

УДК 553.411(571.651)

## УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНО-КВАРЦЕВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПАВЛИК (СЕВЕРО-ВОСТОК РОССИИ), ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

© 2024 г. А. В. Волков<sup>а, \*</sup>, В. Ю. Прокофьев<sup>а</sup>, В. В. Аристов<sup>а</sup>, Н. В. Сидорова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Старомонетный пер., 35, Москва, Ж-17, 119017 Россия

\*E-mail: tma2105@mail.ru

Поступила в редакцию 27.02.2023 г.

После доработки 07.08.2023 г.

Принята к публикации 09.10.2023 г.

Штокверковые золото-сульфидно-кварцевые руды месторождения Павлик (Северо-Восток России) сформированы в основном гомогенным, низко соленым (9.4–4.3 мас. %-экв. NaCl), преимущественно водно-хлоридным флюидом при температурах 275–330°C и флюидном давлении 600–1840 бар. Флюид характеризуется достаточно высоким CO<sub>2</sub> и пониженным содержанием метана – отношение CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> = 17–37.3. Во флюиде среди катионов главную роль играют: Na и Ca, а K и Mg находятся в подчиненном количестве. Кроме того, в составе флюида выявлены многие микроэлементы: As, Li, Rb, Cs, Mo, Ag, Sb, Cu, Zn, Cd, Pb, U, Ga, Ge, Ti, Mn, Fe, Co, Ni, V, Cr, Y, Zr, Sn, Ba, W, Au, Hg и REE. Полученные данные позволяют предполагать уменьшение глубины рудообразования в процессе формирования месторождения на 4–5 км в связи с подъемом рудовмещающего блока. Обращают на себя внимание низкие давления флюида для ряда образцов (330–140 бар), которые могут быть связаны с отдельным этапом минералообразования. Рудообразующий флюид месторождения Павлик по составу, температурам и давлениям обнаруживает сходство с флюидами соседних Наталкинского и Родионовского месторождений и обладает большим сходством с типичными флюидами орогенных месторождений золота. Приведенная в статье информация имеет большое практическое значение для региональных прогнозно-металлогенических построений, поисков и оценки месторождений золота.

**Ключевые слова:** Северо-Восток России, месторождение золота Павлик, флюидные включения, модель, условия рудообразования

**DOI:** 10.31857/S0016777024020015 , **EDN:** yuuqit

### ВВЕДЕНИЕ

Месторождение Павлик расположено в 20 км южнее суперкрупного Наталкинского месторождения и входит наряду с ним и месторождениями Омчак и Золотая Речка в Омчакский рудно-россыпной узел Тенькинской золотоносной зоны Центрально-Колымского рудного района. Кроме Павлика в пределах Тенькинской зоны известны еще несколько месторождений: Дегдекан и Токичан (Дегдеканский рудно-россыпной узел), а также Игуменовское и Родионовское (Пионерский рудно-россыпной узел).

Месторождение Павлик принадлежит Тенькинскому району Магаданской области (фиг. 16). Расстояние до областного центра и порта г. Магадан по автотрассе и грунтовой дороге – 390 км. Месторождение Павлик открыто в 1942 г. в результате поисковых работ Омчакской золоторудной

партией под руководством Е.П. Машко. Поисково-оценочные и разведочные работы продолжались в 1944–1954 гг. На протяжении долгих лет месторождение находилось в Госрезерве с забалансовыми запасами.

Геологоразведочными работами 2007–2008 гг. (ИК “Арлан”) запасы месторождения были увеличены до 100 т, со средними содержаниями 2.7–2.96 г/т золота. В настоящее время месторождение Павлик разрабатывается одноименным АО, которое оценивает его активные запасы в 158 т. По итогам 2022 г. производство золота АО “Павлик” составило 7.22 т (<https://www.pavlik-gold.ru>).

Геологическому строению и вещественному составу руд месторождения в последние годы были посвящены несколько публикаций (Савчук и др., 2018; Аристов и др., 2021). В настоящей статье приведены новые данные по *PT*-параметрам и составу

рудообразующих флюидов месторождения Павлик, обсуждаются результаты сравнительного анализа с другими аналогичными месторождениями. Изучение рудообразующих флюидов с целью установления их природы на протяжении многих десятков лет является одной из центральных проблем в теории эндогенного рудообразования (Бортников, 2006 и др.).

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Район месторождения находится в юго-восточной части Яно-Колымского орогенного складчатого пояса, где приурочен к юго-западному крылу крупного складчатого сооружения — Аян-Юряхского антиклинория. Длина антиклинория около 500 км, ширина — от 50 до 80 км, простирание северо-западное.

Месторождение Павлик расположено в пределах главного структурного элемента антиклинория — Тенькинской антиклинали, участок которой в междуречье р. Кулы и р. Нелькобы выделяется под названием Тенькинского рудного района и включает два рудных узла — Омчакский и Пионерский.

Месторождение приурочено к антиклинальной складке второго порядка, осложненной разрывами северо-западного и северо-восточного простирания (фиг. 1а). Вмещающие пермские терригенные и вулканогенно-терригенные породы представлены флишеидным переслаиванием аргиллитов и песчаников с прослоями вулканомиктовых гравелитов (диамиктитов).

Площадь рудного поля (фиг. 1), за исключением нескольких маломощных (до 1 м) даек среднего состава, амагматична. На СВ периферии рудного поля известен шток Ванин, площадь выходов которого составляет около 1 км<sup>2</sup>. Шток представляет собой сложно построенное тело юрско-раннемеловых диоритов нера-бохапчинского комплекса, прорванное взрывными брекчиями с обломками этих же диоритов и золотоносного кварца, сцементированных позднемеловыми риолитами (Сидоров и др., 2010).

Большая часть площади месторождения сложена отложениями Омчакской свиты (фиг. 1а) общей мощности 1400 м и представленной преимущественно алевролитами, сланцами, песчаниками. В ядре антиклинали обнажены породы атканской свиты (фиг. 1а) мощностью от 250 до 800 м, среди которых преобладают микститы и туфогенные сланцы с гравийно-галечными прослоями.

Павликовская антиклиналь — складка с осью северо-западного простирания, полого погружается на юго-восток и северо-запад. На крыльях антиклинали развиты мелкие формы складчатости. В целом складка несимметричная, юго-западное крыло более крутое — 60°–70°, а северо-восточное более пологое — 40°–50°. Юго-западное крыло и ядро складки осложнены продольными разрывами, к которым приурочены рудные зоны (фиг. 1а).

