

УДК 553.2:549.283 (571.52)

ЗОЛОТО-СУЛЬФИДНО-КВАРЦЕВОЕ РУДОПРЯВЛЕНИЕ ХААК-САИР (ЗАПАДНАЯ ТУВА): ВОЗРАСТ, РТ-ПАРАМЕТРЫ, СОСТАВ ФЛЮИДОВ, ИЗОТОПИЯ S, O И C

Кужугет Ренат Васильевич¹,
rkuzhuget@mail.ru

Анкушева Наталья Николаевна²,
ankusheva@mail.ru

Кадыр-оол Чаяна Олековна¹,
kadyrool91@mail.ru

Редина Анна Андреевна³,
anna-red@outlook.com

Прокопьев Илья Романович³,
prokopev_ilya@mail.ru

Пономарчук Антон Викторович³,
antponomar@gmail.com

¹ Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН,
Россия, 667007, г. Кызыл, ул. Интернациональная, 117 а.

² Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН,
Россия, 456317, г. Миасс, Ильменский заповедник, 1.

³ Институт геологии и минералогии СО РАН,
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью определения возраста и условий образования золото-кварцевого рудопроявления Хаак-Саир в лиственитах, характеризующегося своеобразным минеральным составом руд, выраженным в наличии ртутистого золота, селенидов (фишессерита, науманнита, тиманнита, клаусталита) и теллуридов (гессита, теллуросмугитита и колорадоита).

Цель: определение возраста, условий образования, геохимических особенностей рудоносного флюида и его источников, золото-кварцевого рудопроявления Хаак-Саир в Западной Туве.

Методы. Оптические исследования руд проведены на микроскопах Olympus BX41 и ПОЛАМ П-213М. Состав минералов определен с помощью сканирующего электронного микроскопа MIRA 3 LMU с ЭДС Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd. Температуры, солевой состав, концентрации солей и давление при минералообразовании получены по индивидуальным флюидным включениям с использованием термокамеры Linkam TMS-600 и оптического микроскопа Olympus BX 51; газовый состав флюидных включений определен на рамановском спектрометре Ramanor U-1000 с детектором Horiba DU420E-OE-323, лазер Millennia Pro (Spectra-Physics); валовый газовый состав флюида диагностирован на газовом хроматографе Agilent 6890, содержания анионов в вытяжке проанализированы на жидкостном хроматографе ЦБЕТ-3000, катионы и микроэлементы – методом ICP MS (Elan-6100); соотношения $\delta^{34}\text{S}$ в галените определены на газовом масс-спектрометре FinniganTM MAT Delta в режиме двойного напуска (аналитики В.Н. Реутский, М.Н. Колбасова, ИГМ СО РАН); соотношения стабильных изотопов $\delta^{18}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в кварце и карбонатах определены на масс-спектрометрах Stable Isotope Ratio Mass Spectrometer FinniganTM MAT 253 с пробоотборником Finnigan GasBench II и стандартами IAEA: NBS-18 и NBS-19 (аналитик А.Н. Пыряев, ИГМ СО РАН) и Isoprime с AQS (Akita Quartz Standard, аналитики Х. Каварая, О. Мацубая, Университет г. Акита), соответственно; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование проведено методом ступенчатого прогрева.

Результаты. Установленный $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом возраст синрудных лиственитов рудопроявления составляет $379,4 \pm 4,4$ млн лет, что соответствует позднему девону. Термометрическими исследованиями установлено, что вмещающие листвениты рудопроявления образовались при участии водного Na-K-хлоридного флюида с соленостью 3,4–6,5 мас. % NaCl-экв. и температурами не менее 325–200 °С. Золото-сульфидно-кварцевые жилы отлагались при $P=0,5\text{--}0,75$ кбар ($\sim 1,5\text{--}2,3$ км) из углекислотно-водно-хлоридного (Na-K±Fe) флюида, содержащего CH_4 с концентрациями солей 4,5–37,4 мас. % NaCl-экв. при снижении температур от 320 до 120 °С (I рудная стадия – 310–200 °С, II рудная стадия – 320–120 °С) и вариациях $f\text{O}_2$, $f\text{S}_2$, $f\text{Se}_2$ и $f\text{Te}_2$, которые обусловили разнообразие минеральных форм Au, Ag и Hg. Величины $\delta^{34}\text{S}$ галенита изменяются от –0,6 до –0,4 ‰, а вычисленные значения $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ флюида I рудной стадии находятся в интервале +1,5...+2,1 ‰ ($T=280\text{--}210$ °С), II рудной стадии – +1,6...+2,6 ‰ ($T=290\text{--}190$ °С), что свидетельствует о магматическом происхождении серы. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в кварце рудных жил изменяются от 17,0 до 17,4 ‰, доломите – +17,4...+17,8 ‰, кальците – +16,5 ‰, рассчитанные значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{S}}$ флюида I рудной стадии находятся в интервале +8,1...+5,7 ‰ ($T=250\text{--}210$ °С), II рудной стадии – +6,7...–2,2 ‰ ($T=230\text{--}120$ °С) позволили предположить, что на ранних стадиях рудообразующего процесса флюид имел магматическое происхождение, а на поздних смешивался с метеорными водами. Величины $\delta^{13}\text{C}$ в доломите I рудной стадии варьируют от –0,4 до –0,7 ‰; в кальците II рудной стадии – –0,3 ‰, а рассчитанные значения $\delta^{13}\text{C}$ во флюиде находятся в интервале –1,2...+0,1 ‰ ($T=250\text{--}210$ °С) и –3,3...+0,5 ‰ ($T=230\text{--}120$ °С), соответственно. Это предполагает поступление углерода из гранитоидных магм и/или заимствование его из вмещающих пород. Состав флюида трансформировался от ранних стадий к поздним от углекислотно-водно-хлоридного до водно-хлоридного с уменьшением концентраций хлоридов щелочных и щелочноземельных металлов (от 37,4 до 4 мас. % NaCl-экв.).

