

Благороднометалльная минерализация и условия образования Au-Ag эпитермальных жил на Au-Mo-Cu-порфировом месторождении Кызык-Чадр (Восточная Тува)

Р. В. Кужугет¹, Н. Н. Анкушева², Ю. А. Калинин³, А. Ш. Шавекина³,
В. И. Лосев⁴, М. М. Баланай¹

¹Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, 667007, г. Кызыл,
ул. Интернациональная, 117а, e-mail: rkuzhuget@mail.ru

²ЮУ ФНЦ МуГ УрО РАН, Ильменский заповедник, г. Миасс, 456317, e-mail: ankusheva@mail.ru

³Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, г. Новосибирск,
пр-т Академика Коптюга, 3, e-mail: yuri.a.kalinin@mail.ru

⁴Сибирский федеральный университет, 660025, г. Красноярск, пер. Вузовский, 3,
e-mail: vovalosev98@gmail.com

Поступила в редакцию 18.02.2024 г., принята к печати 16.04.2024 г.

Объект исследований. Рассмотрены результаты минералого-геохимических, термобарогеохимических и изотопно-геохимических исследований Au-Ag эпитермальных жил Au-Mo-Cu-порфирового месторождения Кызык-Чадр (Восточная Тува). Целью работы является установление минералого-геохимических особенностей и условий образования золотосульфидно-кварцевых жил месторождения Кызык-Чадр для определения его рудно-формационной принадлежности. **Методы.** Химический состав минералов установлен методом сканирующей электронной микроскопии. Условия образования жил, газовый и солевой состав растворов во флюидных включениях определены методами микротермометрии и рамановской спектроскопии. Изотопный состав кислорода в кварце и серы в сульфидах выявлен методами изотопной геохимии. **Результаты.** Установлено широкое разнообразие минеральных форм Au и Ag в золотосульфидно-кварцевых жилах благодаря вариациям fO_2 , fS_2 , fSe_2 и fTe_2 в процессе рудоотложения: золото, Hg-золото, Hg-электрум, Hg-кюстелит, вейшанит $(Au,Ag)_{12}Hg_{0.8}$, силванит $AgAuTe_2$, петцит Ag_3AuTe_2 , гессит Ag_2Te , шпютцит Ag_5Te_3 , эмпрессит $AgTe$, фишессерит Ag_3AuSe_2 , Se-ютенбогардит Ag_3AuS_2 , акантит Ag_2S , которые ассоциируют с алтанитом $PbTe$, колорадоитом $HgTe$, клаусталитом $PbSe$, блеклыми рудами ряда теннантит-тетраэдрит и баритом. Анализ флюидных включений (термометрия, рамановская спектроскопия) в кварце и минеральная термометрия (парагенезис петцит-гессит-самородное Au) позволили определить, что рудные жилы отлагались из углекислотно-водного $Na-K \pm Mg$ -хлоридного флюида с соленостью 5.7–10.0 мас. % $NaCl$ -экв. при снижении температур от 360 до 230°C и вариациях fO_2 , fS_2 , fSe_2 и fTe_2 . Изотопия кислорода в кварце указывает на смешение магматического флюида с метеорной водой ($\delta^{18}O$ флюида от +3.5 до +7.1‰). Значения $\delta^{34}S_{H_2S}$ флюида от +7.1 до +5.2‰ позволяют предполагать, что часть серы была извлечена из вмещающих пород. **Выводы.** По минералого-геохимическим особенностям и условиям образования золотосульфидно-кварцевые жилы Au-Mo-Cu-порфирового месторождения Кызык-Чадр могут быть отнесены к промежуточному типу эпитермальных Au-Ag жил, которые являются продуктом деятельности единой порфирово-эпитермальной рудно-магматической системы в Кызык-Чадрском рудном поле.

Ключевые слова: самородное золото, Au-Mo-Cu-порфировые месторождения, Au-Ag эпитермальное оруденение, теллуриды Au-Ag, кварц, флюидные включения, стабильные изотопы, Тува

Источник финансирования

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-27-00344, <https://rscf.ru/project/23-27-00344/>)

Noble-metal mineralization and conditions of formation of Au-Ag epithermal veins from Kyzik-Chadr Au-Mo-Cu porphyry deposit, Eastern Tuva

Renat V. Kuzhuget¹, Natalia N. Ankusheva², Yury A. Kalinin³, Alfiya Sh. Shavekina³,
Vladimir I. Losev⁴, Mila M. Balanay¹

Для цитирования: Кужугет Р.В., Анкушева Н.Н., Калинин Ю.А., Шавекина А.Ш., Лосев В.И., Баланай М.М. (2024) Благороднометалльная минерализация и условия образования Au-Ag эпитермальных жил на Au-Mo-Cu-порфировом месторождении Кызык-Чадр (Восточная Тува). *Литосфера*, 24(6), 1029-1045. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-6-1029-1045>

For citation: Kuzhuget R.V., Ankusheva N.N., Kalinin Yu.A., Shavekina A.Sh., Losev V.I., Balanay M.M. (2024) Noble-metal mineralization and conditions of formation of Au-Ag epithermal veins from Kyzik-Chadr Au-Mo-Cu porphyry deposit, Eastern Tuva. *Lithosphere (Russia)*, 24(6), 1029-1045. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-6-1029-1045>

© Р.В. Кужугет, Н.Н. Анкушева, Ю.А. Калинин, А.Ш. Шавекина, В.И. Лосев, М.М. Баланай, 2024

¹Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS, 117a Internatsionalnaya st., Kyzyl 667007, Russia, e-mail: rkuzhuget@mail.ru
²SU FRC MG UB RAS, Ilmensky Reserve, Miass, Chelyabinsk Region 456317, Russia, e-mail: ankusheva@mail.ru
³V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, 3 Academician Koptyug av., Novosibirsk 630090, Russia, e-mail: yuri.a.kalinin@mail.ru
⁴Siberian Federal University, 3 Vavilova st., Krasnoyarsk 660025, Russia, e-mail: vovalosev98@gmail.com

Received 18.02.2024, accepted 16.04.2024

Research object. The results of mineralogical-geochemical, fluid inclusion and isotopic studies of Au-Ag epithermal veins of Kyzik-Chadr Au-Mo-Cu porphyry deposit (Eastern Tuva) are considered. The aim of the study is to examine mineralogical and geochemical peculiarities and conditions of formation of gold-sulfide-quartz veins from Kyzik-Chadr deposit to identify their ore-formation. **Methods.** The chemical composition of minerals was determined by SEM (Tescan MIRA 3 LMU with XMax 80 and INCA Wave 500 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd). Fluid inclusion study in quartz were carried out using a Linkam TMS-600 thermostage with LinkSystem 32 DV-NC software and an Olympus BX51 optical microscope. The oxygen isotopic composition of quartz was determined on a FINNIGAN MAT 253 gas mass spectrometer. The isotopic composition of sulfur in sulfides was determined using a Finnigan MAT Delta gas mass spectrometer in the double-infusion mode. **Results.** A wide variety of Au-Ag minerals in gold-sulfide-quartz veins due to variations of fO_2 , fS_2 , fSe_2 and fTe_2 during ore formation was diagnosed: gold, Hg-gold, Hg-electrum, Hg-kustelite, weishanite $(Au, Ag)_{1.2}Hg_{0.8}$, sylvanite $AgAuTe_2$, petzite Ag_3AuTe_2 , hessite Ag_2Te , schützite Ag_5Te_3 , empressite $AgTe$, fischerite Ag_3AuSe_2 , Se-uytenbogaardtite Ag_3AuS_2 , acanthite Ag_2S , which are associated with altaite $PbTe$, coloradoite $HgTe$, claustalite $PbSe$, fahlores of tennantite-tetrahedrite series and barite. The study of fluid inclusions (thermometry, Raman spectroscopy) in quartz and mineral thermometry (petzite–hessite–native Au paragenesis) determined that the ore veins were formed due to CO_2 -water Na-K ± Mg-chloride fluid with salinity of 5.7–10.0 wt % NaCl eq with temperatures decreasing from 360 to 230°C and variations in fO_2 , fS_2 , fSe_2 , and fTe_2 . Oxygen isotopy in quartz indicates mixing of magmatic fluid with meteoric water ($\delta^{18}O$ of fluid from +3.5 to +7.1‰). The $\delta^{34}S_{H_2S}$ values of the fluid from +7.1 to +5.2‰ suggest that some sulfur was extracted from the host rocks. **Conclusions.** According to mineralogical and geochemical peculiarities and conditions of formation of gold-sulfide-quartz veins from Kyzik-Chadr Au-Mo-Cu porphyry deposit can be attributed to epithermal Au-Ag veins of intermediate sulfidation type, which are the product of a single porphyry-epithermal ore-magmatic system in the Kyzik-Chadr ore field.

Keywords: native gold, Au-Mo-Cu-porphyry deposits, Au-Ag epithermal mineralization, Au-Ag tellurides, quartz, fluid inclusions, stable isotopes, Tuva

Funding information

The study is supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-27-00344, <https://rscf.ru/project/23-27-00344/>)

ВВЕДЕНИЕ

На территории Тувы (север Центрально-Азиатского орогенного пояса (ЦАОП)) расположены Au-Mo-Cu-порфиновые объекты, наиболее крупными из них являются месторождения Ак-Суг и Кызык-Чадр (потенциальное месторождение) в Восточной Туве. Au-Mo-Cu-порфиновые объекты региона связаны с известково-щелочными ранне- и средне-кембрийскими порфиловыми интрузиями.

Возраст формирования Ак-Сугского (U-Pb возраст рудоносных интрузий по циркону $(515 \pm 4) - (499 \pm 6)$ млн лет (Berzina et al., 2016), Re-Os датировки молибденита 518, 517, 516 и 511 млн лет (Berzina et al., 2003; Pollard et al., 2017)) и Кызык-Чадрского (U-Pb возраст кварцевых порфиров 507 ± 2 млн лет (Гусев и др., 2014)) месторождений предполагает, что они образовались при переходе геодинамической обстановки от островодужной (570–518 млн лет) к аккреционно-коллизийной (510–450 млн лет) либо на стадии образования аккреционно-коллизийного магматического пояса (Старостин и др., 2023).

Медно-порфиновые месторождения пространственно и генетически могут быть связаны с Au-Ag

эпитеpмальными и полиметаллическими (Zn-Cu-Pb-Ag ± Au) месторождениями, которые как сменяют друг друга по вертикали и образуются в единой порфирово-эпитеpмальной рудно-магматической системе (White, Hedenquist, 1995; Sillitoe, 2010), так и совмещены пространственно.

На месторождении Кызык-Чадр, кроме прожилково-вкрапленных руд, выявлено семь золотосульфидно-кварцевых жил, которые известны с 1904 г. Происхождение золотосульфидно-кварцевых жил является дискуссионным, так как условия образования и минералого-геохимические особенности изучены недостаточно, что и стало задачами настоящего исследования в целях определения рудно-формационной принадлежности этих жил.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Тува представляет собой аккреционно-коллизийную структуру, возникшую при геодинамической эволюции и закрытии Палеоазиатского океана (Berzin et al., 1994; Berzin, Kungurtsev, 1996; Yarmolyuk, Kovalenko, 2003). Эволюция геолого-тектонических структур региона была длительной

и происходила многоэтапно с последовательной сменой геодинамических режимов (океанический с примитивными островодужными комплексами ≈ 1000 –600 млн лет, островодужный – 570–518 млн лет, аккреционно-коллизийный – 510–450 млн лет и т.д.) (Rudnev et al., 2015), с каждым из которых сопряжен определенный набор магматических и рудных формаций.

