

УДК 553.21/.24

DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4673

Шифр специальности ВАК: 1.6.10

Золото-кварцевое месторождение Аяхта (Енисейский кряж): условия формирования и источник флюидов

М.А. Петрова¹, Н.А. Гибшер¹, Е.О. Шапаренко¹, А.А. Томиленко¹,
Т.А. Бульбак¹, А.М. Сазонов², М.О. Хоменко¹, С.А. Сильянов²

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, г. Новосибирск

² Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск

 shaparenko@igm.nsc.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования определяется необходимостью установления параметров рудоносных флюидов золоторудного месторождения Аяхта, одного из эталонных и крупных объектов в Енисейском кряже. Полученные данные могут быть использованы для разработки целостной модели формирования золотого оруденения региона. *Цель:* определить физико-химические условия формирования кварцево-жильных зон и источник рудоносных флюидов. *Методы:* состав рудных минералов был проанализирован методом микрорентгеноспектрального анализа, метод микротермометрии использовался для определения температур фазовых переходов во флюидных включениях, состав индивидуальных флюидных включений был определен методом рамановской спектроскопии, валовый состав флюида проанализирован методом газовой хромато-масс-спектрометрии, для установления источника флюида определены изотопы серы ($\delta^{34}\text{S}$) сульфидов и углекислоты ($\delta^{13}\text{C}$) во флюидных включениях в кварце. *Результаты и выводы.* Установлено, что формирование золото-кварцевых жильных зон протекало в среднетемпературных условиях (121–424 °C) при значительных колебаниях давления (0,5–1,5 кбар). Соленость флюида была умеренной (до 25,5 мас. %, NaCl-экв.). Методом газовой хромато-масс-спектрометрии в составе рудоносного флюида было обнаружено от 178 до 286 соединений, среди них преобладают H_2O и CO_2 . На долю углеводородов, их производных, S-, N- и галогенсодержащих соединений в сумме приходится 7,4–22,6 отн. %. Мы предполагаем, что органические соединения принимали непосредственное участие в обогащении кварцевых жил золотой минерализацией. Значения изотопного состава серы (+6,6...+9,5 ‰) и углерода из флюидных включений в кварце (–12,5...–21,9 ‰) свидетельствуют в пользу метаморфогенно-корового источника флюидов.

Ключевые слова: золото, Енисейский кряж, флюидные включения, условия минералообразования, GC-MS

Благодарности: Микрорентгеноспектральные, микротермометрические, раман, GC-MS, изотопного-геохимические (изотопы S, C) исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-77-01063, <https://rscf.ru/project/23-77-01063/>), отбор фактического материала и верификация методики GC-MS осуществлены по государственному заданию Института геологии и минералогии СО РАН (№ 122041400312-2).

Для цитирования: Золото-кварцевое месторождение Аяхта (Енисейский кряж): условия формирования и источник флюидов / М.А. Петрова, Н.А. Гибшер, Е.О. Шапаренко, А.А. Томиленко, Т.А. Бульбак, А.М. Сазонов, М.О. Хоменко, С.А. Сильянов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 3. – С. 74–88. DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4673

UDC 553.21/.24

DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4673

Ayakhta gold-quartz deposit (Yenisei Ridge): formation conditions and source of fluids

M.A. Petrova¹, N.A. Gibsher¹, E.O. Shaparenko¹✉, A.A. Tomilenko¹,
T.A. Bulbak¹, A.M. Sazonov², M.O. Khomenko¹, S.A. Silyanov²

¹ V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

✉ shaparenko@igm.nsc.ru

Abstract. Relevance. The need to establish the parameters of ore-bearing fluids of the Ayakhta gold deposit, one of the standard and large objects in the Yenisei Ridge. The data obtained can be used to develop a holistic model of gold mineralization in the region. **Aim.** To determine the physicochemical conditions for the formation of quartz vein zones and ore-bearing fluids source. **Methods.** We analyzed the ore minerals composition by micro-X-ray spectral analysis, determined the temperatures of phase transitions in fluid inclusions using the microthermometry method, determined the individual fluid inclusions composition by Raman spectroscopy. The fluid bulk composition was analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). To establish the source of the fluid, we used isotopes of sulfur ($\delta^{34}\text{S}$) sulfides and carbon dioxide ($\delta^{13}\text{C}$) in fluid inclusions in quartz. **Results and conclusions.** We established that the gold-quartz vein zones formation occurred under medium temperature conditions (121–424°C) with significant pressure fluctuations (0.5–1.5 kbar). The fluid salinity was moderate (up to 25.5 wt %, NaCl-eq.). Using the GC-MS method, we detected from 178 to 286 compounds in the ore-bearing fluid, H_2O and CO_2 predominate among them. The share of hydrocarbons, their derivatives, S-, N- and halogenated compounds in total accounts for 7.4–22.6 rel. %. We assume that organic compounds were directly involved in the enrichment of quartz veins with gold mineralization. The isotope composition values of sulfur (+6.6...+9.5 ‰) and carbon from fluid inclusions in quartz (–12.5...–21.9 ‰) indicate a metamorphic-crustal source of fluids.

Keywords: gold, Yenisei Ridge, fluid inclusions, mineral formation conditions, GC-MS

Acknowledgments: Micro-X-ray spectral, microthermometric, Raman, GC-MS, isotope-geochemical (S, C isotopes) studies were supported by the Russian Science Foundation (project no. 23-77-01063, <https://rscf.ru/project/23-77-01063/>), the selection of factual material and verification of the GC-MS methodology were carried out on the state assignment of V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (no. 122041400312-2).

For citation: Petrova M.A., Gibsher N.A., Shaparenko E.O., Tomilenko A.A., Bulbak T.A., Sazonov A.M., Khomenko M.O., Silyanov S.A. Ayakhta gold-quartz deposit (Yenisei Ridge): formation conditions and fluids source. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 3, pp. 74–88. DOI: 10.18799/24131830/2025/3/4673

Введение

Аяхтинское золоторудное месторождение находится в Красноярском крае (рис. 1, а), который является лидером по добыче золота в России и одним из крупнейших в мире. Всего в крае известно около 300 месторождений и рудопроявлений золота. Большинство разрабатываемых месторождений относятся к коренному типу. Например, такие крупные объекты, как Олимпиадинское, Благодатное, Советское, Ведугинское, Эльдorado. Помимо крупных, известны более 100 объектов с запасами золота менее 10 т [1–3]. Согласно современной генетической классификации, эти месторождения являются орогенными [4]. В геологическом плане золоторудная минерализация располагается в пределах Енисейского края – древнего орогена коллизионно-аккреционного типа. Рудные тела представлены золото-сульфидными кварце-

выми жилами во вмещающих метаморфических толщах [5]. Более 25 % рудного золота сосредоточено в месторождениях и рудопроявлениях труднообогатимых золото-сульфидно-кварцевых руд с низким содержанием металла [2].

Вопросы металлогении золота широко обсуждаются многими исследователями [1, 4–10]. До сих пор остаются дискуссионными вопросы генезиса золоторудных месторождений, длительности их формирования, источника золота, механизмов его транспортировки и осаждения [5, 11–14]. Получить ответы на часть вопросов стало возможным благодаря развитию методов термобарогеохимии. Комплексный анализ флюидных включений в комбинации с изотопно-геохимическими исследованиями позволяет получить РТХ-характеристики гидротермального рудоносного раствора.

Ряд исследователей занимаются изучением золоторудной минерализации методами термобарогеохимии. Авторы получают данные о солености, температурах и давлении флюида [15–20]. Большое количество работ посвящено изучению состава флюида месторождений Енисейского кряжа, а также ряда других регионов [13, 16, 21–25]. В последние десятилетия с помощью метода газовой хромато-масс-спектрометрии (GC-MS) получены уникальные данные о составе флюида не только в кварце, но и сульфидах, а также о самородном золоте золоторудных месторождений Енисейского кряжа [14, 22, 26, 27].

Целью представленной работы является определение физико-химических параметров и источника рудоносного флюида, сформировавшего месторождение Аяхта.

Краткая геолого-минералогическая характеристика Аяхтинского золоторудного месторождения

Аяхтинское золоторудное месторождение расположено в Северо-Енисейском районе Красноярского края в нижнем течении р. Пенченги. Месторождение входит в состав одноименного рудного

узла, относящегося к центральной части Енисейского кряжа. Район расположен в северо-западной части Татарского антиклинория вблизи сочленения с Ангари-Питским синклиналием [1, 28].

Первые сведения о геологии месторождения Аяхта изложены в [29]. Кварцево-жильные зоны месторождения расположены в сланцевом клине, входящем в гранитоиды Аяхтинского массива. Основной рудолокализирующей структурой является Кадринская брахиантиклиналь, сложенная породами кординской и горбилокской свиты, метаморфизованными в условиях зеленосланцевой и эпидот-амфиболитовой фаций метаморфизма. Сланцы и гранитоиды рудного поля месторождения интенсивно грейзенизированы. Вдоль складчатой структуры проходит зона тектонических нарушений, осложненных разломами субширотных направлений (рис. 1). В этой зоне находятся метасоматически измененные вмещающие породы, в которых присутствует золото-кварцевая минерализация [3, 29, 30].

Интрузивные образования на площади месторождения представлены гранитоидами татарско-аяхтинского комплекса (RF₃ta), в частности аяхтинского массива, возраст которого 760–750 млн лет [31, 32].

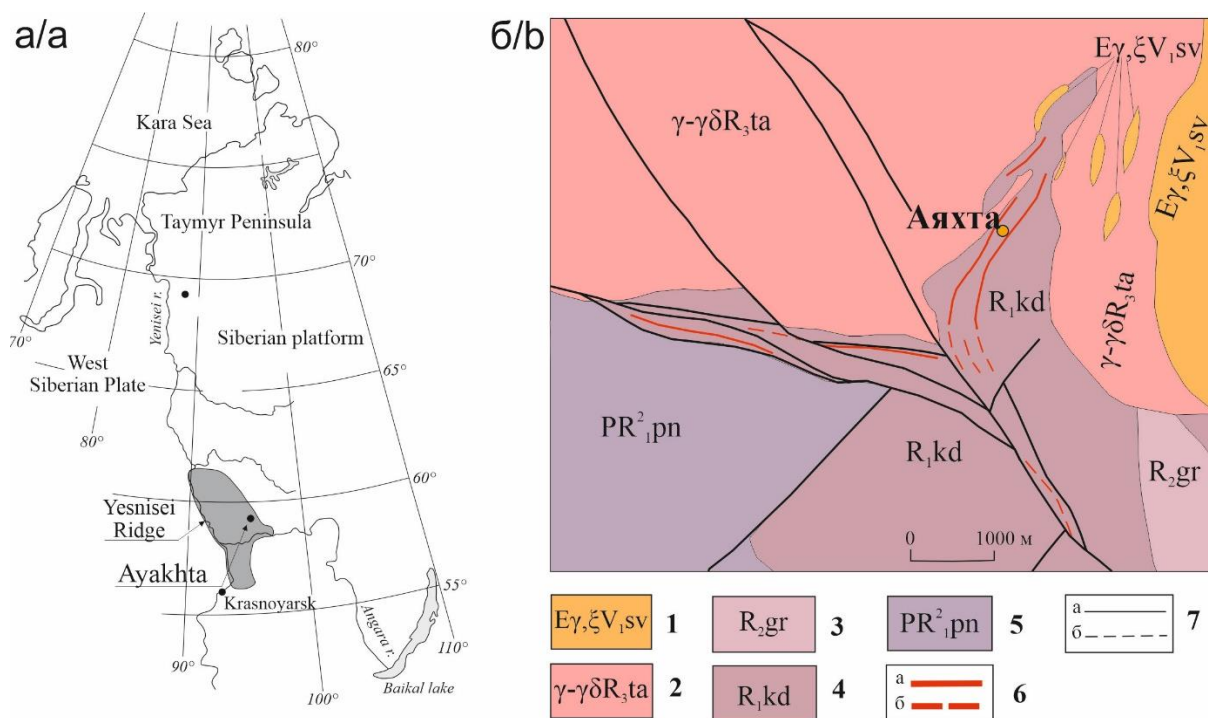


Рис. 1. а) географическое положение месторождения Аяхта; б) фрагмент геологической карты Аяхтинского рудного узла [33]. 1 – Средневороговский комплекс щелочно-гранит-сиенитовый; 2 – Татарско-аяхтинский комплекс гранитовый; 3 – Горбилокская свита; 4 – Кординская свита; 5 – Пенченгинская свита; 6 – золоторудные минерализованные зоны (а – установленные, б – предполагаемые); 7 – разрывные нарушения (а – установленные, б – предполагаемые)