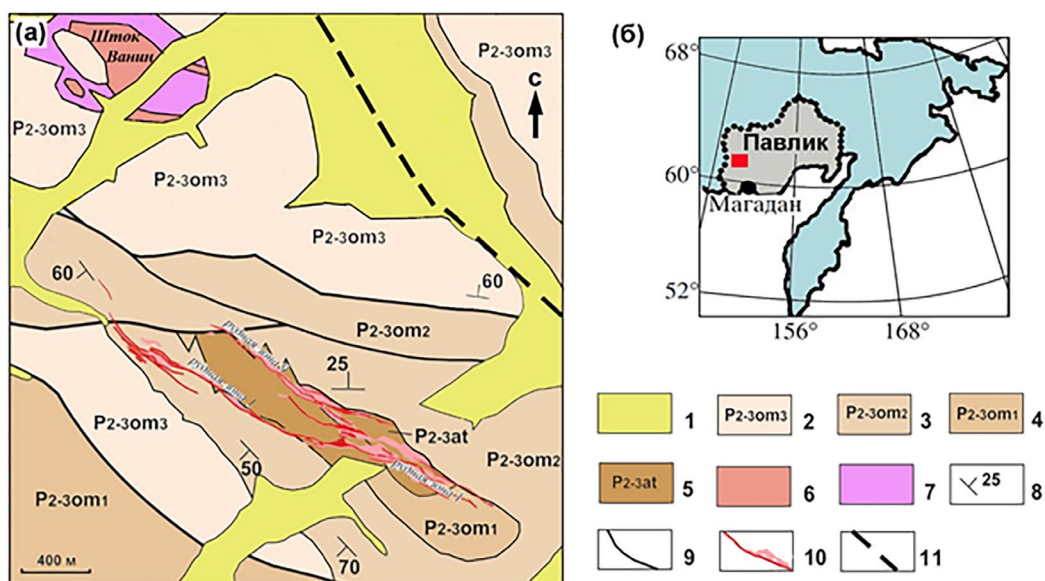
Таким образом, максимально продуктивна центральная часть месторождения длиной 2.5 км и шириной от 250 до 800–1000 м. К двум наиболее крупным разрывным нарушениям приурочены рудные зоны 1 и 9, содержащие основные запасы месторождения (фиг. 1а). Границы рудных тел выделяются исключительно по данным опробования.

Основные формы жильных гидротермальных образований в рудных зонах представлены системами прожилков, линзами, брекчиями или короткими жилами (фиг. 2). Мощность прожилков составляет от долей мм до 1 см (фиг. 2б, в), а мощность линз или коротких жил — до 0.5 м (фиг. 2а) и редко до 1.0 м, как правило, они имеют согласное с зоной залегание. Состав жильных образований — преимущественно кварцевый или кварц-кальцитовый. Из рудных минералов макроскопически, кроме золота, фиксируются арсенопирит и пирит, суммарное количество которых составляет не более 0.5–1.0% (до 5%). Кварц-кальцитовые прожилки составляют 5–10% от общего объема руды (фиг. 2б, в). Содержание органического углерода изменяется от 0.3 до 0.7%.

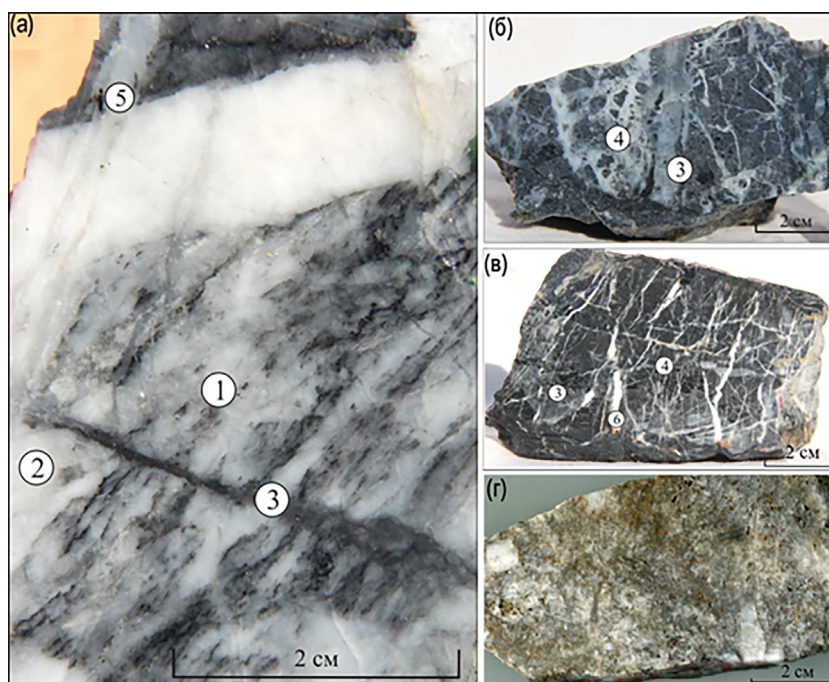
## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для визуальных, термометрических и криометрических исследований флюидных включений из образцов изготавливались двусторонние прозрачно-полированные пластинки толщиной 0.3 мм. Микротермометрические исследования флюидных включений проводились с использованием измерительного комплекса, созданного на основе микротермокамеры THMSG-600 фирмы Linkam (Англия), микроскопа Olympus, снабженного набором длиннофокусных объективов, видеокамеры и управляющего компьютера.

Солевой состав основных компонентов растворов определялся по температурам эвтектик (Борисенко, 1977). Соленость флюида в растворах двухфазовых включений оценивалась по температурам плавления льда в системе NaCl–H<sub>2</sub>O (Bodnar, Vityk, 1994). Соленость флюидов в углекислотно-водных включениях оценивалась по температуре плавления газогидратов (Collins, 1979).



**Фиг. 1.** Геологическая карта золоторудного месторождения Павлик (а), составленная на основе (Троицкий, 2011ф<sup>1</sup>) и его административное положение (б). 1 – аллювиальные отложения; 2–4 – подсвиты омчакской свиты (переслаивающиеся аргиллиты, алевролиты, реже песчаники): 2 – третья подсвита, 3 – вторая подсвита, 4 – первая подсвита; 5 – атканская свита (неслоистые и неяснослоистые, гравийные, галечные, реже валунные диамиктиты); 6, 7 – эруптивные брекчии штока Ванин; 6 – риолитовые, дацитовые; 7 – андезитовые; 8 – элементы залегания пород; 9 – тектонические контакты; 10 – рудные зоны, контролируемые взбросо-сдвигами и взбросо-надвигами; 11 – Тенькинский глубинный разлом.



