

УДК 553.086

Д.В. Сивков¹, В.Ю. Прокофьев², В.Ю. Чикатуева³

НОВЫЕ ДАННЫЕ О УСЛОВИЯХ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОЛОТОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДРАЖНОЕ (РЕСПУБЛИКА САХА — ЯКУТИЯ, РОССИЯ) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

ООО «Институт геотехнологий», 119234, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1, стр. 77

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
119017, Москва, Ж-17, Старомонетный пер., 35

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

LLC "Institute of geotechnology", 119234, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1, bd 77

Institute of Geology of Ore Deposits Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, 119017, Moscow, Staromonetny lane, 35

Новые результаты термобарогеохимических исследований свидетельствуют о том, что кварцевые прожилки в пределах месторождения Дражное формировались в мезотермальных условиях на глубине от 3 до 9 км из гетерогенных углекислотно-водных флюидов с невысокой концентрацией солей и высокой — CO₂, что характерно для рудообразующих флюидов орогенных жильных месторождений золота. По фазовому составу выделяются три типа флюидных включений: 1) углекислотно-водные; 2) газовые, заполненные плотной углекислотой; 3) двухфазные газовой-жидкие водно-солевых растворов. Среди солей в рудообразующих флюидах преобладали хлориды Na, Mg и Fe. Предполагается, что флюиды мигрировали по региональной Адыча-Тарынской системе разломов, поднимаясь к поверхности земли при сверхлитостатическом давлении с последующим процессом осаждения рудных элементов и формированием жильного кварца при подвижках по тектоническим разломам.

Ключевые слова: включения, температура гомогенизации, кварц, золоторудная минерализация, флюиды.

New results of thermal, baric, and geochemical studies indicate that quartz veins within the deposit were formed in mesozonal conditions at depths 3–9 km from heterogeneous CO₂–H₂O fluids containing water and carbon dioxide with low concentrations of salts and high concentrations of CO₂, which is typical for ore-forming fluids of orogenic vein gold deposits. According to the phase composition, there are three types of fluid inclusions: 1) carbon dioxide-water; 2) gas-filled with dense carbon dioxide; 3) biphasic gas-liquid water-salt solutions. There are Na, Mg, and Fe chlorides predominated in the ore-forming fluids. It is assumed that the fluids migrated along the regional Adycha-Taryn shear zone, uplifting to the Earth's surface at supra-lithostatic pressures, followed by the deposition of ore elements and the vein quartz formation during tectonic movements along shear zones.

Key words: inclusions, homogenization temperature, quartz, gold mineralization, fluids.

Введение. Месторождение Дражное расположено на востоке Республики Саха (Якутия) в Оймяконском районе, на 70 км южнее пос. Усть-Нера, административного центра района.

Месторождение открыто в рамках поисковых работ 2004–2011 гг. на востоке Тарынского золоторудного поля (ТЗРП). Оно представлено жильно-прожилковым типом золото-кварцевой формации. С 2012 г. в пределах месторождения ведутся работы по детальной разведке, в рамках которых авторами выполнены комплексные

структурно-геологические, геохимические, минералого-петрографические и петро-томографические исследования [Читалин и др., 2018; Чикатуева, Ситкевич, 2019; Сивков и др., 2020]. Они позволили уточнить существующие представления о формировании кварцевых прожилков в мезотермальных условиях на глубине несколько километров из углекислотно-водных флюидов [Аристов и др., 2015] и получить новые данные о генезисе месторождения, важные для актуализации модели его формирования и

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых, аспирант; ООО «Институт геотехнологий», геолог, магистр; *e-mail:* sivkovdmitrij@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геологии, геохимии и экономики полезных ископаемых, профессор, докт. геол.-минер. н.; Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН), заведующий лабораторией геохимии, докт. геол.-минер. н.; *e-mail:* sophs@mail.ru

³ ООО «Институт геотехнологий», геолог, магистр; *e-mail:* v.chikatueva@igeotech.ru

