

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОЛОТОГО ОРУДЕНЕНИЯ СПОКОЙНИНСКОГО УЗЛА (АЛДАНСКИЙ ЩИТ)

© 2025 г. В. Н. Кардашевская^а, *, Л. А. Кондратьева^а, **, Е. О. Шапаренко^б, Г. С. Анисимова^а

^а Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН,
пр. Ленина, 39, Якутск, 677980 Россия

^б Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН,
пр. Академ. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: kardashevskaya92@mail.ru

**e-mail: lkon12@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.05.2024 г.

После доработки 06.08.2024 г.

Принята к публикации 03.09.2024 г.

В статье приведены первые результаты изучения индивидуальных флюидных включений в кварце трех типов руд (полисульфидных, золото-серебро-теллуридных и золото-висмутовых) Спокойнинского узла, с которыми связано развитие золоторудной минерализации. Выявлены некоторые различия в физико-химических параметрах и составе флюидов для трех типов руд. Установлено, что полисульфидные руды Спокойнинского рудного узла имеют относительно низкую начальную температуру (180–350 °С), более высокую плотность CO_2 (0.27–0.71 г/см³) и более высокое давление флюида (0.7–1 кбар), по сравнению с флюидами, формировавшими золото-серебро-теллуридные руды (температура 200–260 °С, плотность CO_2 0.28–0.56 г/см³, давление 0.7 кбар). Солевой фон флюидов полисульфидных руд определяют хлориды натрия и магния, а минералообразующие флюиды золото-серебро-теллуридных руд, характеризуются более простым водно-солевым содержащим хлориды Na. Флюиды, формировавшие полисульфидные руды, характеризуются водно-углекислотно-азотным составом при сопоставлении с золото-серебро-теллуридными рудами, которые имеют преимущественно водно-углекислотный. Золото-висмутовые руды Майского рудного поля сформировались из рудообразующих флюидов водно-углекислотного состава, с концентрацией солей 4.0–6.4 мас. %-экв. NaCl, плотностью CO_2 0.56–0.61 г/см³, при температуре 280–335 °С и давлении 0.7 кбар. Полученные данные позволяют сделать вывод о сходстве рудообразующего флюида Спокойнинского рудного узла с флюидами орогенных месторождений золота.

Ключевые слова: кварц, золото, флюидные включения, рамановская спектроскопия, Алданский щит

DOI: 10.31857/S0016752525010047, EDN: GPYPZT

ВВЕДЕНИЕ

Алданский щит расположен в южной окраине Сибирской платформы и является одним из крупнейших регионов РФ, где сосредоточены месторождения золота, урана, ЭПГ, железа и молибдена (Парфенов, Кузьмин, 2001). На территории Алданского щита обнаружены и разрабатываются крупные золоторудные месторождения различных геолого-генетических типов, связанных с мезозойским щелочным и субщелочным магматизмом: золоторудные карстовые (Куранахское), золото-сульфидные (Лебединое), золото-медно-порфировые (Рябиновое), золото-урановые (Эльконское) и т. д. (Мигута, 2001; Ветлужских и др., 2002; Кочетков, 2006; Бой-

цов и др., 2010; Хомич, Борискина, 2010; Дворник, 2012; Rodionov et al., 2014; Добровольская и др., 2016; Молчанов и др., 2017). В пределах щита выделяют Чара-Алданскую металлогеническую зону, где с запада на восток расположены перспективные золоторудные районы (Верхнеамгинский, Эвотинский, Тыркандинский и т. д.), ассоциирующие с проявлением мезозойского щелочного магматизма (Прокопьев и др., 2018; Prokopyev et al., 2019; Ivanov et al., 2022). В ранних публикациях обоснована гипотеза, что мезозойские золоторудные месторождения Алданского щита формировались в связи с магматическими процессами в пределах тыловой зоны юрско-раннемеловой активной окраины Сибирского кратона (Парфенов, Кузьмин, 2001). По мнению

некоторых исследователей, формирование мезозойского магматизма на территории Сибирского кратона связано с влиянием подлитосферного “горячего поля мантии” в виде интенсивного рифтогенеза и внутриплитной плутоновулканической деятельности, сопряженных с формированием эпиконтинентальных впадин и грабенных (Ярмолюк и др., 2000). В последних работах проявление мезозойской тектоно-магматической активизации ассоциируют с дегидратацией субдущирующей океанической плиты и последующего апвеллинга астеносферного вещества, что вызвало деформации в литосфере и проявление плюмов, которые отвечают за транспортировку полезных компонентов (Au, Pt, Pd, U) (Khomich et al., 2015).

Объектом наших исследований является Спокойнинский рудный узел, локализованный в Тыркандинской зоне тектонического меланжа Алданского щита и входящий в состав одноименного рудного района. Руды узла представлены тремя минеральными типами: прожилково-вкрапленным полисульфидным, золото-висмутным и золото-серебротеллуридным (Kondratieva et al., 2023). В последнее время в пределах Тыркандинской зоны тектонического меланжа, были выявлены перспективные золоторудные узлы (Алгоминский, Алтан-Чайдахский и др.) (Анисимова, Соколов, 2015; Анисимова и др., 2017). В недавно опубликованной работе месторождение Бодороно, расположенное в Алгоминском узле, по ряду признаков было отнесено к орогенным месторождениям золота в докембрийских комплексах (Кардашевская и др., 2024). Надо отметить, что многие черты геологического строения и минерального состава руд вышеприведенного объекта близки к Спокойнинскому рудному узлу. Так, основными минералами являются кварц, пирит и халькопирит, присутствие минералов висмута и теллуридов, структурный контроль рудных тел и наличие крупных протяженных жильных зон. В настоящее время, проблема происхождения золоторудных месторождений в докембрийских метаморфических комплексах актуальна и подробно обсуждается в ряде работ (Groves et al., 1998; Goldfarb et al., 2005; Goldfarb, Groves, 2015). В экономическом плане данные месторождения обладают значительным металлогеническим потенциалом в мире. Среди них известны крупные эталонные объекты: Ред Лейк (Канада), Колар (Индия), Калгурли (Австралия), Мору-Велью (Бразилия), Саншандао и Ксинчен (Китай) (Сафонов и др., 2007; Li et al., 2015).

Для интерпретации условий образования руд и определения генетического типа объектов большое значение имеет изучение флюидных включений в минералах (Реддер, 1987). Тем не менее, опубликованные данные о детальном изучении состава рудообразующих растворов и выявления условий и механизмов формирования золотого оруденения на Спокойнинском рудном узле отсутствуют. Цель

нашего исследования заключалась в установлении физико-химических параметров рудообразующих флюидов по данным изучения флюидных включений в кварце Спокойнинского узла, способствовавших транспортировке и отложению Au в рудах.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РУДНОГО УЗЛА

В тектоническом отношении Спокойнинский рудный узел расположен в северной части Тыркандинской зоны тектонического меланжа (рис. 1), который отделяет Восточно-Алданский супертеррейн от Центрально-Алданского на западе и от Тындинского террейна на юге и находится в зоне влияния одноименного глубинного разлома (Парфенов, Кузьмин, 2001). Рудный узел сложен докембрийскими гнейсами и кристаллическими сланцами, которые мигматизированы и вмещают согласные и секущие тела основного, среднего и кислого состава (Соколов и др., 2022). Площадь локализована в зоне регионального Тыркандинского разлома север-северо-западного направления. Во время мезозойской тектоно-магматической активизации (ТМА) на Тыркандинский разлом были наложены северо-восточные швы протяженных разломов Суннагинской системы, являющиеся отражением Северо-Станового разлома. Интрузивные образования узла представлены многочисленными дайками и мелкими штоками, среднего и кислого состава. Интрузивные образования сопровождаются гидротермальными изменениями в виде ороговикования, хлоритизации, эпидотизации, серицитизации и окварцевания вмещающего субстрата.

На площади узла известны рудные поля Спокойное и Майское. Спокойное рудное поле расположено в северной части узла, а Майское — на юге (рис. 2).

Спокойное рудное поле сложено докембрийскими гнейсами кюриканской свиты и размещено в Майской синклинальной структуре, где отмечается слабая гранитизация гнейсов (Соколов и др., 2022). Вмещающие породы прорваны докембрийскими гранитоидами и штокообразными, залежными телами с раздувами и дайками основного, среднего и кислого состава, приуроченными к осевым частям складок. Разрывные нарушения представлены сдвигами и сбросами, и взбросами северо-западного направления и сбросами, и взбросами северо-восточного простирания, относящиеся к Тыркандинскому и Суннагинскому разломам. Гидротермальные изменения пород проявляются в виде березитизации и развиваются по гнейсам. Они сложены серицитизированной, карбонатизированной кварц-полевошпатовой породой с вкрапленной сульфидной минерализацией и хлоритом. Рудные тела представлены кварц-сульфидными прожилками и линзами в березитизированных породах и образуют пологозалегающие (10–40°) линзо-лентообразные залежи в зонах рас-