**Фиг. 2.** Типичные руды месторождения Павлик. а – ранняя жила кварца с реликтами углистого вещества (1) пересечена прожилком молочно-белого кварца с альбитом (2). Прожилок с серым кварцем и вкрапленностью арсенопирита (3) сечет со смещением (левый сдвиг или взброс) ранние прожилки и, в свою очередь, пересечен прожилком полупрозрачного “халцедоновидного” кварца с пустотками, выполненными гребенчатым кварцем (5). б – взаимоотношения между кварц-алевролитовыми брекчиями (4), продуктивным серым кварцем с арсенопиритом (3); в – прожилки продуктивного серого кварца с арсенопиритом (3 и 4) пересечены поздними прожилками и просечками кальцита (6), г – поздний кварц (шток Ванин), ксенолит в эруптивных риолитовых брекчиях.

<sup>1</sup>фондовые материалы

Концентрации углекислоты и метана в растворе включений оценивались расчетным путем на основании объемных фазовых соотношений, вычислением соотношений масс отдельных компонентов флюида (Прокофьев, Наумов, 1987). Давление определялось в тех случаях, когда в минералах присутствовали группы сингенетических углекислотно-водных и существенно газовых включений по пересечению изохоры и изотермы (Калужный, 1982). При наиболее высоких температурах гомогенизировались флюидные включения, захватившие гетерогенизовавшиеся флюиды, находившиеся на линии двухфазового равновесия и не требующие введения поправок на давление (Реддер, 1987). Для интерпретации данных исследования газовых смесей состава  $\text{CO}_2$ - $\text{CH}_4$ - $\text{N}_2$  использовались публикации (Kerkhof, 1988; Thiery et al., 1994). Расчеты концентраций солей, плотностей и давлений флюида проводились с использованием программы FLINCOR (Brown, 1989). Уравнения для расчетов взяты из работы (Brown, Lamb, 1989).

Анализы водных и газовых вытяжек из включений различными методами были выполнены из навески 0.5 г фракции 0.5–0.25 мм в ЦНИГРИ, согласно методике, опубликованной в работе (Кряжев и др., 2006). Принципиальная схема валового анализа химического состава флюидных включений включала очистку пробы, вскрытие флюидных включений и определение состава выделившихся компонентов разными методами. Очистка проб осуществлялась сначала раствором  $\text{HNO}_3$  (1 : 1), затем электролитически в потоке воды с использованием ультразвуковой ванны, что позволяло практически полностью удалить поверхностное загрязнение образцов за 3 ч. Высушенная проба помещалась в стеклянный одноразовый реактор, который вакуумировался при  $110^\circ\text{C}$ , и заполнялась гелием. Вскрытие флюидных включений проводилось механическим или термическим способом в зависимости от решаемой задачи. При термическом вскрытии пробу нагревали до  $400^\circ\text{C}$ . Механическое вскрытие осуществляли при помощи корундовых шариков и вибратора при  $120^\circ\text{C}$  для подавления сорбции газов и количественного анализа  $\text{H}_2\text{O}$ . Выделившиеся газы поступали в газовый хроматограф ЦВЕТ-100, снабженный делителем потока для одновременного определения  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и других газов. Реактор с раздробленной пробой заливался деионизированной водой (7 мл) и на 15 мин помещался в ультразвуковую ванну. Раствор вытяжки отделялся путем центрифугирования и анализировался методом ионной хроматографии на жидкостном хроматографе ЦВЕТ-3006 для определения  $\text{Cl}$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,

чувствительность 0.01 мг/л, (аналитик — Ю.В. Васюта) и методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP MS, масс-спектрометр Eln6100 для анализа остальных компонентов, аналитик — Н.Г. Пучкова).

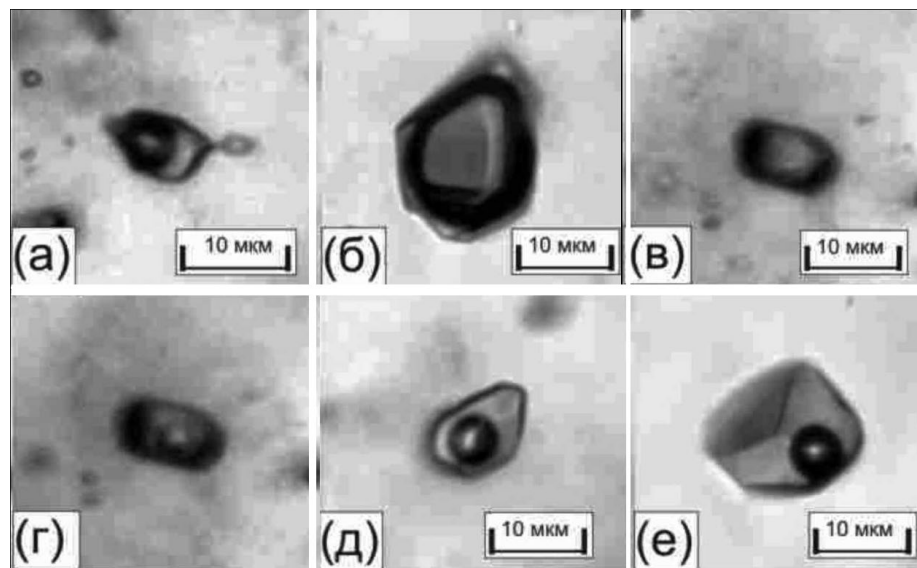
Таким образом, при проведении анализа газы, соли и растворитель (вода) извлекались из флюидных включений одновременно, что позволило вполне обоснованно проводить расчеты концентраций в растворах. Минимизация количества операций снижала вероятность загрязнения пробы посторонними примесями в процессе анализа. Стандартизация процесса обеспечивала максимальную компенсацию ошибок и повышала достоверность выявленных отличий состава флюидных включений в серии изучаемых образцов. Из полученных результатов вычитались данные “холостых” вытяжек. Остаточный полезный сигнал с большой долей вероятности связан с содержимым флюидных включений. Поэтому можно считать, что результаты валовых анализов отражают суммарные концентрации элементов в растворах включений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

В рудах месторождения Павлик выделено несколько (фиг. 2) разновременных разновидностей кварца (Аристов и др., 2021). В последующем тексте исследование касается двух временных разновидностей раннего и позднего кварца, в которых были установлены флюидные включения, пригодные для исследования. В первой группе представлены образцы кварца из рудных жил и прожилков, а во второй группе — поздний кварц, отобранный из эруптивных брекчий штока Ванин (табл. 1).