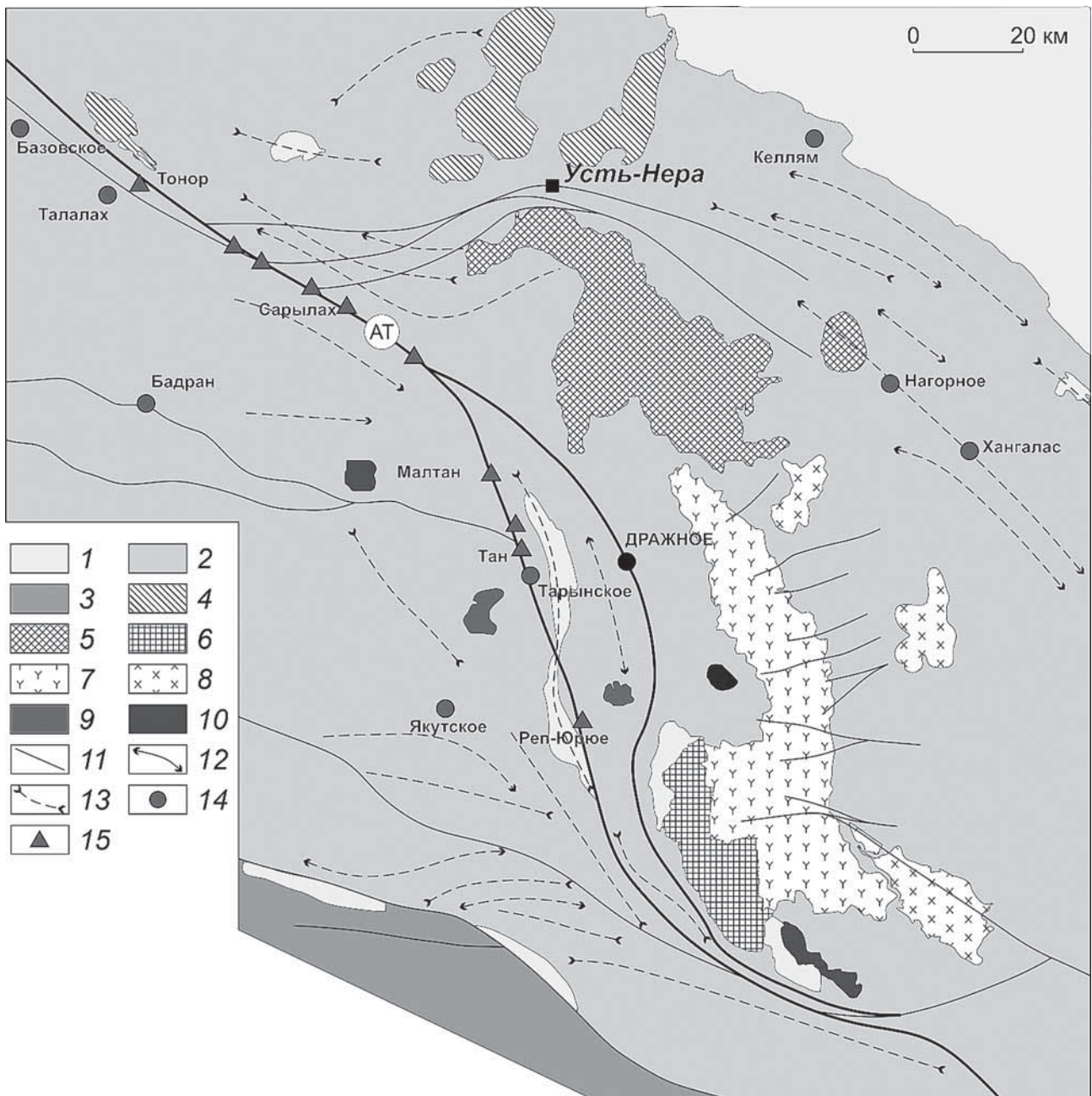


Рис. 1. Геологическое строение Адыча-Эльгинского антиклинория с вынесенными основными золотокварцевыми и золото-сурьмяными месторождениями Адыча-Тарынской металлогенической зоны: 1–3 – отложения: 1 – юрские, 2 – триасовые, 3 – пермские–нижнетриасовые; 4–10 – магматические образования: 4 – гранит-лейкограниты, 5 – адамеллиты и граниты, 6 – риолиты, 7 – дациты Тарынского субвулкана, 8 – диорит-гранодиориты, 9 – гранодиорит-граниты, 10 – гранодиорит-порфиры; 11 – сдвиги, в том числе Адыча-Тарынский (АТ); 12–13 – оси: 12 – антиклиналей, 13 – синклиналей; 14–15 – месторождения: 14 – золото-кварцевые, 15 – золото-сурьмяные

корректировки существующей прогнозно-поисковой модели.

В 2017–2019 гг. в рамках разведочных работ авторами изучены минералогические и термобаро-геохимические особенности золотоносных кварц-сульфидных руд месторождения, а также проведен сравнительный анализ результатов аналогичных работ предшественников.

Геологическое строение месторождения.

В структурно-тектоническом отношении территория Тарынского золоторудного поля принадлежит Верхне-Индибирскому мегасинклинию Яно-

Индибирской синклинальной зоны, выделяемой в структуре Верхояно-Колымской складчатой системы и сложенной терригенно-обломочной толщей, которая сформировалась в условиях дистальной части шельфа [Аристов и др., 2006]. Месторождение Дразное принадлежит Адыча-Тарынской металлогенической зоне, которая протягивается на 600 км в северо-западном направлении при ширине 150 км, пространственно совпадающей с Адыча-Эльгинским антиклинорием (рис. 1).

Адыча-Тарынская золото-сурьмяная зона (АТЗ) связана с одноименным субвертикальным

глубинным разломом северо-западного простирания, характеризующимся преимущественно левосдвиговыми перемещениями [Парфенов, 1988]. Результаты реконструкции палеонапряжений [Сивков и др., 2020] свидетельствуют о вероятной кратковременной смене кинематики АТЗ на обратную, т. е. правосдвиговую, что позволяет говорить о реверсивном характере тектонических подвижек АТЗ. Наиболее крупные и богатые золотокварцевые жилы приурочены к узлам пересечения главного разлома с поперечными разрывными нарушениями.

