ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В КВАРЦЕ ЗОЛОТОРУДНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ И РОССЫПНЫХ ЗОЛОТОКВАРЦЕВЫХ СРОСТКОВ СОЛОЛИЙСКОГО ПОДНЯТИЯ ОЛЕНЕКСКОГО СВОДА

© 2024 Д. чл. В. Н. Кардашевская^{1, *}, д. чл. Б. Б. Герасимов^{1, **}, д. чл. А. А. Томиленко², В. Н. Бочаров³

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, пр. Ленина, 39, Якутск, Республика Саха (Якутия), 677980 Россия ²Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, пр. Акад. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090 Россия ³Санкт-Петербургский государственный университет, ресурсный центр «Геомодель», Университетская наб., д. 7/9, Санкт-Петербург, 199034 Россия *e-mail: kardashevskaya92@mail.ru **e-mail: bgerasimov@vandex.ru

> Поступила в редакцию: 08.12.2023 г. После доработки: 09.02.2024 г. Принята к публикации: 14.02.2024 г.

Изучены флюидные включения в жильном кварце с золотосульфидным оруденением из метаморфизованных песчаников эекитской серии и метариолитов раннего протерозоя, в кварцевой брекчии из зоны наложенной золоторудной минерализации по песчаникам ранне-среднепермского возраста, а также в кварцевой с самородным золотом гальке россыпи р. Сололи. Установлено, что образование кварцевых брекчий происходило в широком интервале температур (от 230 до 425 °C) из флюида, в составе которого преобладали углекислота и азот. Предполагается, что повышенное содержание азота может быть связано с химической реакцией между флюидом и аммоний-содержащими силикатами вмещающих пород, в которых азот в форме NH4+ изоморфно замещает калий на регрессивной стадии метаморфизма. Вместе с тем при формировании изученных брекчий не исключается участие мантийного азота, который поступал по Анабаро-Эекитскому глубинному разлому. Близкие температуры гомогенизации и сходный характер водно-солевого состава для флюидных включений кварцевых жил, инъецирующих метапороды эекитской серии и метариолиты, дают основание предположить одновременность их образования и отнести к общему этапу рудообразования. Коренными источниками гальки кварца с самородным золотом р. Сололи служили кварцевые жилы с золотосульфидной минерализацией, о чем свидетельствует сходство флюидных включений по основным характеристикам. Благоприятным фактором для осаждения Аи являлись окислительные условия минералообразования, на что указывает преобладающее содержание СО₂ во флюидных включениях, что сыграло роль геохимического барьера и привело к повышенному содержанию золота в кварцевых жилах.

Ключевые слова: Сибирская платформа, Оленекский свод, Сололийское поднятие, флюидные включения, рамановская спектроскопия, кварцевая брекчия, жильный кварц, золотокварцевый сросток, рудные проявления

DOI: 10.31857/S0869605524020033, EDN: RNHIML

ВВЕДЕНИЕ

На Сололийском поднятии Оленекского свода известны многочисленные россыпные проявления золота с неустановленными коренными источниками (рр. Эекит, Таас Эекит, Сололи, Улахан Сололи и др.) (Герасимов, Никифорова, 2004). Предшественниками предполагалась связь россыпей с оруденением докембрийского этапа (Виноградов, 1967; Шпунт, 1974; Яблокова и др., 1988). Вместе с тем до сих пор поиски рудных источников, предпринимавшиеся такими организациями как НИИГА, ПГО «Якутскгеология», ПГО «Аэрогеология», не привели к положительным итогам. В связи с этим особенно актуальным является определение поисковых критериев золотого оруденения на территории. На современном этапе исследований по результатам изучения типоморфизма россыпного золота выделено две разновидности самородного золота (Герасимов, 2023). Первая разновидность – типичное самородное золото большинства россыпных проявлений северо-восточной части Сибирской платформы, связанное с промежуточными коллекторами пермского и рифейского возраста, широко развитыми в изучаемом районе. Вторая разновидность – слабоокатанное самородное золото ближнего сноса. Слабая окатанность, невыкрошившийся кварц, неизмененное внутреннее строение, отсутствие коррозионной оторочки свидетельствуют о том, что источниками этого самородного золота являются близлежащие рудные проявления. Ко второй разновидности относятся крупные сростки самородного золота с кварцем, обнаруженные в русловом аллювии р. Сололи.

В настоящей работе представлены результаты изучения флюидных включений в жильном кварце с золотосульфидным оруденением, развитом в сланцах и метаморфизованных песчаниках эекитской серии раннего протерозоя и метариолитах этого же возраста, в кварцевой брекчии из зоны наложенной золоторудной минерализации по песчаникам ранне-среднепермского возраста, а также в золотокварцевом сростке россыпи р. Сололи. Основная цель исследований заключалась в реконструкции условий образования кварцевых жил и золотокварцевых сростков Сололийского поднятия.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Флюидные включения (ФВ) в кварце изучались методами оптической микроскопии, криометрии, термометрии и рамановской спектроскопии.

Микротермометрические исследования включений проводились в лаборатории термобарогеохимии ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) на микротермокамере ТНМSG-600 фирмы Linkam, установленной на оптическом микроскопе Olympus BX51 с набором длиннофокусных объективов. Исследования проводились в диапазоне температур от -196 до +600 °C, точность измерения составляла 0.1-0.3 °C в интервале температур от +60 до -60 °C и 1-5 °C за пределами данного интервала. Концентрация и солевой состав ФВ изучались методом криометрии. Состав солей включений определялся по температуре эвтектики (Тэнт) (Борисенко, 1977). Концентрация солей рассчитывалась по температуре плавления льда ($T_{\text{пл.пьпа}}$) на основе данных системы NaCl-H₂O (Bodnar, Vityk, 1994). Температуры гомогенизации (T_{row}) двухфазных включений определялись по исчезновению газового пузырька методом термометрии. Присутствие растворенных газов значительно снижает влияние давления на температуру гомогенизации и позволяет считать ее близкой к температуре минералообразования (Реддер, 1987). Состав газовой фазы ФВ в кварце исследован с помощью КР-спектрометра Horiba Lab Ram HR 800, оснащенного твердотельным лазером с длиной волны 532 нм, мощностью 100 мВт и микроскопом Olympus BX-41 с рабочими объективами 10х и 100х. Содержание газов во флюидных включениях рассчитывалось по опубликованным методикам (Dubessy et al., 1989; Burke, 2001).



