые 90-летию ИГЕМ РАН. Москва, 2020. С. 112–115.
21. Сивков Д.В., Прокофьев В.Ю., Чикатуева В.Ю. Новые данные о условиях формирования золотой минерализации месторождения Дрожное (Республика Саха (Якутия, Россия) по результатам исследования флюидных включений // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2021. № 1. С. 42–49.
22. Такеноччи С., Кеннеди Дж. Растворимость углекислоты в растворах NaCl при высоких температурах и давлениях // Термодинамика постмагматических процессов. М.: Мир, 1968. С. 137–149.
23. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Ред. Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 571 с.
24. 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.
25. 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.
26. Фридовский В.Ю., Зайцев А.И. Новые данные о времени формирования золоторудной минерализации Верхне-Индигирского района (Яно-Колымский пояс): по результатам Ag-Ag и Rb-Sr датирования // Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит: Материалы IV Всерос. конф. с междунар. участием. Владивосток, 2018. С. 296–299.
27. Фридовский В.Ю., Кряжев С.Г., Горячев Н.А. Физико-химические условия формирования кварца золоторудного месторождения Базовское (восточная Якутия, Россия) // Тихоокеан. геология. 2019. Т. 38, № 5. С. 14–24.
28. Фридовский В.Ю., Яковлева К.Ю., Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Родионов Н.В., Лохов К.И. Позднеюрский (151–147 млн лет) дайковый магматизм северо-восточной окраины Сибирского кратона // Докл. АН. 2020. Т. 491, № 1. С. 12–16.
29. Фридовский В.Ю., Горячев Н.А., Крымский Р.Ш., Кудрин М.В., Беляцкий Б.В., Сергеев С.А. Возраст золотого оруденения Яно-Колымского металлогенического пояса, Северо-Восток России: первые данные Re-Os изотопной геохронологии самородного золота // Тихоокеан. геология. 2021. Т. 40, № 4. С. 18–32.
30. Фридовский В.Ю., Верниковская А.Е., Яковлева К.Ю., Родионов Н.В., Травин А.В., Матушкин Н.Ю., Кадильников П.И. Геодинамические условия и возраст образования гранитоидов комплекса малых интрузий западной части Яно-Колымского золотоносного пояса (Северо-Восток Азии) // Геология и геофизика. 2022. Т. 63, № 4. С. 579–602.
31. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ fluid inclusions / Eds: De Vivo B., Frezzotti M.L. Fluid inclusions in minerals, methods and applications. Blacksburg: Virginia Tech., 1994. P. 117–130.
32. Darling R.S. An extended equation to calculate NaCl contents from final clathrate melting temperatures in $\text{H}_2\text{O-CO}_2\text{-NaCl}$ fluid inclusions: implications for PT-isochors location // Geochim. Cosmochim. Acta. 1991. V. 55. P. 3869–3871.
33. 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.
34. Fridovsky V.Y., Kudrin M.V., Polufuntikova L.I. Multi-stage deformation of the Khangalas ore cluster (Verkhoyansk-Kolyma folded region, northeast Russia): ore-controlling reverse thrust faults and post-mineral strike-slip faults // Minerals. 2018. V. 8, N 7. P. 27.
35. Fridovsky V.Yu., Yakovleva K.Yu., Vernikovskaya A.E., Vernikovskiy V.A., Matushkin N.Y., Kadilnikov P.I., Rodionov N.V. Geodynamic emplacement setting of Late Jurassic dikes of the Yana-Kolyma Gold Belt, NE folded framing of