В строении месторождения участвуют рудовмещающие средненорийские терригенные отложения верхнего триаса, верхнечетвертичные и современные рыхлые образования. Средненорийские отложения, соответствующие возрасту *Eomonotis scutiformis*, достигают мощности 300 м. В разрезе толщи преобладают темно-серые крупнозернистые песчанистые алевролиты. Редко встречаются маломощные линзующиеся слои тонкозернистых песчаников. Практически все разновидности терригенных пород обогащены углеродистым веществом — до 2,0 масс.% [Аристов и др., 2006].

Структура месторождения. В районе месторождения породы характеризуются наклонным залеганием и северо-западным до субмеридиональным простиранием, отмечены также участки линейной складчатости субмеридионального и северо-западного простирания. Складки разных порядков характеризуются острыми замками и размахом крыльев от нескольких десятков до нескольких сотен метров с углами падения на крыльях до субвертикальных. Складчатая толща пород пронизана зонами хрупких и пластических деформаций мощностью до нескольких метров. В пелитовых разностях пород интенсивно развит сквозной кливаж, часто совпадающий по ориентировке с их слоистостью.

Месторождение Дрожное представлено совокупностью кварцевых и сульфидно-кварцевых жильно-штокверковых тел, как пологих, так и крутопадающих, сопряженных с надвигами, взбросами, а также сбросо- и взбросо-сдвигами. Прожилки в штокверках сформировались путем выполнения трещин скола и отрыва разной ориентировки — от субгоризонтальных до крутопадающих. В пределах месторождения выделяются штокверки, характеризующиеся структурой «конский хвост». Выявлены штокверки, связанные с взбросами, сбросо-сдвигами и взбросо-сдвигами пологих и крутых надвиговых зон, а также седловидные штокверки пологих зон растяжения [Читалин и др., 2018].

Кварцевые штокверки, несущие золоторудную минерализацию, обладают пластинообразной формой и характеризуются пологим падением на юго-запад и северо-восток, реже залегают субго-

ризонтально, формируя на отдельных участках арочную (седловидную) структуру.

Штокверки — объемные структуры деформации разрушения. Деформация реализовалась путем образования сопряженных трещин скалывания и отрыва, которые имеют упорядоченное залегание внутри штокверков. Трещины скалывания субпараллельны границам штокверков, трещины отрыва субперпендикулярны или залегают под углом 45–60° к трещинам скалывания, с которыми они образуют единый структурный парагенезис. Трещины часто выполнены кварцем нескольких генераций, прожилки по трещинам отрыва иногда имеют S- или Z-образную форму, пересекаются, что указывает на деформацию вращения ранее образованных прожилков в процессе прогрессивной деформации при формировании штокверков.

Пологопадающие штокверки отвечают структурам надвигового типа, горизонтальные штокверки — структурам вертикального растяжения, сопряженным с надвигами. Выделяются также крутопадающие линейные штокверки, сопряженные с пологими штокверками и сопровождающиеся зонами дробления [Читалин и др., 2018].

Кварцевые штокверки — секущие по отношению к складчатой структуре, что свидетельствует об их позднескладчатом или даже постскладчатом возрасте.

Золоторудные тела, как правило, локализованы в пределах кварцевых штокверков. Наиболее богатые золотом участки рудных тел в пределах штокверков тяготеют к участкам максимального содержания кварца, областям развития пологих кварцевых жил, интенсивной пиритизации и участкам развития арсенопирита [Читалин и др., 2018].

Минералогия месторождения. Главные минералы гидротермально-метасоматических образований, наблюдаемых во вмещающих породах в пределах месторождения, представлены кварцем, светлыми слюдами (гидросерицит, серицит), бледно-зеленым до бесцветного хлоритом, анкеритом и сидеритом.

Прожилки сложены кварцем, карбонатами (кальцит, анкерит-доломит, сидерит?), реже слабоокрашенным (магнезиальным) хлоритом с буроватым или зеленоватым оттенком. Часто в прожилках наблюдаются кристаллы пирита, реже — арсенопирита, сфалерита, халькопирита и других сульфидов.

Макроскопически в строении прожилков можно выделить, как правило, 2–3 генерации кварца. Ранние генерации нередко до- или синтетектонические и несут следы интенсивной перекристаллизации. Кварц поздних генераций часто обладает средне- и крупнокристаллической структурой.