Ключевые слова:

Самородное золото, флюидные включения, кварц, возраст, стабильные изотопы, месторождения золота, Тува.

Введение

Золото-кварцевое рудопроявление Хаак-Саир Алдан-Маадырского рудного узла (АМРУ) Западной Тувы считается одним из перспективных объектов на коренное Au в Республике Тыва. АМРУ приурочен к области развития V–C₁ океанических комплексов и S–O пород коллизионного прогиба. Золотое оруденение парагенетически связано с интрузивными породами баянкольского комплекса (D_{3bn}) и сопряжено с процессами березитизации и лиственитизации рудовмещающих пород [1], а также контролируется

оперяющими разломами субширотного простирания Саяно-Тувинского глубинного разлома.

Рудопроявление Хаак-Саир было открыто в 1952 г. Дальней экспедицией ВСЕГЕИ под руководством Г.М. Владимирского. В 1954–1955 и 1974–76 гг. оно было опробовано несколькими геологическими партиями в процессе геолого-съемочных и тематических работ, и были составлены детальные карты участков и рудного поля Сарыгдаш (Хаак-Саир) масштабов 1:200 и 1:10000, соответственно [2].

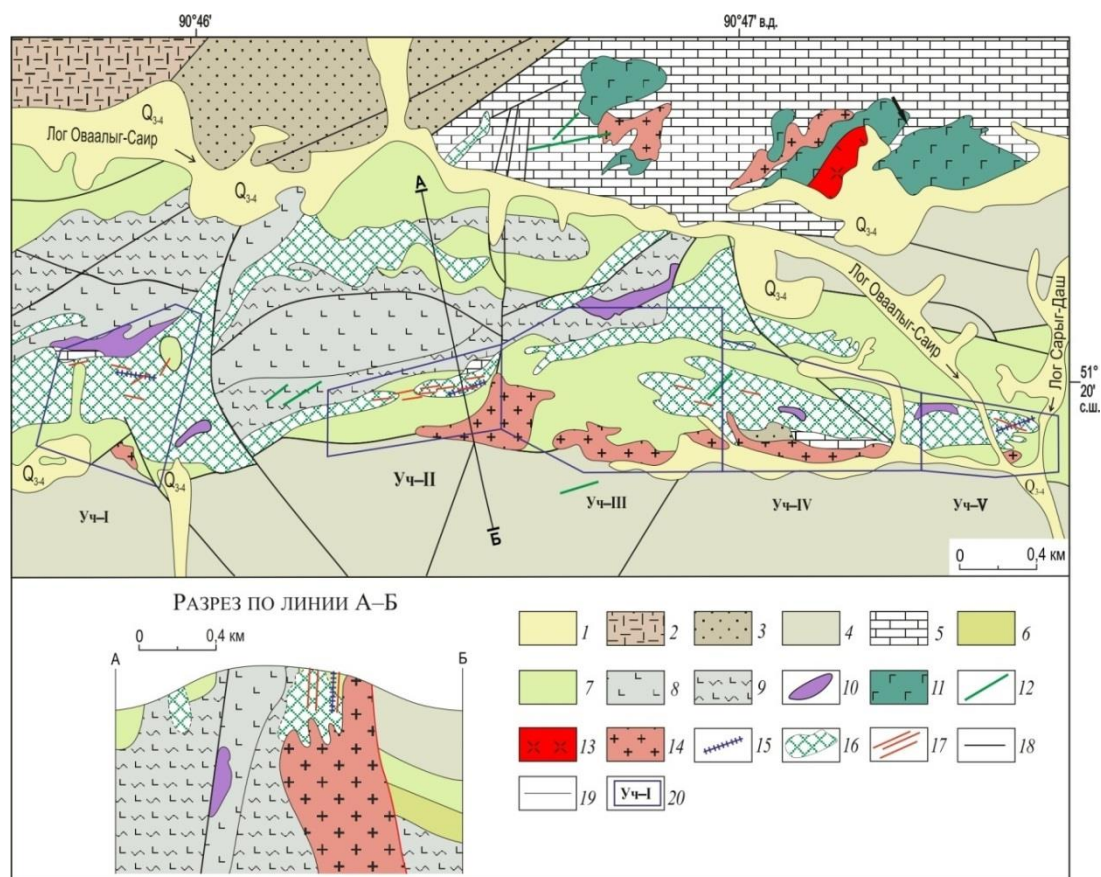


Рис. 1. Схема геологического строения рудопроявления Хаак-Саир (по данным [2] с изменениями): 1 – делювиальные и пролювиальные отложения (Q_{3-4}); 2 – дацит-риолитовые порфиры кендейской свиты (D_{1kn}); 3 – песчаники и алевролиты хондергейской свиты (D_{1hn}); 4 – серицито-глинистые сланцы и алевролиты чергакской свиты (S_{1cr}); 5 – известняки чергакской свиты (S_{1cr}); 6 – алевролиты, гравелиты и песчаники адырташской свиты (O_{3ad}); 7 – конгломераты с линзами песчаников и алевролитов адырташской свиты (O_{3ad}); 8 – спилиты алдынбулакской (чингинской) свиты ($V-C_{1at}$); 9 – рассланцованные спилиты алдынбулакской свиты ($V-C_{1at}$); 10 – серпентиниты, перидотиты, пироксениты и габброиды акдовракского офиолитового комплекса ($\sigma V-C_{1ak}$); 11–14 – интрузивные породы баянкольского комплекса (D_{3bn}): 11 – габброиды III фазы; 12 – дайки диоритов III фазы; 13 – интрузии риолит-порфиров II фазы; 14 – интрузии гранодиорит-, тоналит-порфиров I фазы; 15 – кварц-турмалиновые метасоматиты; 16 – листвениты; 17 – рудные жилы; 18 – разрывные нарушения; 19 – границы геологические; 20 – контуры участков рудопроявления Хаак-Саир