Рис. 1. Схема геологического строения дочетвертичных образований Сололийского выступа (по данным Сметанниковой и др. (2013) и фондовым материалам)

1 – образования эекитской серии раннего протерозоя; 2 – раннерифейские песчаники, алевролиты, гравелиты и конгломераты; 3 – среднерифейские песчаники, доломиты и известняки; 4 – вендские песчаники, конгломераты, доломиты и известняки; 5 – конгломераты, гравелиты, песчаники, углистые сланцы, алевролиты ортокинской свиты ранней перми; 6 – переслаивание пачек аргиллитов, алевролитов и песчаников ныкабытской свиты поздней перми; 7 – триасовые аргиллиты, алевролиты и туфопесчаники; 8 – позднетриасовые-раннеюрские конгломераты, песчаники, алевролиты; 9 – песчаники, конгломераты, прослои аргиллитов и алевролитов, линзы известняков юрского возраста; 10 – меловые песчаники, алевролиты, прослои и линзы конгломератов; 11 – гранитоиды раннепротерозойского возраста; 12 – раннерифейский уэттяхский комплекс долеритов; 13 – вендский трахибазальт-трахитовый Монгусский комплекс; 14 – разломы; 15 – точки штуфного опробования.

Fig. 1. Geological scheme of the Pre-Quaternary formations in the Sololi Uplift, after (Smetannikova et al., 2013) and archive materials.

I – rocks of the Early Proterozoic Eekite series; 2 – Early Riphean sandstones, siltstones, gritstones, and conglomerates; 3 – Middle Riphean sandstones, dolomites, and limestones; 4 – Vendian sandstones, conglomerates, dolomites, and limestones; 5 – conglomerates, gravelites, sandstones, carbonaceous shales, siltstones of the Early Permian Orthokinskaya formation; 6 – interbedding of patches of mudstones, siltstones, and sandstones; 8 – Late Triassic – Early Jurassic conglomerates, sandstones, siltstones; 9 – Jurassic sandstones, conglomerates, interlayers of mudstones and siltstones, with lenses of limestones; 10 – Cretaceous sandstones, siltstones, interlayers and lenses of conglomerates; 11 – Early Proterozoic granitoids; 12 – Early Riphean dolerites of Uettyakhsky complex; 13 – Vendian trachybasalt-trachyte Mongusky complex; 14 – faults; 15 – points of the lump sampling.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА РАБОТ

На исследованной территории на уровне современного эрозионного среза развиты отложения раннепротерозойского, рифейского, вендского, пермского, триасового, юрского (рис. 1) и четвертичного возрастов. Эекитская серия нижнего протерозоя представлена филлитовидными сланцами и метаморфизованными в условиях зеленосланиевой фации песчаниками и алевролитами. На этих отложениях с резким угловым несогласием залегают толщи сыгынахтахской и кютюнгдинской серий нижнерифейского комплекса, представленные кварцевыми конгломератами, песчаниками, алевролитами, известняками и доломитами. Среднерифейские отложения представлены песчаниками, известняками, доломитами и алевролитами арымасской и дебенгдинской свит. Выше на неровной поверхности размыва среднерифейских пород прослеживаются отложения мастахской и хатыспытской свит вендского возраста, состоящие из песчаников, гравелитов с подчиненным количеством конгломератов и доломитов. На размытой поверхности отложений венда, рифея, нижнего протерозоя и магматических образований ранне-верхнепротерозойских комплексов залегают отложения ранне- и позднепермского возраста, представленные кварцевыми конгломератами, песчаниками и алевролитами. Породы триасового возраста имеют ограниченное распространение и представлены аргиллитами, алевролитами и туфопесчаниками. Отложения юрского возраста представлены преимущественно аргиллитами с незначительным количеством прослоев алевролитов и песчаников. Алевролиты, песчаники и аргиллиты мелового возраста закартированы в восточной части района. Песчано-галечные и песчано-суглинистые четвертичные отложения перекрывают водораздельные пространства, склоны и днища долин водотоков. В районе установлены ранне-, позднепротерозойские и вендские магматические образования. Раннепротерозойский комплекс представлен субщелочными габброидами, гранитоидами и метариолитами. С этими магматическими породами ассоциируют кварцевые и кварц-карбонатные жилы. К рифейскому магматическому комплексу относятся силлы и дайки долеритов. Вендские образования представлены штоками, дайками, некками и трубками взрыва, сложенными сиенит-порфирами и трахибазальтами (Сметанникова и др., 2013). В районе широко развиты разрывные нарушения, относящиеся к региональной Анабара-Эекитской системе разломов раннепротерозойского заложения, которая неоднократно подновлялась, в том числе и в мезозое (Никифорова и др., 2018).

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЯВЛЕНИЙ ЗОЛОТА

На исследуемой территории золоторудные образования обнаружены в кварцевых жилах, инъецирующих сланцы и метаморфизованные песчаники эекитской серии и метариолиты раннепротерозойского возраста.