Au-Mo-Cu-порфировое месторождение Кызык-Чадр открыто в 1951 г., опойсковывалось и разведывалось до 1977 г. В разные годы оно изучалось Э.Л. Варандом (1955–1956), Р.Т. Уссаром (1976–1977), М.И. Семеновым (2009–2015) и др. Месторождение находится в Пий-Хемском районе Тувы, в верховьях р. Кызык-Чадр, в 18 км от с. Сушь и в 50 км от г. Кызыла.

Месторождение является составной частью одноименного рудного поля, расположенного в зоне контакта структур Хемчикско-Систигхемского коллизийного прогиба салаирской складчатой системы и девонского Тувинского рифтогенного прогиба. Рудное поле находится в краевой части Ожинского плутона, в составе которого выделяются породы таннуольского (C_2) и кызыкчадрского (C_{2-3}) интрузивных комплексов (Семенов, Юркевич, 2019). Ожинский плутон в плане имеет овальную форму, прослеживается на 60 км в широтном направлении и достигает 15 км в поперечнике. В южной части плутона расположен полифазный Кызыкчадрский интрузивный габбро-диорит-гранодиорит-гранитный массив размером 12.5×3.0 км, прорывающий метаморфизованные вулканогенно-осадочные породы туматтайгинской свиты вендраннекембрийского возраста (Уссар и др., 1978; Гусев и др., 2014; Старостин и др., 2022). По петрохимическим характеристикам породы кызыкчадрского комплекса относятся к известково-щелочной серии с повышенной калиевой щелочностью. Рудоносными являются порфиновые породы (кварцевые диорит-порфиры, гранодиорит-порфиры, гранит-порфиры) в центральной части массива, слагающие малые пластинообразные и дайкообразные тела, прорывающие гранитоиды главных фаз. В краевой части порфирового интрузива присутствуют разрозненные тела приконтактовых эксплозивных брекчий, что предполагает относительно малый эрозионный срез рудно-магматической системы (Старостин и др., 2023). Возраст формирования гранитов Кызыкчадрского массива, определенный по цирконам (U-Pb, SHRIMP II), составляет 508 ± 7 млн лет, кварцевых порфиров – 507 ± 2 млн лет (Гусев и др., 2014).

На месторождении Кызык-Чадр выявлены два участка, расположенных в 2 км друг от друга (рис. 1), которые представляют собой зоны интенсивных гидротермальных изменений (серицитизация, окварцевание, сульфидизация и т. д.). Первый участок находится в районе слияния руч. Ле-

вого, Среднего и Правого Кызык-Чадра. В пределах участка развиты филлитовидные “сланцы” по вулканогенно-осадочным породам туматтайгинской свиты (V- C_{1tm}) с небольшим линзовидным выходом апофизы гранитов (1.0×0.1 км) третьей фазы кызыкчадрского комплекса. На контакте с гранитами в сланцах отмечены зоны дробления, ороговикования, карбонатизации и хлоритизации мощностью от 2 до 10 м. Граниты интенсивно изменены вплоть до образования серицит-альбит-кварцевых метасоматитов, иногда с хлоритом и эпидотом. Реликтовые структуры средне- и мелкозернистые, гипидиоморфно-зернистые, порфировые; текстуры массивные, порфировые, микроструктуры пойкилитовые. На участке выявлены небольшие тела прожилково-вкрапленных медных руд и несколько золотокварцевых и золотосульфидно-кварцевых жил. Первый участок меньше размером, чем второй, но руды здесь богаче Au и Cu и связаны с золотосульфидно-кварцевыми жилами с борнитом, халькопиритом, пиритом. Кварцевожильные тела сопровождаются оторочками интенсивно милонитизированных пород, зонами серицитизации, аргиллизации и окварцевания.

Золото локализовано в кварцевых жилах мощностью от 1.5 до 4.5 м и длиной от 40 до 170 м. В рудном поле месторождения известно семь кварцевых жил, две из которых (№ 1 и 3) разведывались, остальные пять жил имеют неясные перспективы и нуждаются в геологическом изучении. По жилам № 1 и 3 подсчитаны запасы: Au по категории B + $C_1 + C_2$ – 947.5 кг, Cu по категории B + $C_1 + C_2$ – 10.1 тыс. т, Ag по категории C_2 – 3596 кг (Уссар и др., 1978).

Второй участок месторождения расположен в верховьях руч. Левого и Среднего Кызык-Чадра и представляет собой крупное поле штокверкового Au-Mo-Cu-порфирового оруденения, прослеживающееся в СЗ направлении на 4 км при ширине 0.25–2.5 км. Штокверковое оруденение с прожилково-вкрапленной минерализацией, сопровождается зональным ареалом гидротермально-метасоматических изменений (от центра к периферии: кварц-калиево-полевошпатовая, кварц-серицитовая, внутренняя пропилитовая, внешняя пропилитовая), приурочено к экзо- и эндоконтактовой зоне рудоносного порфирового интрузива (Андреев и др., 2021). Наложенная аргиллизация встречается в виде отдельных участков в зонах кварц-серицитовых метасоматитов. Промышленные прожилково-вкрапленные руды приурочены к областям сопряжения кварц-калиево-полевошпатовой, кварц-серицитовой и внутренней пропилитовой метасоматических зон. В пределах внешних кварц-серицитовой зоны и пропилитовой подзоны развит “пиритовый ореол”.

Рудная минерализация представлена мелкой рассеянной вкрапленностью сульфидов, распро-

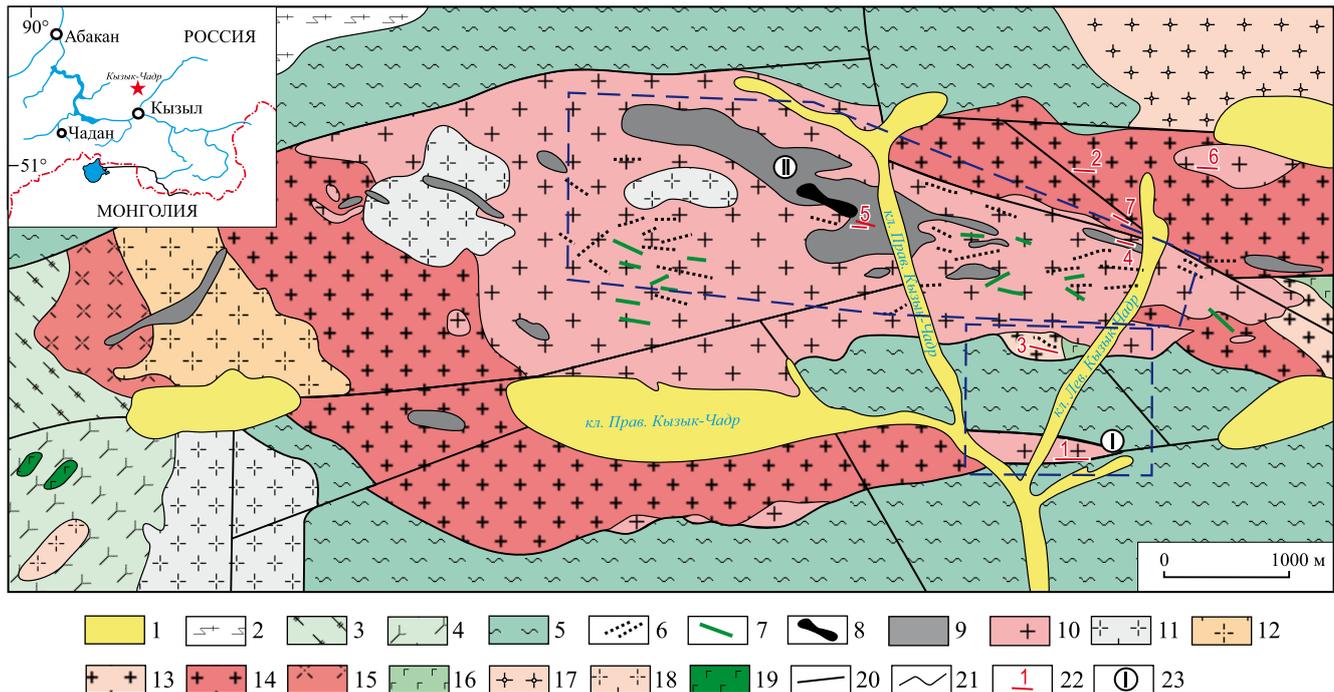


Рис. 1. Схема геологического строения Кызык-Чадрского рудного поля (по данным Р.Т. Уссара с соавторами (1978), Н.И. Гусева с соавторами (2014) с дополнениями авторов).

1 – четвертичные отложения (Q_{3-4}); 2 – бластокатаклазиты (по породам среднего состава), гнейсы, кристаллические сланцы; 3 – порфиroidы; 4 – метапорфириты; 5 – серицит-хлорит-кварц-полевошпатовые сланцы; 6–14 – кызыкчадрский комплекс (C_{1-2k}): 6 – дайки кварцевых, кварц-плагиоклазовых и биотит-кварц-плагиоклазовых порфиров, 7 – дайки диорит-порфиров, 8 – взрывные брекчии, 9 – кварцевые диорит-порфиры, гранодиорит-порфиры, 10 – граниты биотитовые среднезернистые, 11 – гранодиориты средне- и равномернозернистые, 12 – гранодиориты порфировидные, 13 – микрогранодиориты, 14 – кварцевые монодиориты; 15 – диориты, габбро-диориты; 16 – габброиды; 17 – ранне- и среднекембрийские граниты; 18, 19 – раннекембрийский комплекс: 18 – гранит-порфиры, 19 – габбро; 20 – разрывные нарушения; 21 – геологические границы; 22 – рудные жилы и их номера; 23 – рудные участки (I – Первый, II – Второй).

Fig. 1. Geological scheme of the Kyzik-Chadryr ore field (according to R.T. Ussar et al. (1978), N.I. Gusev et al., (2014), modified).

1 – Quaternary sediments (Q_{3-4}); 2 – blastocataclasites, gneisses, crystalline schists; 3 – porphyroids; 4 – metaporphyrites; 5 – sericite-chlorite-quartz-feldspar schists; 6–14 – Kyzikchadryr complex (C_{1-2k}): 6 – dykes of quartz-, quartz-plagioclase and biotite-quartz-plagioclase porphyries, 7 – dykes of diorite-porphyries, 8 – explosive breccias, 9 – quartz-, quartz-plagioclase and biotite-quartz-plagioclase porphyries, 10 – medium-grained biotite granites, 11 – uniform-grained granodiorites, 12 – porphyritic granodiorites, 13 – microgranodiorites, 14 – quartz monodiorites; 15 – diorites, gabbro-diorites; 16 – gabbroids; 17 – Early-Middle Cambrian granites; 18, 19 – Early Cambrian complex: 18 – granite-porphyries, 19 – gabbro; 20 – faults; 21 – geological boundaries; 22 – ore veins; 23 – ore areas (I – First, II – Second).

страненной как в основной массе метасоматитов, так и в кварц-карбонатных, кварцевых и кварц-сульфидных прожилках. Мощность кварцевых, карбонатно-кварцевых, полевошпатово-кварцевых и пирит-кварцевых прожилков – первые сантиметры, иногда до 0.5 м. Нередки прожилки молибденита и халькопирита, приуроченные к плоскостям трещин. Текстуры руд вкрапленные, прожилково-вкрапленные, прожилковые (Рогов, 1992). Главные рудные минералы прожилково-вкрапленных руд: пирит, халькопирит, в меньшей степени молибденит; второстепенные – борнит, блеклые руды, галенит, сфалерит, гематит, магнетит; редкие – арсенопирит, энаргит и самородное золото; гипергенные –

халькозин, малахит, азурит, ковеллин, хризоколла, лимонит, самородная медь. Зона вторичного сульфидного обогащения отсутствует.