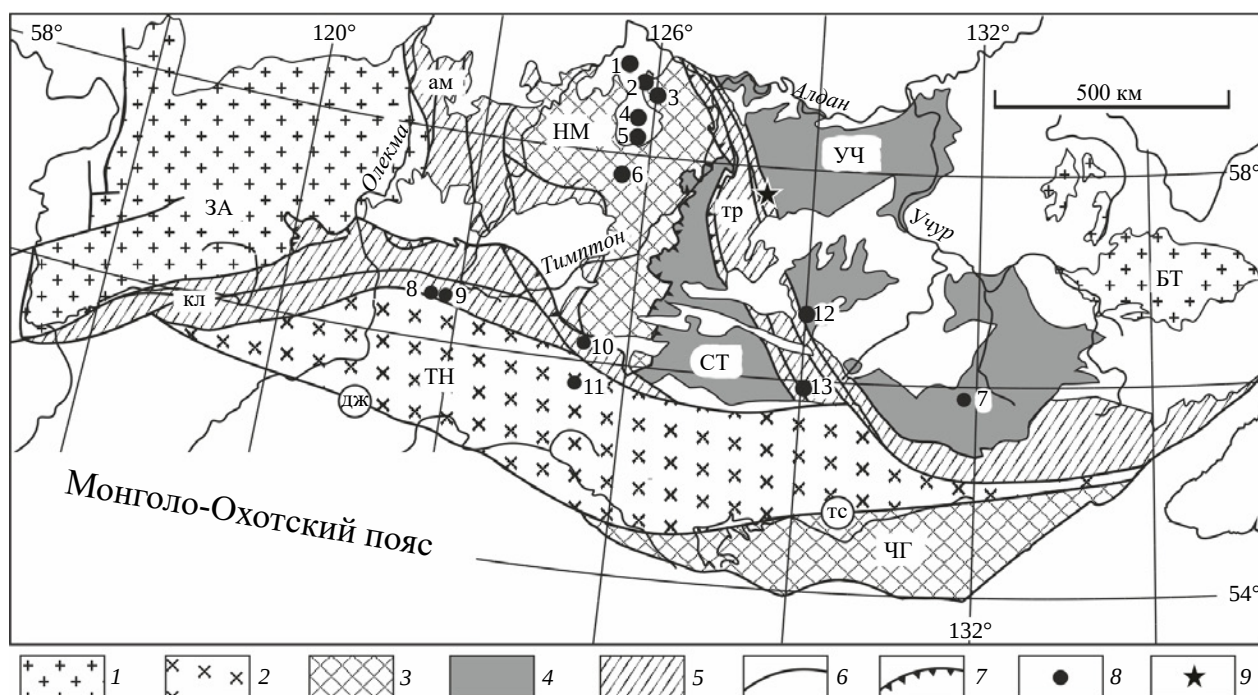


Рис. 1. Положение Спокойнинского рудного узла в региональных структурах Алдано-Станового щита. Карта террейнов Алдано-Станового щита * (по Смелову и др., 2001) с дополнениями. Восточно-Алданский супертеррейн — Батомгский (БТ), Учурский (УЧ) террейны; Центральнo-Алданский супертеррейн — Нимнырский (НМ), Сутамский (СТ) террейны. Террейны: 1 — гранит-зеленокаменные (ЗА — Западно-Алданский, БТ — Батомгский); 2 — тоналит-трондjemитo-гнейсовые (ТН — Тыдинский); 3 — гранулит-ортогнейсовые (НМ — Нимнырский, ЧГ — Чогарский); 4 — гранулит-парагнейсовые (СТ — Сутамский, УЧ — Учурский); 5 — зоны тектонического меланжа (ам — Амгинская, кл — Каларская, тр — Тыркандинская); 6 — разломы (дж — Желтулакский, тс — Таксакандинский); 7 — надвиги; 8 — месторождения и рудопоявления (1 — Куранахское, 2 — Рябиновое, 3 — Эльконская группа, 4 — Лебединское, 5 — Самолазовское, 6 — им. П. Пинигина, 7 — Колчеданный Утес; 8 — Ледяное; 9 — Скалистое; 10 — Бамское; 11 — Одолго; 12 — Алтан-Чайдах; 13 — Алгоминский); 9 — положение Спокойнинского рудного узла.

сланцевания широтного и субширотного простирания с падением на север. Мощность этих залежей составляет от 0.1 до 2.5 м. Прожилки и залежи выполнены кварцем — белым, сероватым, реже медово-желтым, иногда прозрачным, скрыто-, мелкокристаллическим, мелкодрозовидным и брекчиевидным, в тонких прожилках халцедоновидным.

В геологическом строении **Майского рудного поля** участвуют докембрийские метаморфические породы кюриканской свиты, смятые в складки северо-западного простирания (35–85°) и характеризуется более высокой степенью гранитизации (Соколов и др., 2022). Интрузивные образования проявлены в виде даек основного и среднего состава, которые выполняют разрывы северо-западного и северо-восточного простирания, имеют крутое и пологое падение. Разрывные нарушения относятся к системе Тыркандинского и Суннагинского разломов и представлены взбросо-надвигами широтного и субширотного простирания. Рудные тела представлены зонами дробления и расланцевания пологого и крутопадающего залегания (10–20°) в березитах и кварц-сульфидными прожилками, контролируемыми срывами северо-восточного и северо-западного направления, взбросами и сдвиго-взбросами. Мощность залежей составляет

2–10 м. В целом, рудные тела имеют сходство с вышеописанными метасоматитами Спокойного рудного поля.

На территории Спокойнинского узла золотое оруденение представлено прожилково-вкрапленным типом золото-кварцевой малосульфидной формации и четко делится на три типа: 1) полисульфидный (пирит, халькопирит, галенит, арсенопирит, сфалерит), 2) золото-висмутовый (висмутин, теллуrowисмутит, бурсаит, купробисмутит, матильдит, бисмоклит и смирнит) и 3) золото-серебро-теллуридный (креннерит, сильванит, петцит, гессит, кервеллеит, полибазит, акантит, ютенбогаардит) (Kondratieva et al., 2023). Полисульфидный минеральный тип распространен на площади рудного узла повсеместно. Золото-висмутовая и золото-серебро-теллуридная минерализация, развитая в рудах Майского рудного поля отличается разнообразием, в то время как на Спокойном рудном поле отмечается в основном в виде реликтовых включений в самородном золоте (матильдит, гессит, кервеллеит) и гипергенных минералов (акантит, ютенбогаардит и бисмоклит).

Кварц Спокойнинского рудного узла характеризуется широким диапазоном кристалличности

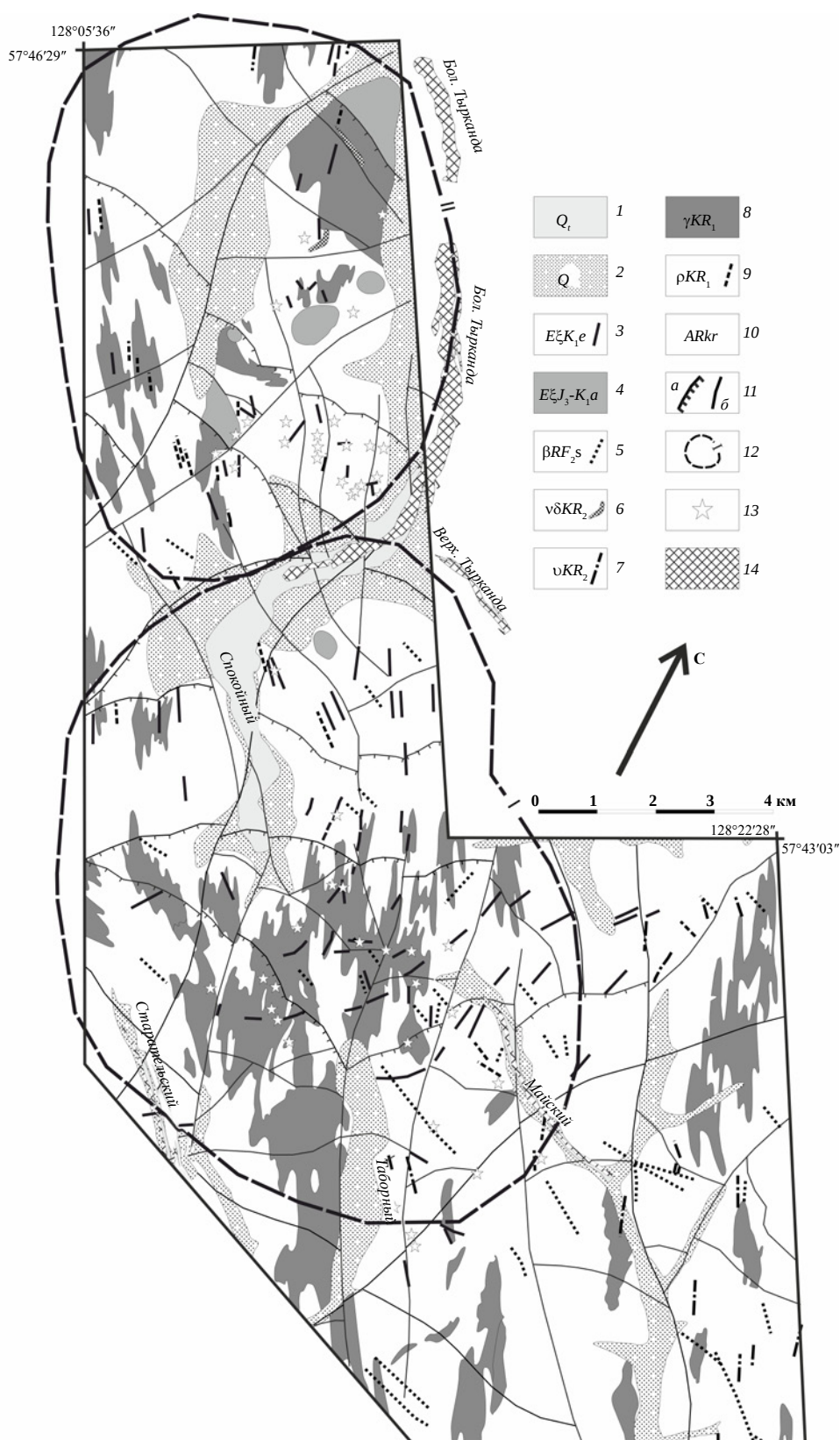


Рис. 2. Геологическая карта Спокойнинского рудного узла (по Соколову и др., 2022) с незначительными упрощениями. 1 — современные техногенные отложения; 2 — четвертичные отложения; 3 — дайки щелочно-земельных сиенитов, и сиенит-порфиров; 4 — штоки щелочно-земельных сиенитов и сиенит-порфиров; 5 — дайки долеритов; 6 — неправильно-согласные тела габбро-диорит-амфиболов; 7 — силлы и дайки ультрабазитов; 8 — раннепротерозойские граниты; 9 — дайки пегматитов; 10 — гнейсы и кристаллические сланцы; 11 — разломы: а) взбросо-надвижки, б) сдвиги рудоконтролирующие; 12 — рудные поля: I — Спокойное, II — Майское; 13 — рудопроявления; 14 — россыпи.