Кварцевые жилы, инъецирующие образования эекитской серии, широко распространены в бассейне среднего течения р. Сололи. Жилы и прожилки представляют собой ветвящиеся, преимущественно согласные напластованию и реже секущие образования кварцевого, реже кварцево-карбонатного состава мощностью в среднем около 0.1 м (до 0.5 м в раздувах) видимой протяженностью до 25 м. Общий объем кварцево-жильного материала во вмещающих породах достигает 1–2%. Основная масса жил сложена молочно-белым и серым полупрозрачным кварцем с вкрапленностью пирита. Породы опробованы фрагментарно в разрозненных скальных выходах, развалах и осыпях средних и нижних течений водотоков. Основные породообразующие минералы рудных проявлений – кварц и полевые шпаты. Кварц характеризуется разнозернистой структурой, образуя 2 генерации. Кварц I чаще обрамляется мелкозернистым гранулированным кварцем II. Полевые шпаты представлены главным образом К, в меньшей степени Na-Ca минералами. В качестве акцессорных установлены циркон, апатит, ильменит, рутил, барит. Рудная минерализация (до 5%) в кварцевых жилах, инъецирующих метапесчаники и сланцы, состоит из самородного золота и сульфидов. Самородное золото характеризуется весьма мелкими (первые мкм) неправильными по форме выделениями. Среди сульфидов наиболее широко развит пирит, встречающийся в виде кристаллов или их агрегатов, довольно часто в ассоциации с калиевым полевым шпатом. Халькопирит встречается в виде небольших по размеру изометричных кристаллов. Сфалерит образует неправильные зерна размером до 50 мкм. Галенит наблюдается в виде небольших (первые мкм) изометричных кристаллов, иногда в виде включений в сфалерите. Редкоземельная минерализация представлена широко распространенным монацитом (Герасимов и др., 2023).

Риолиты раннепротерозойского возраста развиты по левобережью р. Сололи в бассейнах речек Радость и Карат. Как сами риолиты, так и вмещающие сланцы пронизаны маломощными (< 0.1 м) жилами и прожилками кварца. Кварц светло-серый, белый, разнозернистый образует удлиненные ксеноморфные выделения. Рудная минерализация кварцевых жил в риолитах представлена сульфидами и самородным золотом. Сульфиды обнаружены в виде вкраплений размером первые мкм и представлены пиритом, арсенопиритом, халькопиритом и галенитом. Самородное золото характеризуется мелкими (до 5 мкм) комковидными и пластинчатыми (трещинными)



Рис. 2. Золото в сростках с кварцем россыпи р. Сололи. $a-\delta$ – общий вид; e-e – двойниковое внутреннее строение. Fig. 2. Gold in intergrowth with quartz from the Sololi Creek placer. $a-\delta$ – general view; e-e – twinned internal structure.

выделениями. Кроме того, довольно часто встречаются мелкие зерна монацита (Герасимов и др., 2023). По установленным минеральным парагенезисам описанные золотосульфидные проявления отнесены к золото-кварц-сульфидному формационному типу. Кроме названных проявлений, выявлена золотосульфидная минерализация, наложенная по зоне тектонической трещиноватости на песчаники ныкабытской свиты ранне-среднепермского возраста. Песчаники подвержены интенсивному катаклазу и лимонитизации. По ним развиты многочисленные трещины горизонтального и вертикального заложения. В нижней части разреза измененных песчаников наблюдаются секущие их кварц-кальцит-сидеритовые брекчии со сложной ветвящейся морфологией с вкрапленной рудной минерализацией. Видимая мощность брекчий достигает 1.5 м. Нижнюю границу их распространения установить не удалось в связи со сложностью условий расчистки. Кварц образует разнозернистые выделения. Главный рудный минерал — галенит. Кроме этого, в брекчих встречены пирит, киноварь, самородное серебро и ртутьсодержащее золото (Герасимов и др., 2023).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Характеристика флюидных включений. Для изучения флюидных включений были изготовлены двусторонне-полированные пластинки кварца толщиной 0.3–0.5 мм из 8 образцов, отобранных в метапородах эекитской серии, риолитах, брекчиях, а также сросток кварца с золотом. В соответствии с известными критериями (Реддер, 1987) в кварце из жил в брекчиях, риолитах и метапесчаниках и мелкой гальки (золотокварцевого сростка) россыпи р. Сололи были определены первичные и вторичные флюидные включения. Первичные включения встречаются в виде небольших скоплений либо приурочены к зонам роста минерала-хозяина. Вторичные включения приурочены к залеченным трещинам, которые секут кварцевые зерна. Отмечается сосуществование включений всех типов и соотношение различных фаз, что, вероятно, свидетельствует о гетерогенизации флюидной системы (вскипании). Поэтому температуры гомогенизации первичных ФВ можно считать температурами кристаллизации кварца.

В кварце из жил в брекчиях (р. Карат) первичные включения имеют неправильную форму (угловатую или вытянутую) и размер от 10 до 40 мкм (рис. 3). По фазовому составу при комнатной температуре среди первичных ФВ установлены два типа: 1) существенно газовые — однофазные с неустановленной фазой; 2) газово-жидкие двухфазные с объемом газового пузырька 20-30 об.%.

В кварце из жил в риолитах (р. Радость) обнаружены первичные включения размером от 10 до 45 мкм, которые имеют форму отрицательной огранки, реже округлую



Рис. 3. Типы флюидных включений в кварце из жил в брекчиях р. Карат. Γ – газ, Ж – жидкость. **Fig. 3.** Types of fluid inclusions in quartz from veins in the Karat River breccia. Γ , vapor, Ж, liquid.

и вытянутую. По фазовому составу при комнатной температуре среди первичных ΦB встречаются три типа: 1) существенно газовые — однофазные (рис. 7, *a*); 2) газово-жидкие — двухфазные с объемом газового пузырька 20-40 об.% (рис. 7, *б*); 3) водно-углекислотные — трехфазные с соотношением углекислотной (газовой или плотной жидкой CO₂) и водной фаз от 80:20 до 20:80 об.% соответственно (рис. 7, *в*).

В кварце из жил в метаморфизованных песчаниках и сланцах (р. Сололи) первичные флюидные включения в большинстве имеют неправильную форму вакуолей, реже округлую и угловатую, размер их составляет от 10 до 30 мкм. По фазовому составу среди первичных ФВ обнаружены три типа: 1) существенно газовые – однофазные (рис. 8, *a*); 2) газово-жидкие – двухфазные с объемом газового пузырька 10–20 об.% (рис. 8, *б*); 3) водно-углекислотные – трехфазные с соотношением углекислотной (газовой или плотной жидкой CO₂) и водной фаз 70:30 об.% (рис. 8, *в*).