Fig. 1. а) geographical location of the Ayakhta deposit; б) fragment of the Ayakhta ore cluster geological map [33]. 1 – Srednevorogovsky alkali-granite-syenite complex; 2 – Tatar-ayakhta granite complex; 3 – Gorbilok formation; 4 – Corda formation; 5 – Penchenga formation; 6 – gold mineralized zones (а – established, б – supposed); 7 – fracture faults (а – established, б – supposed)

Вмещающие породы представлены кординской свитой рифея, состоящей из кварц-биотитовых и кварц-биотит-мусковитовых сланцев с гранатом, реже с андалузитом и силлиманитом. Возраст пород составляет 1030 ± 130 млн лет [34]. Вмещающие породы имеют экзотактовую зону с Аяхтинским массивом позднеорогенных гранитоидов. На площади широко развиты мелкие тела гранитоидов, в различной степени подвергшиеся метасоматическим преобразованиям [5].

Рудная кварцево-жильная зона Аяхтинского рудного узла имеет протяженность более 10 км и ширину от первых сотен метров до 2 км, протягивающихся в юг-юго-западном направлении. На месторождении выделено две кварцево-жильных зоны: Основная и Западная, состоящие из системы параллельных и субпараллельных жил, прожилков и линз различной мощности [3]. Основными минералами рудных кварцево-жильных образований является кварц и сульфиды, с которыми связана золоторудная минерализация.

Кварц представлен жильной (I) и гнездовой (II) разновидностью в окварцованных породах залежандов кварцевых жил. Кварц I представлен крупными зернами (>2 мм) неправильной формы с волнистыми краями (рис. 2, а). Кварц II преобладает в рудной зоне месторождения. Кварц II (0,05–1,5 мм) имеет изометричную полигональную форму и образуют гранобластическую сотовую структуру (рис. 2, б).

Рудная минерализация представлена золотом, пиритом, арсенопиритом, реже встречаются пирротин, халькопирит, сфалерит (рис. 3). Содержание сульфидов составляет не более 3 %. Микрозондовый анализ показал незначительные вариации химического состава в халькопирите (Cu – 27,59–34,05 %, Fe – 30,39–32,39 %, S – 34,30–35,15 %) и пирите (Fe – 46,27–59,24 %, S – 38,93–53,67 %). Самородное золото в виде мелкой неравномерно рассеянной вкрапленности и небольших прожилков наблюдается как в сростании с кварцем, так и в сланцевых породах. Пробность золота составляет 850 ‰. Запасы золота оцениваются в 11,6 т при среднем содержании 8,3 г/т [35].

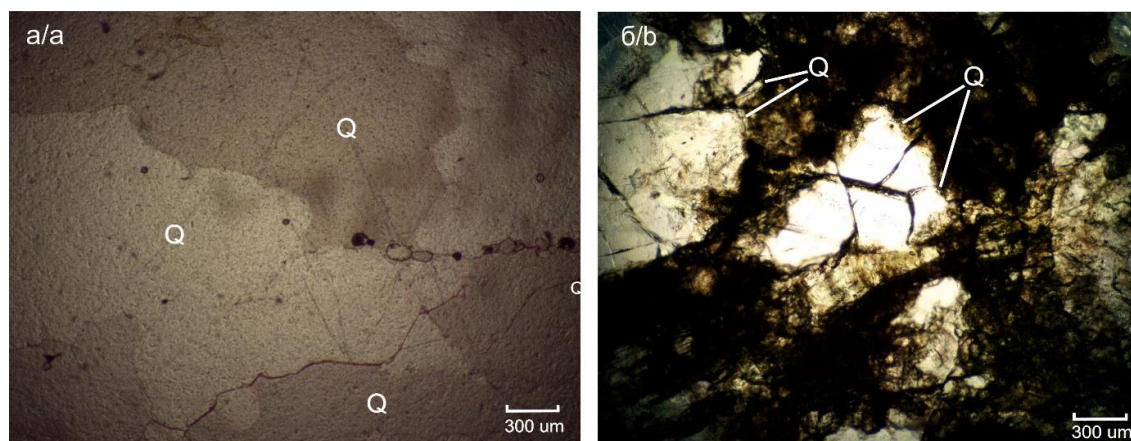


Рис. 2. Разновидности кварца месторождения Аяхта: а) жильный кварц (I) (обр. 2/71.6); б) гнездовой (II) кварц (обр. 607/37), Q – кварц

Fig. 2. Quartz types from the Ayakhta deposit: a) vein quartz (I) (sample 2/71.6); b) nested (II) quartz (sample 607/37), Q – quartz

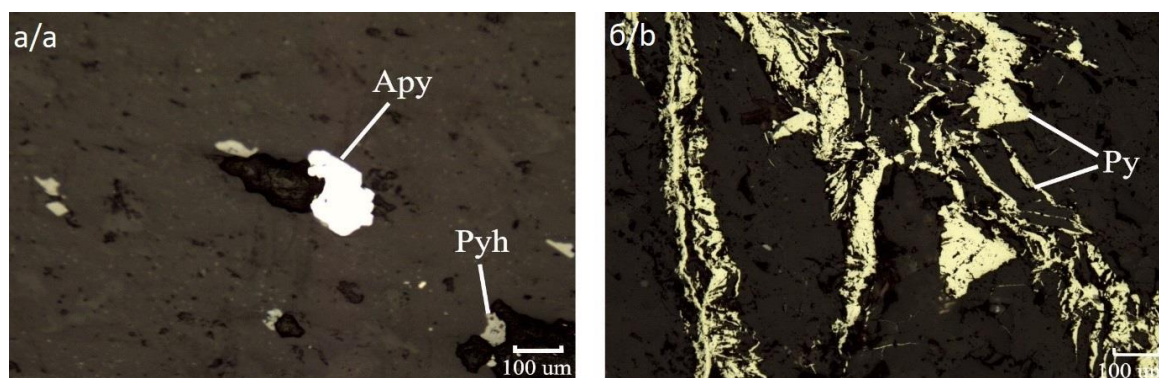


Рис. 3. Сульфидная минерализация месторождения Аяхта: а) вкрапленники арсенопирита и пирротина (обр. 712/124); б) пиритовые прожилки (обр. 2-71.6). Апу – арсенопирит, Py – пирит, Pyh – пирротин

Fig. 3. Sulfide mineralization of the Ayakhta deposit: a) phenocrysts of arsenopyrite and pyrrhotite (sample 712-124); b) pyrite veinlets (sample 2/71.6). Apy – arsenopyrite, Py – pyrite, Pyh – pyrrhotite

Фактический материал и методы исследования

Фактический материал представлен коллекцией, отобранной из скважин 2, 607, 708, 712, 728, 747, 795 и рудного склада. Образцы представлены кварцевыми и кварц-сульфидными агрегатами с прожилками, линзочками сланцев вмещающих пород и слюдами (мусковит, биотит). Сульфиды в образцах присутствуют в виде небольших вкраплений, примазок, прожилков, гнезд в кварце или в сланцевых агрегатах.

Из каменного материала из одной половины образца были сделаны кварцевые пластинки, полированные с двух сторон, и петрографические шлифы для изучения флюидных включений. Другую часть образца дробили и рассеивали на ситах и отбирали фракции минералов без посторонних примесей для дальнейших исследований.

Методом микротермометрии в индивидуальных флюидных включениях были измерены температура общей гомогенизации ($T_{\text{гом}}$), температура эвтектики ($T_{\text{эвт}}$), температура плавления льда в водной фазе ($T_{\text{пл-льда}}$), температура плавления ($T_{\text{пл-СО}_2}$) и частичной гомогенизации смеси газов $\text{CO}_2 \pm \text{CH}_4 \pm \text{N}_2$ ($T_{\text{гом-СО}_2}$). Также фиксировался вид гомогенизации – в жидкую или газовую фазу. Исследования проводились в микротермокамере THMSG-600 фирмы Linkam в диапазоне от -196 до $+600$ °C. Стандартная температурная погрешность измерений составляет $\pm 0,1$ °C в отрицательной и ± 5 °C в положительных температурных значениях. Полученные параметры позволяют оценить давление по методам, представленным в работах [36, 37].

Состав водной фазы получен на основе значений температур эвтектики [38]. Соленость водной фазы флюидных включений оценивалась по температуре плавления льда и температуре растворения кристаллика соли при использовании двухкомпонентной водно-солевой системы $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ [39].

Методом рамановской спектроскопии были проанализированы индивидуальные флюидные включения в кварце на одноканальном раман-спектрометре Horiba J.Y. LabRAM HR800 по методике, изложенной в работах [40, 41].

Валовый состав флюидов в кварце и сульфидах определен методом GC-MS на газовом хромато-масс-спектрометре Focus GC-DSQ II MS (Thermo Scientific, USA). Методика GC-MS анализа подробно изложена в работе [26].

Микротермометрические, раман и GC-MS исследования проведены в лаборатории термобаро-геохимии ИГМ СО РАН.

Изотопный состав серы ($\delta^{34}\text{S}$) в сульфидах измерялся в газе SO_2 , полученном при взаимодействии сульфидов с CuO при 1000 °C, и нормировался относительно изотопного состава троилита из метеорита Каньон-Дьябло. Воспроизводимость

значений $\delta^{34}\text{S}$, включая подготовку образца, составляет $0,1$ % [42].