Fig. 1. Geological scheme of Khaak-Sair ore occurrence (after [2], modified): 1 – deluvial-proluvial sediments (Q_{3-4}); 2 – effusive rocks, dacite and rhyolite porphyry of the Kendei Formation (D_{1kn}); 3 – siltstones and sandstones of the Khodergei Formation (D_{1hn}); 4 – sericite-clay shales of the Chergak Formation (S_{1cr}); 5 – limestones and greenish-gray siltstone lenses of the Chergak Formation (S_{1cr}); 6 – siltstones, gravelites and sandstones of the Adyrtash Formation (O_{3ad}); 7 – shale medium pebble conglomerates with lenses of siltstones and sandstones of the Adyrtash Formation (O_{3ad}); 8 – spilites of the Aldynbulak Formation ($V-C_{1at}$); 9 – shales, and shale spilites of the Aldynbulak Formation ($V-C_{1at}$); 10 – serpentinites, peridotites, pyroxenites, and gabbroids of the Akdovrak ophiolite complex ($\sigma V-C_{1ak}$); 11–14 – intrusive rocks of the Bayan-Kol Complex (D_{3bn}): 11 – gabbroids of phase III; 12 – diorite dykes of phase III; 13 – rhyolite porphyry of phase II; 14 – granodiorite- and tonalite-porphyry, and granite-porphyry of phase I; 15 – quartz-tourmaline metasomatites; 16 – listwanites; 17 – ore veins; 18 – faults; 19 – geologic boundaries; 20 – Khaak-Sair ore occurrence and the outlines

В 2009–2011 гг. ОАО «Красноярскгеолсъемка» провело на АМРУ государственные ревизионно-поисковые работы на рудное Au. В ходе этих работ в центральной части рудопроявления Хаак-Саир были выявлены жильно-прожилковые зоны протяженностью от 450 до 1200 м и мощностью 2–18 м и ресурсы Au категории Р₂ оценены в количестве 18 т [3].

Авторы данной статьи с 2008 г. проводили тематические исследования на объектах АМРУ по изучению их минералого-геохимических особенностей руд, по результатам которых рудопроявления были отнесены к малосульфидной золото-кварцевой вулканогенно-плутоногенной формации [1, 4], т. е. переходного типу от вулканогенных к плутоногенным гидротермальным месторождениям Au.

В 2017–2019 гг. АО «Сибирское ПГО» провело государственные поисковые работы на рудное Au на площади АМРУ, включающие поисковые маршруты, литохимическое опробование по вторичным ореолам рассеяния, площадные геофизические работы, горные, буровые и опробовательские работы. В ходе этих работ авторами статьи были отобраны образцы из горных выработок, использованные для изотопно-геохронологических, изотопно-геохимических и термобарогеохимических исследований, что позволило получить новые данные о возрасте оруденения, геохимических особенностях флюидов и изотопном составе S, O и C флюида.