В кварце из кварцевой гальки с самородным золотом россыпи р. Сололи обнаружены первичные включения размером от 10 до 35 мкм, которые имеют вытянутую, неправильную и угловатую форму. По фазовому составу при комнатной температуре среди первичных ФВ встречаются три типа: 1) существенно газовые — однофазные (рис. 9, δ); 2) газово-жидкие — двухфазные с объемом газового пузырька 10–20 об.% (рис. 9, a, δ); 3) водно-углекислотные — трехфазные с соотношением углекислотной (газовой или плотной жидкой CO₂) и водной фаз 80:20 об.% (рис. 9, a).

Температура гомогенизации, состав и соленость флюидных включений. Общий диапазон температуры гомогенизации первичных двухфазных включений в кварце из жил в брекчиях составляет 230–425 °C в жидкую и газовую фазу, где максимум определений приходится на диапазон 350–390 °C (рис. 4). Соленость варьирует в небольшом



Рис. 4. Гистограмма распределения температур гомогенизации флюидных включений из кварцевых жил в различных породах и в золотокварцевом сростке Сололийского выступа.

I – кварц в брекчиях, *2* – кварц в риолитах, *3* – кварц в метаморфизованных песчаниках и сланцах, *4* – кварц из золотоносной гальки россыпи р. Сололи.

Fig. 4. Histogram of distribution of the homogenization temperature for fluid inclusions in quartz from veins in different rocks and in an intergrowth quartz and gold, Sololi Uplift area.

I – quartz in breccias, 2 – quartz in rhyolites, 3 – quartz in metamorphosed sandstones and slates, 4 – quartz in gold-bearing pebble from the Sololi River placer.



Рис. 5. Соотношение температуры эвтектики и солености флюидных включений в кварцевых жилах и в золотокварцевом сростке Сололийского поднятия. Диаграмма построена с использованием данных (Бхаттачарайа, Паниграйи, 2011).

I – кварц в брекчиях, *2* – кварц в риолитах, *3* – кварц в метаморфизованных песчаниках и сланцах, *4* – кварц из золотоносной гальки россыпи р. Сололи.

Fig. 5. Ratio of eutectic temperature and salinity of fluid inclusions in quartz veins and in a gold-quartz intergrowth. The plot were constructed using data of (Bhattacharya, Panigrahi, 2011).

I – quartz in breccias, 2 – quartz in rhyolites, 3 – quartz in metamorphosed sandstones and slates, 4 – quartz from gold-bearing pebble from the Sololi River placer.

интервале от 4.3 до 7.9 мас.% экв. NaCl. Температура эвтектики говорит о том, что в минералообразующем растворе преобладает NaCl с примесью хлоридов К (рис. 5). Вторичные включения гомогенизировались в жидкость при 165–180 °С и содержат водный раствор с концентрацией солей 5.7–7.9 мас.% экв. NaCl. Газовая составляющая первичных ФВ имеет углекислотный, азотный, азотно-углекислотный и азотно-углекислотно-метановый состав (рис. 6). Содержание CO_2 меняется от 16.8 до 100 мол.%, иногда газовая составляющая содержит примесь азота (70.1–81.3 мол.%), в некоторых случаях до 100 мол.% и метана (до 1.9 мол.%).

Гомогенизация включений в кварце из жил в риолитах происходит в интервале температур от 224 до 384 °C в жидкую и газовую фазу, с максимальным количеством определений в интервале 250-300 °C (рис. 4). Температура плавления CO₂ (-56.6 °C) в них изменяется от -55.6 до -58.0 °C, что свидетельствует о незначительной примеси низкокипящих газов. Температура эвтектики водно-солевой фазы меняется в широком диапазоне (от -10.1 до -38.0 °C), что указывает на присутствие хлоридов Na, K, Мд и Fe (рис. 5). Температура плавления льда колеблется от 0.9 до −8.0 °C, соответствуя солености 0.5–12.0 мас.% экв. NaCl. Гомогенизация жидкой CO₂ в трехфазных включениях происходит при температурах 20.1-29.7 °C в жидкую фазу. Углекислота плавится при температуре от -54.7 до -58.0 °C, что несколько ниже температуры плавления чистой СО₂ и может указывать на незначительную примесь низкокипящих газов. Плавление газгидрата происходит в интервале +4.7...+9.8 °C. Вторичные включения гомогенизируются при температуре 216 °C в жидкую фазу. По данным рамановской спектроскопии первичные ΦB содержат CO₂ в количестве от 83.1 до 92.7 мол.%, N₂ – от 2.2 до 16.5 мол.% и CH₄ – от 0.1 до 0.9 мол.%. В единичных случаях в них отмечается присутствие H₂S (1.4 мол.%) (рис. 6). Также встречаются включения с газовой составляющей, представленной азотом (76.5-87.1 мол.%)



Рис. 6. Состав газовой составляющей флюидных включений (мол.%) в кварцевых жилах и в золотокварцевом сростке Сололийского поднятия по данным КР-спектроскопии.

I – кварц в брекчиях, *2* – кварц в риолитах, *3* – кварц в метаморфизованных песчаниках и сланцах, *4* – кварц из золотоносной гальки.

Fig. 6. Composition of the gas phase in fluid inclusions (mol.%) in vein quartz and a gold-quartz intergrowth, according to the Raman spectroscopy data.

I – quartz in breccia, 2 – quartz in rhyolites, 3 – quartz in metamorphosed sandstones and slates, 4 – quartz in gold-bearing pebble.



Рис.7. Типы флюидных включений в кварце из жил в риолитах р. Радости: a – однофазные, b – двухфазные, e – трехфазные. Γ – газ, Ж – жидкость.