Изотопный состав $\delta^{13}\text{C}$ углекислоты флюидных включений в кварце определялся в газе, извлеченном из навесок в 1000 мг методом декрепитации при нагревании образца до 600 °C. CO_2 связывалось при температуре жидкого азота, затем криолоушки изолировались от вакуумной линии. Ампулы с CO_2 анализировались на масс-спектрометре Thermo Finnigan Delta Plus – XP, оснащенном системой двойного напуска [43]. Результаты нормировались через стандарт VPDB (Pee Dee Belemnite).

Состав сульфидов проанализирован микрорентгеноспектральным методом на электронно-зондовом микроанализаторе JXA-8230 (Jeol Ltd) при следующих параметрах: 20 kV – напряжение, 50 нА – сила тока зонда (аналитик В.Н. Королук).

Микрорентгеноспектральный анализ и изотопно-геохимические исследования (S,C) проведены в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

Характеристика флюидных включений

В образцах с месторождения Аяхта было обнаружено два типа кварца: жильный (I) и гнездовой (II) (рис. 2). Флюидные включения из кварца II присутствовали в небольших количествах, имели размеры менее 5 мкм и оказались непригодны для термобарогеохимических исследований. Поэтому в данной статье будут представлены результаты изучения флюидных включений из жильного кварца (I).

По фазовому составу при комнатной температуре выделены три типа флюидных включений в кварце (рис. 4):

- А – двухфазные газовой-жидкие включения, содержащие фазу жидкой H_2O и газовый пузырек ($\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{Г}, \text{Ж}_{\text{CO}_2 \pm \text{CH}_4 \pm \text{N}_2}$) (рис. 4, а), с меняющимися соотношениями газа и жидкости во включениях. Форма вакуолей округлая, реже неправильная, средние размеры включений $10\text{--}20$ мкм;
- В – однофазные жидкие или газовые включения ($\text{Г}, \text{Ж}_{\text{CO}_2 \pm \text{CH}_4 \pm \text{N}_2}$) (рис. 4, б). Форма вакуолей чаще всего неправильная или вытянутая, размеры достигают $5\text{--}15$ мкм;
- С – трехфазные включения, состоящие из водной фазы ($\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}}$), газового пузырька и твердой фазы (кристаллика). Они составляют менее 5 % от общего количества включений. Форма вакуолей вытянутая, реже неправильная, размеры $5\text{--}10$ мкм (реже до 30 мкм). Расположены чаще группами до $7\text{--}10$ штук (рис. 4, в).

По генетической классификации на месторождении Аяхта выделены первичные, первично-вторичные и вторичные генерации включений.

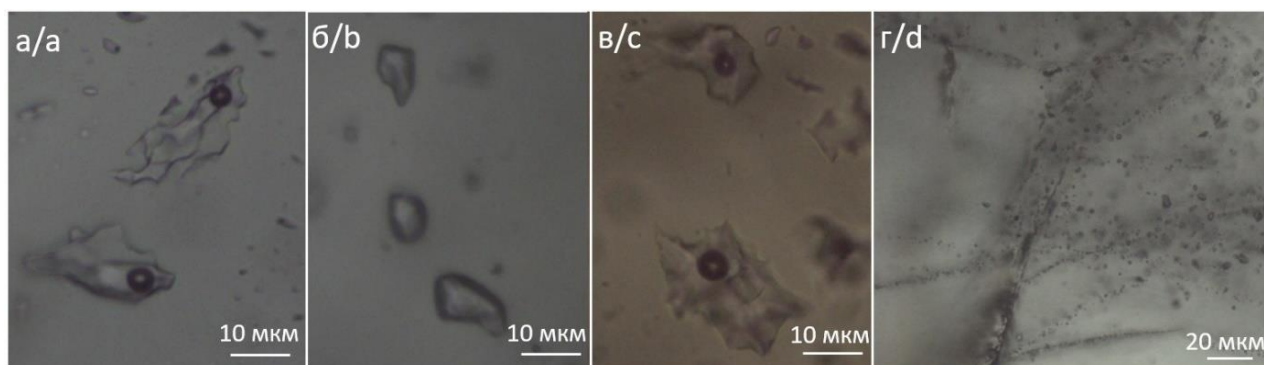


Рис. 4. Типы флюидных включений Аяхтинского месторождения: а) тип А, двухфазные ($\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}}+\text{Г}_{\text{CO}_2\pm\text{CH}_4\pm\text{N}_2}$); б) тип В, однофазные ($(\text{Г},\text{Ж})_{\text{CO}_2\pm\text{CH}_4\pm\text{N}_2}$); в) тип С, трехфазные ($\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}}+\text{Г}+\text{кр}$); г) система взаимно пересекающихся трещин, заполненных вторичными включениями

Fig. 4. Fluid inclusion types of the Ayakhta deposit: a) type A, two-phase ($(\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}+\text{V}_{\text{CO}_2\pm\text{CH}_4\pm\text{N}_2})$); б) type B, single-phase ($(\text{L},\text{V})_{\text{CO}_2\pm\text{CH}_4\pm\text{N}_2}$); c) type C, three-phase ($(\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}+\text{V}+\text{CR})$); d) system of mutually intersecting cracks filled with secondary inclusions

Первичные и первично-вторичные генерации включений (тип А и В) располагаются внутри зерен кварца группами до 25 штук и не относятся к залеченным трещинам. К вторичным генерациям относятся некоторые включения типа А и В, а также включения типа С, приуроченные к залеченным трещинкам, секущим границы кварцевых зерен (рис. 4, г).

Результаты исследования

Температура гомогенизации флюидных включений, состав, соленость и давление флюидов

Результаты микротермометрических исследований первичных и первично-вторичных флюидных включений в кварце Аяхтинского месторождения представлены в табл. 1. Интервал температур гомогенизации газовой-жидких включений из рудной зоны (тип А) составляет 121–424 °С при гомогенизации в жидкость (в большинстве случаев) и газ. Соленость флюида достигала 25,5 мас. %, NaCl-экв. Давление составило интервал 0,5–1,5 кбар.

Первично-вторичные и первичные однофазные флюидные включения (тип В) имеют температуры плавления в интервале от –127 до –57,0 и температуры частичной гомогенизации от –25,9 до 9,0 °С. Гомогенизация однофазных включений преимущественно протекает в жидкую фазу.

Вторичные двухфазные включения гомогенизируются только в жидкую фазу в интервале 73–146 °С, а соленость колеблется от 1,4 до 5,0 мас. %, NaCl-экв., температура эвтектики от –23,8 до –21,2 °С. Вторичные трехфазные включения гомогенизировались при температуре 91–225 °С, соленость составила 27,6–28,5 мас. %, NaCl-экв.

Состав газовой фазы флюида

В результате анализа первичных и первично-вторичных индивидуальных флюидных включений

($n=32$) методом рамановской спектроскопии были обнаружены три компонента CO_2 , CH_4 , N_2 в различных соотношениях (табл. 2, рис. 5). В газовом пузырьке двухфазных включений типа А отношение CO_2/CH_4 варьирует в интервале 8,10–120,3, а в жидких (реже газовых) однофазных включениях (тип В) – в интервале 82,3–199.

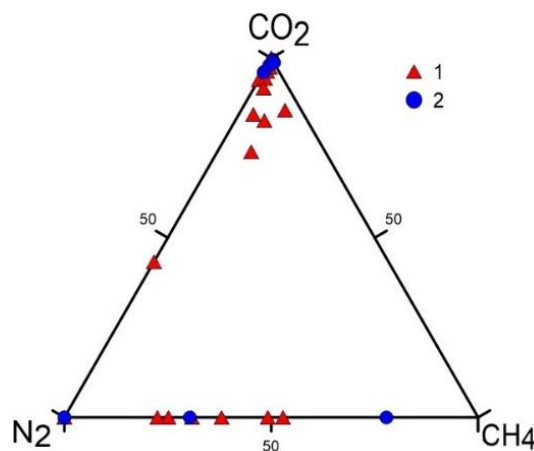


Рис. 5. Состав газовой фазы индивидуальных флюидных включений в кварце месторождения Аяхта (по результатам рамановской спектроскопии): 1 – тип А, двухфазные ($\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}}+\text{Г}_{\text{CO}_2\pm\text{CH}_4\pm\text{N}_2}$), 2 – тип В, однофазные ($(\text{Г},\text{Ж})_{\text{CO}_2\pm\text{CH}_4\pm\text{N}_2}$) включения

Fig. 5. Vapor phase composition of individual fluid inclusions in quartz from the Ayakhta deposit (Raman spectroscopy data): 1 – type A, two-phase ($(\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}+\text{V}_{\text{CO}_2\pm\text{CH}_4\pm\text{N}_2})$); 2 – type B, single-phase ($(\text{L},\text{V})_{\text{CO}_2\pm\text{CH}_4\pm\text{N}_2}$) inclusions

Методом GC-MS было проанализировано две пробы кварца и одна проба пирита из рудной зоны месторождения Аяхта. Анализ показал, что газовая составляющая флюида имеет водно-углекислотный

состав с примесью углеводородов, S-, N- и галоген-содержащих соединений (табл. 3). Основными компонентами минералообразующего флюида являются вода (9,9–83,8 отн. %) и уголекислота (2,6–82,7 отн. %). Доля органических соединений составляет 7,4–22,6 отн. %. Был обнаружен широкий ряд органических соединений: бескислородные алифатические и циклические углеводороды (парафины, олефины, циклические алканы и алкены, арены, полициклические ароматические углеводороды – ПАУ), кислородсодержащие углеводороды (спирты, эфиры простые и сложные, фураны, аль-

дегиды, кетоны, карбоновые кислоты), амиды, амины, SO₂, H₂S, тиофены, галогенсодержащие предельные, циклические углеводороды. Общее количество определенных соединений во флюиде варьирует от 178 до 286.

Соотношение CO₂/(CO₂+H₂O) в кварце меняется от 0,9 до 0,02, а в пирите составляет 0,09. Во всех образцах содержание алканов выше, чем содержание алкенов (алканы/алкены=1,13–3,08). Соотношение тяжелых (C₅–C₁₇) углеводородов к легким (C₁–C₄) в кварце значительно ниже, чем в пирите, и составляет 1,75–2,75 и 21,65, соответственно.