Геолого-минералогическая характеристика рудопроявления

Детальная геолого-минералогическая характеристика рудопроявления Хаак-Саир приведена в работе [4]. Здесь подчеркнем, что оруденение приурочено к горст-антиклинальной структуре субширотного простирания длиной 9 км и шириной 1–1,5 км. Крылья структуры осложнены субширотными тектоническими нарушениями: на севере – Аржанским разломом,

на юге – Рудным разломом. Ядро структуры сложено V–Є₁ вулканогенно-осадочными породами, крылья – O₃–S₁ терригенно-осадочными отложениями (рис. 1). Рудный разлом сбросового типа, контролирующий оруденение, «залечен» тоналит-порфирами I фазы баянкольского комплекса (D_{3bn}), парагенетически связанными с оруденением. Разлом имеет северо-восточное простирание, прослежен на 16 км и насыщен оперяющими трещинами и тектоническими зонами. Падение разлома субвертикальное, реже крутое, на юг или север; амплитуда перемещения 1,5 км.

Тектонически нарушенные зоны стали благоприятной средой для циркуляции гидротермальных флюидов, генерируемых малыми гранитоидными интрузиями баянкольского субвулканического комплекса (D_{3bn}). Это обусловило формирование линейных зон лиственитов с кварцевыми жилами и золотой минерализацией.

На рудопроявлении развиты дорудные кварц-турмалиновые метасоматиты и жилы с W-содержащим рутилом, шеелитом и пиритом (этап I), которые сменяются золото-кварцевыми жилами в березит-лиственитовых метасоматитах (этап II). Кварц-турмалиновый высокотемпературный этап включает турмалиновую (1) и турмалин-кварцевую (2) стадии. Кварц-турмалиновые метасоматиты генетически связаны с малыми интрузиями гранодиорит- и тоналит-порфиров баянкольского комплекса (D_{3bn}) [2]. Они представляют собой метасоматические породы мощностью до 1–2 м, образованные по кварц-полевошпатовым песчаникам ордовика, сложенные бледно- и светло-зеленоватым игольчато-призматическим турмалином с кварц-турмалиновыми и молочно-белыми кварцевыми прожилками последующих стадий (рис. 2). По химическому составу турмалины относятся к промежуточному ряду шерл-дравит-магнезиофойтит с примесью Gr₂O₃ до 1,04 мас. %.

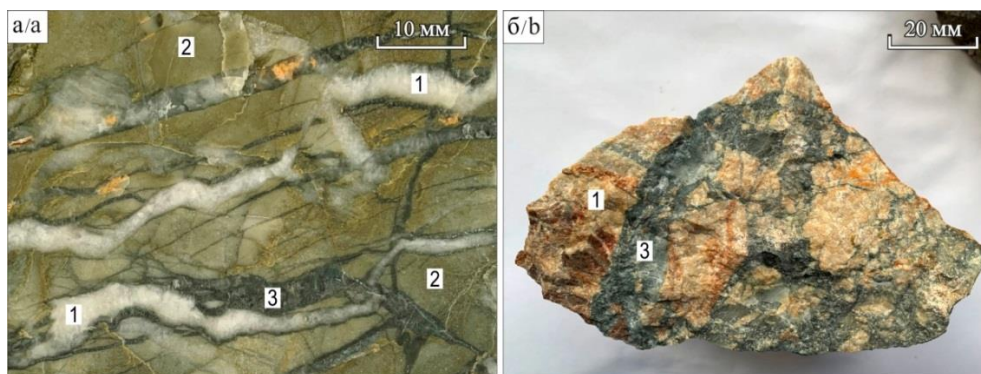


Рис. 2. Кварц-турмалиновые метасоматиты и жилы рудопроявления Хаак-Саир: а) кварц-турмалиновые (3) и кварцевые (1) прожилки в кварц-турмалиновом метасоматите; б) кварц-турмалиновые (3) жилы в карбонатных породах (1)

Fig. 2. Quartz-tourmaline metasomatites and veins of Khaak-Sair ore occurrence: а) quartz-tourmaline (3) and quartz (1) veinlets in quartz-tourmaline metasomatite; б) quartz-tourmaline (3) veins in carbonate rocks (1)

II золото-сульфидно-кварцевый этап включает дорудные (березит-лиственитовую (1) и пирит-кварцевую (2)), рудные (золото-арсенопирит-сульфосольно-кварцевую (3), золото-ртутисто-селенидно-теллуридно-сульфидно-

сульфосольно-кварцевую (4)) и пострудные (хлорит-турмалин-кварцевую (5), карбонат-кварцевую (6) и хлорит-кварцевую (7)) стадии. Гипергенные преобразования руд отнесены к III этапу (табл. 1; рис. 3).