Fig.7. Types of fluid inclusions in quartz of veins in rhyolites of the Radost River: a - single-phase, $\delta - \text{two-phase}$, $\delta - \text{three-phase}$, $\Gamma - \text{vapor}$, $\mathcal{K} - \text{liquid}$.

с примесью метана (12.8–27.4 мол.%). Наряду с ними отмечаются преимущественно углекислотные, метановые и углекислотно-азотные ФВ.

Температуры гомогенизации (в жидкую и газовую фазу) включений в кварце из жил в метаморфизованных песчаниках и сланцах варьируют в интервале от 208 до 380 °C, где максимум определений приходится на интервал 200–300 °C (рис. 4). Температуры плавления чистой CO_2 во включениях (от –55.9 до –56.5 °C) свидетельствуют об отсутствии примесей метана или азота. Измеренные температуры эвтектики (–10.1...–37.0 °C) соответствуют водно-солевым растворам хлоридов K, Na, Mg и Fe (рис. 5). Концентрация солей растворов составляет 0.5–12.3 мас.% экв.



Рис. 8. Типы флюидных включений в кварце из жил в метаморфизованных песчаниках и сланцах р. Сололи: a – однофазные, δ – двухфазные, e – трехфазные. Γ – газ, \mathbb{X} – жидкость. **Fig. 8.** Types of fluid inclusions in quartz from veins in metamorphosed sandstones and slates of the Sololi River: a – single-phase, δ – two-phase, e – three-phase. Γ – vapor, \mathbb{X} – liquid.



Рис. 9. Типы флюидных включений в кварце из золотоносной гальки россыпи р. Сололи: *a*, *б* – однофазные и двухфазные, *в* – трехфазные. Г – газ, Ж – жидкость.

Fig. 9. Types of fluid inclusions in quartz from gold-bearing pebble of the Sololi River placer: a, δ – single-phase and two-phase, β – three-phase. Γ – vapor, \mathbb{X} – liquid.

NaCl. Гомогенизация жидкой CO₂ водно-углекислотных ФВ происходит в жидкую фазу при температурах 25.6–30.8 °C и в газовую фазу при 14.4 °C. Температура плавления CO₂ в них варьирует от -56.5 до -57.6 °C, что близко к температуре плавления чистой углекислоты (-56.6 °C). Газгидрат плавился при температурах от 5.5 до 10 °C. Вторичные двухфазные ФВ гомогенизируются в жидкость при температурах 160–180 °C и содержат водно-солевой раствор с концентрацией солей 5.3–6.3 мас.% экв. NaCl. В растворе этих включений преобладают хлориды Na и Mg с примесью К ($T_{_{3HT}} = -29.5...-33.0$ °C). Газовая составляющая ФВ представлена преимущественно CO₂ и CH₄, иногда углекислотой (40.9–95.3 мол.%), азотом (4.3–54.7 мол.%) и метаном (0.4–11.5 мол.%) (рис. 6). Также встречаются включения с содержаниями N₂ от 80.6 до 84.9 мол.% и CH₄ от 15.1 до 19.4 мол.%. Выявлены единичные ФВ с CO₂ (89.9 мол.%) и CH₄ (10.1 мол.%).

Гомогенизация первичных включений в кварце из кварцевой с самородным золотом гальки россыпи происходит в диапазоне температур от 250 до 345 °C в жидкую фазу с максимальным количеством определений в интервале 300–350 °C (рис. 4). Температура плавления CO₂ равна –56.8 °C, что указывает на отсутствие примесей других газов. Соленость варьирует в небольшом интервале (от 2.6 до 6.9 мас.% экв. NaCl). Температура эвтектики говорит о том, что в минералообразующем растворе преобладает NaCl с примесью хлоридов K (рис. 5). В газовой фазе ФВ преобладает углекислота, содержание которой составляет от 91 до 92.5 мол.%, также встречается примесь N₂ (7–8.5 мол.%) и CH₄ (0.5 мол.%) (рис. 6).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ первичных включений в кварце из жил в брекчиях (р. Карат) показывает, что водно-солевая система характеризуется присутствием хлоридов Na и K с низкой соленостью (4.3–7.9 мас.% NaCl экв.). Температуры гомогенизации ФВ свидетельствуют о том, что образование кварцевых прожилков происходило в широком интервале температур (230–425 °C). Основными компонентами газовой фазы включений являются азот и углекислота, в незначительном количестве присутствует метан. Обращает внимание повышенное содержание N₂ в газовой составляющей ФВ, которое может быть обусловлено химической реакцией между флюидом и аммоний-содержащими силикатами вмещающих пород, в которых азот в форме NH⁴⁺ изоморфно замещает калий на регрессивной стадии метаморфизма (Bottrell, Miller, 1990; Сокерина и др., 2023). С другой стороны, источником азота могут быть органические соединения, но из-за отсутствия исследований это рассуждение носит предварительный характер. В то же время прослеживается увеличение доли CO₂ во флюиде. Предположительно, взаимодействие этих компонентов между собой создавало условия для транспортировки и осаждения золота.

Кварц из жил в риолитах (р. Радость) кристаллизовался в условиях средних и высоких температур (224–384 °C) из слабо-, умеренно-концентрированных (0.5-11.7 мас.% NaCl экв.) растворов с участием хлоридов К, Na и Mg. Высокие температуры и низкие концентрации солей характерны для «сухого пара» на фоне дефицита Н₂О, когда рудная система была перегрета, что, возможно, обусловлено процессами метаморфизма руд (Савва и др., 2019). Особо отмечаются различные соотношения жидкой и газовой фаз во ФВ, наличие трехфазных включений с жидкой СО,, гомогенизация включений как в жидкость, так и в газ, что возможно свидетельствует о неоднородной рудообразующей системе как и по составу, так и по фазовому состоянию. Вероятно, происходило вскипание растворов с отделением СО, и других компонентов вследствие проявления тектонических движений (Сокерина и др., 2014). По данным КР-спектроскопии газовая фаза включений характеризуется преобладанием CO₂, возрастанием роли N₂, реже присутствием CH₄ и незначительной примесью H₂S. Как известно, значительное количество N₂ в газовой фазе ФВ часто встречается в минералах протерозойских месторождений (Прокофьев и др., 2017), а возрастающая роль СН₄ во флюидах может свидетельствовать о разложении органического вещества во вмещающих породах (Shaparenko et al., 2021). Также во включениях прослеживается явление кипения, где происходит переход состава газовой фазы в однофазных включениях преимущественно в N2 и CH4, что является причиной кристаллизации рудных элементов, в том числе и золота (Bowers, 1991; Гибшер и др., 2017).