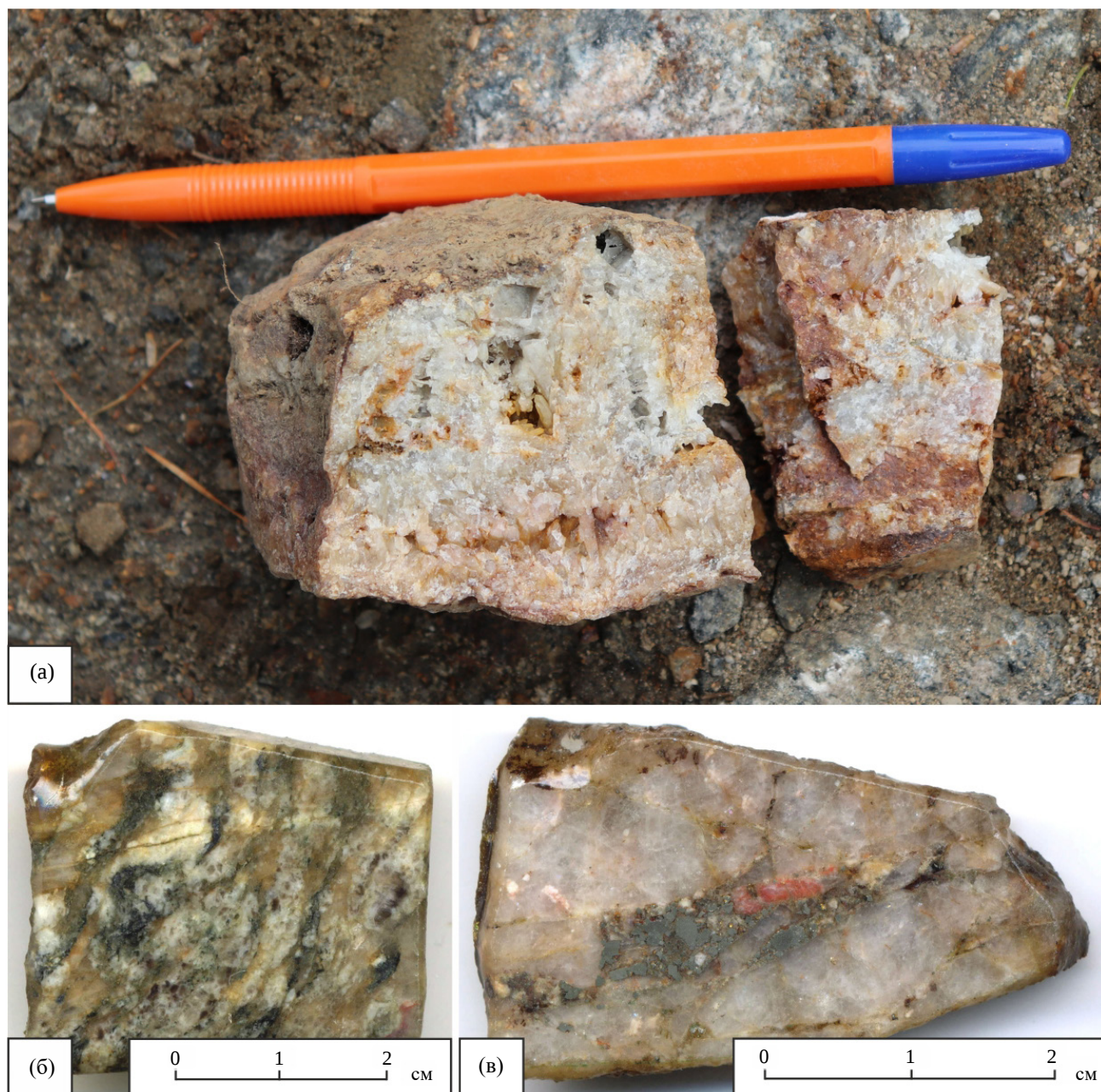


Рис. 3. Разновидности кварца Спокойнинского рудного узла. Спокойное рудное поле: (а) — мелкодрузовидный, (б) — брекчиевидный. Майское рудное поле: (в) — массивный.

от мелко- до крупнозернистого и представлен четырьмя разновидностями. Кварц-1 белый, полупрозрачный, крупно-, среднезернистый, мелкодрузовидный, идиоморфный, зональный, часто замутнен флюидными включениями. С кварцем-1 связан полисульфидный тип оруденения. Кварц-2 серый, прозрачный, средне- мелкозернистый, катаклазированный, неправильной формы с волнистым погасанием, с ним связан золото-серебро-теллуридный тип минерализации. Кварц-3 медово-желтый, крупнозернистый, гипидиоморфный, полупрозрачный. С кварцем-3 связан золото-висмутовый тип оруденения. Кварц-4 крипто- мелкозернистый, гранулированный, цементирует агрегаты кварца 1 и 2 разновидности.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Авторами было проведено изучение флюидных включений в кварце из жил двух рудных полей методами оптической микроскопии, криометрии, термометрии и рамановской спектроскопии.

Микротермометрические исследования включений проводились в лаборатории термобарогеохимии ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) на микротермокамере THMSG-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 пре-

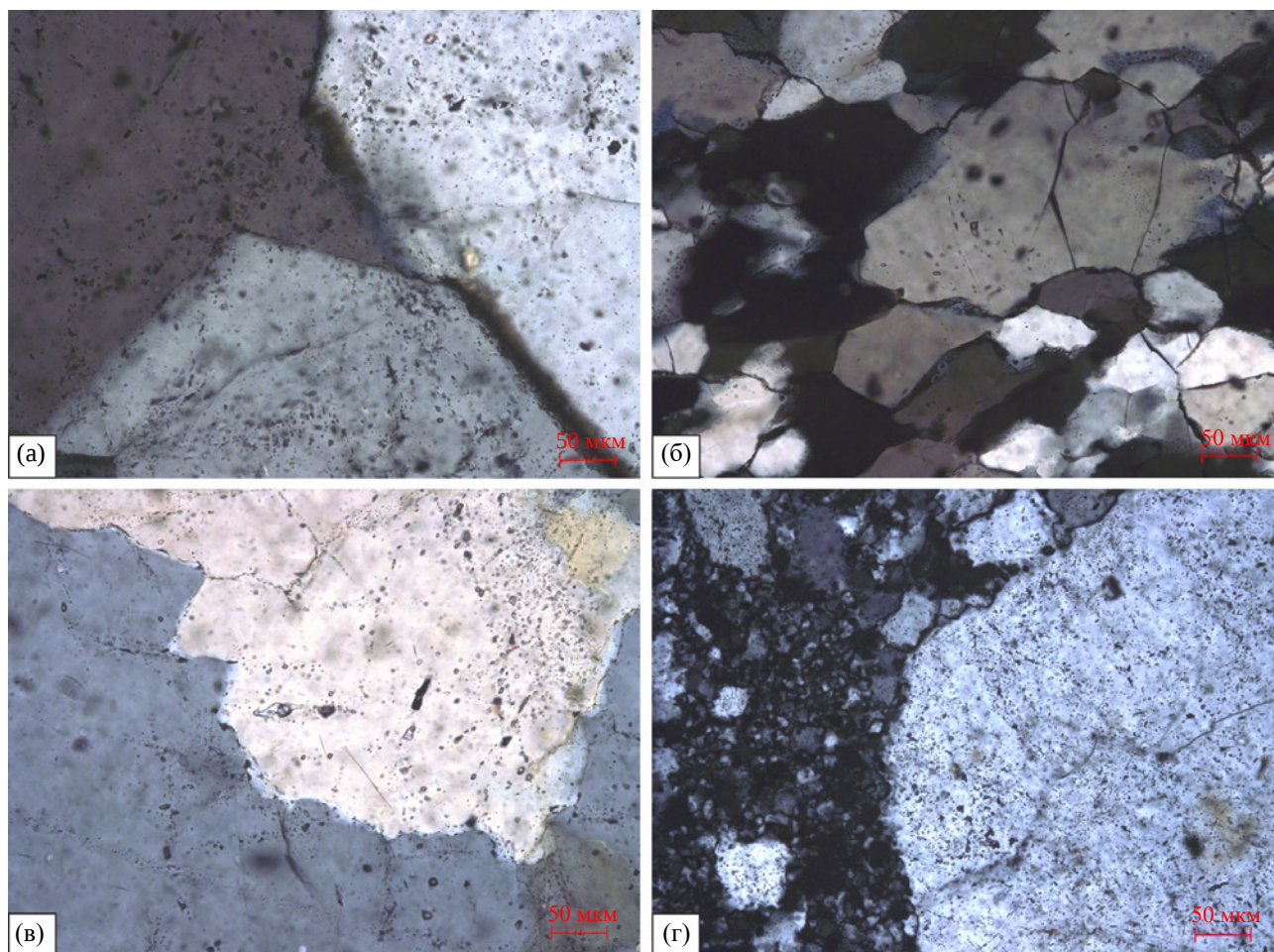


Рис. 4. Микрофотографии жильного кварца Спокойнинского рудного узла: (а) — крупнозернистые идиоморфные зерна кварца-1, (б) — средне-, мелкозернистые гипидиоморфные агрегаты кварца-2, (в) — крупнозернистые гипидиоморфные зерна кварца-3, (г) — крипто- и микрозернистые гранулированные агрегаты кварца-4.