Таблица 1. Результаты микротермометрических исследований флюидных включений в кварце рудных жил Аяхтинского месторождения

Table 1. Results obtained by microthermometric studies of fluid inclusions in quartz from Ayakhta deposit ore veins

№ образца ¹ Sample no.	Тип ФВ ² FI type	N ³	Т _{гом.} T _{hom.} , °C	Вид гом. ⁴ Hom. type	Водная фаза/Liquid phase			CO ₂ ±CH ₄ ±N ₂ фаза/phase			Р, кбар kbar
					Т _{эвт.} T _{eut.} , °C	Т _{пл. льда} T _{l.m.} , °C	Сол. мас. % (NaCl-экв.) Sal. wt % (NaCl eq.)	Т _{пл.} T _{m.} , °C	Т _{част. гом.} T _{p.hom.} , °C	Вид гом. ⁴ Hom. type	
2/71.6	A	10	190–193	Ж/L	–21,3...–20,6	–4,1...–3,7	6,0–6,6	–	–	–	0,5–1,5
	B	123	–	–	–	–	–	–59,3...–57,0	–25,9...9,0	Ж	
728-132	A	25	205–404	Ж/L	–	–24...–23,8	24,8–25,0	–	–	–	
	A	20	146–201	Ж/L	–43...–41	–21,5...–20,7	22,9–23,3	–	–	–	
728-132.5	A	11	281–424	Ж/L	–24,3...–23,9	–5...–3,8	6,2–7,9	–	–	–	
747/221.2-127	A	30	124–414	Г, Ж V, L	–42,8...–42,1	–16,5...–9,3	13,2–19,8	–	–	–	
	A	22	121–187	Ж/L	–34,6...–30,6	–24,9...–23,9	24,9–25,5	–	–	–	
	A	26	126–216	Ж/L	–	–3,8...–3,5	5,7–6,2	–	–	–	
	B	47	–	–	–	–	–	–127 ... –126	–	–	

Примечание: 1 – № скважины/(глубина, м) – разведочная линия; 2 – тип флюидных включений: А – двухфазные (ЖН₂O+ГCO₂±CH₄±N₂), В – однофазные (Ж,Г)CO₂±CH₄±N₂ включения; 3 – количество включений; 4 – Вид гомогенизации: Г – в газ, Ж – в жидкость.

Note: 1 – well number/(depth, m) – exploration line; 2 – fluid inclusion type: type A, two-phase (L_{H2O}+VCO₂±CH₄±N₂), type B, single-phase (V,L)CO₂±CH₄±N₂ inclusions; 3 – number of inclusions; 4 – type of homogenization: V – into vapor, L – into liquid.

Таблица 2. Состав газовой фазы флюидных включений по данным рамановской спектроскопии

Table 2. Vapor phase composition of individual fluid inclusions in quartz from the Ayakhta deposit (Raman spectroscopy data)

N образца Sample no.	Содержание. мол. % Content, mol. %			CO ₂ /CH ₄	N образца Sample no.	Содержание. мол. % Content, mol. %			CO ₂ /CH ₄
	CO ₂	CH ₄	N ₂			CO ₂	CH ₄	N ₂	
Тип А (ЖН ₂ O+Г _{CO2} ±N ₂ ±CH ₄) Type A(L _{H2O} +V _{CO2} ±CH ₄ ±N ₂)					Тип А (ЖН ₂ O+Г _{CO2} ±N ₂ ±CH ₄) Type A(L _{H2O} +V _{CO2} ±CH ₄ ±N ₂)				
2/71.6	–	25,1	74,9	–	607/149	–	37,9	62,1	–
	–	52,7	47,3	–		93,9	–	6,1	–
	97,1	–	2,9	–		43,2	–	56,8	–
	85,3	10,5	4,1	8,1		–	–	100	–
	82,5	7,1	10,4	11,6		100	–	–	–
	96,9	–	3,1	–	Тип В (Ж,Г) _{CO2} ±N ₂ ±CH ₄ /Type B (L,V) _{CO2} ±CH ₄ ±N ₂				
712-124	96,8	–	3,2	–	2/71.6	–	77,7	22,3	–
	96,3	0,8	2,9	120,3		–	–	100	–
	73,9	8,2	17,9	9,03		96,4	–	3,6	–
	97,3	1	1,7	97,3		96,1	–	3,9	–
	94,4	1,3	4,3	72,62	747/221.2	–	–	100	–
	91,6	2,3	6,1	30,82		–	30,3	69,7	–
	84,3	3,5	12,2	24,08		712-124	98,0	0,5	1,5
–	–	100	–	99,5	0,5		–	199	
747/221.2	–	49,1	50,9	–	99,4		0,6	–	186,4
	–	30,8	69,2	–	98,8		1,2	–	82,3
–	22,4	77,6	–						

Изотопный состав S и C

Изотопный состав углерода во флюидных включениях определен в трех образцах кварца из золотоносной зоны. Значения $\delta^{13}\text{C}$ составляют –12,5, –7,0 и –21,9 ‰. Значения $\delta^{34}\text{S}$ в пирите составляет +6,6 ‰, а в пирротине +8,2 и +9,5 ‰.

Обсуждение результатов

Обобщение полученных данных при исследовании флюидных включений на золоторудном месторождении Аяхта позволяет сделать вывод, что рудные кварцево-жильные зоны были сформированы водно-углекислотно-углеводородными флюидами умеренной солености (6–25,5 мас. %, NaCl-экв.), в интервале температур 121–424 °C (рис. 6) и давлений 0,5–1,5 кбар. Такие РТХ-характеристики флюида характерны для других золоторудных месторождений Енисейского края (рис. 6) и орогенных месторождений золота в целом [4, 44, 45].

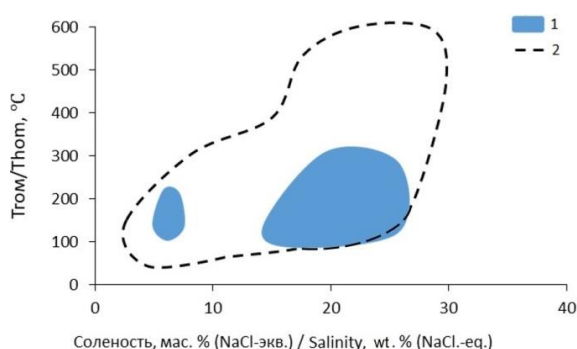


Рис. 6. Температура гомогенизации ($T_{\text{гом}}$) и соленость флюида месторождения Аяхта (1) и флюидов других месторождений золота Енисейского края (2) – Олимпиада, Эльдорадо, Советское, Герфед, Богунайское, Ведуга, Удереи, Панимба, Благодатное [12, 13, 19, 22, 27, 46–51]

Fig. 6. Homogenization temperature (T_{hom}) and salinity of fluid from the Ayakhta deposit (1) and fluids from other gold deposits located in the Yenisei Ridge (2) – Olympiada, Eldorado, Sovetskoe, Gerfed, Bogunaiskoe, Veduga, Uderey, Panimba, Blagodatnoe [12, 13, 19, 22, 27, 46–51]

Широкие вариации температур и давления в процессе минералообразования отражают режим формирования рудных кварцево-жильных зон, когда кипящий флюид поднимался по ослабленным разломным зонам и внедрялся во вмещающие кристаллические сланцы. По-видимому, было несколько порций флюида, при этом снижалась соленость раствора. Появление вторичных высокосолёных (27,6–28,5 мас. %, NaCl-экв.) флюидов могло быть вызвано наложением постмагматических гидротермальных растворов, источником которых были близлежащие гранитоиды.

Флюиды, сформировавшие золоторудное месторождение Аяхта, имеют поликомпонентный состав. В газовой фазе методом рамановской спектроскопии обнаружены CO_2 , CH_4 и N_2 в различных соотношениях (табл. 2, рис. 4), а методом GC-MS было обнаружено до 286 химических компонентов (табл. 3, рис. 7). Преобладающими компонентами являются CO_2 и H_2O , также стоит отметить наличие органических, S-, N- и галогенсодержащих соединений. Вариации отношения $\text{CO}_2/(\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O})$ во флюиде от 0,02 до 0,9, а также CO_2/CH_4 от 8,1 до 199 (табл. 2) указывают на изменение окислительно-восстановительных условий в процессе минералообразования. Такие изменения условий являются неотъемлемой частью формирования золотоносных залежей и связаны с резким изменением флюидного давления, что приводит к кипению (гетерогенизации) флюида [52]. Поэтому в образцах мы наблюдаем различные по фазовому (Г, Ж, Г+Ж) и химическому составу флюидные включения в одном зерне.

Летучие соединения сыграли огромную роль в формировании золотоносных кварцево-жильных зон. Во флюиде Аяхтинского месторождения преобладают H_2O и CO_2 . Вода является основой гидротермальных растворов, а углекислота обеспечивает буферную емкость флюида для поддержания высокой растворимости в нём золота [53].

Органические соединения, обнаруженные в минералообразующих флюидах, могли участвовать в образовании металлоорганических комплексов [54, 55], в виде которых далее шла транспортировка золота. При распаде металлоорганических соединений происходила кристаллизация золота и сульфидов, а их транспортеры (углеводороды) законсервировались во флюидных включениях.

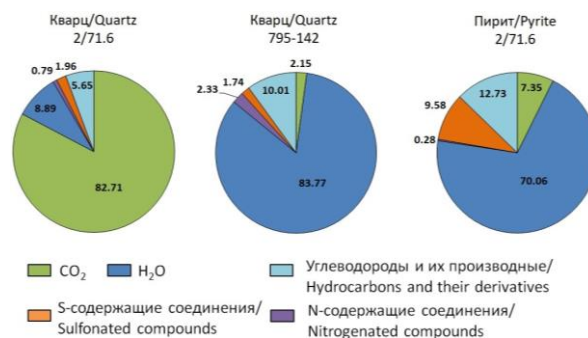


Рис. 7. Валовый состав летучих во флюиде на месторождении Аяхта по данным GC-MS

Fig. 7. Bulk composition of volatiles in the fluid at the Ayakhta deposit (GC-MS data)

В экспериментальных работах показано, что растворимость золота увеличивается при добавлении компонентов сырой нефти [56].

Таблица 3. Состав (в отн. %) и количество (в скобках) летучих компонентов, выделившихся при однократном ударном вскрытии флюидных включений в минералах месторождения Аяхта (по данным GC-MS)

Table 3. Composition (rel. %) and quantity (in parentheses) of volatile components released upon single shock destruction from minerals of the Ayakhta deposit (GC-MS data)