Формирование прожилков, вероятно, происходило в следующем порядке: на ранних этапах формировались тонкие (до 1 мм) с неровными кон-

Минералы	Дорудный (осадочно-диагенетический) этап	Рудный (гидротермально-метасоматический) этап			Пострудный этап
		Ранняя стадия (ранние сульфиды)	Полисульфидная стадия		
			Ранняя ассоциация	Поздняя ассоциация	
Пирит <small>все генерации</small>					
Арсенопирит		—————		—————	
Пирротин		—————			
Халькопирит		—————			
Сфалерит		—————			
Тетраэдрит			—————		
Бурнонит				—————	
Буланжерит				—————	
Галенит			—————		
Герсдорфит		—————			
Глаукоdot				—————	
Золото				—————	
Рутил		—————			
Ильменит		—————			
Магнетит		—————			
Кварц <small>все генерации</small>		—————		—————	
Анкерит		—————		—————	
Хлорит					—————
Серицит			—————		
Каолинит			—————		

Рис. 2. Последовательность минералообразования на месторождении Дразное, по [Чикатуева и др., 2019] с дополнениями

тактами и апофизами прожилки мелкозернистого кварца, карбонатов и серицита в приблизительно равных по объему пропорциях. Позднее возникали кварцевые и карбонат-кварцевые прожилки мощностью несколько миллиметров с резкими ровными контактами. Именно с этими прожилками связаны наиболее значимые выделения сульфидов с золотом. Иногда среди этих прожилков можно выделить несколько генераций: от ранних генераций к поздним возрастает объемная доля кварца, а доля карбонатов и хлорита снижается. В некоторых случаях отмечена тенденция к увеличению доли серицита и гидрослюд при снижении доли хлорита. На заключительных этапах образовывались тонкие (до 0,5 мм) просечки карбонатов (изредка мелкого кварца с серицитом/гидрослюдами), секущие кварцевые жилы и прожилки.

К основным рудным минералам кварцевых штокверков относятся пирит, марказит, арсенопирит, к второстепенным — золото, сфалерит, галенит, халькопирит, тетраэдрит. Редко встречаются пирротин, буланжерит, бурнонит, сульфоарсениды Ni и Co, рутил, ильменит, магнетит [Чикатуева и др., 2019]. Последовательность минералообразования приведена на рис. 2.

Результаты анализа корреляции петрографических признаков с содержанием золота в кварцевых прожилках [Читалин и др., 2018] свидетельствуют о связи повышенной концентрации золота с при-

сутствием в кварцевых прожилках сфалерита, железистых карбонатов, представленных анкеритом, реже сидеритом или сидероплезитом, значимой (>1%об.) доли пирита, а также кварца с гидрослюдами/серицитом.

Отмечена связь повышенной концентрации золота с наличием в осадочных породах крупных (до 1,5 см) метакристаллов пирита. Однако никакая более значимая корреляция золота с другими характеристиками фоновых гидротермальных изменений не выявлена.

К главным особенностям месторождений ТЗРП относятся наличие минерализации арсенопирита в околорудных метасоматитах, а также относительно высокое содержание As (до 3,6 масс. %, по данным [Чикатуева и др., 2019]) в пирите в пределах золотоносных штокверков.

Предполагается, что продуктивная стадия минералообразования связана со слабыми тектоническими движениями на заключительной стадии развития гидротермальной системы после формирования большей части кварцевых прожилков. Золото, осаждающееся из растворов на этой стадии, ассоциирует с гидрослюдами/серицитом и, возможно, с железистым карбонатом (анкеритом) [Читалин и др., 2018; Чикатуева и др., 2019].

Представления о формировании месторождения Дразное. В зарубежной литературе золото-кварцевые малосульфидные месторождения, подобные

Дражному, классифицируются как «кварцевожильные в терригенных толщах» или «орогенные мезотермальные» («orogenic mesozonal»), сформировавшиеся в условиях относительно высоких давления (100–300 МПа) и температуры (200–400 °С), в пределах конвергентных окраин в процессе аккреции или коллизии террейнов [Groves et al., 2020; Ridley, Diamond, 2000; Goldfarb et al., 2005].

В публикациях отечественных авторов отмечена приуроченность золото-кварцевых малосульфидных месторождений к осадочным формациям шельфа и континентального склона пассивных окраин. Несмотря на многообразие состава и внутреннего строения рудовмещающих толщ, общее для всех месторождений — обязательное присутствие углеродисто-терригенных пород, иногда при участии карбонатных и/или вулканогенных разностей [Кряжев, 2017].

Согласно данным [Аристов и др., 2015], кварц месторождения Дражное сформировался в мезотермальных условиях на глубине 3–4 км (230 ± 50 °С; 90 ± 10 МПа) из углекислотно-водных флюидов с широким диапазоном величины солености (2,6–9,3 масс.%-экв. NaCl), содержащих в небольшом количестве метан. Отложение рудных минералов происходило в термостатированных условиях при гетерогенизации флюидов за счет вероятного резкого снижения давления и смешения растворов.

В.В. Аристов с соавторами [2015] сообщают о присутствии в вытяжках из кварца месторождения Дражное гидрокарбонатно-натриевого бромсодержащего раннего флюида (66 г/кг H₂O), сильно разбавленного (17 г/кг H₂O) флюида с повышенным содержанием Вг, В и Li, а также позднего сульфатно-гидрокарбонатно-натриевого флюида с Са, обладающего повышенной соленостью (78 г/кг H₂O).