делами данного интервала. Концентрация и солевой состав ФВ изучались методом криометрии. Состав солей включений определялся по температуре эвтектики ($T_{эвт.}$) (Борисенко, 1977). Концентрация солей рассчитывалась по температуре плавления льда ($T_{пл.льда}$) на основе данных системы $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ (Bodnar, Vityk, 1994). Температуры гомогенизации ($T_{гом}$) 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). Давление флюида определялось по методам, приведенным в работах (Thiery et al., 1994; Bakker, 2003) по сингенетичным включениям. Состав газовой фазы ФВ в кварце исследован с помощью рамановского спектрометра Horiba LabRAM HR 800, оснащенного твердотельным лазером с длиной волны 532 нм, мощностью 50 мВт и микроскопом Olympus BX-41 с рабочими объективами 10х, 50х и 100х. Относительное содержание газов (мол. %) во флюидных включениях рассчитывалось по методикам (Dubessy et al., 1989; Burke, 2001).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Для исследования флюидных включений (ФВ) было изготовлено 14 двусторонне-полированных пластинок кварца трех типов руд из обоих рудных полей, толщиной 0.3–0.5 мм. По общепринятым критериям (Реддер, 1987) были выделены первичные и вторичные ФВ. Первичные включения не имеют связи с залеченными трещинами и располагаются по зонам роста минерала-хозяина либо встречаются по одиночке, а вторичные, в свою очередь, приурочены к трещинам и расщурованы. Изучению подверглись первичные ФВ. В общем количестве было изучено 252 индивидуальных флюидных включения (табл. 1).

Характеристика флюидных включений. В кварце Спокойного рудного поля по фазовому составу при комнатной температуре первичные включения подразделены на три типа: 1) однофазные — существенно-газовые (рис. 5а), 2) двухфазные — газовой-жидкие с объемом газового пузырька 10–60 об. % (рис. 5б) и 3) трехфазные — водно-углекислотные (рис. 5в). Размер ФВ колеблет-

Таблица 1. Результаты микротермометрических данных индивидуальных флюидных включений в кварце Спокойнинского рудного узла

№ образца	Тип ФВ (*)	n	T _{гом.} , °C	T _{эвт.} , °C	T _{пл. льда} , °C	T _{пл. CO₂} , °C	T _{гом. CO₂} , °C	С солей мас. % NaCl экв.	p, кбар	d, г/см ³
Спокойное рудное поле										
К-202	П (II)	12	203–333	–15.0 ... – 21.7	–2.3 ... – 4.0	–	–	3.9–6.4	–	–
	П (III)	8	–	–	–	–56.7	29.5–30.5 Ж	–	0.7	0.56–0.61
Обр.св.	П (II)	21	225–251	–20.1 ... – 24.7	–3.8 ... – 4.5	–	–	6.2–7.2	–	–
Обр.св.а	П (II)	8	229–231	–20.0 ... – 22.0	–4.0 ... – 4.3	–	–	6.4–6.9	–	–
Обр.св.б	П (II)	13	310–345	–37.0 ... – 42.5	–3.9 ... – 6.0	–	–	6.3–9.2	–	–
	П (III)	7	–	–	–	–55.7 ... – 56.0	27.8–29.0 Ж	–	0.7	0.63–0.66
С-8	П (II)	10	328–348	–23.7 ... – 30.7	–6.0 ... – 6.5	–	–	9.2–9.9	–	–
	П (III)	5	–	–	–	–56.9	26.5–30.8 Ж	–	1	0.67–0.71
101	П (II)	16	246–270	–22.3	–	–56.6 ... – 56.7	–	–	–	–
	П (III)	10	–	–	–	–	27.5 Г	–	0.7	0.28
207-80-2	П (II)	15	322–342	–	–0.5	–56.6 ... – 56.7	–	–	–	–
	П (III)	7	–	–	–	–	28.5–29.0 Г	0.88	0.7	0.30–0.31
206-1	П (I)	7	–	–	–	–56.6 ... – 57.1	27.3–28.2 Г	–	0.7	0.27–0.29
	П (II)	18	245–301	–22.1 ... – 24.3	–3.0 ... – 5.8	–	–	5.0–8.9	–	–
Майское рудное поле										
К-252-2	П (II)	8	230–297	–21.1 ... – 22.2	–1.0 ... – 1.5	–	–	1.7–2.6	–	–
	П (III)	6	–	–	–	–	27.4–30.6 Ж	–	0.7	0.56–0.67
К-255-3	П (II)	17	277–332	–18.0 ... – 23.0	–2.4 ... – 4.0	–	–	4.0–6.4	–	–
	П (III)	10	–	–	–	–56.0 ... – 56.6	29.7–31.0 Ж	–	0.7	0.56–0.61
К-280-17	П (II)	15	285–286	–26.2	–	–56.6 ... – 56.8	–	–	–	–
	П (III)	5	–	–	–	–	29.0 Г	–	0.7	0.31
К-265	П (II)	34	220–310	–23.6 ... – 24.2	–1.2 ... – 1.5	–	–	2.1–2.6	–	–

(*) I — существенно-газовые; II — газово-жидкие; III — водно-углекислотные. Генетический тип ФВ — П — первичные. Г — гомотенизация углекислоты в газ, Ж — в жидкость. n — количество ФВ. T_{гом.} — температура гомотенизации, T_{эвт.} — температура эвтектики, T_{пл.} — температура плавления, C — солёность, p — давление, d — плотность флюида.