По характеру водно-солевого состава ФВ кварц из жил в метапесчаниках (р. Сололи) близок к рассмотренному ранее кварцу из прожилков в риолитах (р. Радость), для которых характерно преобладание в составе включений солей K, Na и Mg с низкой и умеренной соленостью (0.5–12.3 мас.% NaCl экв.). Полученные температуры гомогенизации для ФВ в кварце попадают в диапазон 208–380 °С. По данным KP-спектроскопии газовая составляющая флюидов представлена смесью CO_2 – N_2 – CH_4 . Следует заметить, что преобладающее содержание CO_2 во включениях играет роль геохимического барьера и приводит к повышенному содержанию золота в кварцевых жилах (Томиленко, Гибшер, 2001). Участие CH_4 в транспорте золота связано с метаморфическими процессами.

Образование кварца из золотоносной гальки россыпи (р. Сололи) происходило в средне- и высокотемпературных условиях (250–345 °C) из окисленных хлоридных калий-натровых растворов низкой солености (до 7 мас.% NaCl экв.) с преобладанием углекислого газа и небольшой примесью азота и метана в газовой фазе. Сходные параметры (температура гомогенизации, состав растворов и газовых фаз) установлены и для кварца из жил риолитов и метаморфизованных сланцев и песчаников. По данным большинства исследователей, преимущественное содержание углекислого газа в составе ФВ является свидетельством «углекислотной волны» в минералообразующем процессе, что считается надежным показателем золотоносности (Ройзенман, 2008; Сокерина и др., 2018).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые проведенные исследования флюидных включений в кварце из жил в различных породах и кварцевой гальки с самородным золотом из россыпи Сололийского поднятия показали следующее.

Образование кварцевых брекчий, обнаруженных в зоне тектонического дробления пермских пород, происходило в широком интервале температур (от 230 до 425 °C). В газовой фазе преобладали углекислота и азот с единичной примесью метана. Вероятно, повышенное содержание азота связано с химическими реакциями между флюидом и аммоний-содержащими силикатами вмещающих пород, в которых азот в форме NH_4^+ изоморфно замещает калий. Вместе с тем не исключается участие при формировании изученных брекчий мантийного азота, который поступал по глубинному Анабара-Эекитскому разлому.

Близкие температуры гомогенизации и сходный характер водно-солевого состава для ФВ кварцевых жил, инъецирующих метапороды эекитской серии и метариолиты, дают основание предположить одновременность их образования и отнести к общему этапу рудообразования. В пользу этого утверждения указывает также одинаковый минеральный состав золотосульфидного оруденения этих жил.

ФВ кварца из гальки аллювиальных отложений р. Сололи по основным характеристикам близки к ФВ жильного кварца метапород и метариолитов. Сходство параметров рудообразующих гидротермальных флюидов может свидетельствовать о едином источнике. Благоприятным фактором для осаждения золота являлись окислительные условия минералообразования, на что указывает преобладающее содержание СО₂во включениях, что сыграло роль геохимического барьера и привело к повышенному содержанию золота в кварцевых жилах.

Сопоставление полученных данных условий образования кварца рудных жил и гальки россыпи позволяет сделать вывод о том, что коренными источниками россыпи служили изученные кварцевые жилы с золотосульфидной минерализацией.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-20033, https:rscf.ru/project/22-27-20033.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

Бхаттачарайа С., Паниграйи М.К. Гетерогенность флюидных характеристик в районе Рамагири-Пенакачерла восточной части кратона Дарвар: связь с золоторудной минерализацией // Геология и геофизика. **2011.** Т. 52. № 11. С. 1821–1834. Виноградов В.А., Красильщиков А.А., Горина И.Г. Об источниках золота на Оленекском

Виноградов В.А., Красильщиков А.А., Горина И.Г. Об источниках золота на Оленекском поднятии // Материалы по геологии и полезным ископаемым Якутской АССР. Якутск. 1967. № 15. С. 114–119.

Герасимов Б.Б., Никифорова З.С. Эпохи формирования россыпной золотоносности бассейна р. Эекит (Юго-восток Оленекского поднятия) // Отечественная геология. **2004.** № 6. С. 3–6.

Герасимов Б.Б. Типоморфные признаки россыпного золота бассейна р. Сололи и его потенциальные рудные источники // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. **2023.** Т. 68. № 2. С. 218–234.

Гибшер Н.А., Томиленко А.А., Сазонов А.М., Рябуха М.А., Тимкина А.Л. Золоторудное месторождение Герфед: характеристика флюидов и РТ-условия образования кварцевых жил (Енисейский кряж, Россия) // Геология и геофизика. **2011.** Т. 52. № 1. С. 1851–1867.

Гибшер Н.А., Рябуха М.А., Томиленко А.А., Сазонов А.М., Хоменко М.О., Бульбак Т.А., Некрасова Н.А. Характеристика металлоносных флюидов и возраст формирования золоторудного месторождения Панимба (Енисейский кряж, Россия) // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 11. С. 1721–1741.

Мельников Ф.П., Прокофьев В.Ю., Шатагин Н.Н. Термобарогеохимия. М.: Академический Проект, **2008.** 222 с.

Никифорова З.С., Герасимов Б.Б., Глушкова Е.Г., Каженкина А.Г. Индикаторные признаки россыпного золота как показатель прогнозирования формационных типов золоторудных месторождений (восток Сибирской платформы) // Геология и геофизика. **2018.** Т. 59. № 10. С. 1643–1657.