Таблица 1. Последовательность минералообразования на рудопроявлении Хаак-Саир

Table 1. Mineral formation sequence of Khaak-Sair ore occurrence

Минерал/Mineral	Этан/Stages									Гипергенный Supergene
	Кварц-турмалиновый Quartz-tourmaline		Гидротермальный золото-сульфидно-кварцевый Hydrothermal gold-sulfide-quartz							
	Стадия/Substage									
	1	2	1	2	3	4	5	6	7	
Кварц/Quartz										
Турмалин/Tourmaline										
Шеелит/Scheelite										
Рутил/Rutile										
Хлорит/Chlorite										
Пирит/Pyrite										
Кальцит/Calcite										
Доломит/Dolomite										
Сидерит/Siderite										
Анкерит/Ankerite										
Серицит/Sericite										
Парагонит/Paragonite										
Герсдорфит/Gersdorffite										
Галенит/Galena										
Сфалерит/Sphalerite										
Арсенопирит/Arsenopyrite										
Халькопирит/Chalcopyrite										
Блѣклые руды/Fahlores										
Бурнонит/Bournonite										
Борнит/Bornite										
Золото/Native gold										
Электрум/Electrum										
Гессит/Hessite										
Hg-золото/Hg-gold										
Hg-электрум/Hg-electrum										
Hg-кюстелит/Hg-kustelite										
Hg-серебро/Hg-silver										
Колорадоит/Coloradoite										
Акантит/Acanthite										
Теллуровисмутит/Tellurobismuthite										
Фишессерит/Fischesserite										
Науманнит/Naumannite										
Клаустолит/Clausthalite										
Тиманнит/Tiemannite										
Se-киноварь/Cinnabar										
Se-имитерит/Se-imiterite										
Ялпаит/Jalpaite										
Барит/Baryte										
Гематит/Hematite										
Ковеллин/Covellite										
Халькозин/Chalcocite										
Малахит/Malachite										
Азурит/Azurite										
Гѣтит/Goethite										
Скородит/Scorodite										
Серебро/Silver										
Галогениды Ag/Silver halides										
Гипергенные/Supergene										

Примечание. Гипергенные – англезит, церуссит, линарит, конихальцит, брошантит, атакамит и т. д.

Note. Hypergenic – anglesite, cerussite, linarite, conichalcite, brochanite, atacamite, etc.

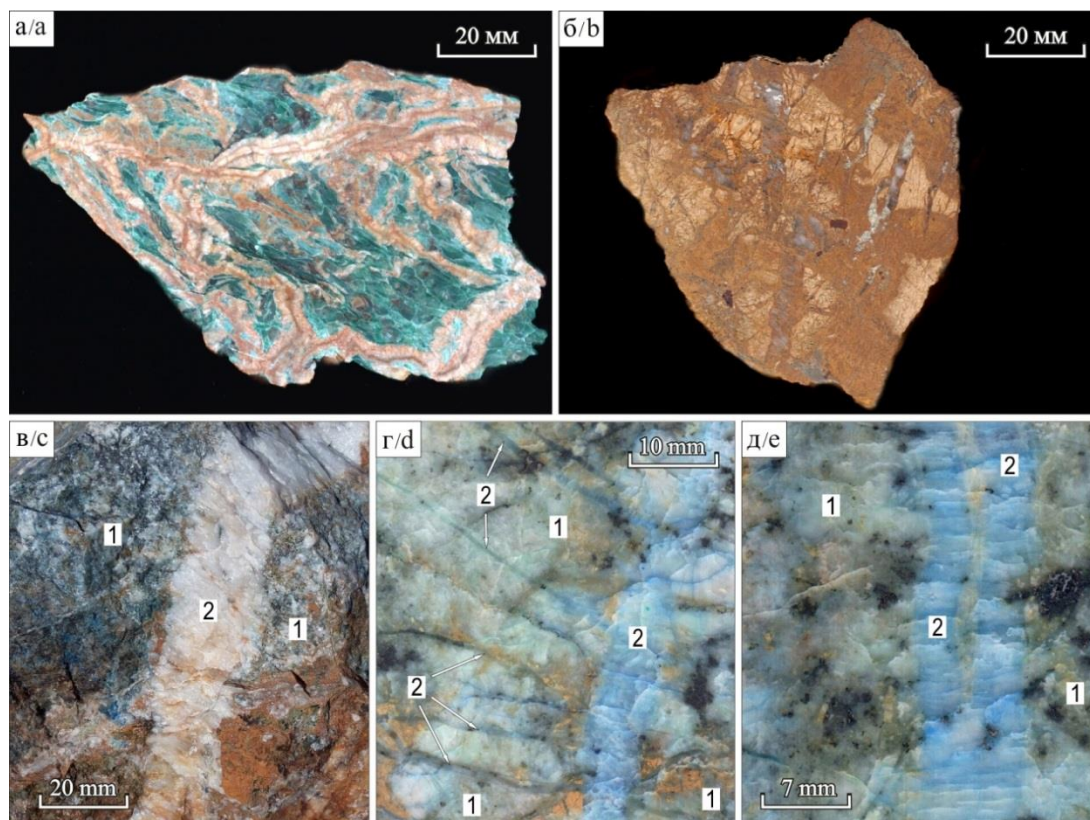


Рис. 3. Листвениты и рудные жилы рудопроявления Хаак-Саир: а, б) листвениты: а) зеленый; б) красновато-бурый; в–д) золото-сульфидно-кварцевые прожилки II рудной стадии (2) в минеральных агрегатах I рудной стадии (1)