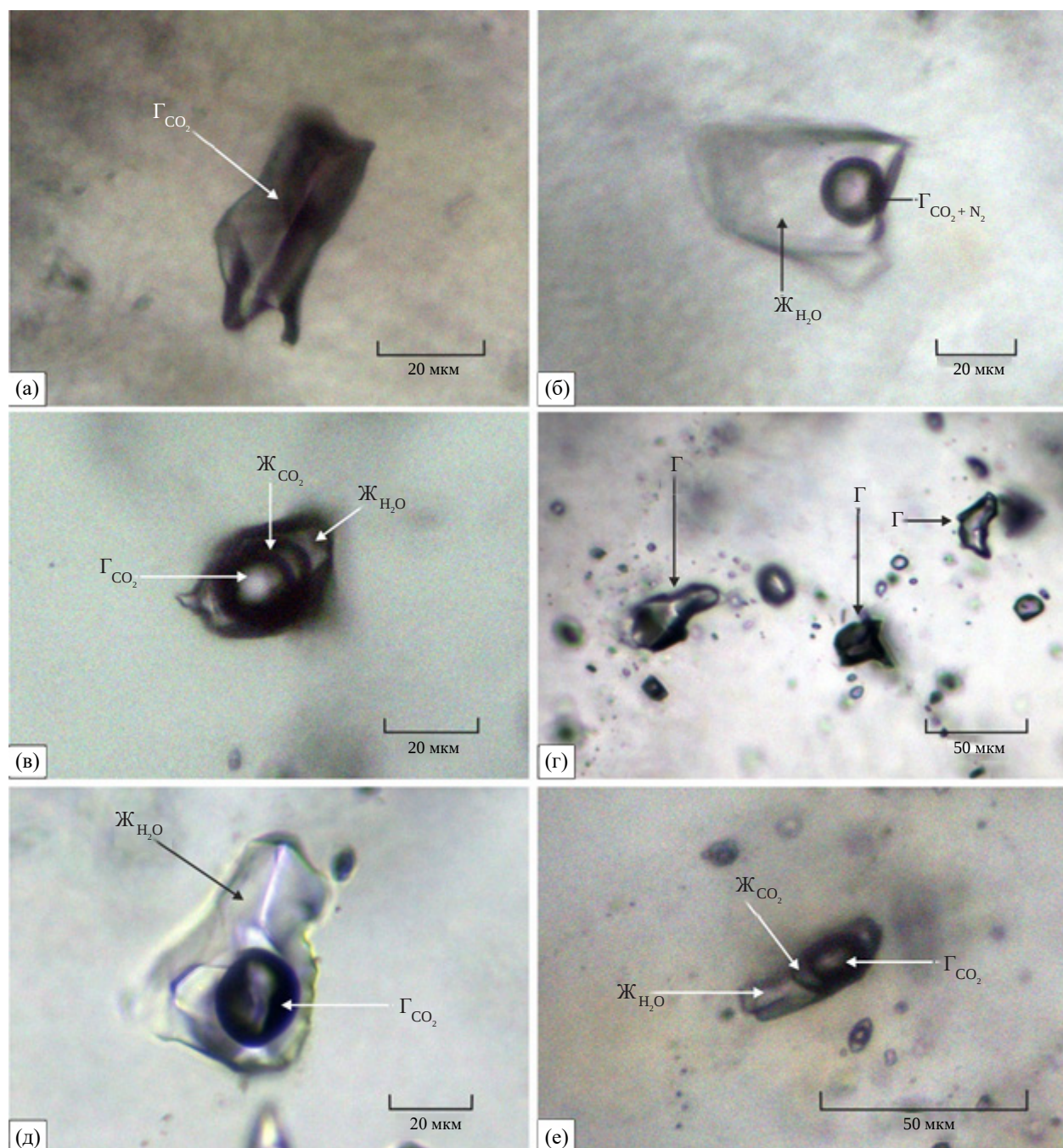


Рис. 5. Типы флюидных включений в кварце Спокойнинского рудного узла. Спокойное рудное поле: (а) — существенно-газовое однофазное, (б) — газowo-жидкое двухфазное, (в) — водно-углекислотное трехфазное. Майское рудное поле: (г) — существенно-газовое однофазное, (д) — газowo-жидкое двухфазное, (е) — водно-углекислотное трехфазное. Г — газ, Ж — жидкость.

ся от 10 до 70 мкм. Изредка встречены крупные включения, размером до 100 мкм, расположенные по зонам роста кристаллов, а также распределенные по всему зерну кварца (рис. 6а). Флюидные включения имеют вытянутую, неправильную, угловатую, реже изометричную форму вакуолей.

В кварце из *Майского рудного поля* по фазовому составу при комнатной температуре среди первичных ФВ обнаружены три типа: 1) однофазные — существенно-газовые (рис. 5г), 2) двухфаз-

ные — газowo-жидкие с объемом газового пузырька 20–60 об. % (рис. 5д) и 3) трехфазные — водно-углекислотные (рис. 5е). Размер включений составляет от 10 до 70 мкм, единично до 90 мкм. Флюидные включения часто имеют вытянутую и неправильную форму вакуолей, иногда округлую и угловатую.

Присутствие в кварце трех типов флюидных включений (рис. 6б) в сингенетической ассоциации свидетельствует о гетерогенности (вскипании) минералообразующего флюида (Реддер, 1987).

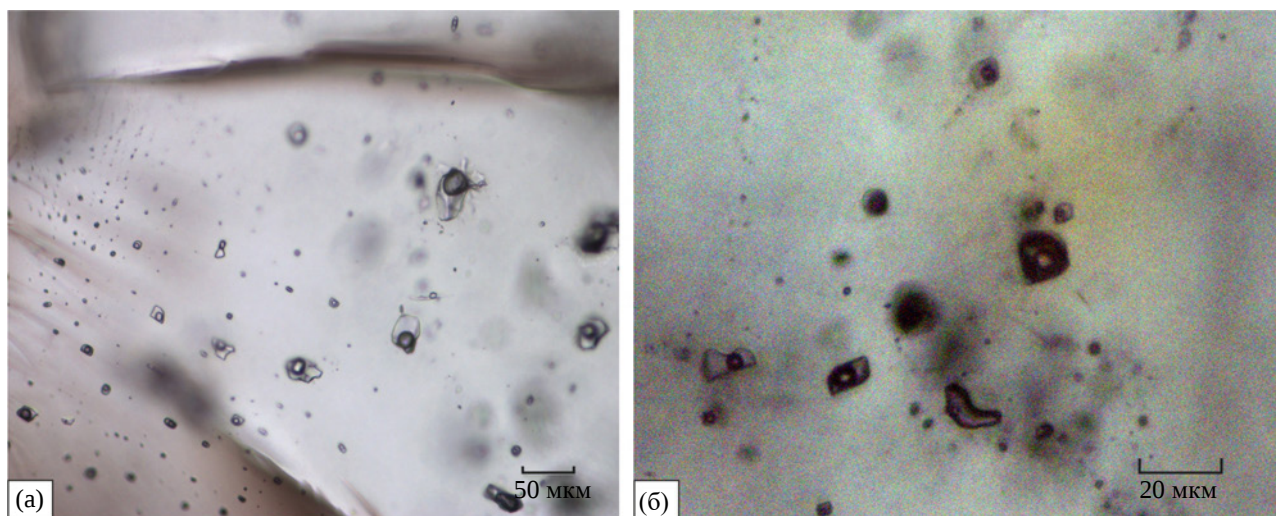


Рис. 6. Типичные флюидные включения в кварце Спокойнинского рудного узла. (а) — первичные ФВ вдоль плоскости в кристалле кварца Спокойного рудного поля, (б) — сосуществование ФВ различного фазового состава в кварце Майского рудного поля.

Результаты микротермометрических исследований

Спокойное рудное поле. Температуры общей гомогенизации первичных двухфазных включений в кварце *полисульфидных руд* изменяются от 180 до 350 °С в жидкую фазу (рис. 7). Общая концентрация водно-солевых растворов колеблется в незначительном диапазоне от 5.0 до 9.9 мас. % NaCl экв. (рис. 8). Исходя из широких значений температуры эвтектики от –20 до –42.5 °С, в растворах среди солей присутствуют хлориды натрия и магния (рис. 9). Плавление фазы CO₂ происходит при температуре –55.7 ...–57.1 °С, что близко к температуре плавления чистой углекислоты (–56.6 °С) и говорит об отсутствии существенных количеств примесей низкокипящих газов. Гомогенизация жидкой CO₂ в трехфазных включениях происходит при температурах +26.5 ...+30.8 °С в жидкую и газовую фазу. Дав-

ление флюида варьирует в интервале от 0.7 до 1 кбар. Плотность флюида изменяется от 0.27 до 0.71 г/см³. Изучение газовой составляющей первичных включений в кварце полисульфидных руд методом рамановской спектроскопии выявило присутствие в составе их газовой фазы CO₂ (100–77.76 мол. %) и N₂ (22.24–1.75 мол. %), а также наличие H₂S (14.91 мол. %) в единичном случае.

Гомогенизация двухфазных включений в кварце *золото-серебро-теллуридных руд* происходит в интервале от 200 до 260 °С в жидкую фазу (рис. 7). Концентрация солей в растворе ФВ изменяется от 3.9 до 5.7 мас. % NaCl экв. (рис. 8). Температуры эвтектики от –15 до –21 °С свидетельствуют о том, что во флюиде растворены KCl и NaCl (рис. 9). Плавление CO₂ составляет величину –56.6...–56.7 °С. Жидкая углекислота в трехфазных

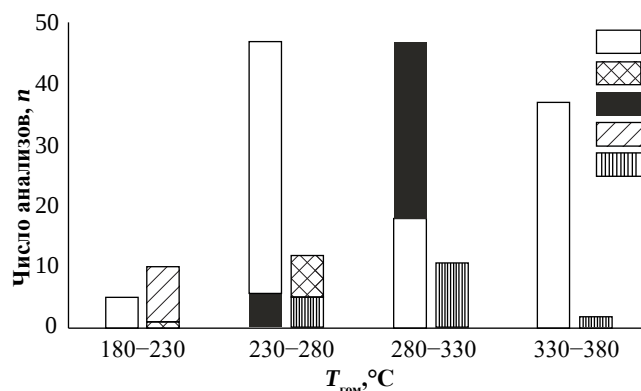


Рис. 7. Температуры гомогенизации в кварце трех типов руд Спокойнинского рудного узла. 1–2 — Спокойное рудное поле: 1 — полисульфидный, 2 — золото-серебро-теллуридный; 3–5 — Майское рудное поле: 3 — полисульфидный, 4 — золото-серебро-теллуридный, 5 — золото-висмутый.

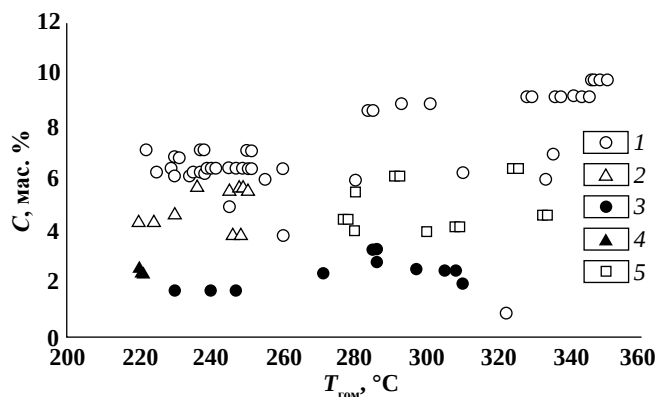


Рис. 8. Диаграмма “температура-концентрация” для рудообразующего флюида трех типов руд Спокойнинского рудного узла. 1–2 — Спокойное рудное поле: 1 — полисульфидный, 2 — золото-серебро-теллуридный; 3–5 — Майское рудное поле: 3 — полисульфидный, 4 — золото-серебро-теллуридный, 5 — золото-висмутый.