Рудные минералы образуют минеральные ассоциации, концентрически сменяющиеся в пространстве от центральных частей минерализованных зон к их периферии в следующем порядке: борнит-халькопирит-кварцевая (в кварц-калиево-полевошпатовой зоне), пирит-молибденит-халькопирит-кварцевая (в кварц-калиево-полевошпатовой, кварц-серицитовой и внешней пропилитовой зонах), пирит-блеклово-рудно-полисульфидная (в карбонатизированной тектонической, кварц-серицитовой и аргиллизитовой зонах) (Андреев и др., 2021).

Штокверковое оруденение характеризуется первичными и вторичными ореолами рассеяния основных элементов-индикаторов медно-порфирового оруденения – Cu (0.01–0.6%), Mo (0.001–0.02%), Au (0.01–0.3 г/т), а также элементов-спутников – Ag, Pb, Zn, As, Sb, Bi, Co и корреляцией Ag и Au в пространстве. При этом оно имеет типичное зональное строение – концентрации Cu + Mo + Au в меднорудной зоне и Pb + Zn + Ag – на ее периферии. Содержание золота в прожилково-вкрапленных рудах достигает до 30 г/т, Ag – более 100 г/т. Самородное золото в этих рудах образует вкрапленность (0.03–0.05 мм) в халькопирите, слагающем гнезда с пиритом в прожилках кварца, а также пересекающим и цементирующим раздробленные зерна пирита (Андреев и др., 2021). Руды прослежены на глубину более 500 м без признаков выклинивания.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы руд отобраны с поверхности месторождения из естественных горных обнажений и геологоразведочных канав. Для определения минерального состава, текстурно-структурных особенностей руд и гидротермально измененных пород и взаимоотношений минералов полированные шлифы и аншлифы изучены на микроскопах Olympus BX41 и ПОЛАМ П-213М в ТуВИКОПР СО РАН (г. Кызыл).

Химический состав минералов определен в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск, аналитик А.Ш. Шабекина) на СЭМ MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding) с системами микроанализа INCA Energy 450+XMax 80 и INCA Wave 500 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd). Для характеристики самородного золота использована следующая градация: весьма высокопробное – 1000–950‰, высокопробное – 950–900‰, средней пробыности – 900–800‰, относительно низкопробное – 800–700‰, электрум (низкопробное) – 700–300‰, кюстелит – 300–100‰, самородное серебро – 300–100‰. Проба самородного золота определялась в промилле (‰) по формуле $Au/(Au + Ag + Hg) \times 1000\%$.

Термометрические исследования флюидных включений в кварце проведены в термокамере Linkam TMS-600 с ПО LinkSystem 32 DV-NC и оптическим микроскопом Olympus BX51 (ЮУрГУ, г. Миасс, аналитик Н.Н. Анкушева). Температуры эвтектики флюидных включений интерпретированы с использованием работ (Борисенко, 1982; Davis et al., 1990). Концентрации солей в растворах включений определены по финальным температурам плавления льда во включениях по (Bodnar, Vituk, 1994). Температуры гомогенизации включений приняты за минимальные температуры процесса минералообразования (Реддер, 1978). Состав газовой фазы флюидных включений уточнен при помо-

щи рамановского микроспектрометра Horiba Jobin Yvon LabRam HR800 в сочетании с CCD-детектором и микроскопом Olympus BX40 с использованием 532-нм Nd:YAG-лазера. Монохроматор откалиброван по кремниевой полосе (520.7 см^{-1}) (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск, аналитик Е.О. Шапаренко). Обработка результатов измерений выполнена в программе Statistica 6.1.

PT условия отложения жил также рассчитаны по геотермометрам, геофугометрам и минеральным парагенезисам. Области стабильностей рудных минералов в координатах fS_2 – fTe_2 рассчитаны с использованием (Barton, Skinner, 1979; Afifi et al., 1988).

Изотопный состав кислорода в кварце определен в АЦ “Геоспектр” ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ, аналитик В.Ф. Посохов) на газовом масс-спектрометре FINNIGAN MAT 253 с использованием двойной системы напуска в классическом варианте (стандарт-образец). Значения $\delta^{18}O$ приведены в промилле (‰) относительно стандарта SMOW.

Изотопный состав серы в сульфидах проанализирован в ЦКП “Многоэлементные и изотопные исследования” СО РАН с использованием газового масс-спектрометра Finnigan MAT Delta в режиме двойного напуска (г. Новосибирск, аналитик В.Н. Реутский). Контроль измерений проведен набором образцов стандартного изотопного состава в диапазоне $\delta^{34}S$ от –15.1 до +21.8‰ относительно троилита из Canyon Diablo (CDT), в том числе международных: NBS-123 ($\delta^{34}S = +17.44$) и NBS-127 ($\delta^{34}S = +21.8$). Воспроизводимость значений $\delta^{34}S$, включая подготовку образца, не превысила 0.1‰ (2 σ). Значения $\delta^{34}S$ (‰) приведены относительно стандарта CDT.

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ЗОЛОТОСУЛЬФИДНО-КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ

Авторами изучена золоторудная минерализация жил № 1 и 3. Жила № 1 залегает на южном контакте гранитов кызыкчадрского комплекса с вмещающими метаморфизованными вулканогенно-осадочными породами туматтайгинской свиты (V–C₁tm). Простирается ее субширотное, падение северное под углом 45–50°, на поверхности жила прослежена на 170 м, на глубину – на 95 м. Средняя мощность жилы составляет 0.9 м при разбросе от 0.1 до 4.5 м. Жила сложена молочно-белым, брекчированным кварцем, который с цементированными сульфидами меди образует руды массивной, полосчатой, петельчатой и брекчиевидной текстур.

Рудные минералы представлены борнитом, количество которого иногда превышает 15–20%. В небольшом количестве отмечаются халькопирит, пирит и самородное Au. Содержание Au в жиле колеблется от следов до 150 (в среднем 8.2) г/т, Ag – 78 (в среднем 28) г/т.

Жила № 3 залегает в микрогранодиоритах кызыкчадрского комплекса и имеет протяженность 160 м, мощность – 0.1–2.0 м. Среднее содержание Au составляет 14 г/т, максимальное – 40 г/т. Мощность остальных жил варьируется от долей метра до 2 м (в среднем 0.3–0.4 м) при протяженности от 36 до 140 м (Уссар и др., 1978).

Минералого-геохимическими исследованиями установлены три стадии минерализации (рис. 2): 1) кварц-серицитовая с пиритом; 2) золотосульфидно-кварцевая с кварцем, сидеритом, борнитом, халькопиритом, пиритом, минералами ряда галенит–клаусталит, золотом, ртутистым золотом, электрумом, ртутистым электрумом, ртутистым кюстелитом, вейшанитом $(Au, Ag)_{1.2}Hg_{0.8}$, гесситом Ag_2Te , алтаитом $PbTe$, колорадоитом $HgTe$, штюццитом Ag_5Te_3 , эмпресситом $AgTe$, сильванитом $AgAuTe_2$, петцитом Ag_3AuTe_2 , фишессеритом Ag_3AuSe_2 , блеклыми рудами, баритом ± цумоит $BiTe \pm Se$ -ютенбогардтит $Ag_3AuS_2 \pm$ акантит Ag_2S , самородные Bi и Te ; 3) хлорит-кальцит-кварцевая.

В коре выветривания развиты малахит, азурит, лимонит, халькозин, ковеллин, церуссит, хризокolla, иодаргирит, майерсит, гипергенное золото.

Самородное золото, а также агрегаты высокопробного золота, Hg-золота и Hg-электрума образуют вкрапленность в кварце, борните, пирите или малахите и халькозине. Видимое золото в рудах представлено зернами от 0.01 до 5.0 мм. Цвет золота варьируется от золотисто-желтого до серебристого с желтоватым оттенком. Для большинства зерен (60%) характерен неоднородный цвет, который изменяется в пределах одного зерна. Соотношение золотисто-желтых и серебристых участков на поверхности зерен также варьируется. Форма зерен разнообразна: преобладают трещинно-прожилковые, комковато-ветвистые, угловатые, каплевидные и ячеистые, реже отмечаются кристаллы и губчатые зерна золота. Поверхность зерен преимущественно шагреневая, мелкоямчатая, ямчато-бугорчатая, иногда ровная (рис. 3).

Электронно-микроскопическими исследованиями установлено, что самородное золото по содержаниям Ag и Hg представлено (мас. %):

1) весьма высокопробным ($Au - 94.41-97.39$, $Ag - 1.63-4.45$, $Cu - 0.00-0.60$, $Te - 0.00-0.41$);

2) высокопробным с Hg до 1.3 мас. % ($Au - 89.81-96.37$, $Ag - 4.18-8.03$, $Hg - 0.00-1.25$, $Cu - 0.00-0.43$, $Te - 0.00-0.42$);

3) среднепробным с Hg до 4 мас. % ($Au - 80.14-89.15$, $Ag - 7.26-18.98$, $Hg - 0.00-3.66$, $Cu - 0.00-0.40$, $Te - 0.00-0.42$);

4) относительно низкопробным с Hg до 7 мас. % ($Au - 71.56-79.15$, $Ag - 18.03-24.94$, $Hg - 0.00-6.95$, $Cu - 0.00-0.31$);

5) ртутистым электрумом ($Au - 31.19-69.28$, $Ag - 25.14-51.81$, $Hg - 3.30-19.82$, $Cu - 0.00-0.84$, $Te - 0.00-0.78$);

6) ртутистым кюстелитом ($Au - 29.28$, $Ag - 51.16$; $Hg - 19.08$). Средняя пробность золота жил месторождения Кызык-Чадр составляет 735‰ при вариациях от 294 до 998‰. Содержание Ag в минералах ряда $Au-Ag-Hg$ отмечается (мас. %) до 53.83, $Hg - 19.82$, $Cu - 0.83$, $Te - 0.78$. В самородном золоте наблюдается обратная корреляция содержания Hg с пробностью золота, т. е. содержание Au от центра зерна к краю закономерно уменьшается до 10 мас. %, иногда с 90.97 до 62.97 мас. %, а содержания Ag и Hg , наоборот, увеличиваются вплоть до Hg-электрума (табл. 1, рис. 4).

Часто отмечаются агрегаты безртутистого, Hg-золота и Hg-электрума (см. рис. 4). Характер взаимоотношений этих минералов предполагает близкое одновременное отложение. На поверхности самородного золота отмечены наросты вейшанита в виде кристаллов гексагонально-призматического облика. Состав минерала отвечает формуле $(Au, Ag)_{1.4}Hg_{0.6}$.

Самородное золото ассоциирует с теллуридами Au , Ag , Hg , Bi и Pb , которые находятся в виде номинеральных включений в борните, халькопирите, пирите и кварце (рис. 5). Морфология выделенных гессита, колорадоита, алтаита, штюццита, эмпрессита, сильванита, петцита и цумоита разнообразна, и составы не отклоняются или отклоняются незначительно от стехиометрии (табл. 2).

Петровскит, фишессерит и Se-ютенбогардтит представлены мелкими (до 50 мкм) включениями в кварце, пирите и лимоните по пириту (см. рис. 5, табл. 3). Часто фишессерит образует сростания с самородным золотом (см. рис. 5з, и).