Зона Адыча-Тарынского разлома (АТР) служит областью концентрирования и разгрузки флюидов. Состав раннего флюида свидетельствует о его элизионной природе. По данным [Аристов и др., 2015], повышенная соленость и усложнение состава позднего флюида указывают на вовлечение в рудообразование магматогенных компонентов. Состав флюидов, возможно, зависит от преобладания горизонтальной (элизионные воды) или вертикальной проницаемости зоны АТР.

Верхнекоревая метаморфогенная модель формирования орогенных месторождений золота. В зарубежной литературе широкое признание получила модель формирования орогенных месторождений, в основе которой лежат представления о метаморфогенной потере флюидов (devolatilization), как правило, из пород средней коры в условиях от зеленосланцевой до амфиболитовой фации метаморфизма. Эта модель предполагает подъем флюида, высвободившегося при региональном метаморфизме из пород средней коры, с возмож-

ным осаждением рудного вещества в верхней коре [Groves et al., 2020].

Специфика этой модели заключается в том, что она не подразумевает какую-либо связь рудного вещества с вмещающими породами или интрузиями. В результате метаморфогенной потери флюидов из пород средней коры формируются золотоносные флюиды, характеризующиеся низкой соленостью H₂O–CO₂ (\pm CH₄, N₂) [Fyfe et al., 1978].

Из пелитовых терригенных и основных вулканических пород в рассматриваемом диапазоне *PT*-условий можно выделить до 5 об.% флюидов [Fyfe et al., 1978], что обеспечивает необходимый приток флюидов даже для уникальных месторождений [Phillips, Powell, 2010]. Такие флюиды будут мигрировать в региональные системы разломов и перемещаться вверх при давлении, превышающем литостатическое, с последующим осаждением рудных элементов и кремнезема (кварца) при тектонических подвижках по этим разломам [Cox et al., 1991].

Осаждение золота из флюида происходило в результате распада тиосульфидных комплексов с образованием пирита и других сульфидов (реакция сульфидизации) при протекании процесса гетерогенизации флюида [Groves et al., 2020].

Материалы и методы исследований. В рамках работы было исследовано более 100 индивидуальных флюидных включений размером >10 мкм в золотоносных кварцевых прожилках в центральной части карьера месторождения (№ ПШ008, глубина 75,0 м) и на юго-западном фланге месторождения (№ DS004, глубина 25,5 м; № 88804, глубина 273,3 м).

Выполнена оценка объемного веса разных литологических разностей вмещающих пород, а также жильного материала на основании >1600 замеров (интервал глубины отбора образцов 0–550 м).

Исследование флюидных включений. Микрометрические исследования флюидных включений проводили в лаборатории геохимии ИГЕМ РАН с использованием измерительного комплекса, созданного на основе микротермокамеры THMSG-600 («Linkam», Великобритания), микроскопа «Olimpus B51», снабженного набором длиннофокусных объективов, видеокамерой и управляющим компьютером. Комплекс позволяет в режиме реального времени измерять температуру фазовых переходов внутри включений в температурном интервале от –196 до 600 °С, наблюдать за ними при большом увеличении и получать электронные микрофотографии. Солевой состав растворов определялся по значениям температуры эвтектики [Борисенко, 1977]. Концентрацию солей в растворе включений оценивали по температуре плавления газгидратов [Collins, 1979]. Концентрацию углекислоты и метана в растворе оценивали также на основе объемных соотношений фаз и плотности углекислоты и метана в газовой фазе.

Давление оценивали для гетерогенного флюида по пересечению изохоры и изотермы. Оценка концентрации солей и давления флюида проводилась с использованием специализированного программного обеспечения FLINCOR [Brown, 1989].

Определение объемного веса. Определение объемного веса пород и руд выполняли на участке буровых работ в процессе документации керна скважин. Вес образца измеряли в сухом виде, после чего определяли массу вытесненной образцом воды путем взвешивания образца, погруженного в воду. Объем образца рассчитывали исходя из значения плотности воды 1 г/см³. Величину объемного веса образца рассчитывали как отношение веса сухого образца в воздухе к объему вытесненной воды.

Результаты исследований и их обсуждение. По фазовому составу при комнатной температуре первичные включения изученных образцов подразделены на 3 типа (рис. 3): 1) углекислотно-водные флюидные включения; 2) газовые флюидные включения, заполненные плотной углекислотой с небольшой каймой водного раствора; 3) двухфазовые газовой-жидкие включения водно-солевых растворов. Разные типы первичных флюидных включений образуют ассоциации газовых включений с углекислотно-водными включениями, что свидетельствует об одновременном захвате включений двух типов, т. е. кристаллизация кварца рудных жил происходила из гетерогенного флюида.