В кварце из рудных жил и прожилков были обнаружены многочисленные флюидные включения размером 25–2 мкм, имеющие форму отрицательных кристаллов или неправильную. Среди них по известным критериям (Реддер, 1987) выделены первичные и вторичные. Включения, равномерно распределенные по объему кварца, отнесены к первичным. Включения, приуроченные к секущим трещинам, являются вторичными.

По фазовому составу (при комнатной температуре) выделены три типа флюидных включений (фиг. 3). Тип 1 — двух- или трехфазовые углекислотно-водные, с жидкой углекислотой в газовом пузырьке; тип 2 — преимущественно газовые, с жидкой  $\text{CO}_2$  (тип 2а — газовые, с малоплотным водяным паром); тип 3 — двухфазовые, содержащие водный раствор и газовый пузырек. Газовые включения



**Фиг. 3.** Разные типы флюидных включений в кварце рудных жил месторождения Павлик. а — углекисотно-водное включение типа 1; б — газовое включение с малоплотным водяным паром типа 2а; в, г — газовые включения типа 2 с плотной углекислотой (в  $+20^{\circ}\text{C}$ , г  $-5^{\circ}\text{C}$ ); д, е — двухфазовые включения водно-солевых растворов (д — первичное, е — вторичное).

часто сингенетичны углекисотно-водным включениям типа 1, либо двухфазовым включениям типа 3 (приурочены к одним и тем же зонам роста или трещинам), свидетельствуя о гетерогенном состоянии рудообразующего флюида. Это значит, что температура гомогенизации флюидных включений типа 1 и 3, захваченных в ассоциации с газовыми включениями типа 2 и 2а, соответствует температурам их консервации и не требует введения поправок на давление (Реддер, 1987). Результаты термо- и криометрических исследований около 100 индивидуальных первичных и вторичных флюидных включений в кварце приведены в табл. 1 и на фиг. 4.

Температуры гомогенизации включений типа 1 в раннем кварце составляют  $306\text{--}340^{\circ}\text{C}$ , соленость флюида — 1.4 мас. %-экв. NaCl, концентрация углекислоты — 5.0 моль/кг р-ра. Температура эвтектики ( $-33^{\circ}\text{C}$ ) указывает на преобладание в растворе хлоридов Na, Mg и Fe. Температура плавления углекислоты в газовой фазе включений типа 1 составляет  $-58.8^{\circ}\text{C}$ . Плотность флюида  $0.95\text{ г/см}^3$ .

Присутствие углекислоты во включениях подтверждено экспериментально, основываясь на ее физических свойствах: критической температуре  $+31.05^{\circ}\text{C}$  и температуре “тройной точки”  $-56.6^{\circ}\text{C}$  (Реддер, 1987). При сильном переохлаждении (около  $-100^{\circ}\text{C}$ ) углекислота замерзала с образованием множества очень мелких кристалликов, так что включение темнело. Эти кристаллики в дальнейшем превращались в один кристалл, который

и плавился при нагревании вблизи температуры  $-56.6^{\circ}\text{C}$ .

Углекислота в газовых включениях типа 2 в раннем кварце, сингенетичных углекисотно-водным включениям типа 1, гомогенизовалась при температурах от  $+4.5$  до  $+21.8^{\circ}\text{C}$  в жидкую фазу. Температура ее плавления изменяется от  $-58.1$  до  $-60.1^{\circ}\text{C}$ , что отличается от температуры плавления чистой  $\text{CO}_2$  ( $-56.6^{\circ}\text{C}$ ) и свидетельствует о небольшой примеси низкокипящих газов ( $\text{CH}_4$  или  $\text{N}_2$ ). Плотность углекислоты  $0.75\text{--}0.90\text{ г/см}^3$ .

Давление флюида, оцененное для ассоциаций флюидных включений типов 1 и 2 в раннем кварце, захваченных в периоды гетерогенного состояния флюида, изменяется от 1390 до 2370 бар при изменении температур от  $306$  до  $340^{\circ}\text{C}$ .

Первичные двухфазовые включения типа 3 в кварце из ксенолита жилы в штоке Ванин (проба ПЛК 187) гомогенизируются в жидкость при температурах  $332\text{--}376^{\circ}\text{C}$  и содержат водный раствор с соленостью 3.8—4.7 мас. %-экв. NaCl. В растворе этих включений также преобладали хлориды Na (температуры эвтектики от  $-30$  до  $-35^{\circ}\text{C}$ ). Плотность флюида  $0.57\text{--}0.70\text{ г/см}^3$ .

Вероятно, эти включения сингенетичны газовым включениям типа 2а, в которых не наблюдается конденсации  $\text{CO}_2$  при глубоком ( $-150^{\circ}\text{C}$ ) охлаждении. Наличие таких включений свидетельствует о том, что гидротермальный раствор при этих температурах сосуществовал с водяным паром



малой плотности. Давление водяного пара при температурах 332—376 °С составляло 130—210 бар.

Первично-вторичные двухфазовые включения типа 3 в кварце ксенолита гомогенизируются в жидкость при температурах 269—294 °С и содержат водный раствор с соленостью 3.1—3.6 мас. %-экв. NaCl. В растворе этих включений также преобладали хлориды Na (температуры эвтектики от –30 до –32 °С). Плотность флюида 0.76—0.79 г/см<sup>3</sup>.

Вторичные двухфазовые включения типа 3 в кварце ксенолита гомогенизируются в жидкость при температурах 125—173 °С и содержат водный раствор с соленостью 1.3—4.7 мас. %-экв. NaCl. В растворе этих включений также преобладали хлориды Na (температуры эвтектики от –27 до –32 °С). Плотность флюида 0.93—0.95 г/см<sup>3</sup>.

**Состав флюидов.** Исследование состава флюидов валовым анализом включений в монофракциях кварца продуктивных жил (табл. 2, фиг. 5) показало, что среди анионов присутствовали (г/кг воды) гидрокарбонат-ион (0.31—1.12) и хлор (2.8—5.3), а среди катионов — натрий (1.1—2.5), калий (0.09—0.71), кальций (0.07—0.26) и магний (0.03—0.04), что согласуется с данными по температурам эвтектики.