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ РУДНЫХ ЖИЛ

Для определения PT параметров минералообразующего флюида золотосульфидно-кварцевых жил месторождения Кызык-Чадр проведены термометрические исследования флюидных включений в кварце жил № 1 и 3 (рис. 6). Проанализированы двухфазные (газово-жидкие, $J_{H_2O} + G$, VL) флюидные включения в раннем кварце с высокопробным золотом, борнитом и халькопиритом (обр. КЧ-19-1), кварце с Hg-золотом и Hg-электрумом (обр. КЧ-4-7 и КЧ-22-1) жилы № 1. В жиле № 3 исследован кварц, не содержащий Hg-золота и Hg-электрума (обр. КЧ-3-1, КЧ-3-2 и КЧ-3-2а).

Результаты термометрических исследований флюидных включений приведены в табл. 4 и на рис. 7.

В кварце жилы № 1 классифицируются (Реддер, 1978) двухфазные ($J_{H_2O} + G$) первичные и псевдовторичные флюидные включения (см. рис. 6). Включения имеют размеры 5–15 мкм; одиночные, удлиненной, угловатой формы, а также в форме “отрицательного кристалла”, расположенные хаотично в минерале-хозяине. Газовые вакуоли в них

Минерал	Стадия			
	Кварц-серицитовый	Золотосульфидно-кварцевый	Хлорит-кальцит-кварцевая	Гипергенный
Кварц	▬	▬	▬	
Серицит	▬			
Альбит	▬			
Хлорит	▬		▬	
Кальцит	▬		▬	
Пирит	▬	▬		
Сидерит		▬		
Халькопирит		▬		
Борнит		▬		
Галенит		▬		
Сфалерит		▬		
Теннантит		▬		
Тетраэдрит		▬		
Золото		▬		▬
Электрум		▬		
Гессит		▬		
Петцит		▬		
Сильванит		▬		
Барит		▬		
Цумоит		▬		
Вольфскит		▬		
Штютцит		▬		
Эмпрессит		▬		
Акантит		▬		▬
Алтаит		▬		
Киноварь		▬		
Петровскаит		▬		
Клаустолит		▬		
Се-югенбогардит		▬		
Фишессерит		▬		
Колорадоит		▬		
Нг-золото		▬		
Нг-электрум		▬		
Нг-кюстелит		▬		
Вейшанит		▬		
Самородный Вi		▬		
Самородный Те				▬
Ковеллин				▬
Халькозин				▬
Куприт				▬
Малахит				▬
Азурит				▬
Хризоколла				▬
Брошантит				▬
Гематит				▬
Гетит				▬
Гидроокислы Мп				▬
Галогениды Ag и Cu				▬

Рис. 2. Схема последовательности минералообразования в золотосульфидно-кварцевых жил месторождения Кызык-Чадр.

Fig. 2. Mineral sequence scheme of gold-sulfide-quartz veins of the Kyzyk-Chadr deposit.

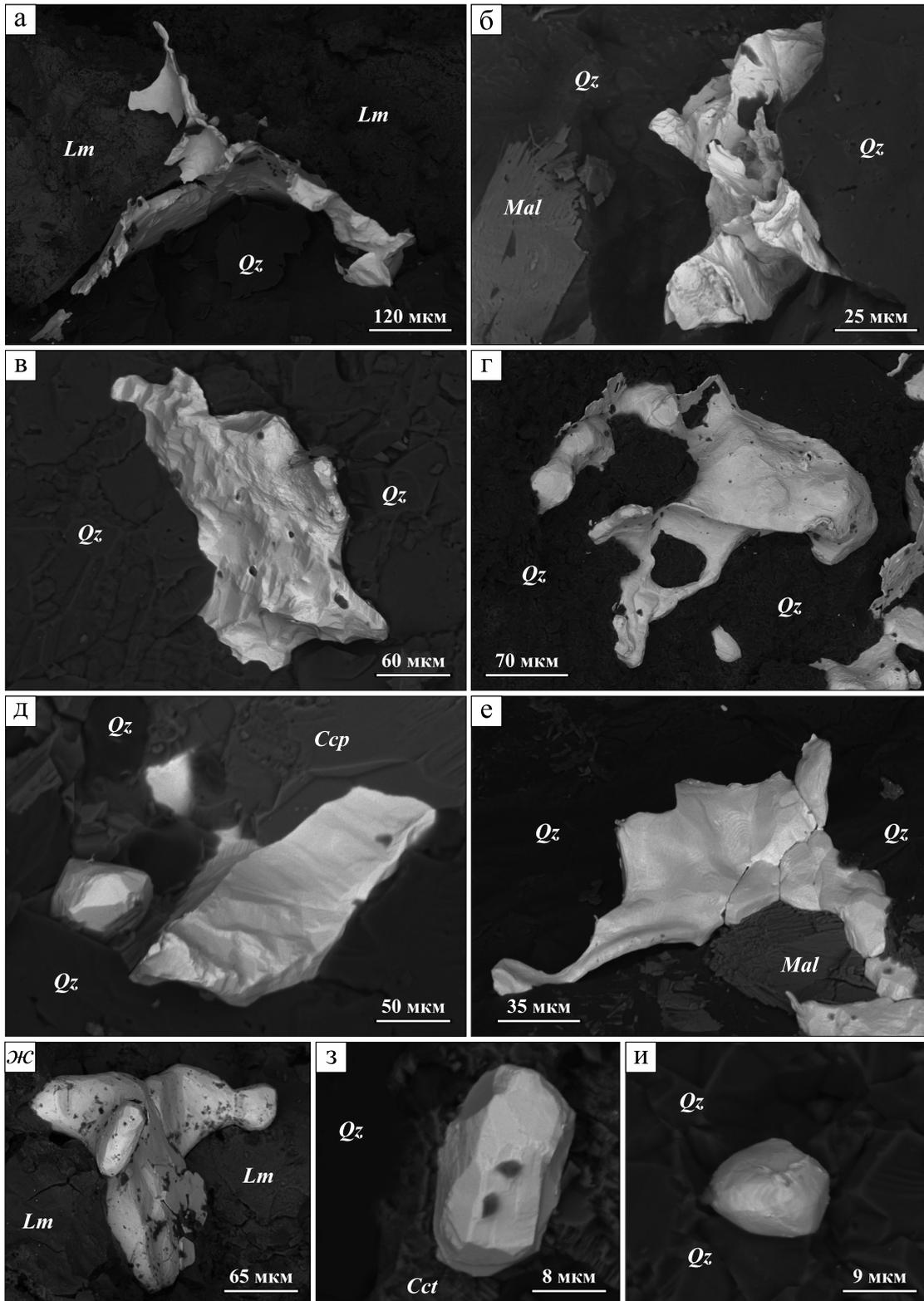


Рис. 3. Формы выделения золота в кварце (*Qz*), халькопирите (*Ccp*), лимоните (*Lm*) и халькозине (*Cct*) с малахитом (*Mal*). Снимки в режиме BSE.

Fig. 3. Gold grains in quartz (*Qz*), chalcopyrite (*Ccp*), limonite (*Lm*) and chalcosite (*Cct*) with malachite (*Mal*). BSE images.

Таблица 1. Химический состав зональных зерен золота из золотосульфидно-кварцевых жил месторождения Кызык-Чадр, мас. %

Table 1. Chemical composition of zonal gold grains from gold-sulfide-quartz veins of Kyzik-Chadr deposit, wt %

№ п. п.	Зона	Au	Ag	Hg	Cu	Te	Σ	Пробность
1	Центр	95.82	3.8	—	—	—	99.62	962
2	—“—	94.83	3.89	—	0.44	—	99.16	956
3	Край	95.16	4.01	—	0.44	—	99.61	955
4	Центр	94.04	5.19	—	—	—	99.23	948
5	Край	93.38	5.6	—	0.36	—	99.34	940
6	Центр	92.96	7.13	—	0.29	—	100.38	926
7	—“—	81.05	18.4	—	—	—	99.45	815
8	Край	80.16	18.95	—	—	—	99.11	809
9	Центр	94.81	4.06	—	0.42	0.40	99.69	951
10	—“—	76.95	19.04	2.59	—	0.42	99.00	777
11	—“—	76.54	18.03	4.69	—	—	99.26	771
12	Край	72.63	19.77	6.95	—	—	99.35	731
16	Центр	90.97	8.03	—	0.3	—	99.3	916
17	—“—	82.09	16.91	—	—	—	99.00	829
18	—“—	72.3	24.66	3.3	—	—	100.26	721
19	—“—	64.48	25.89	8.95	—	—	99.32	649
20	Край	62.97	26.11	10.35	—	—	99.43	633
21	Центр	89.81	7.3	1.21	0.43	0.38	99.13	906
22	Край	76.99	15.92	6.49	—	—	99.4	775
23	Центр	79.15	20.57	1.07	—	—	100.79	785
24	—“—	68.49	26.53	4.28	—	—	99.3	690
25	Край	51.55	39.62	8.1	—	—	99.27	519
31	Центр	73.56	23.37	2.39	—	—	99.32	741
32	—“—	73.1	23.71	3.02	—	—	99.83	732
33	—“—	66.57	27.26	5.04	0.36	—	99.23	671
34	—“—	62.62	30.69	5.86	—	—	99.17	631
35	—“—	53.17	37.24	7.97	0.49	0.47	99.34	535
36	Край	46.65	44.17	9.71	—	—	100.53	464
37	Центр	69.28	26.46	3.64	—	—	99.38	697
38	Край	56.22	34.96	7.92	—	0.38	99.48	565
39	Центр	64.12	30.16	5.58	—	—	99.86	642
40	Край	48.76	42.67	7.31	—	0.47	99.21	491
41	Центр	62.84	28.42	8.16	—	—	99.42	632
42	Край	57.05	37.21	4.90	—	—	99.16	575
43	Центр	50.99	39.65	8.38	—	—	99.02	515
44	Край	42.88	48.73	7.5	—	0.56	99.67	430
45	Центр	50.66	42.02	7.01	—	—	99.69	508
46	Край	50.00	38.76	10.41	—	—	99.17	504
47	Центр	46.08	44.32	9.52	—	—	99.92	461
48	Край	40.42	45.67	13.7	—	—	99.79	405
49	Центр	41.98	37.94	19.41	—	—	99.33	423
50	Край	31.19	47.78	19.82	—	0.47	99.26	314

Примечание. Здесь и в табл. 2 состав минералов определялся на электронном микроскопе MIRALM (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Прочерк – ниже предела обнаружения.

Note. Here and in Table 2: the mineral composition was determined on SEM MIRA LM (IGM SB RAS, Novosibirsk). Dash – limit below detection.

занимают от 5 до 40% объема включений. Включения распределены по зернам кварца хаотично или группами по 10–15 включений, зон роста не обнаружено.

Для первичных включений в кварце жилы № 1 температуры гомогенизации в жидкую фазу составляют 320–360°C. Температуры эвтектики

(–21...–26°C) и плавления последней кристаллической фазы (–3.3...–5°C) указывают на Na- и K-Na хлоридный состав флюида со значениями солёности флюида 5.4–7.9 мас. % NaCl-экв.