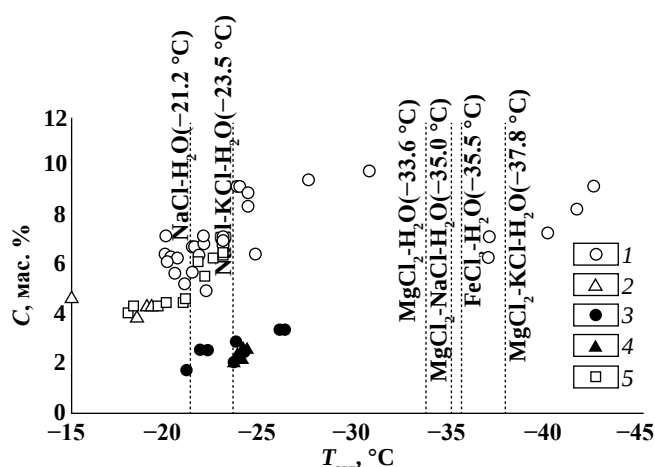


Рис. 9. Соотношение температуры эвтектики и солености ФВ в кварце трех типов руд Спокойнинского рудного узла (Бхаттачарайа, Паниграйн, 2011) 1–2 — Спокойное рудное поле: 1 — полисульфидный, 2 — золото-серебро-теллуридный; 3–5 — Майское рудное поле: 3 — полисульфидный, 4 — золото-серебро-теллуридный, 5 — золото-висмутовый.

включениях гомогенизируется в газовую и жидкую фазу при температурах $+27.5 \dots +30.5$ °C. Давление равно 0.7 кбар. Плотность флюида $0.28\text{--}0.56$ г/см³. Газовая фаза первичных ФВ в кварце золото-серебро-теллуридных руд состоит преимущественно из углекислоты (100 мол. %).

Майское рудное поле. Первичные двухфазные включения в кварце *полисульфидных руд* гомогенизировались в жидкость при температурах от 235 до 310 °C (рис. 7). Температура плавления льда меняется в интервале от -1.0 до -2.0 °C, что соответствует солености растворов от 1.7 до 3.4 мас. % NaCl экв. (рис. 8). Плавление эвтектики замороженных водно-солевых растворов двухфазных включений происходит в диапазоне от -21.1 до -26.2 °C (рис. 9). Состав солей представлен NaCl. Плавление CO₂ происходит при температурах от -56.6 до -56.8 °C. Гомогенизация жидкой CO₂ трехфазных ФВ происходит в жидкую фазу при температурах $27.4\text{--}31.0$ °C. Давление флюида оценено в 0.7 кбар. Плотность флюида $0.31\text{--}0.67$ г/см³. По данным рамановской спектроскопии первичные флюидные включения в газовой фазе содержат преимущественно CO₂ (100–65.88 мол. %), в единичном случае обнаружен N₂ (34.11 мол. %).

Флюидные включения в кварце *золото-серебро-теллуридных руд* имеют узкий диапазон температур гомогенизации от 220 до 221 °C (рис. 7). Концентрация солей изменяется в незначительном интервале от 2.6 до 2.1 мас. % NaCl экв. (рис. 8). Полученные температуры эвтектики ($-23.6 \dots -24.2$ °C) указывают на присутствие хлоридов Na в водно-солевом растворе включений (рис. 9). Газовая составляющая ФВ имеет чисто углекислотный состав (100 мол. %).

В первичных включениях, которые обнаружены в кварце *золото-висмутовых руд*, температуры

гомогенизации варьируют от 280 до 335 °C и содержат водный раствор с концентрацией солей 4.0–6.4 мас. % NaCl экв. (рис. 7, 8). Температуры эвтектики ($-18 \dots -23$ °C) показывают, что во ФВ встречается NaCl (рис. 9). Плавление CO₂ изменяется от -56 до -56.7 °C, что свидетельствует об отсутствии примесей низкокипящих газов. Трехфазные включения гомогенизируются в жидкость при температурах от $+29.7$ до $+31$ °C. Давление в период формирования изученных руд составляло 0.7 кбар. Плотность CO₂ $0.56\text{--}0.61$ г/см³. Газовая фаза включений в кварце золото-висмутовых руд состоит из углекислоты (100 мол. %).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные термобарогеохимические исследования руд Спокойнинского узла позволяют обсудить химический состав минералообразующих флюидов, а также выяснить их условия и механизмы формирования. Полученные данные показали, что формирование прожилково-вкрапленной *полисульфидной минерализации Спокойного рудного поля* происходило вследствие поступления в зону Тыркандинского разлома флюида, представлявшего собой низкоумеренноконцентрированную (5.0–9.9 мас. % NaCl экв.) смесь H₂O–CO₂±N₂±H₂S–NaCl–MgCl₂. Эти флюиды были среднетемпературными (180–350 °C) и отлагали рудную минерализацию при низких и умеренных давлениях (0.7–1 кбар). Если сравнить данные, полученные для *полисульфидных руд Майского поля*, то можно сделать вывод, что параметры формирования этих руд очень близки, но также присутствуют и некоторые различия. Последние, как правило, формируются из флюидов H₂O–CO₂–N₂–NaCl низкоконцентрированных (1.7–3.4 мас. % NaCl экв.) и среднетемпературных (235–310 °C) при низких давлениях (0.7 кбар). При этих условиях произошла фазовая сепарация флюида на две части: первый — водно-углекислотный, а второй — преимущественно газовый, состоящий из CO₂. Известно, что при фазовой сепарации происходит удаление летучих компонентов CO₂, H₂S, NH₃, что приводит к окислению и увеличению pH в остаточном водно-углекислотном флюиде (Бортников и др., 2010). В результате этого процесса флюид становится неравновесным с минералами вмещающих пород и вступает во взаимодействие с ними, вызывая метасоматическое преобразование вмещающей толщи с образованием ореолов березитизации.

Образование *золото-висмутовой минерализации Майского поля* происходило из флюидов H₂O–CO₂–NaCl низкоконцентрированных (4.0–6.4 мас. % NaCl экв.) и среднетемпературных (280–335 °C) при низких давлениях (0.7 кбар). Следует отметить, что формирование золото-висмутовых руд сопровождается повышением начальной температуры минералообразования, что можно объяснить поступлением новой порции минералообразующего флюида.

да, вызванное локальной тектонической активностью на данной территории (Борисенко и др., 2017). Также происходит некоторое снижение концентрации солей и давления, которое, вероятно, связано с развитием и усложнением систем трещин, возникновением конвективной гидротермальной системы в надинтрузивном пространстве. Уменьшение солёности раствора приводит к уменьшению растворимости серебра и висмута и осаждению некоторого их количества в форме сульфидов и теллуридов висмута в рудах узла (Прокофьев и др., 2007).

Отложение *золото-серебро-теллуридных руд Спокойнинского рудного поля* происходило при участии разбавленного флюида $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ с низкой солёностью (3.9–5.7 мас. % NaCl экв.) и среднетемпературными значениями (200–260 °C), что отвечает параметрам флюида, формировавшего аналогичные руды Майского поля. На *Майском рудном поле золото-серебро-теллуридные руды* были сформированы при участии менее концентрированных (2.1–2.6 мас. % NaCl экв.), близких по составу $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ и среднетемпературных (220–221 °C) флюидов. Падение температуры минералообразования и концентрации растворов в ходе эволюции гидротермально-магматической системы, свидетельствует о смешении и разбавлении флюидов поверхностными водами (Бортников, 2006). С внедрением поверхностных вод произошло кипение флюида и его гетерогенизация (разделение на две или более несмешиваемых флюидных фаз), что, вероятно, привело к осаждению золота с образованием поздней (Au-Ag-Te) минерализации (Lu, 2011; Li et al., 2024).

Проведенные исследования флюидных включений в кварце трех типов руд Спокойнинского узла позволяют сделать вывод о том, что они соответствуют параметрам типичных минералообразующих флюидов орогенных месторождений золота (низкая и умеренная солёность и наличие хлоридов Na и K в растворе, преобладающая роль $\text{CO}_2 > \text{CH}_4 \gg \text{N}_2 \gg \text{H}_2\text{S}$ в газовой фазе, низкие и средние значения температур и давления) (Groves et al., 1998; Kerrich et al., 2000; Ridley, Diamond, 2000; Goldfarb et al., 2005; Bodnar et al., 2014; Goldfarb, Groves, 2015; Прокофьев и др., 2020). Следует отметить, что флюид, отлагавший руды Спокойнинского узла, не содержит метан в газовой фазе. Это его отличительная черта от флюида, из которого образовались многие типичные орогенные месторождения, залегающие в зеленокаменных метаморфизованных толщах, которые всегда содержат метан, нередко углекислоту и азот (Mikucki, 1998; Горячев, 2019; Groves et al., 2020).

В опубликованных работах (Краснов и др., 2007; Борисенко и др., 2017; Добровольская и др., 2016; Prokoryev et al., 2019; Кардашевская и др., 2024) рассмотрены результаты изучения включений в кварце золоторудных месторождений Бодороно, Самола-

зовское и Лебединое, а также в Верхнеамгинском рудном районе, расположенных на Алданском щите. Среди общих характеристик минералообразующих флюидов упомянутых объектов и Спокойнинского узла отметим их низкую и умеренную солёность (0.5–14 мас. % NaCl экв.), высокое содержание CO_2 в газовой фазе (68.4–98.5 мол. %) и температуру гомогенизации 136–390 °C. Формирование данных объектов связывают с процессами позднемезозойской тектоно-магматической активизации, сопровождавшейся становлением комплексов субщелочных и щелочных пород юрско-мелового возраста. В работе И. Р. Прокопьева с соавторами (2019) приводится сопоставление золоторудных районов Алданского щита с объектами провинции Цзяодун, где прослеживается сходство в геологической обстановке регионов.