Прокофьев В.Ю., Афанасьева З.Б., Иванова Г.Ф., Буарон М.К., Мариньяк Х. Исследование флюидных включений в минералах Олимпиадинского Au-(Sb-W)-месторождения (Енисейский кряж) // Геохимия. **1994.** № 7. С. 1012.

Прокофьев В.Ю., Наумов В.Б., Миронова О.Ф. Физико-химические параметры и геохимические особенности флюидов докембрийских золоторудных месторождений // Геохимия. 2017. № 12. С. 1069–1087.

Реддер Э. Флюидные включения в минералах. М.: Мир, 1987.

Ройзенман Ф.М. Теория богатого рудообразования под воздействием «углекислотной волны». М.: Издательство МЮИ, **2008.** 84 с.

Савва Н.Е., Волков А.В., Сидоров А.А., Колова Е.Е., Мурашов К.Ю. Эпитермальное Ag-Au месторождение Приморское (Северо-Восток России): геологическое строение, минералогогеохимические особенности и условия рудообразования // Геология рудных месторождений. **2019.** Т. 61. № 1. С. 52–74.

Сметанникова Л.И., Гриненко В.С., Маланин Ю.А., Прокопьев А.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Анабаро-Вилюйская. Лист R-51 – Джарджан. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, **2013.** 147 с.

Сокерина Н.В., Кузнецов С.К., Исаенко С.И., Ковалевич Р.С. Флюидные включения в кварце золоторудных жил проявления Секущий (Чукотка) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. **2014.** № 2 (230). С. 3–6.

Сокерина Н.В., Майорова Т.П., Шанина С.Н., Исаенко С.И. Флюидный режим образования кварцевых жил Яроташорской золотороссыпной площади (Приполярный Урал) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 8. С. 20–25.

Сокерина Н.В., Сокерин М.Ю., Глухов Ю.В., Исаенко С.И., Шайбеков Р.И., Зорина С.О. Условия образования кварцевожильной минерализации Кыввожского золотороссыпного поля на Среднем Тимане (по данным изучения флюидных включений) // Вестник геонаук. **2023.** № 3. С. 3–10.

Томиленко А.А., Гибшер Н.А. Особенности состава флюида в рудных и безрудных зонах Советского кварц-золоторудного месторождения (по данным изучения флюидных включений) // Геохимия. 2001. № 2. С. 167—177.

Шпунт Б.Р. Типоморфные особенности и генезис россыпного золота на севере Сибирской платформы // Геология и геофизика. **1974.** № 9. С. 77–88.

Яблокова С.В., Израилев Л.М. Минералогия золота в разновозрастных толщах осадочного чехла Оленекского поднятия // Труды ЦНИГРИ. М.: ВЦИО, **1988.** С. 58–65.

Fluid Inclusions in Quartz of the Gold-Ore Occurrences and Gold-Quartz Intergrowths from Placers in the Sololi Uplift of the Olenyok Arch (Yakutia)

V. N. Kardashevskaia^{*a*}, *, B. B. Gerasimov^{*a*}, **, A. A. Tomilenko^{*b*}, V. N. Bocharov^{*c*}

^aDiamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch RAS, Yakutsk, Russia ^bSobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch RAS, Novosibirsk, Russia ^cSaint-Petersburg State University, Research Center for Geo-Environmental Research and Modelling, Saint-Petersburg, Russia *e-mail: kardashevskaya92@mail.ru **e-mail: bgerasimov@vandex.ru

Fluid inclusions have been studied in vein quartz with gold sulfide mineralization from metamorphosed sandstones of the Eekite series and metarhyolites of the Early Proterozoic, in quartz breccia from the zone of overlapping gold mineralization on the Early and Middle

Permian sandstones, as well as in the gold quartz intergrowths from the Sololi River placer. It has been revealed that formation of quartz breccias occurred within a wide temperature interval from 230 to 425 °C, with predominance of carbon dioxide and nitrogen in the vapor phase. It is suggested that the increased nitrogen content may be associated with a chemical reaction between the fluid and ammonium-containing silicates of host rocks, in which nitrogen in the form of NH⁴⁺ isomorphically replaces potassium at the regressive stage of metamorphism. At the same time, it is possible that mantle nitrogen, which was transported along the Anabar-Eekite deep fault, participated in formation of the studied breccias. The close homogenization temperatures and similar nature of the water-salt composition for the fluid inclusions of quartz veins that inject the Eekite series meta-rocks and meta-rhyolites indicate the synchronism of their formation and attribute them to the common stage of ore formation. Quartz veins with gold sulfide mineralization were the primary sources of pebbles with gold-quartz intergrowths from the Sololi River, this is evidenced by similarity of principal characteristics of fluid inclusions. Oxidizing conditions of the mineralization serve as favorable factor for the Au deposition, it is indicated by the predominant CO₂ content in fluid inclusions, keeping role of a geochemical barrier and leading to an elevated gold content in quartz veins.

Keywords: Siberian platform, Olenyok arch, Sololi uplift, fluid inclusions, Raman spectroscopy, quartz breccia, vein quartz, gold-quartz aggregate, ore occurrence

REFERENCES

Bhattacharya S., Panigrahi M.K. Heterogeneity in fluid characteristics in the Ramagiri-Penakacherla sector of the eastern Dharwar craton: implications to gold Metallogeny. *Russian Geol. Geophys.* **2011.** Vol. 52. N 11. P. 1821–1834 (*in Russian*).

Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions. Fluid inclusions in minerals: methods and applications, Pontignano: Siena, **1994.** P. 117–130.

Borisenko A.S. Study of the salt composition of solutions of gas-liquid inclusions in minerals by cryometric method. Russian Geol. Geophys. **1977.** N 8. P. 16–27 (*in Russian*).

Bottrell S.H., Miller M.F. The geochemical behavior of nitrogen compounds during the formation of black shale hosted quartz-vein gold deposits, North Wales. *Appl. Geochem.* **1990.** Vol. 5. N 3. P. 289–296.