Температуры гомогенизации псевдотворичных включений в кварце жилы № 1 равны 250–320°C. Температуры эвтектики (–21...–32°C) свидетель-

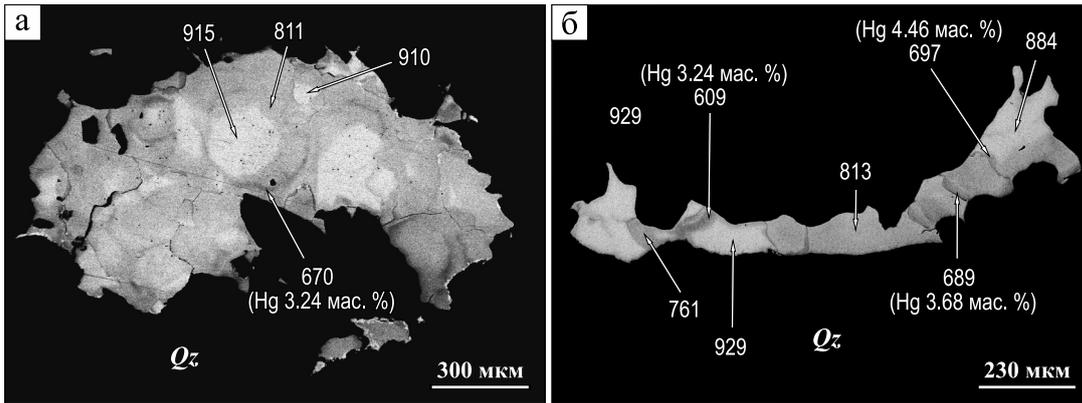


Рис. 4. Пробность (%) и содержание Hg (мас. %) в зернах золота из золотосульфидно-кварцевых жил месторождения Кызык-Чадр. Снимки в режиме BSE.

Fig. 4. Fineness (%) and Hg content (wt %) in gold grains from gold-sulfide-quartz veins of Kyzik-Chadr deposit. BSE images.

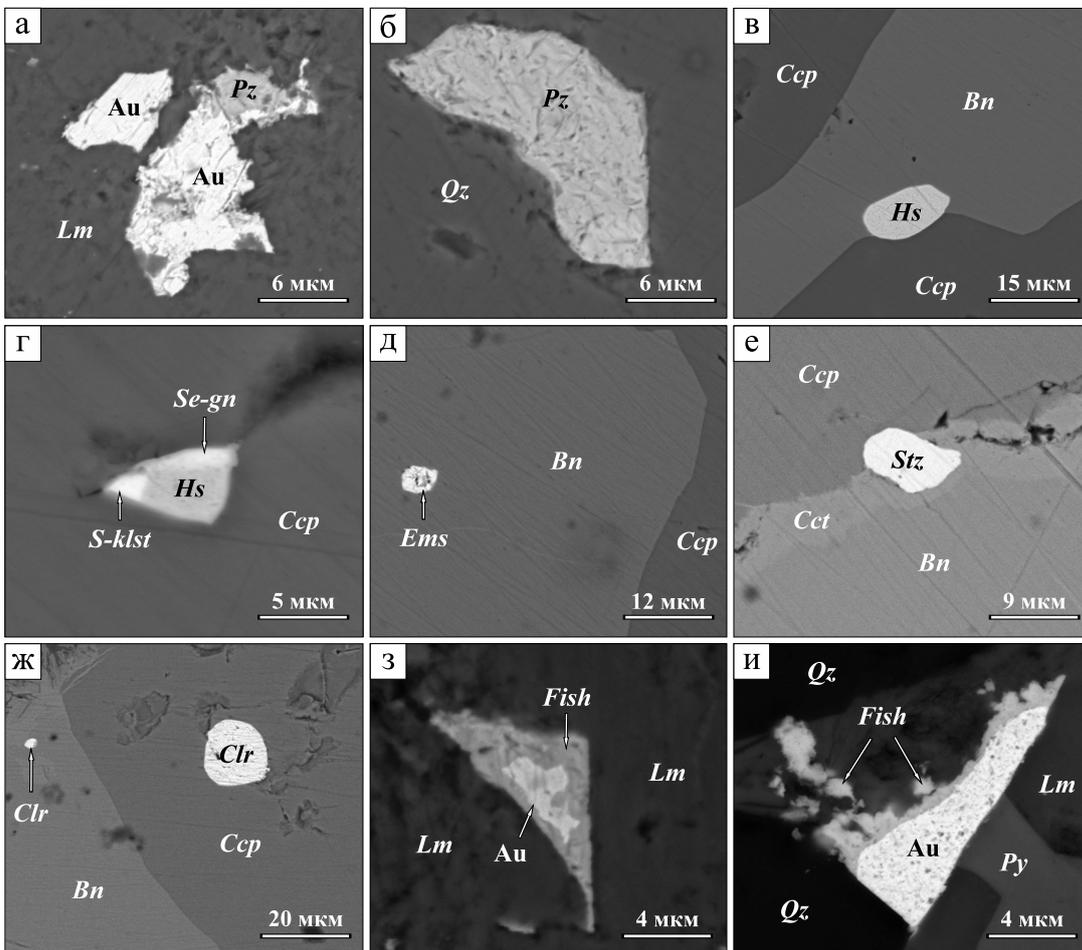


Рис. 5. Выделения золота (Au), петцита (Pz), гессита (Hs), Se-галенита (Se-gn), S-клаусталита (S-klst), эмпрессита (Ems), штютцита (Stz), колорадоита (Clr), фишессерита (Fish) в кварце (Qz), борните (Bn), халькопирите (Ccp), халькозине (Cct) и лимоните (Lm). Снимки в режиме BSE.

Fig. 5. Gold (Au), petzite (Pz), hessite (Hs), Se-galenite (Se-gn), S-clausthalite (S-klst), empressite (Ems), schützite (Stz), coloradoite (Clr), and fischesserite (Fish) in quartz (Qz), bornite (Bn), chalcopyrite (Ccp), chalcosite (Cct), and limonite (Lm). BSE images.

Таблица 2. Химические составы теллуридов Au, Ag, Hg и Bi, мас. %

Table 2. Chemical compositions of Au, Ag, Hg, and Bi tellurides, wt %

№ п. п.	Au	Ag	Hg	Bi	Te	Σ	Кристаллохимическая формула
Петцит Ag_3AuTe_2							
1	26.25	41.18	–	–	31.99	99.42	$Ag_{2.99}Au_{1.04}Te_{2.97}$
2	25.33	40.54	–	–	33.18	99.05	$Ag_{2.95}Au_{1.01}Te_{2.94}$
3	26.74	40.83	–	–	31.47	99.04	$Ag_{2.98}Au_{1.07}Te_{2.95}$
4	27.20	40.82	–	–	31.66	99.68	$Ag_{2.97}Au_{1.08}Te_{2.95}$
Сильванит $AuAgTe_4$							
5	23.52	13.79	–	–	62.03	99.34	$Ag_{1.04}Au_{0.98}Te_{3.98}$
Гессит Ag_2Te							
6	–	62.41	–	–	37.59	100	$Ag_{1.99}Te_{1.01}$
7	–	62.05	–	–	37.45	99.50	$Ag_{1.99}Te_{1.01}$
8	–	62.45	–	–	37.51	99.96	$Ag_{1.99}Te_{1.01}$
9	–	62.80	–	–	37.15	99.95	$Ag_{2.00}Te_{1.00}$
10	–	62.20	–	–	37.79	99.99	$Ag_{1.99}Te_{1.01}$
11	–	62.65	–	–	37.31	99.96	$Ag_{2.00}Te_{1.00}$
12	–	62.45	–	–	37.51	99.96	$Ag_{1.99}Te_{1.01}$
13	–	62.51	–	–	37.21	99.73	$Ag_{2.00}Te_{1.00}$
14	–	62.31	–	–	36.98	99.29	$Ag_{2.00}Te_{1.00}$
15	–	63.81	–	–	35.80	99.61	$Ag_{2.03}Te_{0.97}$
16	–	63.05	–	–	36.80	99.85	$Ag_{2.00}Te_{1.00}$
Штютцит Ag_5Te_3							
17	–	58.77	–	–	41.21	99.98	$Ag_{5.02}Te_{2.98}$
18	–	58.41	–	–	41.55	99.96	$Ag_{5.00}Te_{3.00}$
19	–	58.40	–	–	41.59	99.99	$Ag_{4.99}Te_{3.01}$
20	–	58.34	–	–	41.65	99.99	$Ag_{4.99}Te_{3.01}$
21	–	58.43	–	–	41.55	99.98	$Ag_{5.00}Te_{3.00}$
22	–	57.92	–	–	41.28	99.20	$Ag_{4.99}Te_{3.01}$
Эмпрессит $AgTe$							
23	–	45.03	–	–	54.72	99.75	$Ag_{0.99}Te_{1.01}$
Вольнскит $AgBiTe_2$							
24	–	17.02	–	40.58	42.25	99.85	$Ag_{0.92}Bi_{1.13}Te_{1.94}$
Колорадоит $HgTe$							
25	–	–	62.10	–	37.87	99.97	$Hg_{1.02}Te_{0.98}$
26	–	–	62.11	–	37.80	99.91	$Hg_{1.02}Te_{0.98}$
27	–	–	61.71	–	37.83	99.54	$Hg_{1.02}Te_{0.98}$
28	–	–	61.59	–	37.44	99.03	$Hg_{1.02}Te_{0.98}$
29	–	–	61.48	–	38.03	99.51	$Hg_{1.02}Te_{0.98}$
30	–	–	61.82	–	38.06	99.88	$Hg_{1.02}Te_{0.98}$
Цумоит, $BiTe$							
31	–	–	–	62.19	36.9	99.09	$Bi_{1.01}Te_{0.99}$

Примечание. Прочерк – ниже пределов обнаружения. Формулы петцита и сильванита рассчитаны на 6 ат., вольнскита – на 4 ат., гессита – на 3 ат., эмпресита, колорадоита и цумоита – на 2 ат.

Note. Dash – below detection limits. Formulae of petzite and sylvanite are calculated for 6 at., wolynskite – for 4 at., hessite – for 3 at., empresite, coloradoite and tsumoite – for 2 at.

ствуют о содержании во флюиде хлоридов Na, K и Mg. Концентрации солей, согласно данным по температурам плавления последней кристаллической фазы (–3.6...–6.4°C), варьируются в пределах 5.9–9.7 мас. % NaCl-экв.

Псевдотричные флюидные включения в кварце жилы № 3 имеют температуры эвтектики от –18 до –33°C, следовательно, содержат флюид комплексного солевого состава NaCl-KCl-MgCl₂-H₂O. Гомогенизация включений в жидкую фазу проис-

ходила в интервале от 230 до 330°C. Значения солености варьируются от 5.7 до 10 мас. % NaCl-экв.

Двухфазные включения ассоциируют с однофазными, существенно водными, включениями (Ж_{H₂O}) размером порядка 5 мкм. Кроме того, в кварце присутствуют вторичные включения, трассирующие трещины, размером менее 3 мкм, которые не изучались.