Таким образом, предложенный механизм формирования золотого оруденения Спокойнинского узла имеет аналогию с условиями образования золоторудных месторождений провинции Цзяодун, расположенной в восточной части Северо-Китайского кратона ($T_{\text{гом}} = 200\text{--}400\text{ °C}$, солёность <11 мас. % NaCl экв., плотность флюида 0.43–0.96 г/см³ (Fan et al., 2003; Deng et al., 2015, 2020a, 2020b; Li et al., 2015; Wang et al., 2015; Guo et al., 2017). По мнению В. Г. Хомича и соавторов (2014), окраины Сибирского и Северо-Китайского кратонов расположены на периферии единого поля стагнирующего слэба и мантийного апвеллинга (Khomich et al., 2014; Прокопьев и др., 2018).

В заключение отметим, что проведенные исследования позволили продемонстрировать наличие различий в физико-химических параметрах минералообразующих флюидов, формировавших три типа руд Спокойнинского золотоносного узла. Полученные результаты не противоречат как полигенной метаморфогенно-плутоногенной гипотезе (Рундквист, 1997; Парфенов, Кузьмин, 2001), связывающей формирование золоторудных месторождений Алданского щита с процессами позднемезозойской тектоно-магматической активизации, так и модели орогенных месторождений золота (Groves et al., 2020).

Авторы благодарны И. Р. Прокопьеву, научным редакторам Н. В. Сорохотиной и О. А. Луканину и анонимному рецензенту за ценные замечания, способствовавшие улучшению текста рукописи.

Работа выполнена за счет государственного задания ИГАБМ СО РАН (проект FUGG-2024-0006) и по государственному заданию ИГМ СО РАН (проект № 122041400312-2, рамановская спектроскопия).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анисимова Г.С., Соколов Е.П. (2015) Алтан-Чайдахский рудный узел — перспективный золоторудный объект Южной Якутии. *Отечественная геология*. (5), 3–10.

- Анисимова Г.С., Соколов Е.П., Кардашевская В.Н. (2017) Золоторедкометалльное (Au-Mo-Te-Bi) оруденение Верхнеалгоминского золотоносного района (Южная Якутия). *Отечественная геология*. (5), 12–22.
- Бойцов В.Е., Верчеба А.А., Пилипенко Т.Н., Жданов А.В. (2010) Металлогеническое районирование Центрально-Алданского рудного района Республики Саха (Якутия). *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. (5), 23–32.
- Борисенко А.С. (1977) Изучение солевого состава растворов газово-жидких включений в минералах методом криометрии. *Геология и геофизика*. (8), 16–27.
- Борисенко И.Д., Боровиков А.А., Борисенко А.С., Гаськов И.В. (2017) Физико-химические условия формирования руд Самолазовского месторождения золота (Центральный Алдан). *Геология и геофизика*. **58**(12), 1915–1927.
- Бортников Н.С., Гамянин Г.Н., Викентьева О.В., Прокофьев В.Ю., Прокопьев А.В. (2010) Золото-сурьмяные месторождения Сарылах и Сентачан (Саха-Якутия): пример совмещения мезотермальных золото-кварцевых и эпитеpmальных антимонитовых руд. *Геология рудных месторождений*. **52**(5), 381–417.
- Бортников Н.С. (2006) Геохимия и происхождение рудообразующих флюидов в гидротермально-магматических системах в тектонически активных зонах. *Геология рудных месторождений*. **48**(1), 3–28.
- Бхаттачарайа С., Паниграи М. (2011) Гетерогенность флюидных характеристик в районе Рамагири-Пенакачерла восточной части кратона Дарвар: связь с золоторудной минерализацией. *Геология и геофизика*. **52**(11), 1821–1834.
- Ветлужских В.Г., Казанский В.И., Кочетков А.Я., Яновский В.М. (2002) Золоторудные месторождения Центрального Алдана. *Геология рудных месторождений*. **44**(6), 467–499.
- Гибшер Н.А., Томиленко А.А., Сазонов А.М., Рябуха М.А., Тимкина А.Л. (2011) Золоторудное месторождение Герфед: характеристика флюидов и РТ-условия образования кварцевых жил (Енисейский кряж, Россия). *Геология и геофизика*. **52**(11), 1851–1867.
- Горячев Н.А. (2019) Месторождения золота в истории Земли. *Геология рудных месторождений*. **61**(6), 3–18.
- Дворник Г.П. (2012) Золоторудные метасоматические формации Центрально-Алданского района. *Литосфера*. (2), 90–105.
- Добровольская М.Г., Разин М.В., Прокофьев В.Ю. (2016) Золоторудное месторождение Лебединое (Центральный Алдан): минеральные парагенезисы, стадии и условия образования. *Геология рудных месторождений*. **58**(4), 346–366.
- Кардашевская В.Н., Анисимова Г.С., Баданина Е.В., Саватенков В.М., Травин А.В. (2024) Алгоминский золоторудный узел (Алдано-Становой щит): минералогия, условия образования, источники рудного вещества и возраст оруденения. *Геология и геофизика*. **65**(3), 471–495.
- Кочетков А.Я. (2006) Мезозойские золотоносные рудно-магматические системы Центрального Алдана. *Геология и геофизика*. **47**(7), 850–864.
- Краснов А.Н., Ломм Т., Крылова Т.Л., Грознова Е.О. (2007) Первые данные рамановской микроспектрометрии рудообразующих флюидов золотой и урановой минерализации Алдана (Республика Саха, Якутия). *ДАН*. **413**(2), 233–236.
- Мигута А.К. (2001) Урановые месторождения Эльконского рудного узла на Алданском щите. *Геология рудных месторождений*. **43**(2), 129–151.
- Молчанов А.В., Терехов А.В., Шатов В.В., Петров О.В., Кукушкин К.А., Козлов Д.С., Шатова Н.В. (2017) Золоторудные районы и узлы Алдано-Становой металлогенической провинции. *Региональная геология и металлогения*. (71), 93–111.
- Парфенов Л.М., Кузьмин М.И. (2001) Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). М.: МАИК “Наука/Интерпериодика”, 571 с.
- Прокопьев И.Р., Кравченко А.А., Иванов А.И., Борисенко А.С., Пономарчук А.В., Зайцев А.И., Кардаш Е.А., Рожков А.А. (2018) Геохронология и рудность Желтулинского щелочного массива (Алданский щит, Южная Якутия). *Тихоокеанская геология*. **37**(1), 37–50.
- Прокофьев В.Ю., Зорина Л.Д., Коваленкер В.А., Акинфиев Н.Н., Бакшеев И.А., Краснов А.Н., Юргенсон Г.А., Трубкин Н.В. (2007) Состав, условия формирования руд и генезис месторождения золота Талатуй (Восточное Забайкалье, Россия). *Геология рудных месторождений*. **49**(1), 37–76.
- Прокофьев В.Ю., Калинин А.А., Лобанов К.В., Бэнкс Д.А., Боровиков А.А., Чичеров М.В. (2018) Состав рудообразующих флюидов золотой минерализации Печенгской структуры зеленокаменного пояса Печенга-Имандра-Варзуга (Кольский полуостров, Россия). *Геология рудных месторождений*. **60**(4), 317–341.
- Прокофьев В.Ю., Наумов В.Б., Миронова О.Ф. (2020) Физико-химические параметры и геохимические особенности флюидов мезозойских золоторудных месторождений. *Геохимия*. **65**(2), 123–144.
- Prokofiev V.Y., Naumov V.B., Mironova O.F. (2020) Physicochemical parameters and geochemical features