Bowers T.S. The deposition of gold and other metals: pressure-induced fluid immiscibility and associated stable isotope signatures. *Geochim. Cosmochim. Acta.* **1991.** Vol. 55. P. 2417–2434.

Burke E.A. Raman microspectrometry of fluid inclusions. Lithos. 2001. Vol. 55. P. 139–158.

Dubessy J., Poty B., Ramboz C. Advances in C–O–H–N–S fluid geochemistry based on micro-Raman spectrometric analysis of fluid inclusions. *European J. Miner.* **1989.** N 1. P. 517–534.

Gerasimov B.B., Nikiforova Z.S. Epochs of formation of placer gold deposits in the river basin Eekit (Southeast of the Olenek uplift). *Domestic Geology*. **2004.** N 6. P. 3–6 (*in Russian*).

Gerasimov B.B. Typomorphic features of placer gold of the Sololi river basin (northeast of the Siberian platform). Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sci. 2023. Vol. 68. N 2. P. 218–234 (in Russian).

Gibsher N.A., Tomilenko A.A., Ryabukha M.A., Timkina A.L., Sazonov A.M. The Gerfed gold deposit: fluids and PT-conditions for quartz vein formation (Yenisei ridge, Russia). *Russian Geol. Geophys.* **2011.** Vol. 52. N 11. P. 1851–1867 (*in Russian*).

Gibsher N.A., Ryabukha M.A., Tomilenko A.A., Khomenko M.O., Bul'bak T.A., Sazonov A.M., Nekrasova N.A. Metal-bearing fluids and the age of the Panimba gold deposit (Yenisei ridge, Russia). Russian Geol. Geophys. 2017. Vol. 58. N 11. P. 1721–1741 (in Russian).

Melnikov F.P., Prokofev V.Yu., Shatagin N.N. Thermobarogeochemistry. Moscow: Academic Project, 2008. 222 p. (in Russian).

Nikiforova Z.S., Gerasimov B.B., Glushkova E.G., Kazhenkina A.G. Indicative features of placer gold for the prediction of the formation types of gold deposits (east of the Siberian platform). Russian Geol. Geophys. 2018. Vol. 59. N 10. P. 1643–1657 (in Russian). Prokofiev V.Yu., Afanaseva Z.B., Ivanova G.F., Buaron M.K., Maryniak H. Study of fluid inclusions

Prokofiev V.Yu., Afanaseva Z.B., Ivanova G.F., Buaron M.K., Maryniak H. Study of fluid inclusions in minerals of the Olympiada Au-(Sb-W)-deposit (Yenisei ridge). *Geochem. Int.* **1994.** N 7. P. 1012 (*in Russian*).

Prokofiev V.Yu., Naumov V.B., Mironova O.F. Physicochemical parameters and geochemical features of fluids of Precambrian gold deposits. *Geochem. Int.* 2017. N 12. P. 1069–1087 (*in Russian*).

Roedder E. Fluid inclusions in minerals. *Rev Miner*. **1984**. Vol. 12. Mineralogical Society of America, 644 p.

Roizenman F.M. The theory of rich ore formation under the influence of a «carbon dioxide wave». Moscow: Publishing house MUI, **2008.** 84 p. (*in Russian*).

Savva N.E., Kolova E.E., Volkov A.V., Sidorov A.A., Murashov K.Y. Primorskoe epithermal Ag-Au deposit (Northeastern Russia): geological setting, mineralogy, geochemistry, and ore formation conditions. *Geol. Ore Deposits.* **2019.** Vol. 61. N 1. C. 52–74 (*in Russian*).

Shaparenko E., Gibsher N., Tomilenko A., Sazonov A., Bulbak T., Ryabukha M., Khomenko M., Silyanov S., Nekrasova N., Petrova M. Ore-bearing fluids of the Blagodatnoye gold deposit (Yenisei ridge, Russia): results of fluid inclusion and isotopic analyses. *Minerals*. **2021.** Vol. 11. N 10. P. 1090.

Smetannikova L.I., Grinenko V.S., Malanin Yu. A., Prokopiev A.V. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Anabaro-Vilyuiskaya series. Sheet R-51 (Djardjan).

Explanatory letter. Saint Petersburg: VSEGEI, 2013. 147 p. (in Russian).

Sokerina N.V., Kuznetsov S.K., Isaenko S.I., Kovalevich R.S. Fluid inclusions in quartz of gold ore veins of deposit Sekuschiy (Chukotka). Vestnik Inst. Geol. Komi Sci. Centre Ural Branch RAS. 2014. N 2 (230). P. 3–6 (in Russian).

Sokerina N.V., Mayorova T.P., Shanina S.N., Isaenko S.I. Fluid mode of quartz vein formation of Yarotashor gold placer (Subpolar Urals). Vestnik Inst. Geol. Komi Sci. Centre Ural Branch RAS. 2018. N 8. P. 20–25 (in Russian).

Sokerina N.V., Sokerin M.Yu., Glukhov Yu.V., Isaenko S.I., Shaibekov R.I., Zorina S.O. Formation conditions of quartz-vein mineralization of the Kyvvozh gold placer in the Middle Timan (according to results of study of fluid inclusions). Vestnik Geosci. **2023.** N 3. P. 3–10 (*in Russian*).

Tomilenko A.A., Gibsher N.A. Peculiarities of fluid composition in the mineralized and barren zones of the Sovetskoe quartz-gold deposit (on fluid inclusion study). *Geochem. Int.* **2001.** Vol. 39. N 2. P. 167–177 (*in Russian*).

Shpunt B.R. Typomorphic features and genesis of placer gold in the north of the Siberian platform. *Russian Geol. Geophys.* **1974.** N 9. P. 77–88 (*in Russian*).

Yablokova S.V., İzrailev L.M. Mineralogy of gold in different-aged strata of the sedimentary cover of the Olenyok uplift. Proc. TsNIGRI. Moscow, **1988.** P. 58–65 (*in Russian*).