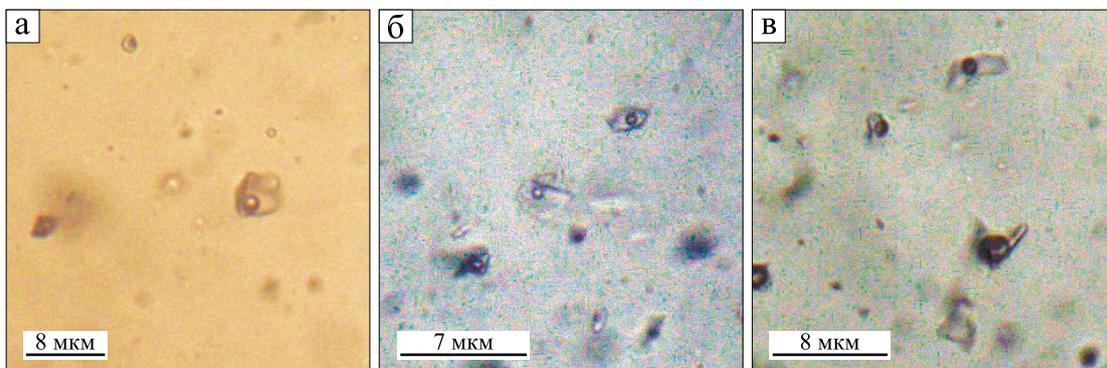
По данным рамановской спектроскопии, газовая фаза представлена CO₂, примесей других га-

Таблица 3. Химические составы селенидов и сульфидов Au и Ag, мас. %**Table 3.** Chemical compositions of Au, and Ag selenides and sulfides, wt %

№ п. п.	Au	Ag	S	Se	Σ	Кристаллохимическая формула
				Фишессерит Ag_3AuSe_2		
1	29.72	46.01	–	23.81	99.54	$Ag_{2.91}Au_{1.03}Se_{2.06}$
2	31.5	45.27	–	23.18	99.95	$Ag_{2.88}Au_{1.10}Se_{2.02}$
				Се-ютенбогардтит Ag_3AuS_2		
3	31.6	52.73	7.33	7.75	99.41	$Ag_{3.01}Au_{0.99}(S_{1.40}Se_{0.60})_{2.00}$
				Петровскаит $AuAgS$		
4	56.12	33.35	9.67	–	99.14	$Ag_{1.04}Au_{0.95}S_{1.01}$
				Акантит Ag_2S		
5	–	87.01	12.62	–	99.63	$Ag_{2.02}S_{0.98}$

Примечание. Прочерк – ниже пределов обнаружения. Формулы фишессерита и Се-ютенбогардтита рассчитаны на 6 ат., петровскаита и акантита – на 3 ат.

Note. Dash – below detection limits. Formulae of fischesserite and Se-uytenbogaardtite are calculated for 6 at., petrovskaitite and acanthite – for 3 at.

**Рис. 6.** Флюидные включения в кварце жил месторождения Кызык-Чадр.

а, б – жила № 1, в – жила № 3.

Fig. 6. Fluid inclusions in quartz in veins of the Kyzzyk-Chadr deposit.

а, б – vein № 1, в – vein № 3.

зов обнаружено не было. Спектр рамановского рассеяния, полученный в газовой фазе флюидных включений в кварце жил № 1 и 3, представлен на рис. 8. В рамановском спектре молекулы CO_2 наблюдаются две интенсивные колебательные моды около 1281 см^{-1} (ν_1) и 1386 см^{-1} ($2\nu_2$), а также мода в области 1370 см^{-1} , связанная с колебаниями $^{13}CO_2$ ($2\nu_2$), и двух малоинтенсивных линий в области 1285 и 1388 см^{-1} (“hotbands”), связанных с переходами из более высоких по энергии (возбужденных) колебательных состояний, обусловленных тепловой энергией молекул $^{12}CO_2$ (Hurai et al., 2015).

Температуры минералообразования жилы № 3 по парагенезису петцит–гессит–самородное золото (Бортников и др., 1988) составляют $264\text{--}227^\circ\text{C}$, что согласуется с результатами термометрических исследований флюидных включений.

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ O И S

Величина $\delta^{18}O$ кварца рудных жил изменяется от 12.5 до 15.3‰ . Значения $\delta^{18}O$ флюида, в соответствии с уравнением фракционирования (Zhang et al., 1989; Zheng, 1999) и средними температурами минералообразования, полученными по флюидным включениям, следующие: кварца с высокопробным золотом, халькопиритом и борнитом – $+7.1\text{‰}$ ($T = 300^\circ\text{C}$), кварца с низкопробным золотом и Hg-электрумом – от $+4.6$ до $+3.5\text{‰}$ ($T = 270\text{--}225^\circ\text{C}$) (табл. 5).

Величины $\delta^{18}O_{H_2O}$ ($+7.1\text{‰}$) флюида кварца с высокопробным золотом, попадающие в область значений, относящихся к флюидам как магматического, так и метаморфического происхождения, позднего кварца с низкопробным золотом и Hg-электрумом ($\delta^{18}O_{H_2O} +3.1\text{...}+4.6\text{‰}$), указывают на

Таблица 4. Результаты изучения флюидных включений в кварце месторождения Кызык-Чадр

Table 4. Results of fluid inclusions study in quartz of Kyzik-Chadr deposit

Обр.	Ассоциация ФВ	N	$T_{\text{гом}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{эвт}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл льда}}, ^\circ\text{C}$	Соленость, мас. % NaCl-экв.	Солевой состав	Газовый состав
Жила № 1								
КЧ-22-1	П	8	345–348	–	–	–	–	CO ₂
	ПВ	34	240–274	–	–	–	–	CO ₂
КЧ-19-1	П	41	321–362	–21...–26	–3.3...–5	5.4–7.9	Хлориды Na, К	CO ₂
	ПВ	11	248–252	–	–	–	–	CO ₂
КЧ-4-7	ПВ	37	253–322	–21...–32	–3.6...–6.4	5.9–9.7	Хлориды Na, К, Mg	CO ₂
Жила № 3								
КЧ-3-1	ПВ	36	294–338	–21...–33	–3.5...–6.1	5.7–9.3	Хлориды Na, К, Mg	CO ₂
КЧ-3-2а	ПВ	30	274–334	–23...–30	–4.4...–6	7–10.2	Хлориды К, Mg	CO ₂
КЧ-3-2	ПВ	43	234–276	–18...–29	–3.5...–5.5	5.7–8.5	Хлориды Na, К	CO ₂

Примечание. П – первичные, ПВ – псевдвторичные; N – количество включений; $T_{\text{гом}}$ – температура гомогенизации, $T_{\text{эвт}}$ – температура эвтектики, $T_{\text{пл льда}}$ – температура плавления последнего кристалла льда. Прочерк – не определено.

Note. FIA: П – primary, ПВ – pseudo-secondary; N – number of inclusions; $T_{\text{гом}}$ – homogenization temperature, $T_{\text{эвт}}$ – eutectic temperature, $T_{\text{пл льда}}$ – final melting temperature. Dash – not measured.

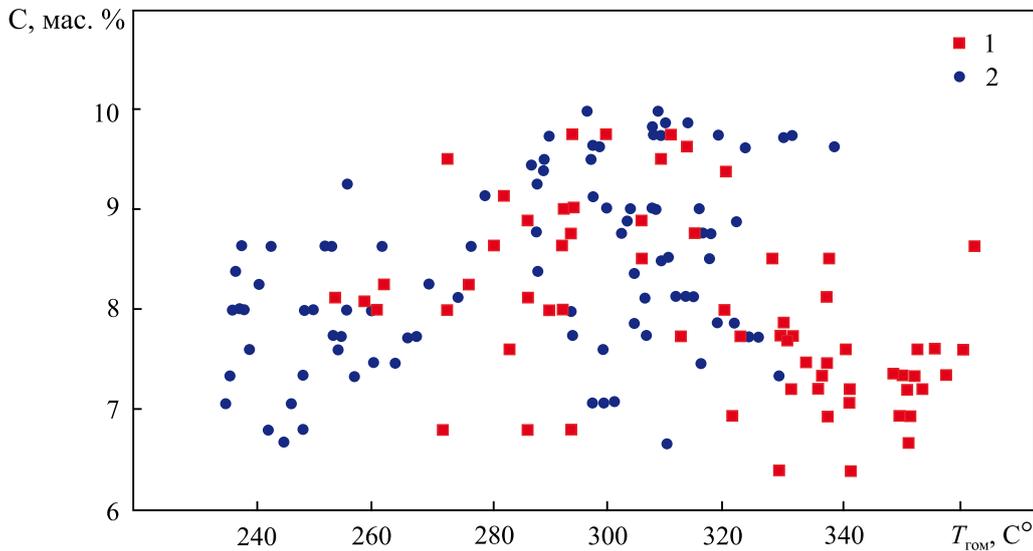


Рис. 7. Диаграмма температур гомогенизации ($T_{\text{гом}}, ^\circ\text{C}$) и солености (C, мас. %) включений в кварце месторождения Кызык-Чадр.

1 – жила № 1, 2 – жила № 3.

Fig. 7. Temperature of homogenization ($T_{\text{гом}}, ^\circ\text{C}$) vs salinity (C, wt %) plot of Kyzik-Chadr deposit.

1 – vein No. 1, 2 – vein No. 3.

смешение рудоносного магматогенного флюида с метеорной водой (рис. 9).

Изотопный состав серы в сульфидах в ассоциации с высокопробным золотом варьируется от +6.9 (халькопирит) до +7.5‰ (борнит), в пирите с низкопробным золотом и Hg-электрумом – от +6.6 до +7.1‰. Значения $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ флюида, в соответствии с уравнением фракционирования (Ohmoto, Rye, 1979; Li, Liu, 2006) и средними температурами минералообразования, полученными по флюидным включениям, для кварца с высокопробным золотом вари-

руются от +6.7 до +7.3‰ ($T = 300^\circ\text{C}$), кварца с низкопробным золотом – от +5.2 до +5.7‰ ($T = 270^\circ\text{C}$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Массивные, полосчатые, петельчатые, брекчиевидные текстуры золотосульфидно-кварцевых жил месторождения Кызык-Чадр и их минералого-геохимические особенности, а именно наличие сложно-зональных зерен, Hg-золота (Hg до 7 мас. %), Hg-электрума (Hg до 20 мас. %), петцита Ag_3AuTe_2 ,

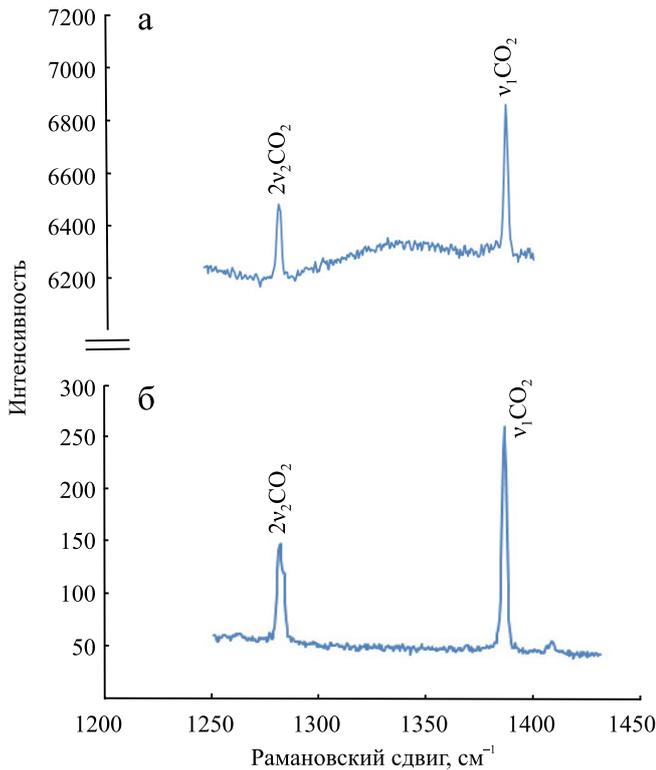


Рис. 8. Рамановские спектры, полученные в газовых пузырьках флюидных включений в кварце жил № 1 (а, обр. КЧ-22-1) и № 3 (б, обр. КЧ-3-2).

Fig. 8. Raman spectra of fluid inclusion vapor bubbles from quartz of vein No. 1 (a) and No. 3 (б).