Во флюиде также обнаружены (г/кг воды) углекислота (14.8—86.3), метан (0.90—0.94) и ряд микрокомпонентов (мг/кг воды): Br (109), As (7.6—1648), Li (1.9—5.3), B (112—497), Rb (0.34—1.11), Cs (0.05—0.24), Sr (0.12—11.53), Mo (0.05—0.23), Ag (0.28), Sb (0.42—1.35), Zn (10.4—38.5), Cd (0.05—0.22), Pb (0.01—0.12), Bi (до 0.02), Th (до 0.01), Ga (0.20), Ge (0.28—0.42), Mn (1.74—7.16), Fe (до 3.5), Co (до 0.04), Ni (0.34—1.32), V (0.28—0.52), Cr (0.35—1.99), Y (0.01—0.03), Zr (0.14—0.24), Sn (0.08), Ba (1.14—4.09), W (0.98—3.18), Hg (до 0.15), Tl (до 0.10), и REE (0.01—0.04). Основные показатели состава флюида: CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> = 15.8—91.5, Na/K = 1.6—21.1, а K/Rb = 254—641.

Ранние рудообразующие флюиды месторождения Павлик по составу и физико-химическим параметрам похожи на типичные флюиды орогенных жильных месторождений золота в терригенных толщах, охарактеризованные в статье (Ridley, Diamond, 2000).

Поздние рудообразующие флюиды на флангах основной рудной зоны по основным физико-химическим параметрам (см. табл. 1) соответствуют эпitherмальным месторождениям (Simmons et al., 2005).

Сравнение параметров флюидов месторождения Павлик с флюидами месторождений Родионовское и Наталка показывает их заметное сходство (фиг. 6).

Есть некоторые различия в режиме изменения давления и в режиме солености этих месторождений.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты изучения геохимических особенностей и флюидных включений золото-сульфидно-кварцевых штокерковых руд месторождения Павлик позволяют охарактеризовать основные физико-химические параметры их образования.

Рудообразующие флюиды были (см. табл. 1, 2, фиг. 4): слабоминерализованными, углекислотно-водными, хлоридно-гидрокарбонатными, гетерогенными, низкосолёными (1.4—3.1 мас. %-экв. NaCl), среднетемпературными (197—340 °С), средне- и высокобарическими (600—2370 бар). Такие флюиды, содержащие небольшие концентрации солей и высокие — углекислоты, характерны для состава рудообразующих флюидов орогенных месторождений золота (Ridley, Diamond, 2000; Bodnar et al., 2014; Goldfarb, Groves, 2015; Prokofiev, Naumov, 2020 и др.). Последняя модель формирования орогенных месторождений (Groves et al., 2020) предполагает глубинный (нижнекоровый или мантийный) источник рудообразующего флюида и тектонический контроль процесса формирования золотой минерализации этого типа.

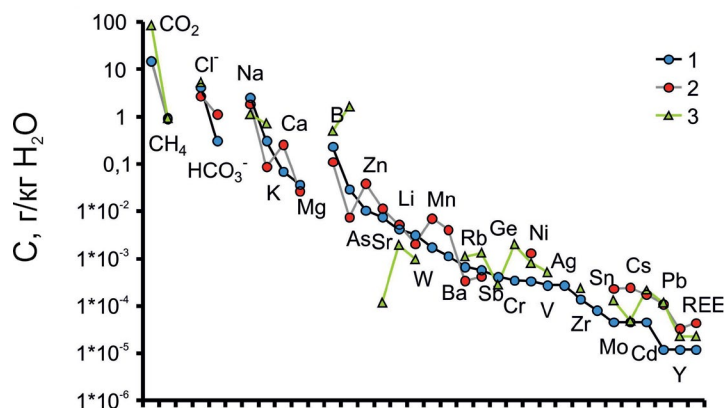
Судя по результатам, флюид представлен гетерогенным существенно водным типом с достаточно высоким CO<sub>2</sub> (до 86 г/кг воды) и пониженным содержанием метана (до 0.9 г/кг воды), о чем свидетельствует отношение CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> = 15.8—91.5 (табл. 2, отношения рассчитывались по неокругленным анализам). Такие смеси углекислоты и метана во флюиде могли образоваться при взаимодействии гидротермальных флюидов с обогащенными органическим веществом осадочными породами (Naden, Shepherd, 1989; Гибшер и др., 2011).

Преобладание CO<sub>2</sub> над CH<sub>4</sub> в рудообразующих флюидах (табл. 2) свидетельствует об интенсивном поступлении CO<sub>2</sub> в результате глубинных высокотемпературных процессов декарбонатизации, стимулированных ближайшим к месторождению Павлик гранитоидным массивом.

В рамках этой модели установленные нами различия в параметрах и составе минералообразующих флюидов, формировавших месторождение Павлик (табл. 1), можно объяснить взаимодействием глубинного флюида с вмещающими терригенными породами в процессе рудоотложения. При формировании прожилков кварца в штокерковых рудах флюид, отлагавший минерализацию в узких трещинах, и, соответственно, на большей

**Таблица 2.** Химический состав минералообразующих флюидов месторождения Павлик

| Элемент                                     | PAV-10 | PAV-08 | 517/B-84 |
|---------------------------------------------|--------|--------|----------|
| Макрокомпоненты, г/кг воды                  |        |        |          |
| CO <sub>2</sub>                             | 15.1   | 14.8   | 86.3     |
| CH <sub>4</sub>                             | 0.90   | 0.94   | 0.94     |
| Cl <sup>-</sup>                             | 4.2    | 2.8    | 5.3      |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>               | 0.31   | 1.12   | —        |
| Na                                          | 2.5    | 1.8    | 1.1      |
| K                                           | 0.31   | 0.09   | 0.71     |
| Ca                                          | 0.07   | 0.26   | —        |
| Mg                                          | 0.04   | 0.03   | —        |
| Микрокомпоненты, 10 <sup>-3</sup> г/кг воды |        |        |          |
| Br                                          | —      | 108.9  | —        |
| As                                          | 29.3   | 7.6    | 1647.5   |
| Li                                          | 4.2    | 5.3    | 1.9      |
| B                                           | 232.9  | 111.5  | 497.1    |
| Rb                                          | 0.67   | 0.34   | 1.11     |
| Cs                                          | 0.05   | 0.24   | 0.05     |
| Sr                                          | 7.60   | 11.53  | 0.12     |
| Mo                                          | 0.05   | 0.23   | 0.13     |
| Ag                                          | 0.28   | —      | —        |
| Sb                                          | 0.57   | 0.42   | 1.35     |
| Zn                                          | 10.41  | 38.52  | —        |
| Cd                                          | 0.05   | 0.18   | 0.22     |
| Pb                                          | 0.01   | 0.11   | 0.12     |
| Bi                                          | —      | —      | 0.02     |
| Th                                          | —      | 0.01   | 0.01     |
| Ga                                          | —      | 0.20   | —        |
| Ge                                          | 0.42   | —      | 0.28     |
| Mn                                          | 1.74   | 7.16   | —        |
| Fe                                          | —      | —      | 3.50     |
| Co                                          | —      | 0.04   | —        |
| Ni                                          | 0.34   | 1.32   | 0.81     |
| V                                           | 0.28   | —      | 0.52     |
| Cr                                          | 0.35   | —      | 1.99     |
| Y                                           | 0.01   | 0.03   | 0.02     |
| Zr                                          | 0.14   | —      | 0.24     |
| Sn                                          | 0.08   | —      | —        |
| Ba                                          | 1.14   | 4.09   | —        |
| W                                           | 3.18   | 2.06   | 0.98     |
| Hg                                          | —      | 0.15   | —        |
| Tl                                          | —      | 0.10   | —        |
| REE                                         | 0.01   | 0.04   | 0.02     |
| Na/K                                        | 8.3    | 21.1   | 1.6      |
| CO <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub>            | 16.8   | 15.8   | 91.5     |
| K/Rb                                        | 454    | 254    | 641      |