Fig. 3. Listwanites and ore veins of Khaak-Sair ore occurrence: а, б) listwanites: а) green; б) reddish-brown; в–е) Au-sulfide-quartz veins of the late ore substage (2) dissecting the mineral aggregates of the early ore substage (1)

Малосульфидные жилы и жильно-прожилковые зоны с вкрапленной, прожилково-вкрапленной минерализацией развиты в лиственитах, эффузивах и терригенных породах. Они сложены молочно-белым, серовато-белым среднетонкозернистым или халцедоновидным кварцем. Среднее содержание Au в рудах составляет 2,5 г/т, Ag – 26,55 г/т; наблюдается корреляция Au с Cu, Sb, As, Ag, B, Pb, Ba, Zn, Mo, W, Bi, Te, Cd и Mg [4].

Рудная стадия I включает две минеральные ассоциации: раннюю золото-галенит-арсенопирит-теннантит-тетраэдрит-кварцевую с бурнонитом ± аргентотеннантит-тетраэдрит (Ag до 50,05 мас. %) и позднюю золото-электрум-галенит-халькопирит-тетраэдрит-кварцевую с герсдорфитом ± пирит ± борнит ± кальцит ± доломит (FeO до 1,09 мас. %) ± Fe-доломит (FeO от 5,84 до 8,62 мас. %, MnO до 0,31 мас. %).

Минералы ранней ассоциации составляют центральные части жил или самостоятельные жилы и рассечены жилами рудной стадии II (рис. 3, в–д). Последние также образуют две минеральные ассоциации: раннюю золото-гессит-науманнит-теннантит-тетраэдрит-кварцевую с Hg-золотом (Hg до 2 мас. %), электрумом, Hg-электрумом, бурнонитом, герсдорфитом (Fe до 1,96 мас. %), халькопиритом, борнитом, теллуристом, галенитом (Se до 14,5 мас. %, Ag до 5 мас. %), клаусталитом (S до 4,69 мас. %), науманнитом (S до 1,5 мас. %), фишессеритом, тиманнитом, колорадоитом ± Se-имитерит; и позднюю золото-

ртутисто-халькопирит-теннантит-тетраэдрит-кварцевую с теннантит-тетраэдритом (Ag до 15,96 мас. %), тетраэдритом (Ag до 22,76 мас. %), аргентотетраэдритом (Ag до 40,96 мас. %), гесситом, акантитом, герсдорфитом (Fe до 3,76 мас. %, Co до 6,88), Se-галенитом, науманнитом, S-науманнитом, Hg-золотом, электрумом, Hg-электрумом, Hg-кюстелитом, Au-содержащим Hg-серебром, баритом, бурнонитом ± сфалерит ± Секиноварь ± ялпаит ± кальцит (FeO до 0,89 мас. %, MnO до 0,26).

В рудных жилах широко развиты блеклые руды ряда теннантит-тетраэдрит, низкопробное золото, электрум, кюстелит и их ртутистые разновидности с содержаниями Hg 5–10, 3–17 и 5–17,5 мас. %, соответственно. Пробность золота на рудопроявлении колеблется от 957 до 19 ‰, составляя в среднем 701 ‰.

По составу рудных минералов жил рудопроявление Хаак-Саир отвечает золото-электрум-галенит-халькопирит-сульфосольному типу с Ag-содержащим тетраэдритом (Ag до 22 мас. %), аргентотетраэдритом (Ag до 40 мас. %) и минералами ряда Au–Ag–Hg.

В коре выветривания рудопроявления развиты многочисленные гипергенные минералы (табл. 1) [4]. Мощность зоны гипергенеза составляет не менее 200 м.

⁴⁰Ar/³⁹Ar возраст оруденения на рудопроявлении

Для определения возраста оруденения был отобран синрудный лиственит (обр. ХС-3, рис. 2, б) из зальбанды золото-сульфидно-сульфосольно-кварцевой

жилы центрального участка рудопоявления. Прожилково-пятнистый, среднезернистый лиственит имеет красновато-бурую окраску вследствие разложения Fe-содержащих карбонатов, в нем отмечаются кварцевые прожилки, а на их контакте с карбонатами развивается серицит (веерообразные агрегаты из че-

шук размером 0,1–0,3 мм). Лиственит сложен карбонатом (Fe-доломитом, кальцитом) – 60 %, кварцем – 32 %, серицитом ~5 %, лимонитом по пириту ~3 %.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирование, выполненное по монофракциям серицита, отобранного вручную, составляет $379,4 \pm 4,4$ млн лет (рис. 4).