- of fluids at mesozoic gold deposits. *Geochem. Int.* **58**(2), 128–150.
- Реддер Э. (1987) Флюидные включения в минералах. М.: Мир, 1, 560 с.
- Рундквист Д.В. (1997) Фактор времени в образовании гидротермальных месторождений: периоды, эпохи, мегаэтапы и стадии рудообразования. *Геология рудных месторождений*. **39**(1), 11–24.
- Сафонов Ю.Г., Попов В.В., Волков А.В., Злобина Т.М., Чаплыгин И.В. (2007) Актуальные проблемы металлогении золота. *Геология и геофизика*. **48**(12), 1257–1275.
- Соколов Е.П., Бабкина Т.Г., Макогонов И.В., Линник И.А., Халгаев Е.У., Шматкова Л.Е., Анисимова Г.С., Кондратьева Л.А., Кардашевская В.Н. (2022) Новый тип золотого оруденения в породах фундамента Алдано-Становой золотоносной провинции. *Руды и металлы*. (2), 122–140.
- Хомич В.Г., Борискина Н.Г. (2010) Структурная позиция крупных золоторудных районов Центрально-Алданского (Якутия) и Аргунского (Забайкалье) супертеррейнов. *Геология и геофизика*. **51**(6), 849–862.
- Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Кузьмин М.И. (2000) Северо-Азиатский суперплюм в фанерозое: магматизм и глубинная геодинамика. *Геотектоника*. (5), 3–29.
- Bakker R.J. (2003) Package FLUIDS 1. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties. *Chemical Geology*. (194), 3–23.
- Bodnar R.J., Vityk M.O. (1994) Interpretation of microthermometric data for H₂O-NaCl fluid inclusions In *Fluid inclusions in minerals: methods and application*. (Eds. De Vivo B., Frezotti M.L.) Blacksburg: Virginia Tech, 117–130.
- Bodnar R.J., Lecumberri-Sanchez P., Moncada D., Steele-MacInnes P. (2014) *Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. Reference Module in Earth Systems and environmental Sciences. Treatise on Geochemistry*, 2nd Edition, Elsevier, 119–142.
- Burke E.A. (2001) Raman microspectrometry of fluid inclusions. *Lithos*. (55), 139–158.
- Deng J., Liu X., Wang Q., Pan R. (2015) Origin of the Jiaodong-type Xinli gold deposit, Jiaodong Peninsula, China: Constraints from fluid inclusion and C-D-O-S-Sr isotope compositions. *Ore Geol. Rev.* (65), 674–686.
- Deng J., Wang Q., Santosh M., Liu X., Liang Y., Yang L., Zhao R., Yang L. (2020a) Remobilization of metasomatized mantle lithosphere: a new model for the Jiaodong gold province, eastern China. *Miner. Deposita*. (55), 257–274.
- Deng J., Yang L.Q., Groves D.I., Zhang L., Qiu K.F., Wang Q.F. (2020b) An integrated mineral system model for the gold deposits of the giant Jiaodong province, eastern China. *Earth Sci. Rev.* (208), 103274.
- Dubessy J., Poty B., Ramboz C. (1989) Advances in C-O-H-N-S fluid geochemistry based on micro-Raman spectrometric analysis of fluid inclusions. *Eur. J. Miner.* (1), 517–534.
- Fan H.R., Zhai M.G., Xie Y.H., Yang J.H. (2003) Ore-forming fluids associated with granite-hosted gold mineralization at the Sanshandao deposit, Jiaodong gold province, China. *Miner. Deposita*. (38), 739–750.
- Goldfarb R.J., Baker T., Dube B., Groves D.I., Hart C.J.R. and Gosselin P. (2005) Distribution, character, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes. In *Economic Geology 100th Anniversary Volume, Society of Economic Geologists Inc.*, (Eds. Hedenquist J.W., Thompson J.F.H., Goldfarb R.J. and Richards J.P). Littleton, 407–450.
- Goldfarb R.J., Groves D.I. (2015) Orogenic gold: common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos*. (233), 2–26.
- Groves D.I., Goldfarb R.J., Gebre-Mariam M., Hagemann S.G., Robert F. (1998) Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geol. Rev.* **13** (1–5), 7–27.
- Groves D.I., Santosh M., Deng J., Wang Q., Yang L., Zhang L. (2020) A holistic model for the origin of orogenic gold deposits and its implications for exploration. *Miner. Deposita*. (55), 275–292.
- Guo L.N., Chen B.H., Goldfarb R.J., Li J.L., Li R.H., Wang Z.L. (2017) A comparison of Jiaojia- and Linglong-type gold deposit ore-forming fluids: do they differ? *Ore Geol. Rev.* (88), 511–533.
- Ivanov A.I., Loskutov E.E., Ivanov M.S., Zhuravlev A.I. (2022) Petrography, geochemical features and absolute dating of the Mesozoic igneous rocks of Medvedev and Tazhnyi massifs (Southeast Russia, Aldan shield). *Minerals*. **12** (12), 1516.
- Kerrick R., Goldfarb R., Groves D., Garwin S., Jia Y. (2000) The characteristics, origins, and geodynamic settings of supergiant gold metallogenic provinces. *Science in China (Series D)*. (43), 1–68.
- Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. (2014) A geodynamic perspective of worldclass gold deposits in East Asia. *Gondwana Res.* (26), 816–833.
- Khomich V.G., Boriskina N.G., Santosh M. (2015) Geodynamics of late Mesozoic PGE, Au, and U mineralization in the Aldan shield, North Asian Craton. *Ore geol. rev.* (68), 30–42.
- Kondratieva L.A., Anisimova G.S., Kardashevskaya V.N. (2023) Ore mineralogy and typomorphism of native gold

- of the Spokoininsky cluster of the Aldan-Stanovoy gold province. *Minerals*. **13**(4), 543.
- Li L., Santosh M., Li S.-R. (2015) The “Jiaodong type” gold deposits: Characteristics, origin and prospecting. *Ore geol. Rev.* **65**(3), 589–611.
- Li M., Mao G., Ding Zh., Xu Q., Zhao H., Han Y., He T. (2024) Genesis of the Panzijian gold deposit in Jiaodong Peninsula, Eastern China: Insights from fluid inclusions and isotopes. *Solid Earth Sciences*. **9**(2), 100177.
- Lu H.Z. (2011) Fluids immiscibility and fluid inclusions. *Acta Petrol. Sin.* **27**(5), 1253–1261.
- Mikucki E.J. (1998) Hydrothermal transport and depositional processes in Archean lode-gold systems: a review. *Ore Geol. Rev.* (13), 307–321.
- Prokopyev I.R., Doroshkevich A.G., Ponomarchuk A.V., Redina A.A., Yegitova I.V., Ponomarev J.D., Sergeev S.A., Kravchenko A.A., Ivanov A.I., Sokolov E.P., Kardash E.A., Minakov A.V. (2019) 1U-Pb SIMS and Ar-Ar geochronology, petrography, mineralogy and gold mineralization of the late Mesozoic Amga alkaline rocks (Aldan shield, Russia). *Ore Geol. Rev.* (109), 520–534.
- Ridley J.R., Diamond L.W. (2000) Fluid chemistry of orogenic lode gold deposits and implications for genetic models. In *Gold in 2000. Reviews in Economic Geology*. (Eds. Hagemann S.G., Brown P.). (13), 141–162.
- Rodionov S.M., Fredericksen R.S., Berdnikov N.V., Yakubchuk A.S. (2014) The Kuranakh epithermal gold deposit (Aldan Shield, East Russia). *Ore Geol. Rev.* (59), 55–65.
- Thiery R., van den Kerkhof A.M., Dubessy J. (1994) ν X properties of CH_4 - CO_2 and CO_2 - N_2 fluid inclusions: modeling for $T < 31^\circ\text{C}$ and $P < 400$ bars. *Eur. J. Miner.* **6**(6), 753–771.
- Tomilenko A.A., Gibsher N.A., Dublaynsky Y.V., Dal-lai L. (2010) Geochemical and isotopic properties of fluid from gold-bearing and barren quartz veins of the Sovetskoye deposit (Siberia, Russia). *Econ. Geol.* (105), 375–394.
- Wang Z.-L., Yang L.-Q., Guo L.-N., Marsh E., Wang J.-P., Liu Y., Zhang C., Li R.-H., Zhang L., Zheng X.-L., Zhao R.-X. (2015) Fluid immiscibility and gold deposition in the Xincheng deposit, Jiaodong Peninsula, China: A fluid inclusion study. *Ore Geol. Rev.* (65), 701–717.
- White D.E., Muffler L.J.P., Truesdell A.H. (1971) Vapor-dominated hydrothermal systems compared with hot-water systems. *Econ. Geol.* **66**(1), 75–97.
- Wilkinson J.J. (2001) Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos.* (55), 229–272.

FORMATION CONDITIONS OF GOLD MINERALIZATION IN THE SPOKONINSKY ORE CLUSTER, ALDAN SHIELD, RUSSIA

© 2025 V. N. Kardashevskaya^{a, *}, L. A. Kondratieva^{a, **}, E. O. Shaparenko^b, G. S. Anisimova^a

^a*Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
Lenina prospect, 39, Yakutsk, 677980 Russia*

^b*V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch Russian Academy of Sciences,
Akademika Koptuyuga prospect, 3, Novosibirsk, 630090 Russia*

*e-mail: kardashevskaya92@mail.ru

**e-mail: lkon12@yandex.ru

Received May 17, 2024

Revised August 6, 2024

Accepted September 3, 2024

The article presents the first data on individual fluid inclusions hosted in quartz in the ores of three ore types (polysulfide, gold-silver-telluride and gold-bismuth) of the Spokoininsky ore cluster with gold ore mineralization. The three ore types show differences in the physicochemical parameters and composition of their fluids. The fluid of the Spokoininsky cluster polysulfide ores are characterized by a relatively low initial temperature (180–350 °C), a higher CO₂ density (0.27–0.71 g/cm³) and a higher fluid pressure (0.7–1 kbar) compared to the fluids that formed the gold-silver-telluride ores (temperature 200–260 °C, CO₂ density 0.28–0.56 g/cm³, pressure 0.7 kbar). The dominant salt in the fluids of polysulfide ores are Na and Mg chlorides, whereas the mineral-forming fluids of gold-silver-telluride ores are simpler saline aqueous fluids containing Na chlorides. The fluids that formed the polysulfide ores have a H₂O-CO₂-N₂ composition, whereas the fluid of the gold-silver-telluride ores, is mostly of H₂O-CO₂ composition. The gold-bismuth ores in the Mayskoe ore field were formed by H₂O-CO₂-bearing fluids with a salinity concentration of 4.0–6.4 wt. % NaCl eq., a CO₂ density of 0.56–0.61 g/cm³, at a temperature of 280–335 °C and a pressure of 0.7 kbar. The data led us to conclude that the ore-forming fluid of the Spokoininsky ore cluster was similar to the fluids of orogenic gold deposits.

Keywords: quartz, gold, fluid inclusions, Raman spectroscopy, Aldan Shield