- the Siberian Craton: Geochemical, petrologic, and U–Pb zircon data // *Minerals*. 2020. V. 10, N 11. P. 1000–39.
36. Fridovsky, V.Yu., Polufuntikova, L.I., Kudrin, M.V., Goryachev, N.A. Sulfur isotope composition and geochemical characteristics of gold-bearing sulfides of the Badranorogenic deposit, Yana-Kolyma metallogenic belt (Northeast Asia) // *Reports RAS. Earth Sciences*, 2022. V. 502, N 1. P. 3–9.
 37. Fridovsky V.Yu., Polufuntikova L.I., Kudrin M.V. Origin of disseminated gold-sulfide mineralization from proximal alteration in orogenic gold deposits in the central sector of the Yana–Kolyma metallogenic belt, NE Russia // *Minerals*. 2023. V. 13, N 3. P. 394.
 38. Frimmel H.E. Earth's continental crustal gold endowment // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2008. 267. P. 45–55.
 39. Goldfarb R.J., Groves D.I., Gardoll S. Orogenic gold and geologic time: a synthesis // *Ore Geol. Rev.* 2001. V. 18. P. 1–75.
 40. Goldfarb R.J., Baker T., Dube B., Groves D.I., Hart C.J.R., Gosselin P. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes // *Econ. Geol. 100th Anniv. Vol.* 2005. P. 407–450.
 41. Goldfarb R., Taylor R., Collins G., Goryachev N., Orlandini O. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia // *Gondwana Res.* 2014. V. 25. P. 48–102. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.03.002>.
 42. Goldfarb R., Groves D. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time // *Lithos*. 2015. V. 233. P. 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.011>.
 43. Goryachev N.A., Pirajno F. Gold deposits and gold metallogeny in Far East, Russia // *Ore Geol. Rev.* 2014. V. 59. P. 123–151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.11.010>.
 44. Layer P.W., Newberry R., Fujita K., Parfenov L.M., Trunilina V.A., Bakharev A.G. Tectonic setting of the plutonic belts of Yakutia, northeast Russia, based on ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology and trace element geochemistry // *Geol.* 2001. V. 29, N 2. P. 167–170.
 45. Ridley J.R., Diamond L.W. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models // *Rev. Econ. Geol.* 2000. V. 13. P. 141–162.
 46. Thiery R., Kerkhof A.M., Dubessy J. vX properties of CH₄–CO₂ and CO₂–N₂ fluid inclusions: modeling for T<31 °C and P<400 bars // *Eu. J. Mineral.* 1994. N 6. P. 753–771.
 47. Toro J., Miller E.L., Prokopiev A.V., Zhang X., Veselovskiy R., Mesozoic orogens of the Arctic from Novaya Zemlya to Alaska // *J. Geol. Soc.* 2016. V. 173. P. 89–1006. <https://doi.org/10.1144/jgs2016-083>.
 48. Voroshin S.V., Tyukova E.E., Newberry R.J., Layer P.W. Orogenic gold and rare metal deposits of the Upper Kolyma District, Northeastern Russia: Relation to igneous rocks, timing, and metal assemblages // *Ore Geol. Rev.* 2014. V. 62. P. 1–24.

Рекомендована к печати Н.А. Горячевым

после доработки 23.05.2023 г.

принята к печати 06.07.2023 г.

S.G. Kryazhev, V.Y. Fridovsky

Fluid regime of orogenic gold deposits formation within the Yana–Kolyma gold-bearing belt

The microthermometric and bulk analysis data on fluid inclusions in vein quartz of 16 orogenic gold deposits located in various parts of the Yana-Kolyma belt are presented. The deposits were found to have formed in the temperature range 350–220°C with weakly mineralized carbon dioxide-aqueous fluids (< 5 wt. % NaCl-eq.) typical for orogenic ore-forming systems. The composition of the salts is dominated by sodium bicarbonate, and trace elements are K, B, As, Sb, Rb, and Cs. The molar fraction of CO₂ varies from 0.19 to 0.03 depending on the RTX conditions. The molar fraction of methane in carbon dioxide does not exceed 0.1. Intense degassing of solutions in the range between 320° and 270°C could be one of the reasons for ore deposition. Gold-bearing quartz veins and veinlets were formed at depths of 6–3 km with a decrease in pressure from 1.5–1.0 to 0.9–0.8 kbar while the orogeny dynamic regime evolved. At the final stage, the opening of fractures led to a change of the lithostatic regime to hydrostatic with a pressure drop to 0.5–0.1 kbar. At the final stages of mineral formation, fluid systems are characterized by increased salinity and the gas phase comprising essentially nitrogen and methane, which indicates their supply from another source. Thus, the parameters of fluid inclusions in quartz reflect a long history of evolution of the processes involved in mineral and ore formation that associated with the orogen development.

Key words: gold-quartz, orogenic gold deposits, fluid inclusions, temperature, pressure, fluid composition Yana-Kolyma belt.