Компонент Component	Формула Formula	MW	Кварц Quartz 2/71.6	Кварц Quartz 795-142	Пирит Pyrite 2/71.6
Алифатические углеводороды/Aliphatic hydrocarbons					
Парафины (алканы)/Paraffins (alkanes)	CH ₄ –C ₁₈ H ₃₈	16–226	0,23 (16)	1,37 (24)	0,59 (21)
Олефины (алкены)/Olefins (alkenes)	C ₂ H ₂ –C ₁₇ H ₃₄	56–210	0,08 (17)	0,54 (34)	0,52 (37)
Циклические углеводороды/Cyclic hydrocarbons					
Циклоалканы, циклоалкены, арены, ПАУ Cycloalkanes, cycloalkenes, arenes, PAH	C ₆ H ₆ –C ₁₆ H ₂₆	78–204	0,20 (19)	0,40 (28)	0,78 (48)
Кислородсодержащие углеводороды/Oxygenated hydrocarbons					
Спирты/Alcohols	CH ₄ O–C ₁₁ H ₁₆ O	32–108	0,14 (7)	0,41 (10)	0,23 (11)
Эфиры/Ethers and esters	C ₄ H ₆ O ₂ –C ₁₆ H ₂₂ O ₄	86–232	2,75 (15)	3,19 (23)	7,82 (27)
Альдегиды/Aldehydes	CH ₂ O–C ₁₅ H ₃₀ O	44–226	1,67 (24)	1,01 (24)	1,18 (27)
Кетоны/Ketones	C ₃ H ₆ O–C ₁₆ H ₃₂ O	58–240	0,13 (18)	1,20 (22)	0,44 (22)
Карбоновые кислоты/Carboxylic acids	C ₂ H ₄ O ₂ –C ₁₅ H ₃₀ O ₂	60–228	0,38 (13)	1,85 (16)	1,12 (15)
Гетероциклические соединения/Heterocyclic hydrocarbons					
Диоксаны, диоксины, фураны Dioxanes, dioxins, furans	C ₄ H ₄ O–C ₁₃ H ₂₂ O	88–138	0,01 (8)	0,03 (6)	0,05 (24)
Азотсодержащие соединения/Nitrogenated compounds					
Азот, аммиак, нитрилы/N ₂ , ammonia, nitriles	N ₂ –C ₁₀ H ₂₁ NO	28–171	0,79 (16)	2,33 (16)	0,28 (20)
Серосодержащие соединения/Sulfonated compounds					
H ₂ S, SO ₂ , CS ₂ , COS, тиофены(thiophenes)	H ₂ S–C ₁₄ H ₂₄ S	34–210	1,96 (19)	1,74 (12)	9,58 (31)
Фосфоросодержащие соединения/Phosphorus compounds					
Фосфаты/Phosphate		182–266	0,06 (3)	0,01 (1)	–
Неорганические соединения/Inorganic compounds					
CO ₂		44	82,71	2,15	7,35
H ₂ O		18	8,89	83,77	70,06
Ar		40	<0,01	0,01	<0,01
Общее количество компонентов/Number of components			178	219	286
Алканы/алкены/Alkanes/alkenes			3,08	2,51	1,13
CO ₂ /(CO ₂ +H ₂ O)			0,90	0,02	0,09
Σ(C ₅ –C ₁₇)/Σ(C ₁ –C ₄)			1,75	2,75	21,65

Примечание: Относительные концентрации (отн. %) летучих компонентов в изучаемой смеси были получены методом нормализации площадей индивидуальных хроматографических пиков к общей площади всех пиков. MW – номинальная масса. В номер образца: скважина/глубина–разведочная линия.

Note: Relative concentrations (rel. %) of volatile components in the mixture under study were obtained by normalizing the areas of individual chromatographic peaks to the total area of all peaks. MW – nominal weight. In sample number: well/depth–exploration line.

Такие компоненты были определены и во флюидах Аяхтинского месторождения. Присутствие карбоновых кислот во флюиде, как известно [57], благотворно влияет на подвижность флюида. Наличие углеводородов в минералообразующих флюидах золоторудных месторождений отмечается на других золоторудных месторождениях Енисейского кряжа [22, 24, 26, 27, 51]. В мировой практике термобаро-геохимических исследований отмечается наличие на месторождениях Черри Хилл (США) [58], Детур Лэйк и Перрон (Канада) [59, 60]. Таким образом, результаты приведенных исследований подтверждают, что органические соединения участвуют в формировании золотоносных руд [61].

Наличие молекулярного азота и других азотсодержащих соединений во флюидных включениях в кварце и сульфидах (0,3–2,3 отн. %), вероятно, связано с химическими реакциями между флюидом и аммонийсодержащими силикатами вмещающих пород (слюды, калиевый полевой шпат), в которых

азот в форме NH₄⁺ изоморфно замещает калий [62]. Соединения серы, доля которых во флюиде составляет до 9,6 отн. %, благотворно влияют на растворимость комплексов золота [63].

Изотопное исследование углерода (δ¹³C) углекислоты флюидных включений в кварце месторождения Аяхта показали значения в интервале от –12,5 до –21,9 ‰. Углерод с такими значениями тяжелее органического углерода терригенных толщ, для которого δ¹³C попадает в интервал от –22,4 до –28,7 ‰ [64, 65]. Значения δ³⁴S в пирите и пирротине находятся в интервале от +6,6 до +9,5 ‰. Сера в сульфидах месторождения попадает в интервал гидротермально-осадочных сульфидов [13]. Таким образом, результаты изотопно-геохимических исследований указывают на коровую природу минералообразующих флюидов, сформировавших месторождение Аяхта. Наиболее вероятным механизмом образования флюидов могла быть деволатилизация (высвобождение летучих) глубинных оса-

дочных пород во время тектонической активизации Енисейского кряжа.

Заключение

Результаты проведенного исследования демонстрируют, что флюиды, сформировавшие золотоносные кварцево-жильные зоны Аяхтинского месторождения, имеют разнообразный многокомпонентный состав (до 286 соединений). В целом минералообразующий флюид можно охарактеризовать как водно-углекислотный с примесью органических соединений.

Формирование рудной зоны месторождения Аяхта проходило при температуре 121–424 °С и

давлении 0,5–1,5 кбар. Соленость флюида была умеренной и достигала 25,5 мас. % (NaCl–экв.).

Углеводороды, их производные, S-, N- и галогенсодержащие соединения принимали участие в формировании месторождения, благотворно влияя на растворимость золота в минералообразующем растворе и перенос рудных компонентов.

Изотопно-геохимические характеристики ($\delta^{13}\text{C} = -12,5 \dots -21,9 \text{ ‰}$, $\delta^{34}\text{S} = +6,6 \dots +9,5 \text{ ‰}$) указывают на метаморфогенно-коровую природу флюидов. Генерация флюидов происходила в процессе деволатилизации глубинных пород в периоды тектонических событий на Енисейском кряже.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бровков Г.Н., Ли Л.В. Геология и металлогения Енисейского рудного пояса. – Красноярск: Изд-во КНИИГиМС, 1985. – 291 с.
2. Поляков А.В. Оценка эффективности освоения группы золоторудных месторождений на примере Раздолинского рудного узла // Состояние и проблемы геологического изучения недр и развития минерально-сырьевой базы Красноярского края. – Красноярск: Изд-во КНИИГиМС, 2003. – С. 239–241.
3. Модели месторождений золота Енисейской Сибири / С.С. Сердюк, Ю.Е. Коморовский, А.И. Зверев, В.К. Ояберг, В.С. Власов, В.Е. Бабушкин, В.А. Кирилленко, С.А. Землянский. – Красноярск, СФУ, 2010. – 584 с.
4. Горячев Н.А. Месторождения золота в истории Земли // Геология рудных месторождений. – 2019. – Т. 61. – № 6. – С. 3–18. DOI: 10.31857/S0016-77706163-18
5. Золоторудная металлогения Енисейского кряжа: геолого-структурная позиция, структурные типы рудных полей / А.М. Сазонов, А.А. Ананьев, Т.В. Полева, А.Н. Хохлов, В.С. Власов, Е.А. Звягина, А.В. Фёдорова, П.А. Тишин, С.И. Леонтьев // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технология. – 2010. – Т. 3. – № 4. – С. 371–395.
6. Рудная минерализация месторождения Ожерелье: сопоставление с объектами «сухоложского» типа / А.Е. Будак, Ю.И. Тарасова, Н.А. Горячев, А.В. Блинов, А.В. Игнатьев, Т.А. Веливецкая, В.Д. Абрамова, Д.Ю. Щербakov // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2023. – Т. 509. – № 2. – С. 198–207. DOI 10.31857/S268673972260223X
7. Сафонов Ю.Г. Золоторудные и золотосодержащие месторождения мира – генезис и металлогенический потенциал // Геология руд. месторождений. – 2003. – Т. 45. – № 4. – С. 305–320.
8. Goldfarb R.J., Groves D.I. Orogenic gold: common vs. evolving fluid and metal sources through time // Lithos. – 2015. – Vol. 223. – P. 2–26. DOI: 10.1016/j.lithos.2015.07.011
9. Gaboury D., MacKenzie D., Craw D. Fluid volatile composition associated with orogenic gold mineralization, Otago Schist, New Zealand: implications of H_2 and C_2H_6 for fluid evolution and gold source // Ore Geology Reviews. – 2021. – Vol. 133. – 104086. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104086
10. Mineral paragenesis, formation stages and trace elements in sulfides of the Olympiada Gold Deposit (Yenisei Ridge, Russia) / S.A. Silyanov, A.M. Sazonov, E.A. Naumov., B.M. Lobastov, Y.A. Zvyagina, D.A. Artemyev, N.A. Nekrasova, F. Pirajno // Ore Geology Reviews. – 2022. – 104750. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104750
11. Ли Л.В. Золоторудные месторождения Енисейского кряжа // Геология и полезные ископаемые Центральной Сибири. – Красноярск: КНИИГиМС, 1997. – С. 184–222.
12. Geochemical and isotopic properties of fluids from gold-bearing and barren quartz veins of the Sovetskoye gold deposit (Siberia, Russia) / A.A. Tomilenko, N.A. Gibsher, Y.V. Dublyansky, L. Dallai // Econ. Geol. – 2010. – Vol. 105. – № 2. – P. 375–394. DOI: 10.2113/gsecongeo.105.2.375
13. Кряжев С.Г. Генетические модели и критерии прогноза золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. – М., 2017. – 52 с.
14. Шапаренко Е.О. Физико-химические условия формирования золоторудных месторождений Благодатное и Доброе (Енисейский кряж): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 2022. – 22 с.
15. Бортников Н.С., Прокофьев В.Ю., Раздолина И.В. Генезис золото-кварцевого месторождения Чармитан (Узбекистан) // Геология рудных месторождений. – 1996. – Т. 38. – № 3. – С. 238–256.
16. Кряжев С.Г. Изотопно-геохимический режим формирования золоторудного месторождения Мурунтау. – М.: ЦНИГРИ, 2002. – 91 с.
17. Сафонов Ю.Г., Прокофьев В.Ю. Модель конседиментационного гидротермального образования золотоносных рифов бассейна Витватерсранд // Геология руд. месторождений. – 2006. – Т. 48. – № 6. – С. 475–511.
18. Физико-химические параметры и возраст формирования Васильковского золоторудного месторождения (Северный Казахстан) / М.О. Хоменко, Н.А. Гибшер, А.А. Томиленко, Т.А. Бульбак, М.А. Рябуха, Д.В. Семенова // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57. – № 12. – С. 2192–2217. DOI: 10.15372/GiG20161206
19. Характеристика металоносных флюидов и возраст формирования золоторудного месторождения Панимба (Енисейский кряж, Россия) / Н.А. Гибшер, М.А. Рябуха, А.А. Томиленко, А.М. Сазонов, М.О. Хоменко, Т.А. Бульбак, Н.А. Некрасова // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 11. – С. 1721–1741. DOI: 10.15372/GiG20180807