гессита Ag₂Te, фишессерита Ag₃AuSe₂, Se-ютенбогартита Ag₃AuS₂, акантита Ag₂S, колорадоита HgTe и широкие вариации пробности самородного золота (от 294 до 998‰), характерные для эпитегрмальных месторождений, позволяют предполагать, что они образовались в гипабиссальной фации глубинности P ≈ 0.5–0.75 кбар (≈1.5–2.3 км).

Таблица 5. δ¹⁸O кварца и сосуществующего флюида месторождения Кызык-Чадр

Table 5. δ¹⁸O of quartz and ore-forming fluid of Kyzik-Chadr deposit

№ п. п.	№ пробы	δ ¹⁸ O кварца, ‰ (CDT)	T _{ср}	δ ¹⁸ O (H ₂ O) флюида, ‰ (CDT)
Жила № 1				
1	КЧ-19-1	14.5	300	+7.1
2	КЧ-22	15.3	225	+4.6
Жила № 3				
3	КЧ-3-1	12.5	270	+4.0
4	КЧ-3-2	12.9	240	+3.1

Примечание. Анализы выполнены в ГИН СО РАН, аналитик В.Ф. Посохов.

Note. Analyses were performed in Geological Institute SB RAS, operator V.F. Posokhov.

По данным термобарогеохимии и КР-спектроскопии флюидных включений, Au-Ag жилы на месторождении Кызык-Чадр отлагались при понижении температур в интервале 360–230°C из K-Na ± Mg водно-углекислотно-солевого флюида с умеренной соленостью 5.7–10.0 мас. % NaCl-экв. Она имеет максимальные значения во включениях в кварце без Hg-золота и Hg-электрума (до 10.2 мас. % NaCl-экв.). Ассоциация двухфазных включений с однофазными жидкостными указывает на гетерогенное состояние флюида (Bowers, 1991).

Исходя из полученных данных можно заключить, что жилы № 1 и 3 отлагались в гипабиссальной фации глубинности (≈1.5–2.3 км) при сходных условиях. Уменьшение концентраций солей при снижении температур указывает на смешение рудоносного флюида с метеорной водой (Wilkinson, 2001).

Изотопные данные кислорода флюида (от +7.1 до +3.5‰) также указывают на смешение рудоносного магматического флюида с метеорной водой (см.

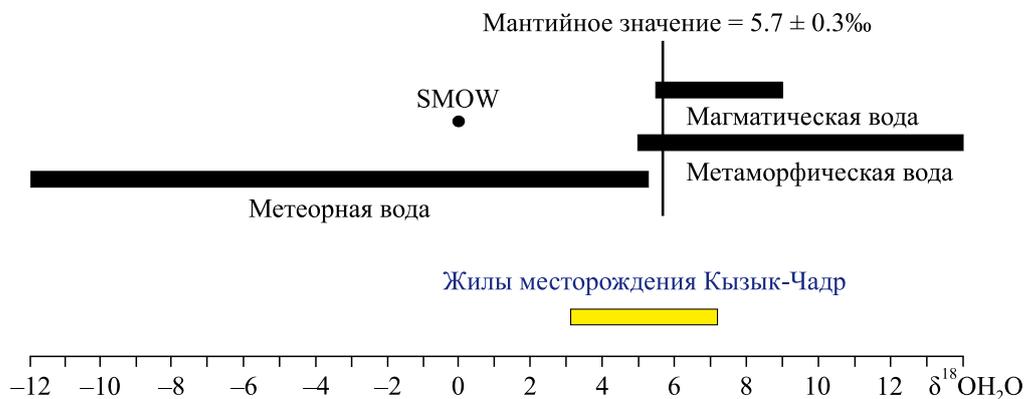


Рис. 9. Изотопный состав кислорода рудоносного флюида месторождения Кызык-Чадр.

Fig. 9. Oxygen isotopic composition of ore-forming fluid from Kyzik-Chadr deposit.

рис. 9). Значения $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ флюида от +7.1 до +5.2‰ свидетельствуют о поступлении серы из гранитоидных магм и хорошо сопоставляются с сульфидной серой золотокварцевых и золотосульфидно-кварцевых руд (Ohmoto, Rye, 1979; Ohmoto, 1986; Hoefs, 2009). Отметим, что обилие теллуридов – минералогический индикатор прямого магматического вклада рудообразующую систему (Vikent'eva et al., 2020).

Минеральные парагенезисы с высокопробным золотом свидетельствуют о том, что рудоотложение происходило при высокой фугитивности (f) сульфидной серы $\lg f(\text{S}_2) = 10^{-12.5} - 10^{-7}$ (при $T = 300^\circ\text{C}$), парагенезисы с низкопробным золотом и электрумом – при $\lg f(\text{S}_2) = 10^{-14.5} - 10^{-7}$, $\lg f(\text{Te}_2) = 10^{-12.7} - 10^{-10.5}$ и $\lg f(\text{Se}_2) = 10^{-19} - 10^{-16}$ (при $T = 250^\circ\text{C}$) (Barton, Skinner, 1979; Afifi et al., 1988; Журавкова и др., 2019). Уменьшение $f\text{S}_2$ сопровождалось ростом $f\text{O}_2$, так как широкое развитие минералов ртутистого золота и фишессерита в конце рудоотложения указывает на рудообразование при высокой $f\text{O}_2$, предположительно, из-за смешения рудоносного флюида с высокоаэрированной метеорной водой (Бортников и др., 1987).

Минералого-геохимические особенности и условия образования Au-Ag жил месторождения Кызык-Чадр позволяют отнести эти жилы к промежуточному типу (intermediate sulfidation, IS) минерализации эпитеpмальных месторождений. Ранее установлено, что с порфиpово-эпитеpмальными системами связана эпитеpмальная Au-Ag минерализация IS типа, а также Zn-Pb-Ag ± Cu ± Au жильные месторождения IS типа, локализованные вблизи медно-порфиpовых месторождений (Sillitoe, 2010). Индикаторными минералами IS оруденения являются сфалерит, галенит, тетраэдрит-теннантит, халькопирит. Примеры месторождений с хорошо развитым оруденением IS-типа – Санта-Барбара (Греция) (Voudouris, 2006) и Маунт Миллиган (Канада) (LeFort et al., 2011).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по текстурным особенностям и минералого-геохимическим особенностям руд, а также по условиям образования золотосульфидно-кварцевые жилы по генезису могут быть отнесены к эпитеpмальным Au-Ag жилам месторождений IS типа. Наличие на Кызык-Чадрском Au-Mo-Cu-порфиpовом месторождении золотосульфидно-кварцевых жил, характерных для эпитеpмальных Au-Ag месторождений IS типа, свидетельствует о существовании единой порфиpово-эпитеpмальной рудно-магматической системы в Кызык-Чадрском рудном поле. Согласно модели эволюции медно-порфиpовой системы (Sillitoe, 2010), золоторудная минерализация локализуется непосредственно в рудном штокверке медно-порфиpового орудене-

ния и за его пределами. Во втором случае она находится в составе алуниp-кварцевого (high sulfidation, HS) и промежуточного (IS) типов эпитеpмальной минерализации, субэпитеpмальных (переходных от постпорфиpовых к эпитеpмальным) карбонатно-полиметаллических рудах и сопровождается развитием минералов Ag (LeFort et al., 2011).

При поисках медно-порфиpового оруденения нахождение различных типов сопутствующих руд несет важную информацию: наличие того или иного типа минерализации указывает на степень сохранности порфиpово-эпитеpмальных систем и уровень эрозионного среза. Полученные новые результаты могут иметь практическое значение для региональных прогнозно-металлогенических поисков месторождений и рудопроявлений Cu, Ag, Au и Mo.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев А.В., Гирфанов М.М., Старостин И.А., Авилова О.В., Кряжев С.Г., Юрмазов Д.Н., Бабкин И.А., Семенов М.И. (2021) Геологическое строение, рудно-метасоматическая и минералого-геохимическая зональность золотосодержащего молибден-медно-порфиpового месторождения Кызык-Чадр, Республика Тыва. *Руды и металлы*, (1), 57-76.
- Борисенко А.С. (1982) Анализ солевого состава растворов газовой-жидких включений в минералах методом криометрии. *Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений*. (Ред. Н.П. Лавров). М.: Недра, 37-46.
- Бортников Н.С., Генкин А.Д., Коваленкер В.А. (1987) Минералого-геохимические показатели условий гидротермального рудообразования. *Эндогенные рудные районы и месторождения*. М.: Наука, 40-59.
- Бортников Н.С., Крамер Х., Генкин А.Д. (1988) Парагенезисы теллуридов золота и серебра в золоторудном месторождении Флоренсия (Республика Куба). *Геол. руд. месторождений*, (2), 49-61.
- Гусев Н.И., Берзон Е.И., Семенов М.И. (2014) Кызык-чадрское меднопорфиpовое месторождение (Тува): геохимические особенности и возраст магматизма. *Регион. геология и металлогения*, (59), 70-79.
- Журавкова Т.В., Пальянова Г.А., Калинин Ю.А., Горячев Н.А., Зинина В.Ю., Житова Л.М. (2019) Физико-химические условия образования минеральных парагенезисов золота и серебра на месторождении Валунистое (Чукотка). *Геология и геофизика*, **60**(11), 1565-1576.
- Реддер Э. (1978) Флюидные включения в минералах. Т. 1. М.: Мир, 360 с.
- Рогов Н.В. (1992) Магматические и другие структуры, перспективы и некоторые особенности металлогении Кызык-Чадрского Au-Cu-Mo месторождения Тувы. *Магматизм и металлогения рудных районов Тувы*. Новосибирск: Наука, 108-119.
- Семенов М.И., Юркевич Л.Г. (2019) Геология, геохимия и рудоносность Ожинского интрузивного плутона. Геологическое строение и полезные ископаемые Центральной Сибири. Красноярск: Сибирское ПГО, 110-119.
- Стамборовский Н.Н., Смоляков Ю.Г., Почерняева Л.Д. (1969) Геологическое строение и полезные ископае-