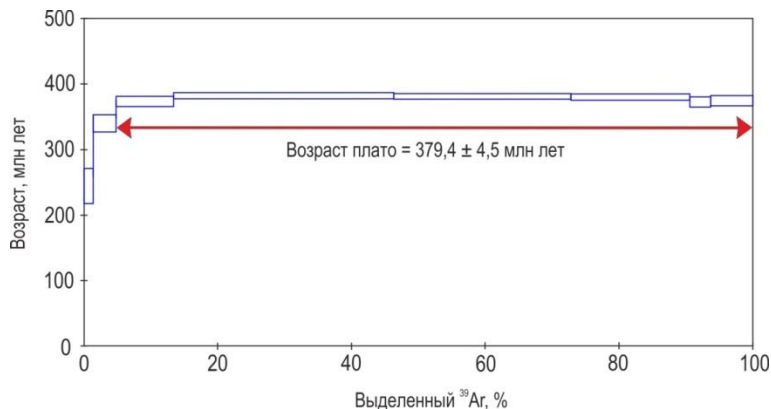


Рис. 4. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования серицита из лиственитов рудопоявления Хаак-Саир

Fig. 4. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of sericite from Khaak-Sair ore occurrence

Полученный возраст синрудных лиственитов рудопоявления хорошо согласуется с $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастом $376,5 \pm 3,4$ млн лет для даек габбро III фазы баян-кольского комплекса (D_3bn) в южной части АМРУ [5].

Условия образования лиственитов и рудных жил

Для установления условий образования дорудных метасоматитов (лиственитов) и золотоносных жил рудопоявления Хаак-Саир исследованы первичные,

псевдотричные и вторичные флюидные включения в кварце [6]. По фазовому составу они разделены на ассоциации: 1) двухфазные газовой-жидкие (VL); 2) трехфазные газовой-жидкие с твердой фазой (VLS); 3) трехфазные, содержащие газовую фазу, жидкую углекислоту и водный раствор (VLC) (рис. 5). Результаты термометрических исследований приведены в табл. 2 и на рис. 6.

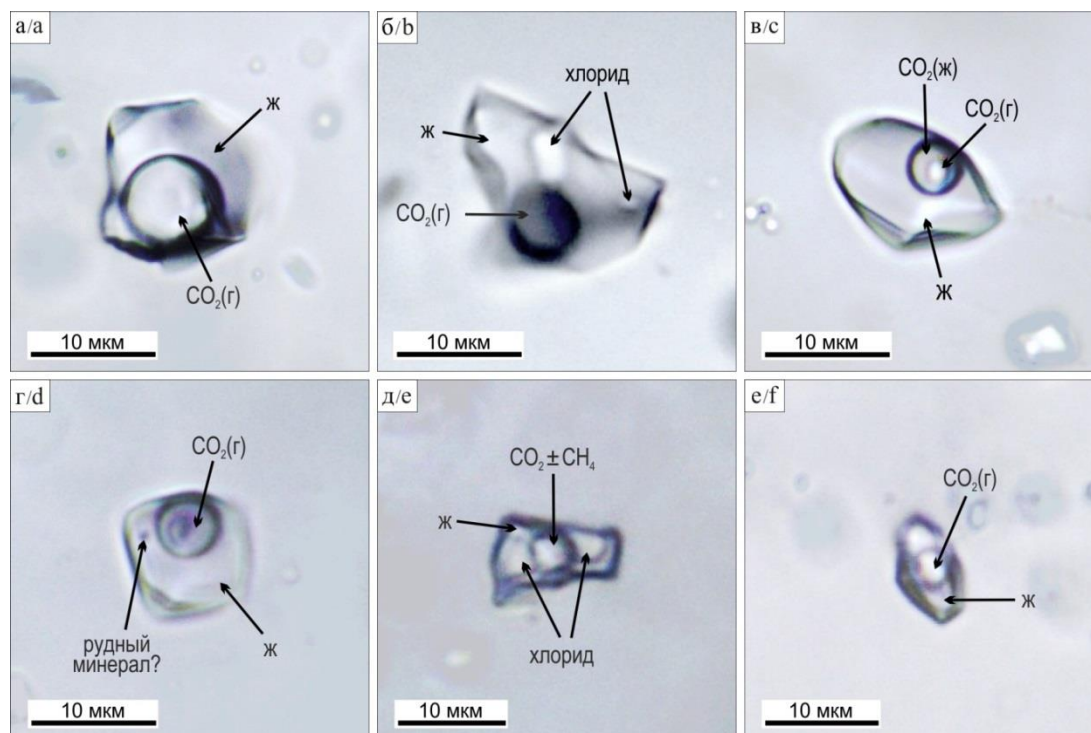


Рис. 5. Флюидные включения в кварце: а) псевдотричное VL (обр. XC-5); б–г) первичные (обр. XC-7): б) VLS; в, г) VLC; д) первичное VLS (обр. XC-3); е) псевдотричное VL (обр. XC-3); ж – жидкая фаза, з – газовая фаза