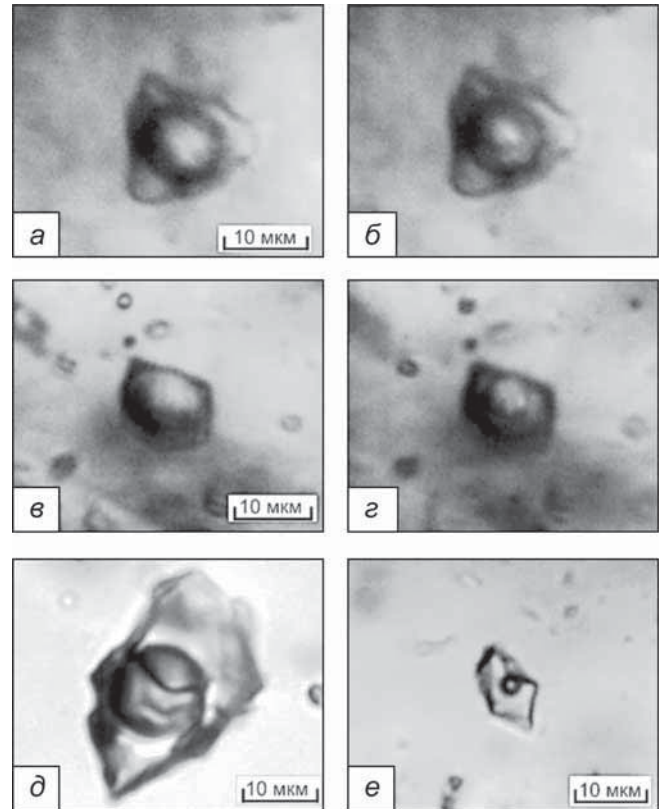


Рис. 3. Микрофотографии флюидных включений разных типов в кварце месторождения Дразное: а, б — углекислотно-водные 1-го типа (а — +20 °С, б — +18 °С); в, г — газовые 2-го типа (в — +20 °С, г — +15 °С); д, е — двухфазовые газовой-жидкие 3-го типа

Таблица 1

Результаты термо- и криометрических исследований индивидуальных флюидных включений в кварце золоторудных жил месторождения Дразное

Номер пробы	Тип включений	n	T _{гом} , °С	T _{эвт} , °С	T _{пл. льда} , °	T _{пл CO₂} , °С	T _{гом CO₂} , °С	T _{пл газ} , °С	C _{солей} , масс. % экв. NaCl	C _{CO₂} , моль/кг раствора	C _{CH₄} , моль/кг раствора	d, г/см ³	Давление, МПа
DS004	1П	21	293–334	–30...–34	–2,6...–3,2	–57,4...–57,6	17,9Г...28,1Ж	8,7–9,2	1,6–2,6	3,1–6,0	0,8–1,2	0,75–0,94	128–152
	2П	11	–	–	–	–56,6...–58,1	22,1...22,7Ж	–	–	–	–	0,74–0,75	–
	3В	3	147	–27	–3,1	–	–	–	–	–	–	–	–
ПШ008	1П	4	275	–25	–2,1	–57,0	27,9Г	9,9	0,2	2,9	0,7	0,87	–
	3П–В	22	244–272	–29...–30	–0,7...–2,5	–	–	–	1,2–4,1	–	–	0,79–0,84	–
	3В	3	162	–27	–1,6	–	–	–	2,6	–	–	0,93	–
88804	3П–В	3	263	–31	–4,1	–	–	–	6,4	–	–	0,84	–
	3П–В	5	241	–30	–4,3	–	–	–	6,8	–	–	0,88	–
	1П	16	304	–23	–1,2	–	–	–	2,0	–	–	0,71	–
	1П	3	304	–27	–3,0	–	–	9,7	4,9	–	–	0,75	250
	–	2	–	–	–	–59,9	–6,7Ж	–	–	–	–	0,97	–
	1П	8	296	–28	–3,3	–	–	–	5,3	–	–	0,78	–
	3П–В	3	239	–31	–2,5	–	–	–	4,1	–	–	0,85	–
	1П	4	293	–24	–2,7	–	–	–	4,4	–	–	0,77	–
	1П	3	297	–23	–3,0	–	–	–	7,9	–	–	0,77	–
3В	8	114	–25	–1,8	–	–	–	3,0	–	–	0,97	–	

Примечания. Вещественный тип включений: 1 — углекислотно-водно-солевые; 2 — газовые, 3 — газовой-жидкие водно-солевых растворов; генетический тип включений: П — первичные, П–В — первично-вторичные, В — вторичные; Г — гомогенизация углекислоты в газ, Ж — в жидкость; n — число включений; d — плотность флюида.