20. Linking lithospheric thinning and magmatic evolution of late Jurassic to early cretaceous granitoids in the Jiaobei Terrane, southeastern North China Craton / X.H. Li, H.R. Fan, F.F. Hu, P. Hollings, K.F. Yang, X. Liu // *Lithos.* – 2019. – Vol. 325. – P. 280–296. Doi: 10.1016/j.lithos.2018.11.022
21. Кряжев С.Г., Фридовский В.Ю. Флюидный режим формирования орогенных золоторудных месторождений Яно-Колымского пояса // *Тихоокеанская геология.* – 2023. – Т. 42. – № 6. – С. 118–130. DOI: 10.30911/0207-4028-2023-42-6-118-130
22. Олимпиадинское золоторудное месторождение (Енисейский край): температура, давление, состав рудообразующих флюидов, $\delta^{34}\text{S}$ сульфидов, $^3\text{He}/^4\text{He}$ флюидов, Ar-Ar возраст и продолжительность формирования / Н.А. Гибшер, А.А. Томиленко, А.М. Сазонов, Т.А. Бульбак, М.А. Рябуха, С.А. Сильянов, Н.А. Некрасова, М.О. Хоменко, Е.О. Шапаренко // *Геология и геофизика.* – 2019. – Т. 60. – № 9. – С. 1310–1329. DOI: 10.15372/GiG2019073
23. High solubility of gold in H_2S - H_2O - NaCl fluids at 100–200 MPa and 600–800 °C: a synthetic fluid inclusion study / M. Hu, I-M. Chou, R. Wang, L. Shang, C. Chen // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 2022. – Vol. 330. – P. 116–130. DOI: 10.1016/j.gca.2022.03.006
24. Parameters for the formation of the Dobroe Gold Deposit (Yenisei Ridge, Russia): evidence from fluid inclusions and S–C isotopes / E. Shaparenko, N. Gibsher, M. Khomenko, A. Tomilenko, A. Sazonov, T. Bulbak, S. Silyanov, M. Petrova, M. Ryabukha // *Minerals.* – 2023. – Vol. 13. – № 1. – P. 11. DOI: 10.3390/min13010011
25. Characterization of deep ore-forming fluid in the Zhaoxian gold deposit within the Jiaodong gold province: insights from quartz vein fluid inclusion, in-situ trace element analysis, and S isotopic composition in pyrite / Z. Zhang, Q. Zeng, H.-R. Fan, R. Bai, J. Wu, X. Li, Y. Zhang, L. Huang // *Front. Earth Sci.* – 2024. – 12:1354261. DOI: 10.3389/feart.2024.1354261
26. Углеводороды во флюидных включениях из самородного золота, пирита и кварца месторождения Советское (Енисейский край, Россия) по данным беспирилизной газовой хромато-масс-спектрометрии / Т.А. Бульбак, А.А. Томиленко, Н.А. Гибшер, А.М. Сазонов, Е.О. Шапаренко, М.А. Рябуха, М.О. Хоменко, С.А. Сильянов, Н.А. Некрасова // *Геология и Геофизика.* – 2020. – Т. 61. – № 11. – С. 1535–1560. DOI: 10.15372/GiG2020145
27. Ore-bearing fluids of the Blagodatnoye Gold Deposit (Yenisei Ridge, Russia): results of fluid inclusion and isotopic analyses / E. Shaparenko, N. Gibsher, A. Tomilenko, A. Sazonov, T. Bulbak, M. Ryabukha, M. Khomenko, S. Silyanov, N. Nekrasova, M. Petrova // *Minerals.* – 2021. – № 11. – P. 1090. DOI: 10.3390/min11101090
28. Сердюк С.С., Забияка А.И., Гусаров Ю.В. Золото // *Тектоника и металлогения Нижнего Приангарья.* – Красноярск: Изд-во КНИИГиМС, 2004. – С. 203–221.
29. Натаров В.Н. Геохимия Аяктынского месторождения рудного золота // *Труды треста золоторазведка и института НИГРИЗОЛОТО.* – М.; Л.: Изд-во ОНТИ НКТП СССР Главная редакция геолого-разведочной литературы, 1937. – С. 3–48.
30. Бернштейн П.С., Петровская Н.В. Золоторудное месторождение Советское (Енисейский край) // *Геология главнейших золоторудных месторождений.* – М.: Изд-во «Наука», 1954. – Т. 6. – 162 с.
31. Верниковский В.А., Верниковская А.Е. Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского края // *Геология и геофизика.* – 2006. – Т. 47. – № 1. – С. 35–52.
32. Неволько П.А., Борисенко А.С. Сурьмяная минерализация на золото-сульфидных месторождениях Енисейского края // *Разведка и охрана недр.* – 2009. – № 2. – С. 11–14.
33. Секретарев М.Н., Липишанов А.П. Прогнозно-поисковые работы на рудное золото в пределах Аяктынского рудного узла (Южно-Енисейский район): отчет о результатах работ за 2005–2006 гг. – Красноярск, 2017. – 183 с.
34. Полева Т.В., Сазонов А.М. Геология золоторудного месторождения Благодатное в Енисейском крае. – М.: Изд-во «Экономическая газета», 2012. – 290 с.
35. Сердюк С.С. Попутинский тип золото-сульфидного оруденения Енисейской провинции // *Сборник докладов XI международного конгресса «Цветные металлы и минералы».* – Красноярск, 2019. – С. 700–712.
36. Bakker R.J. Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties // *Chemical Geology.* – 2003. – Vol. 194. – P. 3–23.
37. Steele-MacInnis M., Lecumberri-Sanchez P., Bodnar R.J. A numerical model to estimate trapping conditions of fluid inclusions that homogenize by halite disappearance // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 2012. – Vol. 92. – P. 14–22. DOI: 10.1016/j.gca.2012.05.044
38. Борисенко А.С. Изучение солевого состава растворов газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // *Геология и геофизика.* – 1977. – № 8. – С. 16–27.
39. Киргинцев А.Н., Трушников Л.И., Лаврентьева В.Г. Растворимость неорганических веществ в воде. Справочник. – Л.: Изд-во «Химия», 1972. – 247 с.
40. Burke E.A. Raman microspectroscopy of fluid inclusions // *Lithos.* – 2001. – Vol. 55. – P. 139–158.
41. Frezzotti M.L., Tecce F., Casagli A. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis // *Journal of Geochemical Exploration.* – 2012. – Vol. 112. – P. 1–20. DOI: 10.1016/j.jgexplo.2011.09.009
42. Пиритизированные двусторчатые моллюски из верхнего триаса орогенного золото-сурьмяного месторождения Сентачан (Восточная Якутия): минеральный состав и изотопный состав серы / Г.А. Пальянова, Е.С. Соболев, В.Н. Реутский, Н.С. Бортникова // *Геология рудных месторождений.* – 2016. – Т. 58. – № 6. – С. 513–521. DOI: 10.7868/S0016777016060071
43. The role of metamorphic devolatilization in building orogenic gold deposits within paleoproterozoic organic-rich sediments: P-T-X thermobarometric and carbon isotopic constraints from the Chertovo Koryto Deposit (Eastern Siberia) / Y. Tarasova, A. Budyak, N. Goryachev, S. Skuzovatov, V. Reutsky, B. Gareev, G. Batalin, A. Nizamova // *Russ. J. of Pac. Geol.* – 2022. – Vol. 16. – P. 387–404. DOI: 10.1134/S1819714022040078
44. Ridley J.R., Diamond L.W. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models // *Rev. Econ. Geol.* – 2000. – Vol. 13. – P. 141–162.
45. A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration / D.I. Groves, M. Santosh, J. Deng, Q. Wang, L. Yang, L. Zhang // *Mineralium Deposita.* – 2020. – Vol. 55. – P. 275–292.
46. Томиленко А.А., Гибшер Н.А. Особенности состава флюидов в рудных и безрудных зонах Советского кварц-золоторудного месторождения (по данным изучения флюидных включений) // *Геохимия.* – 2001. – № 2. – С. 167–177.

47. Золотоносный арсенопирит и условия его образования на золоторудных месторождениях Олимпиада и Ведуга (Енисейский край, Сибирь) / А.Д. Генкин, Ф.Е. Вагнер, Т.Л. Крылова, А.И. Цепин // Геология рудных месторождений. – 2002. – № 44. – С. 59–76.
48. Сурьма в гидротермальных процессах: растворимость, условия переноса, металлоносность растворов / А.А. Оболенский, Л.В. Гущина, А.С. Борисенко, А.А. Боровиков, Г.Г. Павлова // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48. – № 12. – С. 1276–1288.
49. Золоторудное месторождение Герфед: характеристика флюидов и РТ-условия образования кварцевых жил (Енисейский край, Россия) / Н.А. Гибшер, А.А. Томиленко, А.М. Сазонов, М.А. Рябуха, А.Л. Тимкина // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 11. – С. 1851–1867.
50. РТХ–параметры метаморфогенных и гидротермальных флюидов; изотопия и возраст формирования Богунайского золоторудного месторождения южной части Енисейского края (Россия) / М.А. Рябуха, Н.А. Гибшер, А.А. Томиленко, Т.А. Бульбак, М.О. Хоменко, А.М. Сазонов // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – № 6. – С. 1153–1172.
51. Рудоносные флюиды золоторудного месторождения Эльдorado / Н.А. Гибшер, М.А. Томиленко, А.М. Сазонов, Т.А. Бульбак, М.О. Хоменко, М.А. Рябуха, Е.О. Шапаренко, С.А. Сильянов, Н.А. Некрасова // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59. – № 8. – С. 1220–1237. DOI: 10.15372/GiG20180807
52. Рёддер Э. Флюидные включения в минералах. – М.: Изд-во «Мир», 1987. – Т. 1. – 558 с.
53. Phillips G.N., Evans K.A. Role of CO₂ in the formation of gold deposits // Nature. – 2004. – Vol. 429. – P. 860–863. DOI: 10.1038/nature02644
54. Баликов С.В., Деметьев В.Е. Золото: свойства. Геохимические аспекты. – Иркутск: Иргиредмет, 2015. – 328 с.
55. Особенности определения металлоорганических соединений в углеродистых веществах черно-сланцевых отложений с применением ИК-спектроскопии диффузного отражения / В.П. Иванов, Т.В. Тимкин, Д.А. Болдина, М.Г. Пахтаева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 141–156. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4462
56. Hydrocarbons as ore fluids / A.A. Migdisov, X. Guo, H. Xu, A.E. Williams-Jones, C.J. Sun, O. Vasyukova, I. Sugiyama, S. Fuchs, K. Pearce, R. Roback // Geochem. Persp. Let. – 2017. – Vol. 5. – P. 47–52.
57. Organic geochemistry and mineralogy. I. Characterization of organic matter associated with metal deposits / P.F. Greenwood, J.J. Brocks, K. Grice, L. Schwark, J.M. Dick, K.A. Evans // Ore Geol. Rev. – 2013. – № 50. – P. 1–27. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2012.10.004
58. Percy E.C., Burruss R.C. Hydrocarbons and gold mineralization in the hot-spring deposit at Cherry Hill, California // Bitumens in Ore Deposits. Special Publication of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits. – Berlin, Heidelberg: Springer, 1993. – Vol. 9. – P. 117–137. DOI: 10.1007/978-3-642-85806-2_8
59. Gaboury D. Does gold in orogenic deposits come from pyrite in deeply buried carbon-rich sediments?: Insight from volatiles in fluid inclusions // Geology. – 2013. – Vol. 41 (12). – P. 1207–1210. DOI: 10.1130/G34788.1
60. The Perron gold deposit, Archean Abitibi belt, Canada: Exceptionally high-grade mineralization related to higher gold-carrying capacity of hydrocarbon-rich fluids / D. Gaboury, D. Genna, J. Trottier, M. Bouchard, J. Augustin, K. Malcolm // Minerals. – 2021. – Vol. 11. – № 10. – P. 1066. DOI: 10.3390/min11101066
61. Органическое вещество как формирующий и транспортирующий агент в процессах переноса ЭПГ и золота / И.В. Кубракова, С.Н. Набиуллина, Д.В. Пряжникова, М.С. Киселева // Геохимия. – 2022. – Т. 67. – № 8. – С. 741–749.
62. Bottrell S.H., Miller M.F. The geochemical behaviour of nitrogen compounds during the formation of black shale hosted quartz-vein gold deposits, north Wales // Applied Geochemistry. – 1990. – Vol. 5. – Iss. 3. – P. 289–296.
63. Sulfur radical species form gold deposits on Earth / G.S. Pokrovski, M.A. Kokh, D. Guillaume, A.Y. Borisova, P. Gisquet, J.-L. Hazemann, E. Lahera, W. del Net, O. Proux, D. Testemale et al. // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2015. – Vol. 112. – P. 13484–13489. DOI: 10.1073/pnas.1506378112
64. Галимов Э.М. Геохимия стабильных изотопов углерода. – М.: Изд-во «Недра», 1968. – 226 с.
65. Хёвс Й. Геохимия стабильных изотопов. – М.: Изд-во «Мир», 1983. – 200 с.