Фиг. 5. Состав минералообразующих флюидов месторождения Павлик. 1—3 — пробы (см. табл. 2): 1 — PAV-10, 2 — PAV-08. 3—517/B-84.

поверхности взаимодействовавший с вмещающими породами, мог в значительной степени изменять свои параметры, чем, например, флюид, отлагавший жильный кварц, заполнявший крупные полости. Т.е. начальные параметры флюида, из которого отлагался жильный кварц, были ближе всего к параметрам флюида, осуществлявшего транспорт рудных компонентов. В частности, можно отметить, что углекислота в этом флюиде была глубинная, а гидрокарбонат-ион мог образоваться при реакции флюида с карбонатной составляющей вмещающих пород. Во флюиде, формировавшем штокверковые руды месторождения Павлик,  $K/Rb$  отношение в среднем составляет 450 (см. табл. 2), что указывает на взаимодействие флюида с вмещающими породами (Котов и др., 2023).

Максимальная величина оценок флюидного давления (2370 бар), связанная с присутствием в жильном кварце чисто углекислотных флюидных включений с максимально высокой плотностью углекислоты ( $0.95 \text{ г/см}^3$ ), согласуется с такой картиной и позволяет оценить глубину источника флюидов примерно в 9 км при геобарическом градиенте 260 бар на 1 км (Прокофьев, Пэк, 2015).

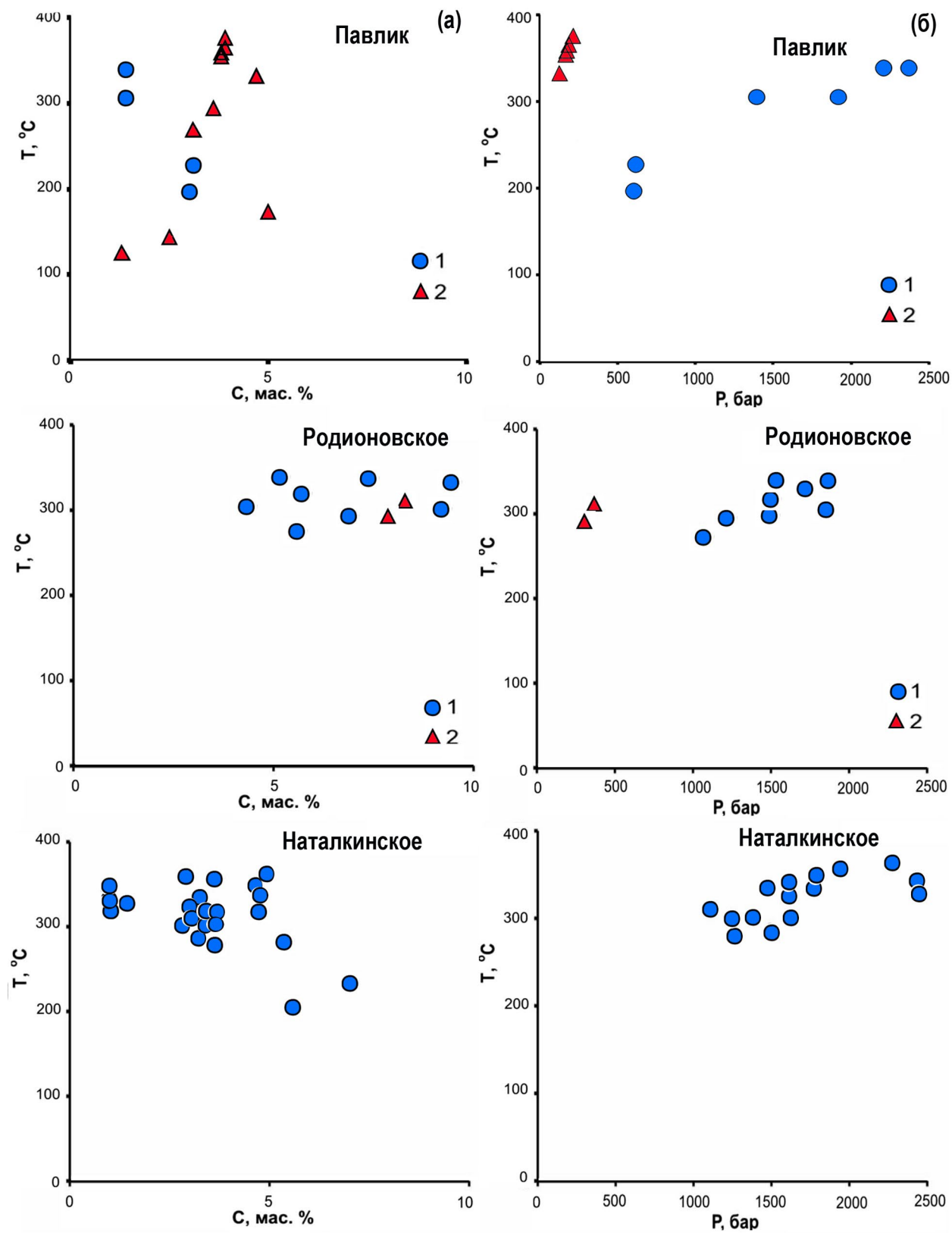
Отношение максимального флюидного давления к минимальному для штокверковых руд составляет 3.95 (см. табл. 1), что позволяет предположить уменьшение глубины рудообразования на 3—4 км в связи с подъемом рудовмещающего блока (Прокофьев, Пэк, 2015). Обращают на себя внимание низкие давления флюида для некоторых образцов из штока Ванин (130—210 бар), которые могут быть связаны с отдельным этапом минералообразования. Самостоятельный характер низкотемпературной минерализации виден и на диаграмме “температура—концентрация солей” (фиг. 4).