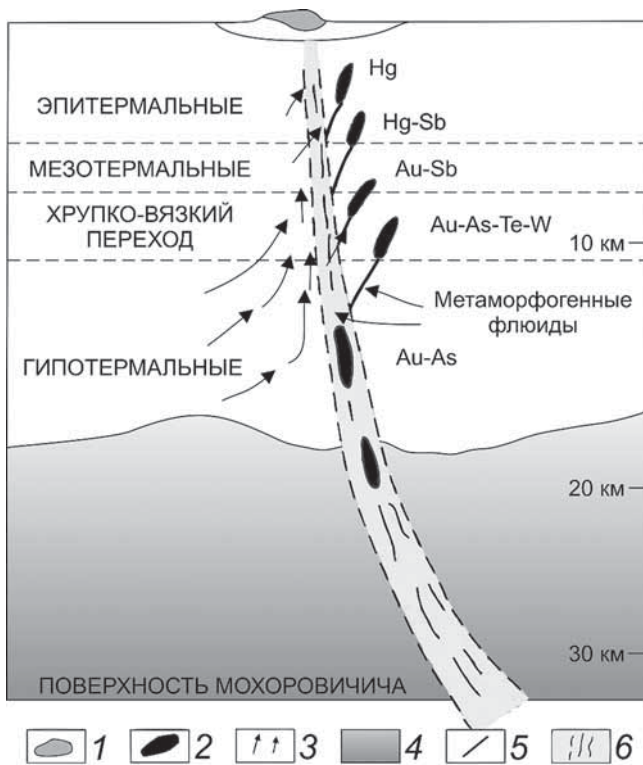


Рис. 4. Упрощенная схема формирования месторождений из метаморфогенных флюидов в условиях верхней коры, по [Groves et al., 2020]: 1 — термальные источники, 2 — орогенные месторождения золота, 3 — потоки флюидов, 4 — золотоносные материнские горные породы, 5 — разрывные нарушения, 6 — региональные зоны сдвиговых деформаций

По данным изучения 119 индивидуальных флюидных включений (табл. 1) температура гомогенизации первичных и первично-вторичных флюидных включений 1-го типа в кварце изменяется в интервале 239–334 °С. Концентрация солей в растворе флюидных включений этого типа составляет 0,2–7,9 масс. %-экв. NaCl. Концентрация CO₂ в рудообразующем флюиде достигала 2,9–6,0 моль/кг раствора, а CH₄ — 0,7–1,2 моль/кг раствора. Плотность углекислотно-водного флюида 0,71–0,94 г/см³. Судя по величине температуры эвтектики (от –23 до –34 °С), в рудообразующих флюидах среди солей преобладали хлориды натрия, магния и железа.

Гомогенизация CO₂ во флюидных включениях 2-го типа, сингенетичных включениям 1-го типа, происходила в жидкую фазу при температуре от +22,1 до +22,7 °С. Плавление CO₂ наблюдается в интервале температуры от –56,6 до –58,1 °С. Температура плавления ниже температуры плавления чистой CO₂ (–56,6 °С) связана с наличием примесей CH₄ или N₂. Плотность газовой фазы достаточно велика (0,74–0,75 г/см³).

Давление флюида, оцененное для ассоциаций флюидных включений 1- и 2-го типов в кварце месторождения Дразное, захватывавшихся в периоды гетерогенизации флюида, изменяется от 128 до 250 МПа в температурном интервале 293–334 °С.

Среднее значение объемного веса пород по 1678 замерам составляет 2,72 т/м³. Сопоставление результатов основного и контрольного замеров, проводившееся за весь период работ на месторождении, позволило выявить не более 10 незначительных отклонений от допустимых расхождений. Отклонения не превышали 0,01 т/м³, они связаны с сильной дезинтеграцией выбранных образцов. Результаты определения объемного веса различных литологических разностей вмещающих пород приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты определения удельного веса пород и руд

Литологическая разность	Число замеров	Средняя плотность, т/м ³
Алеврит	129	2,74
Песчаник	520	2,71
Алевритопесчаник	310	2,72
Песчаник алевритистый	586	2,73
Кварцевые и кварц-карбонатные жилы и прожилки, кварцевый штокверк (>50% об. кварца)	133	2,66
Итого	1678	2,72

Результаты тематических исследований [Ridley, Diamond, 2000] свидетельствуют о том, что характерные для месторождения Дразное флюиды, содержащие небольшую концентрацию солей и высокую концентрацию углекислоты, характерны для рудообразующих флюидов орогенных жильных месторождений золота.

Исходя из результатов оценки условий гомогенизации флюидных включений в отобранных образцах (табл. 1) величина литостатического давления варьирует от 128 до 250 МПа. На основе более чем 1500 результатов измерений объемного веса пород и оцененной величины внешнего литостатического давления глубина формирования флюидных включений в пределах месторождения Дразное оценивается как диапазон

$$\text{от } P_{\text{лит}} = \frac{128 \text{ МПа}}{2,72 \text{ т/м}^2 \cdot 9,8 \text{ м/с}^2} \sim 4,8 \text{ км}$$

$$\text{до } P_{\text{лит}} = \frac{250 \text{ МПа}}{2,72 \text{ т/м}^2 \cdot 9,8 \text{ м/с}^2} \sim 9,4 \text{ км.}$$

Полученные результаты согласуются с вышеизложенной моделью формирования орогенных месторождений, сформированных в мезотермальных условиях при отложении золоторудной минерализации из флюидов, поднимающихся с более низких уровней коры (рис. 4).