Информация об авторах

Марина Александровна Петрова, аспирант, инженер лаборатории термобарогеохимии Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3. petrovama@igm.nsc.ru

Надежда Александровна Гибшер, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории термобарогеохимии Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3. gibsher@igm.nsc.ru

Елена Олеговна Шапаренко, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории термобарогеохимии Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3. shaparenko@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6421-433X>

Анатолий Алексеевич Томиленко, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник лаборатории термобарогеохимии Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3. tomilen@igm.nsc.ru

Тарас Александрович Бульбак, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории термобарогеохимии Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3. taras@igm.nsc.ru

Анатолий Максимович Сазонов, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии, минералогии и петрографии Института цветных металлов Сибирского Федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. ASazonov@sfu-kras.ru

Маргарита Олеговна Хоменко, младший научный сотрудник лаборатории термобарогеохимии Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Колтунга, 3. homenko@igm.nsc.ru

Сергей Анатольевич Сильянов, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии, минералогии и петрографии Института цветных металлов Сибирского Федерального университета, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79. silyanov-s@mail.ru

Поступила в редакцию: 02.05.2024

Поступила после рецензирования: 24.05.2024

Принята к публикации: 24.01.2025

REFERENCES

1. Brovko G.N., Li L.V. *Geology and metallogeny of the Yenisei Ore Belt*. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Publ., 1985. 291 p. (In Russ.)
2. Polyakov A.V. Assessment of efficiency of development of the group of gold deposits by the example of Razdolinsky ore cluster. *State and Problems of Geological Study of Subsoil and Development of Mineral and Raw Material Base of Krasnoyarsk Region*. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Publ., 2003. pp. 239–241. (In Russ.)
3. Serdyuk S.S., Komorovsky Y.E., Zverev A.I., Oyaber V.K., Vlasov V.S., Babushkin V.E., Kirillenko V.A., Zemlyansky S. *Models of gold deposits in Yenisei Siberia*. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2010. 584 p. (In Russ.)
4. Goryachev N.A. Gold deposits in the Earth's history. *Geol. Ore Depos.*, 2019, vol. 61 (6), pp. 495–511. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0016-77706163-18
5. Sazonov A.M., Ananyev A.A., Poleva T.V., Khokhlov A.N., Vlasov V.S., Zvyagina E.A., Fedorova A.V., Tishin P.A., Leontiev S.I. Gold ore metallogeny of the Yenisei ridge: Geological-structural position, structural types of ore fields. *Tekhnika I Tekhnologii Zh.*, 2010, vol. 3 (4), pp. 371–395. (In Russ.)
6. Budyak A.E., Tarasova Yu.I., Goryachev N.A., Blinov A.V., Ignatiev A.V., Velivetskaya T.A., Abramova V.D., Shcherbakov D.Yu. Ore mineralization of the Ozherelye deposit: comparison with objects of the “Sukhoi Log” type. *Doklady Earth Sciences*, 2023, vol. 509, no. 2, pp. 198–207. (In Russ.) DOI: 10.31857/S268673972260223X
7. Safonov Yu.G. Gold and gold-bearing deposits of the world: genesis and metallogenic potential. *Geol. Ore Depos.*, 2003, vol. 45 (4), pp. 265–278. (In Russ.)
8. Goldfarb R.J., Groves D.I. Orogenic gold: common vs. evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*, 2015, vol. 223, pp. 2–26. DOI: 10.1016/j.lithos.2015.07.011
9. Gaboury D., MacKenzie D., Craw D. Fluid volatile composition associated with orogenic gold mineralization, Otago Schist, New Zealand: implications of H₂ and C₂H₆ for fluid evolution and gold source. *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 133, 104086. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104086
10. Silyanov S.A., Sazonov A.M., Naumov E.A., Lobastov B.M., Zvyagina Y.A., Artemyev D.A., Nekrasova N.A., Pirajno F. Mineral paragenesis, formation stages and trace elements in sulfides of the Olympiada Gold Deposit (Yenisei Ridge, Russia). *Ore Geology Reviews*, 2022, 104750. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104750
11. Li L.V. Gold deposits of the Yenisei Ridge. *Geology and minerals of Central Siberia*. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Publ., 1997. pp. 184–222. (In Russ.)
12. Tomilenko A.A., Gibsher N.A., Dublyansky, Y.V., Dallai L. Geochemical and isotopic properties of fluids from gold-bearing and barren quartz veins of the Sovetskoye gold deposit (Siberia, Russia). *Econ. Geol.*, 2010, vol. 105 (2), pp. 375–394. DOI: 10.2113/gsecongeo.105.2.375
13. Kryazhev S.G. *Genetic models and criteria for prediction of gold deposits in carbon-terrigenous complexes*. Dr. Diss. Abstract. Moscow, 2017. 52 p. (In Russ.)
14. Shaparenko E.O. Physico-chemical conditions of the Blagodantnoe and Dobroe Gold deposits formation (Yenisei Ridge). Cand. Diss. Abstract. Novosibirsk, 2022. 22 p. (In Russ.)
15. Bortnikov N.S., Prokovev V.Y., Razdolina N.V. Origin of the Charmitan gold-quartz deposit (Uzbekistan). *Geol. Ore Depos.*, 1996, vol. 38, pp. 238–256. (In Russ.)
16. Kryazhev S.G. *Isotope-geochemical regime of the formation of the gold ore deposit Muruntau*. Moscow, TsNIGRI Publ., 2002. 91 p. (In Russ.)
17. Safonov Y.G., Prokofev, V.Yu. Model of cosedimentation hydrothermal formation of gold-bearing reefs of the Witwatersrand basin. *Geol. Ore Depos.*, 2006, vol. 48 (6), pp. 475–511. (In Russ.)
18. Khomenko M.O., Gibsher N.A., Tomilenko A.A., Bulbak T.A., Ryabukha M.A., Semenova D.V. Physicochemical parameters and age of the Vasilkovskoe gold deposit (Northern Kazakhstan). *Russ. Geol. Geophys.*, 2016, vol. 57, pp. 1728–1749. (In Russ.) DOI: 10.1016/j.rgg.2016.04.010
19. Gibsher N.A., Ruabukha M.A., Tomilenko A.A., Sazonov A.M., Khomenko M.O., Bul'bak T.A., Nekrasova N.A. Metal-bearing fluids and the age of the Panimba gold deposits (Yenisei Ridge, Russia). *Russ. Geol. Geophys.*, 2017, vol. 58, pp. 1366–1383. (In Russ.) DOI: 10.1016/j.rgg.2017.11.004
20. Li X.H., Fan H.R., Hu F.F., Hollings P., Yang K.F., Liu X. Linking lithospheric thinning and magmatic evolution of late Jurassic to early cretaceous granitoids in the Jiaobei Terrane, southeast North China Craton. *Lithos*, 2019, vol. 325, pp. 280–296. DOI: 10.1016/j.lithos.2018.11.022
21. Kryazhev S.G., Fridovsky V.Y. Fluid regime of orogenic gold deposits formation within the Yana–Kolyma gold-bearing belt. *J. Geol. Pac. Ocean*, 2023, vol. 42 (6), pp. 118–130. (In Russ.) DOI: 10.30911/0207-4028-2023-42-6-118-130
22. Gibsher N.A., Tomilenko A.A., Sazonov A.V., Bulbak T.A., Ryabukha M.A., Silyanov S.A., Nekrasova N.A., Khomenko M.O., Shaparenko E.O. The Olimpiadinskoe Gold Deposit (Yenisei Ridge): temperature, pressure, composition of ore-forming fluids, $\delta^{34}\text{S}$ in sulfides, $^3\text{He}/^4\text{He}$ of fluids, Ar–Ar age and duration of formation. *Russ. Geol. Geophys.*, 2019, vol. 60 (9), pp. 1043–1059. (In Russ.) DOI: 10.15372/GiG2019073