Давление, установленное по особенностям флюидных включений в сингенетичном кварце, соответствует литостатическому на глубине около 5—6 км и составляет около 1500 бар. Температура, установленная по тем же флюидным включениям, составляет от 200 до 300°C, а соленость флюида — 3—4 мас. %-экв. NaCl. Отложение сульфидов прерывается тектоническим событием, о котором свидетельствуют сохранившиеся фрагменты сульфидно-кварц-алевролитовых брекчий с кварцевым и кварц-анкеритовым цементом (фиг. 26). Текстуры брекчий сходны с обликом типичных брекчий гидроразрыва.

Подтверждением резкого снижения давления являются проявленные в синхронном этому событию кварце флюидных включений с параметрами, отвечающими давлению в 600 бар и температурам в 200—300°C. При этом соленость флюидов несколько повышается (до 5—7 мас. %-экв. NaCl), хотя состав флюидов меняется не радикально.

Постоянство хлоридного состава флюида фиксируется по составу водных вытяжек из монофракций кварца. Таким образом, падение давления происходит в термостатированной среде, по-видимому, только за счет увеличения объема активной пористости. Вероятный механизм такого увеличения пористости, связанный с развитием микротрещиноватости на пологой границе двух изолированных тектонических пластин и повышением гидростатического давления при сжатии нижней пластины и растяжении верхней, был детально рассмотрен в статье (Аристов и др., 2021).

При резком сбросе давления на границе двух пластин происходит дегазация флюида и формирование в верхней пластине “аэрозольного” облака. Дисперсная золотосодержащая фаза распределяется в твердом веществе, мгновенно заполнив все



**Фиг. 6.** Диаграммы “температура–соленость” (а) и “температура–давление” (б) для минералообразующего флюида месторождений Павлик, Родионовское (Волков и др., 2017) и Наталкинское (Горячев и др., 2015). 1 – ранний кварц, 2 – поздний кварц.

активные поры. В этот же момент в открытых полостях могло развиваться пористое, “вспененное” золото с высоким содержанием пор, выполненных карбонатом, альбитом и гидрослюдой.

Трещиноватость верхней пластины увеличивается в первую очередь за счет хрупких сульфидов, а отдельные арсенопиритовые выделения “конденсируют” и накапливают выброшенный аэрозоль. Поскольку давление парогазовой смеси очень высокое, крупные выделения арсенопирита оказываются как бы взорванными по этим трещинкам, а сами трещинки заполнены золотом.

Отметим, что если верхняя пластина на момент нарушения закрытой системы была вскрыта в эрозионном срезе, то в этой пластине будет сформирована трубка взрыва, что наблюдается в 3 км от месторождения на штоке Ванин (фиг. 1а). Отобранный нами в штоке Ванин фрагмент жилы гребчатого кварца характеризуется аномально низкими давлениями (по особенностям флюидных включений) и низкой соленостью (см. табл. 1), что характерно для кварца эпитеермальных месторождений.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что прожилково-вкрапленные (штокверковые) золото-сульфидно-кварцевые руды месторождения Павлик сформированы в основном гомогенным низкосолёным (9.4—4.3 мас. %-экв. NaCl), существенно водно-хлоридным флюидом при температурах 275—330 °С и флюидном давлении 300—1840 бар. Флюид характеризуется достаточно высоким CO<sub>2</sub> (до 349 г/кг воды) и пониженным содержанием метана (до 22 г/кг воды), о чем свидетельствует отношение CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> = 17—37.3. Во флюиде среди катионов главную роль играют: Na и Ca, а K и Mg находятся в подчиненном количестве. Кроме того, в составе флюида выявлены многие микроэлементы: As, Li, Rb, Cs, Mo, Ag, Sb, Cu, Zn, Cd, Pb, U, Ga, Ge, Ti, Mn, Fe, Co, Ni, V, Cr, Y, Zr, Sn, Ba, W, Au, Hg и REE.

Рудообразующий флюид месторождения Павлик по составу, температурам и давлениям обнаруживает сходство с флюидами Наталкинского и Родионовского месторождений (фиг. 6) и обладает большим сходством с типичными флюидами орогенных жильных месторождений золота, для которых характерны низкие концентрации растворенных солей и высокие — углекислоты (Ridley, Diamond, 2000). Полученные результаты корреспондируют с метаморфогенно-магматогенной моделью формирования золотокварцевых месторождений Яно-Колымского пояса (Voroshin et al., 2014).

Учитывая высокое отношение максимального флюидного давления к минимальному, можно предполагать уменьшение глубины рудообразования в процессе формирования месторождения на 3—4 км в связи с подъемом рудовмещающего блока (Прокофьев, Пэк, 2015). Обращают на себя внимание низкие давления флюида для некоторых образцов (330—140 бар), которые могут быть связаны с отдельным (эпитеермальным) этапом минералообразования.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа выполнена при финансовой поддержке темы Госзадания ИГЕМ РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аристов В.В., Григорьева А.В., Савчук Ю.С., Сидорова Н.В., Сидоров В.А. Формы нахождения золота и некоторые типоморфные характеристики самородного золота орогенного месторождения Павлик (Магаданская область) // Геология руд. месторождений. 2021. Т. 63. № 1. С. 3—39.
- Борисенко А.С. Изучение солевого состава газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16—27.
- Бортников Н.С. Геохимия и происхождение рудообразующих флюидов в гидротермально-магматических системах в тектонически активных зонах // Геология руд. месторождений. 2006. Т. 48. № 1. С. 3—28.
- Волков А.В., Прокофьев В.Ю., Тюкова Е.Э., Сидоров В.А., Мурашов К.Ю., Сидорова Н.В. Новые данные по геологии и геохимии золотокварцевого месторождения Родионовское (Северо-восток России) // Геология руд. месторождений. 2017. Т. 59. № 2. С. 93—112.
- Гибшер Н.А., Томиленко А.А., Сазонов А.М. и др. Золоторудное месторождение Герфед: характеристика флюидов и РТ-условия образования кварцевых жил (Енисейский край, Россия) // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 11. С. 1851—1867.
- 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.
- Калужный В.А. Основы учения о минералообразующих флюидах. Киев: Наукова думка, 1982. 240 с.
- Котов А.А., Прокофьев В.Ю., Волков А.В., Злобина Т.М., Мурашов К.Ю. Флюидные включения в кварце из разных типов промышленных руд месторождения золота