Учитывая многостадийный характер развития АТР как области разгрузки флюидов и различия в оценке глубины формирования кварца (по данным [Аристов и др., 2015] в 3–4 км, согласно результатам наших исследований — 4,8–9,4 км), кварц в образцах, исследованных в работе [Аристов и др.,

2015], вероятно, представлял собой более поздние минеральные ассоциации. Разница в солёности флюидов (по данным [Аристов и др., 2015] — 2,6–9,3 масс. %-экв. NaCl, а согласно результатам наших исследований — 0,2–7,9 масс. %-экв. NaCl), что может свидетельствовать в пользу этого предположения.

Заключение. Флюиды золоторудного месторождения Дрожное характеризовались небольшой концентрацией солей и высокой — углекислоты. Согласно модели формирования орогенных месторождений (по [Groves et al., 2020]) рудоносные флюиды месторождения мигрировали по региональной Адыча-Тарынской зоне разломов, поднимаясь к поверхности при давлении, превышающем литостатическое, с последующим процессом формирования золотоносных кварцевых и кварц-карбонатных прожилков по раскрытым при тектонических подвижках трещинам в условиях кратковременного падения литостатического

давления. Формирование кварцевых жильно-прожилковых образований, несущих золотую минерализацию, происходило полистадийно, преимущественно в мезотермальных условиях на глубине от 3 до 9 км из гетерогенных углекислотно-водных флюидов.

Процесс осаждения золотоносной минерализации месторождения Дрожное, вероятно, хронологически соответствует смене поля деформации [Читалин и др., 2018; Сивков и др., 2020] в регионе — направление вектора горизонтального сжатия изменилось с северо-восточного—юго-западного на северо-западное—юго-восточное. Результатом стало формирование рудоконтролирующей зоны левосдвиговых деформаций север-северо-западного простирания, в пределах которой в обстановке трансформации зоны образовались складки северо-восточного простирания. Этим деформациям, очевидно, сопутствовал подъем флюида к поверхности с отложением рудного вещества.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аристов В.В., Задорожный Д.Н., Имамендинов Б.Н. и др. Факторы локализации золото-кварцевых месторождений Тарынского рудно-россыпного узла. М., 2006. 200 с.

Аристов В.В., Прокофьев В.Ю., Имамендинов Б.Н. и др. Особенности рудообразования на золото-кварцевом месторождении Дрожное (Восточная Якутия, Россия) // Докл. РАН. 2015. Т. 464, № 1. С. 65–70.

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

Кряжев С.Г. Генетические модели и критерии прогноза золоторудных месторождений в углеродистотерригенных комплексах: Автореф. докт. дисс. М., 2017.

Парфенов Л.М. Геодинамика, магматизм и металлогения Верхояно-Колымских мезозойд // Закономерности размещения полезных ископаемых. Т. 15. М., 1988. С. 179–188.

Сивков Д.В., Читалин А.Ф., Дергачев А.Л. Применение линементного анализа для выявления закономерностей локализации золотого оруденения на территории Тарынского рудного поля в Республике Саха (Якутия) // Исследование Земли из космоса. 2020. Вып. 1. С. 3–19.

Чикатуева В.Ю., Ситкевич С.А. Минералогия золоторудного месторождения Дрожное, Республика Саха (Якутия) // Изв. вузов. Геология и разведка. № 5. 2019. С. 57–63.

Читалин А.Ф., Воскресенский К.И., Гришин Е.М. и др. Структурно-кинематическая модель золоторудно-

го месторождения Дрожное // Геофизика. 2018. № 3. С. 106–114.

Brown P. FLINCOR: a computer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data // Amer. Mineral. 1989. Vol. 74. P. 1390–1393.

Collins P.L.P. Gas hydrates in CO₂-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity // Econ. Geol. 1979. Vol. 74. P. 1435–1444.

Cox S.F., Etheridge M.A., Cas R.A.F., Clifford B.A. Deformational style of the Castlemaine area, Bendigo-Ballarat Zone—implications for evolution of the crustal structure across Southeast Australia // Aust. J. Earth Sci. 1991. Vol. 38. P. 151–170.

Fyfe W.S., Price N.J., Thompson A.B. Fluids in the Earth's crust. Amsterdam: Elsevier, 1978. 383 p.

Goldfarb R.J., Baker T., Dubé B. et al. Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes // Econ. Geol. 2005. 100th Anniv. P. 407–450.

Groves D.I., Santosh M., Deng J. et al. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration // Miner. Depos. 2020. Vol. 55. P. 275–292.

Phillips G.N., Powell R. Formation of gold deposits—a metamorphic devolatilization model // J. Metamorph. Geol. 2010. Vol. 28. P. 689–718.

Ridley J.R., Diamond L.W. Fluid Chemistry of Orogenic Lode Gold Deposits and Implications for Genetic Models // Gold in 2000. SEG Rev. 2000. Vol. 13. P. 141–162.

Поступила в редакцию 01.09.2020

Поступила с доработки 30.10.2020

Принята к публикации 30.10.2020