23. Hu M., Chou I-M., Wang R., Shang L., Chen C. High solubility of gold in $H_2S-H_2O\pm NaCl$ fluids at 100–200 MPa and 600–800 °C: a synthetic fluid inclusion study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2022, vol. 330, pp. 116–130. DOI: 10.1016/j.gca.2022.03.006
24. Shaparenko E., Gibsher N., Khomenko M., Tomilenko A., Sazonov A., Bulbak T., Silyanov S., Petrova M., Ryabukha M. Parameters for the formation of the Dobroe Gold deposit (Yenisei Ridge, Russia): evidence from fluid inclusions and S–C isotopes. *Minerals*, 2023, vol. 13 (1), p. 11. DOI: 10.3390/min13010011
25. Zhang Z., Zeng Q., Fan H.-R., Bai R., Wu J., Li X., Zhang Y., Huang L. Characterization of deep ore-forming fluid in the Zhaoxian gold deposit within the Jiaodong gold province: insights from quartz vein fluid inclusion, in-situ trace element analysis, and S isotopic composition in pyrite. *Front. Earth Sci*, 2024, 12:1354261. DOI: 10.3389/feart.2024.1354261
26. Bulbak T.A., Tomilenko A.A., Gibsher N.A., Sazonov A.M., Shaparenko E.O., Ryabukha M.A., Khomenko M.O., Silyanov S.A., Nekrasova N.A. Hydrocarbons in fluid inclusions from native gold, pyrite, and quartz of the Sovetskoe Deposit (Yenisei Ridge, Russia) according to pyrolysis-free gas chromatography-mass spectrometry data. *Russ. Geol. Geophys.*, 2020, vol. 61 (11), pp. 1260–1282. (In Russ.) DOI: 10.15372/GiG2020145
27. 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 Blagodatnoe Gold Deposit (Yenisei Ridge, Russia): results of fluid inclusion and isotopic analyses. *Minerals*, 2021, no. 11, p. 1090. DOI: 10.3390/min11101090
28. Serdyuk S.S., Zabiya A.I., Gusarov Yu.V. Gold. *Tectonics and metallogeny of the Lower Angara region*. Krasnoyarsk, KNIIGIMS Publ., 2004. pp. 203–221. (In Russ.)
29. Natarov V.N. Geochemistry of the Ayakhtinskoe ore gold deposit. *Proceedings of the Gold Prospecting Trust and the NIGRIZOLOTO Institute*. Moscow, Leningrad, ONTI NKTP of the USSR Publ., 1937. pp. 3–48. (In Russ.)
30. Bernstein P.S., Petrovskaya N.V. *Sovetskoe gold-ore deposit (Yenisei Ridge); Geology of the major gold-ore deposits of the USSR*. Moscow, Nauka Publ., 1954. Vol. 6. 162 p. (In Russ.)
31. Vernikovskiy V.A. Vernikovskaya A.E. Tectonics and evolution of granitoid magmatism in the Yenisei Ridge. *Russ. Geol. Geophys.*, 2006, vol. 47 (1), pp. 35–52. (In Russ.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00337-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00337-8)
32. Nevolko P.A., Borisenko A.S. Stibium mineralization at the gold-sulfide deposits of the Yenisei Range. *Geology and methods of prospecting and exploration of deposits*, 2009, vol. 2, pp. 11–14. (In Russ.)
33. Sekretarev M.N., Lipishanov A.P. *Forecasting and prospecting work for ore gold within the Ayakhtinsky ore cluster (South Yenisei region): report on the results of work for 2005–2006*. Krasnoyarsk, 2017. 183 p. (In Russ.)
34. Poleva T.V., Sazonov A.M. *Geology of the Blagodatnoe Gold Deposit in the Yenisei Ridge*. Moscow, ITKOR Publ., 2012. 290 p. (In Russ.)
35. Serdyuk S.S. Poputninsky type of gold-sulfide mineralization of the Yenisei province. *Collection of reports from the XI International Congress. Non-Ferrous Metals and Minerals*. Krasnoyarsk, 2019. pp. 700–712. (In Russ.)
36. Bakker R.J. Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties. *Chemical Geology*, 2003, vol. 194, pp. 3–23.
37. Steele-MacInnis M., Lecumberri-Sanchez P., Bodnar R.J. A numerical model to estimate trapping conditions of fluid inclusions that homogenize by halite disappearance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, vol. 92, pp. 14–22. DOI: 10.1016/j.gca.2012.05.044
38. Borisenko A.S. Studies of salinity of gas-liquid inclusions in minerals by the cryometric method. *Russ. Geol. Geophys.*, 1977, no. 8, pp. 16–27. (In Russ.)
39. Kirgintsev A.N., Trushnikova L.I., Lavrentieva V.G. *Water solubility of inorganic compounds. Handbook*. Leningrad, Khimiya Publ., 1972. 247 p. (In Russ.)
40. Burke E.A.J. Raman microspectrometry of fluid inclusions. *Lithos*, 2001, vol. 55, pp. 139–158. DOI: 10.1016/S0024-4937(00)00043-8
41. Frezzotti M.L., Tecce F., Casagli A. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, vol. 112, pp. 1–20. DOI: 10.1016/j.gexplo.2011.09.009
42. Palyanova G.A., Reutsky V.N., Sobolev E.S., Bortnikov N.S. Upper Triassic pyritized bivalve mollusks from the Sentachan orogenic gold-antimony deposit, Eastern Yakutia: mineralogy and sulfur isotopic composition. *Geol. Ore Depos.*, 2016, vol. 58 (6), pp. 513–521. (In Russ.) DOI: 10.1134/S1075701516060064
43. Tarasova Y., Budyak A., Goryachev N., Skuzovatov S., Reutsky V., Gareev B., Batalin G., Nizamova A. The role of metamorphic devolatilization in building orogenic gold deposits within paleoproterozoic organic-rich sediments: P-T-X Thermobarometric and carbon isotopic constraints from the Chertovo Koryto Deposit (Eastern Siberia). *Russ. J. of Pac. Geol*, 2022, vol. 16, pp. 387–404. DOI: 10.1134/S1819714022040078
44. Ridley J.R., Diamond L.W. Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models. *Rev. Econ. Geol*, 2000, vol. 13, pp. 141–162.
45. 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, vol. 55, pp. 275–292.
46. Tomilenko A.A., Gibsher N.A. Composition of fluids in mineralized and barren zones of the Sovetskoe quartz-gold deposit, Yenisei Ridge as Deduced from Fluid Inclusions Study. *Geochem*, 2001, no. 2, pp. 167–177. (In Russ.)
47. Genkin A.D., Wagner F.E., Krylova T.L., Tsepina A.I. Gold-bearing arsenopyrite and its formation condition at the Olimpiada and Veduga gold deposits (Yenisei ridge, Siberia). *Geol. Ore Depos.*, 2002, no. 44, pp. 59–76. (In Russ.)
48. Obolensky A.A., Gushchina L.V., Borisenko A.S., Borovikov A.A., Pavlova G.G. Antimony in hydrothermal processes: solubility, conditions of transfer, and metal-bearing capacity of solutions. *Russ. Geol. Geophys.*, 2007, vol. 48 (12), pp. 992–1001. (In Russ.) DOI: 10.1016/j.rgg.2007.11.006
49. Gibsher N.A., Tomilenko A.A., Sazonov A.M., Ryabukha M.A., Timkina A.L. The Gerfed gold deposit: fluids and PT-conditions for quartz vein formation (Yenisei Ridge, Russia). *Russ. Geol. Geophys.*, 2011, vol. 52, pp. 1461–1473. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.10.014>
50. Ryabukha M.A., Gibsher N.A., Tomilenko A.A., Bulbak T.A., Khomenko M.O., Sazonov A.M. PTX-parameters of metamorphogene and hydrothermal fluids; isotopy and age of formation of the Bogunai gold deposit southern Yenisei ridge (Russia). *Russ. Geol. Geophys.*, 2015, vol. 56 (6), pp. 1153–1172. (In Russ.)

51. Gibsher N.A., Tomilenko A.A., Sazonov A.M., Bulbak T.A., Khomenko M.O., Ryabukha M.A., Shaparenko E.O., Silyanov S.A., Nekrasova N.A. Ore-bearing fluids of the Eldorado gold deposit (Yenisei Ridge, Russia). *Russ. Geol. Geophys.*, 2018, vol. 59, pp. 983–996. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.07.018>
52. Roedder E. *Fluid inclusions in minerals*. Moscow, Mir Publ., 1987. Vol. 1, 558 p. (In Russ.)
53. Phillips G.N., Evans K.A. Role of CO₂ in the formation of gold deposits. *Nature*, 2004, vol. 429, pp. 860–863. DOI: 10.1038/nature02644
54. Balikov S.V., Dement'yev V.E. *Gold: properties. Geochemical aspects*. Irkutsk, Irgiredmet Publ., 2015. 328 p. (In Russ.)
55. Ivanov V.P., Timkin T.V., Boldina D.A., Pakhtaeva M.G. Features of determining organometallic compounds in organic matters of black shale using diffuse reflectance infrared Fourier transform spectroscopy. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 141–156. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4462
56. Migdisov A.A., Guo X., Xu H., Williams-Jones A.E., Sun C.J., Vasyukova O., Sugiyama I., Fuchs S., Pearce K., Roback R. Hydrocarbons as ore fluids. *Geochem. Persp. Lett.*, 2017, vol. 5, pp. 47–52.
57. Greenwood P.F., Brocks J.J., Grice K., Schwark L., Dick J.M., Evans K.A. Organic geochemistry and mineralogy. I. Characterization of organic matter associated with metal deposits. *Ore Geol. Rev.*, 2013, no. 50, pp. 1–27. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2012.10.004
58. Percy E.C., Burruss R.C. Hydrocarbons and gold mineralization in the hot-spring deposit at Cherry Hill, California. Bitumens in ore deposits. *Special Publication of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits*. Berlin, Heidelberg, 1993. Vol. 9, pp. 117–137. DOI: 10.1007/978-3-642-85806-2_8
59. Gaboury D. Does gold in orogenic deposits come from pyrite in deeply buried carbon-rich sediments?: Insight from volatiles in fluid inclusions. *Geology*, 2013, vol. 41 (12), pp. 1207–1210. DOI: 10.1130/G34788.1
60. Gaboury D., Genna D., Trotter J., Bouchard M., Augustin J., Malcolm K. The Perron gold deposit, Archean Abitibi belt, Canada: exceptionally high-grade mineralization related to higher gold-carrying capacity of hydrocarbon-rich fluids. *Minerals*, 2021, vol. 11 (10), p. 1066. DOI: 10.3390/min11101066
61. Kubrakova I.V., Nabiullina S.N., Pryazhnikov D.V., Kiseleva M.S. Organic matter as a forming and transporting agent in transfer processes of PGE and gold. *Geochemistry*, 2022, vol. 67 (8), pp. 741–749. (In Russ.)
62. Bottrell S.H., Miller M.F. The geochemical behaviour of nitrogen compounds during the formation of black shale hosted quartz-vein gold deposits, north Wales. *Applied Geochemistry*, 1990, vol. 5, Iss. 3, pp. 289–296.
63. Pokrovski G.S., Kokh M.A., Guillaume D., Borisova A.Y., Gisquet P., Hazemann J.-L., Lahera E., Del Net W., Proux O., Testemale D., Testelman D., Haigis V., Jonchière R., Seitsonen A.P., Ferlat G., Vuilleumier R., Marco Saitta A., Boiron M.-C., Dubessy J. Sulfur radical species form gold deposits on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, vol. 112, pp. 13484–13489. DOI: 10.1073/pnas.1506378112
64. Galimov E.M. *Geochemistry of Stable Carbon Isotopes*. Moscow, Nedra Publ., 1968. 300 p. (In Russ.)
65. Hoefs I. *Geochemistry of stable isotopes*. Moscow, Mir Publ., 1983. 200 p. (In Russ.)

Information about the authors

Marina A. Petrova, Postgraduate Student, Engineer, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. petrovama@igm.nsc.ru

Nadezhda A. Gibsher, Cand. Sc., Senior Researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. gibsher@igm.nsc.ru

Elena O. Shaparenko, Cand. Sc., Researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. shaparenko@igm.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6421-433X>

Anatoly A. Tomilenko, Dr. Sc., Chief Researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. tomilen@igm.nsc.ru

Taras A. Bulbak, Cand. Sc., Senior Researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. taras@igm.nsc.ru

Anatoly M. Sazonov, Dr. Sc., Professor, Siberian Federal University, 79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation. sazonov_am@mail.ru

Margarita O. Khomenko, Junior Researcher, Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3, Academician Koptyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. homenko@igm.nsc.ru

Sergey A. Silyanov, Cand. Sc., Associate Professor, Federal University, 79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation. silyanov-s@mail.ru

Received: 02.05.2024

Revised: 24.05.2024

Accepted: 24.01.2025