- мье бассейна верхних течений рек Аксуга, Соруга и Кадыр-Ооса: Оконч. отч. по работам Соругской ГСП за 1965–1967 гг. Красноярск. Тыв. фил. ФБУ “ТФГИ по СФО”. Инв. № 1211.
- Старостин И.А., Гирфанов М.М., Ярцев Е.И. (2022) Геологическое строение, метасоматическая и скрытая минералогическая зональность медно-порфирирового месторождения Кызык-Чадр (Республика Тыва). *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геол.*, (5), 90-94.
- Старостин И.А., Черных А.И., Гирфанов М.М. (2023) Палеогеотектоническая позиция Кызыкчадрского медно-порфирирового рудного поля (Республика Тыва). *Руды и металлы*, (4), 52-73.
- Уссар Р.Т., Добрянский Г.И., Зюзин М.П. (1978) Результаты поисков месторождений меди на участке Кызык-Чадр и в его районе. Кызыл, 87 с.
- Affi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. (1988) Phase relations among tellurides, sulphides and oxides: I. Thermochemical data and calculated equilibria. *Econom. Geol.*, **83**, 377-404.
- Barton P.B., Skinner B.J. (1979) Sulfide mineral stabilities. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. (Ed. H.L. Barnes). N.Y.: Sley & Sons, 278-403.
- Berzin N.A., Coleman R.G., Dobretsov N.L., Zonenshain L.P., Xuchang X., Chang E.Z. (1994) Geodynamic map of the western part of Paleasian Ocean. *Russ. Geol. Geophys.*, **35**, 5-22.
- Berzin N.A., Kungurtsev L.V. (1996) Geodynamic interpretation of Altai-Sayan geological complexes. *Russ. Geol. Geophys.*, **37**, 56-73.
- Berzina A.N., Berzina A.P., Gimon V.O. (2016) Paleozoic-Mesozoic porphyry Cu(Mo) and Mo(Cu) deposits within the southern margin of the Siberian Craton: Geochemistry, geochronology, and petrogenesis (a review). *Minerals*, **6**(6), 1-25.
- Berzina A.N., Stein H.J., Zimmerman A., Sotnikov V.I. (2003) Re-Os ages of molybdenite from porphyry and greisen Mo-W deposits of southern Siberia (Russia) preserve metallogenic record. Mineral Exploration and Sustainable Development. (Eds D. Eliopoulos et al.). V. 1. Rotterdam: Millpress, 231-234.
- Bodnar R.J., Vityk M.O. (1994) Interpretation of microthermometric data for H₂O–NaCl fluid inclusions. *Fluid Inclusions in Minerals: Methods and Applications*: (Eds B. De Vivo, M.L. Frezzotti). Blacksburg: Virginia Tech., 117-130.
- Bowers T.S. (1991) The deposition of gold and other metals: pressure-induced fluid immiscibility and associated stable isotope signatures. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **55**, 2417-2434.
- Davis D.W., Lowenstein T.K., Spenser R.J. (1990) Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl–H₂O, NaCl–KCl–H₂O, NaCl–MgCl₂–H₂O, and CaCl₂–NaCl–H₂O. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**, 591-601.
- Hoefs J. (2009) Stable Isotope Geochemistry. Berlin; Heidelberg: Springer, 281 p.
- Hurai V., Huraiova M., Slobodnik M., Thomas R. (2015) Geofluids. Developments in Microthermometry, Spectroscopy, Thermodynamics, and Stable Isotopes. Elsevier, 489 p.
- LeFort D., Hanley J., Guillong M. (2011) Subepithermal Au–Pd mineralization associated with an alkalic porphyry Cu–Au deposit, Mount Milligan, Quesnel Terrane, British Columbia, Canada. *Econ. Geol.*, **106**, 781-808.
- Li Y., Liu J. (2006) Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 1789-1795.
- Ohmoto H. (1986) Stable isotope geochemistry of ore deposits. *Stable Isotopes in High Temperature Geological Processes*, 491-560. (*Rev. Mineral. Geochem.*, **16**).
- Ohmoto H., Rye R.O. (1979) Isotopes of Sulfur and Carbon. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. N.Y.: Wiley, 509-567.
- Pollard P.J., Pelenkova E., Mathur R. (2017) Paragenesis and Re-Os molybdenite age of the Cambrian Ak-Sug porphyry Cu–Au–Mo deposit, Tyva Republic, Russian Federation. *Econ. Geol.*, **112**, 1021-1028.
- Rudnev S.N., Serov P.A., Kiseleva V.Yu. (2015) Vendian–Early Paleozoic granitoid magmatism in Eastern Tuva. *Russ. Geol. Geophys.*, **56**(9), 1232-1255.
- Sillitoe R.H. (2010) Porphyry copper systems. *Econ. Geol.*, **105**, 3-41.
- Vikent'eva O., Prokofiev V., Groznova E., Vikentyev I., Bortnikov N., Borovikov A., Kryazhev S., Pritchkin M. (2020) Contrasting fluids in the Svetlinsk gold telluride hydrothermal system, South Urals. *Minerals*, **10**, 37.
- Voudouris P. (2006) A comparative mineralogical study of Te-rich magmatic-hydrothermal systems in northeastern Greece. *Mineral. Petrol.*, **87**, 241-275.
- White N.C., Hedenquist J.W. (1995) Epithermal gold deposits: styles, characteristics, and exploration. *Soc. Econ. Geol. Newslett.*, **23**, 9-13.
- Wilkinson J.J. (2001) Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, **55**, 229-272.
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I. (2003) Deep Geodynamics and Mantle Plumes: Their role in the formation of the Central Asian fold belt. *Petrology*, **11**(6), 504-531.
- Zhang L.-G., Liu J.-X., Zhou H.B., Chen Z.-S. (1989) Oxygen isotope fractionation in the quartz–water–salt system. *Econ. Geol.*, **89**, 1643-1650.
- Zheng Y.F. (1999) Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals. *Geochem. J.*, **33**, 109-126.

REFERENCES

- the southern margin of the Siberian Craton: Geochemistry, geochronology, and petrogenesis (a review). *Minerals*, **6**(6), 1-25.
- Berzina A.N., Stein H.J., Zimmerman A., Sotnikov V.I. (2003) Re-Os ages of molybdenite from porphyry and greisen Mo-W deposits of southern Siberia (Russia) preserve metallogenic record. *Mineral Exploration and Sustainable Development*. (Eds D. Eliopoulos et al.). V. 1. Rotterdam, Millpress, 231-234.
- Bodnar R.J., Vityk M.O. (1994) Interpretation of microthermometric data for H₂O–NaCl fluid inclusions. *Fluid Inclusions in Minerals: Methods and Applications*: (Eds B. De Vivo, M.L. Frezzotti). Blacksburg, Virginia Tech., 117-130.
- Borisenko A.S. (1982) Analysis of the salt composition of solutions of gas-liquid inclusions in minerals by cryometry. *The use of thermobarogeochemistry methods in the search and study of ore deposits*. (Ed. N.P. Laverov). Moscow, Nedra Publ., 37-46. (In Russ.)
- Bortnikov N.S., Genkin A.D., Kovalenker V.A. (1987) Mineralogical and geochemical parameters of hydrothermal ore formation conditions. *Endogenous ore regions and deposits*. Moscow, Nauka Publ., 40-59. (In Russ.)
- Bortnikov N.S., Kramer H., Genkin A.D. (1988) Paragenesis of tellurides of gold and silver in the gold ore deposit Florencia (Republic of Cuba). *Geol. Ore Depos.*, (2), 49-61. (In Russ.)
- Bowers T.S. (1991) The deposition of gold and other metals: pressure-induced fluid immiscibility and associated stable isotope signatures. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **55**, 2417-2434.
- Davis D.W., Lowenstein T.K., Spenser R.J. (1990) Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl–H₂O, NaCl–KCl–H₂O, NaCl–MgCl₂–H₂O, and CaCl₂–NaCl–H₂O. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**, 591-601.
- Gusev N.I., Berzon E.I., Semenov M.I. (2014) Kyzikchadr copper-porphyry deposit (Tuva): Geochemical features and age of magmatism. *Region. Geologiya i Metallogeniya*, (59), 70-79. (In Russ.)
- Hoefs J. (2009) *Stable Isotope Geochemistry*. Berlin; Heidelberg, Springer, 281 p.
- Hurai V., Huraiova M., Slobodnik M., Thomas R. (2015) Geofluids. *Developments in Microthermometry, Spectroscopy, Thermodynamics, and Stable Isotopes*. Elsevier, 489 p.
- LeFort D., Hanley J., Guillong M. (2011) Subepithermal Au–Pd mineralization associated with an alkalic porphyry Cu–Au deposit, Mount Milligan, Quesnel Terrane, British Columbia, Canada. *Econ. Geol.*, **106**, 781-808.
- Li Y., Liu J. (2006) Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **70**, 1789-1795.
- Ohmoto H. (1986) Stable isotope geochemistry of ore deposits. *Stable Isotopes in High Temperature Geological Processes*, 491-560. (*Rev. Mineral. Geochem.*, **16**).
- Ohmoto H., Rye R.O. (1979) *Isotopes of Sulfur and Carbon. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. N.Y.: Wiley, 509-567.
- Pollard P.J., Pelenkova E., Mathur R. (2017) Paragenesis and Re–Os molybdenite age of the Cambrian Ak-Sug porphyry Cu–Au–Mo deposit, Tyva Republic, Russian Federation. *Econ. Geol.*, **112**, 1021-1028.
- Redder E. (1978) *Fluid inclusions in minerals*. V. 1. Moscow, Mir Publ., 360 p. (In Russ.)
- Rogov N.V. (1992) Magmatic and other structures, prospects and some features of metallogeny of the Kyzik-Chadr Au–Cu–Mo deposit of Tuva. *Magmatism and metallogeny of the ore regions of Tuva*. Novosibirsk, Nauka Publ., 108-119. (In Russ.)
- Rudnev S.N., Serov P.A., Kiseleva V.Yu. (2015) Vendian–Early Paleozoic granitoid magmatism in Eastern Tuva. *Russ. Geol. Geophys.*, **56**(9), 1232-1255.
- Semenov M.I., Yurkevich L.G. (2019) Geology, geochemistry and ore content of the Ozhinsky intrusive pluto. The geological structure and minerals of Central Siberia. Krasnoyarsk, Sibirskoe PGO Publ., 110-119. (In Russ.)
- Sillitoe R.H. (2010) Porphyry copper systems. *Econ. Geol.*, **105**, 3-41.
- Stamborovskii N.N., Smolyakov Yu.G., Pochernyaeva L.D. (1969) Geological structure and minerals of the basin of the upper reaches of the Aksuga, Soruga and Kadyr-Oosa rivers: Final report on the works of the Soruga GSP for 1965–1967. Krasnoyarsk, Tyv. phil. FBU “TFGI for the SFO”. Inv. No. 1211. (In Russ.)
- Starostin I.A., Chernykh A.I., Girfanov M.M. (2023) Paleogeotectonic position of the Kyzikchadr copper porphyry ore field (Republic of Tyva). *Ores and Metals*, (4), 52-73. (In Russ.)
- Starostin I.A., Girfanov M.M., Yartsev E.I. (2022) Geological structure, metasomatic and hidden mineralogical zonation of the Kyzik-Chadr copper-porphyry deposit (Republic of Tyva). *Vestn. Moskovskogo Univ. Ser. 4. Geol.*, (5), 90-94. (In Russ.)
- Ussar R.T., Dobryanskii G.I., Zyuzin M.P. (1978) The results of the search for copper deposits in the Kyzik-Chadr area and in its area. *Kyzyl*, 87 p. (In Russ.)
- Vikent'eva O., Prokofiev V., Groznova E., Vikentyev I., Bortnikov N., Borovikov A., Kryazhev S., Pritchkin M. (2020) Contrasting fluids in the Svetlinsk gold telluride hydrothermal system, South Urals. *Minerals*, **10**, 37.
- Voudouris P. (2006) A comparative mineralogical study of Te-rich magmatic-hydrothermal systems in northeastern Greece. *Mineral. Petrol.*, **87**, 241-275.
- White N.C., Hedenquist J.W. (1995) Epithermal gold deposits: Styles, characteristics, and exploration. *Soc. Econ. Geol. Newslett.*, **23**, 9-13.
- Wilkinson J.J. (2001) Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, **55**, 229-272.
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I. (2003) Deep Geodynamics and Mantle Plumes: Their role in the formation of the Central Asian fold belt. *Petrology*, **11**(6), 504-531.
- Zhang L.-G., Liu J.-X., Zhou H.B., Chen Z.-S. (1989) Oxygen isotope fractionation in the quartz-water-salt system. *Econ. Geol.*, **89**, 1643-1650.
- Zheng Y.F. (1999) Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals. *Geochem. J.*, **33**, 109-126.
- Zhuravkova T.V., Pal'anova G.A., Kalinin Y.A., Goryachev N.A., Zinina V.Y., Zhitova L.M. (2019) Physicochemical conditions of formation of gold and silver parageneses at the valunistoe deposit (Chukchi peninsula). *Russ. Geol. Geophys.*, **60**(11), 1247-1256. (In Russ.)