- Вернинское (Бодайбинский район, Россия) // Геохимия. 2023. Т. 61. № 5. С. 508—520.
- Кряжев С.Г., Прокофьев В.Ю., Васюта Ю.В. Использование метода ICP MS при анализе состава рудообразующих флюидов // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2006. № 4. С. 30—36.
- Прокофьев В.Ю., Наумов В.Б. Геохимические особенности рудообразующих растворов Зырянского колчеданно-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай) // Геохимия. 1987. № 3. С. 375—386.
- Прокофьев В.Ю., Пэк А.А. Проблемы оценки глубины формирования гидротермальных месторождений по данным о давлении минералообразующих флюидов // Геология руд. месторождений. 2015. Т. 57. № 1. С. 3—24.
- Реддер Э. Флюидные включения в минералах. М.: Мир, 1987. Т. 1. 560 с.; Т. 2. 632 с.
- Савчук Ю.С., Волков А.В., Аристов А.А., Сидоров В.А., Лямин С.М. Строение и состав золоторудных залежей месторождения Павлик // Руды и металлы. 2018. № 2. С. 77—86.
- Сидоров А.А., Сидоров В.А., Волков А.В. Золотоносные эксплозивные брекчии штока Ванин — новый тип оруденения на Северо-востоке России // ДАН. 2010. Т. 435. № 6. С. 780—785.
- Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions // Fluid inclusions in minerals: methods and applications. Edited by: Benedetto De Vivo & Maria Luce Frezzotti. Pontignano-Siena. 1994. P. 117—130.
- Bodnar R.J., Lecumberri-Sanchez P., Moncada D., Steele-MacInnes P. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits // Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Treatise on Geochemistry, 2nd Edition, Elsevier, 2014. P. 119—142.
- Brown P.E. Flincor: A microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data // Am. Mineral. 1989. V. 74. P. 1390—1393.
- Brown P.E., Lamb W.M. P-V-T properties of fluids in the system H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl: New graphical presentations and implications for fluid inclusion studies // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1989. V. 53. № 6. P. 1209—1222.
- Claypool G.M., Kaplan J.R. The origin and distribution of methane in marine sediments // Natural gases in marine sediments. New York and London: Plenum Press, 1974. V. 3. P. 99—139.
- Collins P.L.P. Gas hydrates in CO<sub>2</sub>-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity // Economic Geology. 1979. V. 74. P. 1435—1444.
- Goldfarb R.J., Groves D.I. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time // Lithos. 2015. V. 233. P. 2—26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2015.07.011>
- Groves D.I., Santosh M., Deng J., Wang Q., Yang L., Zhang L. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration. Mineralium Deposita. 2020. V. 55. P. 275—292. <https://doi.org/10.1007/s00126-019-00877-5>
- Kerkhof A.M. The System CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub> in Fluid Inclusions: Theoretical Modeling and Geological Applications. Amsterdam: Free University Press, 1988. 206 p.
- Naden J., Shepherd Th. Role of methane and carbon dioxide in gold deposition // Nature. 1989. V. 342. P. 793—795.
- Prokofiev V. Yu., Naumov V.B. Physicochemical Parameters and Geochemical Features of Ore-Forming Fluids for Orogenic Gold Deposits Throughout Geological Time // Minerals. 2020. V. 10 (1). 50. <http://dx.doi.org/10.3390/min10010050>
- Ridley J.R., Diamond L.W. Fluid Chemistry of Orogenic Lode Gold Deposits and Implications for Genetic Models // Gold in 2000. SEG Reviews. 2000. V. 13. P. 141—162.
- Simmons F.A., White N.C., John D.A. Geological Characteristics of Epithermal Precious and Base Metal Deposits // Economic Geology 100th Anniversary Volume. 2005. Society of Economic Geologists, Inc. P. 485—522.
- Thiery R., Kerkhof A.M., Dubessy J. V-X 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. V. 6. P. 753—771.
- 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.

## CONDITIONS OF FORMATION OF THE PAVLIK GOLD-SULFIDE-QUARTZ DEPOSIT (NORTH-EAST OF RUSSIA), ACCORDING TO THE FLUID INCLUSIONS STUDY

A. V. Volkov<sup>1, \*</sup>, V. Y. Prokofiev<sup>1</sup>, V. V. Aristov<sup>1</sup>, N. V. Sidorova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences,  
Staromonetny Lane, 35, Moscow, 119017 Russia

\*e-mail: tma2105@mail.ru

The stockwork gold-sulphide-quartz ores of the Pavlik deposit (North-East of Russia) are formed mainly by homogeneous, low saline (9.4—4.3 wt. % eq. NaCl), essentially water-chloride fluid at temperatures of 275°—330°C and a fluid pressure of 600—1840 bar. The fluid is characterized by a sufficiently high CO<sub>2</sub>

and a reduced methane content — the ratio of  $\text{CO}_2 / \text{CH}_4 = 17\text{—}37.3$ . In the fluid, among the cations, the main role is played by: Na and Ca, and K and Mg are in a subordinate amount. In addition, many trace elements were detected in the fluid composition: As, Li, Rb, Cs, Mo, Ag, Sb, Cu, Zn, Cd, Pb, U, Ga, Ge, Ti, Mn, Fe, Co, Ni, V, Cr, Y, Zr, Sn, Ba, W, Au, Hg and REE. The obtained data allow us to assume a decrease in the depth of ore formation during the formation of the deposit by 4—5 km due to the rise of the ore-bearing block. Attention is drawn to the low fluid pressures for a number of samples (330—140 bar), which may be associated with a separate stage of mineral formation. The ore-forming fluid of the Pavlik deposit in composition, temperatures and pressures shows similarities with the fluids of the neighboring Natalka and Rodionovsky deposits and has a great similarity with typical fluids of orogenic gold deposits. The information given in the article is of great practical importance for regional predictive metallogenic constructions, prospecting and evaluation of gold deposits.

*Keywords:* North-East of Russia, Pavlik gold deposit, fluid inclusions, model, ore formation conditions