Fig. 5. Fluid inclusions in quartz: a) pseudosecondary VL (XC-5); b–d) primary (XC-7): b) VLS; c, d) VLC; e) primary VLS (XC-3); f) pseudosecondary VL (XC-3); ж – liquid phase, з – gas phase

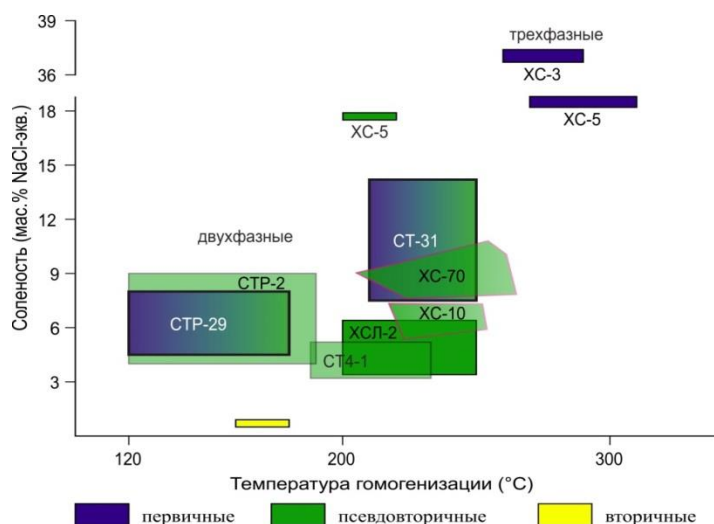


Рис. 6. Диаграмма температур гомогенизации и солености флюидных включений в кварце. Номера образцов – в табл. 2

Fig. 6. Homogenization temperatures vs salinity plot of fluid inclusions in quartz. For sample numbers see Table 2

Таблица 2. Результаты изучения флюидных включений в кварце рудопроявления Хаак-Саир

Table 2. Fluid inclusions data of Khaak-Sair ore occurrence

Образец Sample	Генерация ФВ (FIA)	Фазовый состав (phases)	n	$T_{\text{гом}}, ^\circ\text{C}$ $T_{\text{hom}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{эвт}}, ^\circ\text{C}$ $T_{\text{eut}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пл. льда}}, ^\circ\text{C}$ $T_{\text{ice melts}}, ^\circ\text{C}$	Соленость (мас. % NaCl-экв.) C, wt. %, NaCl equiv	P, бар P, bar	Солевой состав Salt composition
Лиственины/Listwanites									
ХСЛ-2	ПВ	VL	12	250–200	–15	–4––2	3,4–6,5	–	NaCl-KCl-H ₂ O
	В	VL	20	180–160	–	–0,3––0,5	0,5–0,9	–	–
Золото-галенит-арсенопирит-теннантит-тетраэдрит-кварцевая жила (I) Gold-galena-arsenopyrite-tennantite-quartz vein of the early ore substage									
ХС-5	П	VL	10	310–270	–28––30	–15,2––14,5	18,2–18,8	–	NaCl-FeCl ₂ -H ₂ O+ CO ₂ (г)
	ПВ	VL	18	220–200	–21––25	–14,2––13,7	17,5–17,9	–	NaCl-FeCl ₂ -H ₂ O+ CO ₂ (г)
	В	VL	22	180–160	–	–	–	–	–
Золото-электрум-галенит-халькопирит-тетраэдрит-кварцевые жилы (I) Gold-electrum-galena-chalcopryrite-tennantite-tetrahedrite-quartz veins of the early ore substage									
ХС-7	П	VLC	10	280–260	–	–	–	0,75–0,6	CO ₂ (г+ж)
	П	VLS	8	270–260*	–	–	–	–	chlorides-H ₂ O +CO ₂ (г)
СТ-31	ПВ	VL	67	250–210	–22––24	–10,3––4,8	7,5–14,2	–	H ₂ O±CO ₂ (г)+ NaCl-KCl-H ₂ O
Золото-гессит-науманнит-теннантит-тетраэдрит-кварцевые жилы (II) Gold-hessite-naumannite-tennantite-tetrahedrite-quartz veins of the late ore substage									
ХС-8 ХС-3	П	VL	20	320–300	–	–	–	–	+ CO ₂ (г)
		VLS	13	275–270*	–	–	–	–	chlorides- H ₂ O+CO ₂ ±CH ₄ (г)
	ПВ	VL	24	270–250	–	–	–	–	+CO ₂ (г)
	П	VLS	14	290–280	–	–	36,7–37,4	–	chlorides-H ₂ O+CO ₂ (г)
	ПВ	VL	25	230–190	–	–	–	–	chlorides + CO ₂ (г)
Золото-ртутисто-халькопирит-теннантит-тетраэдрит-кварцевые жилы (II) Gold-mercury-chalcopryrite-tetrahedrite-quartz veins of the late ore substage									
СТР-2 СТ4-1, СТ-29	П	VL	31	230–180	–21––24	–2,5––5,0	4,5–8,0	–	NaCl-KCl-H ₂ O
	ПВ	VLC	11	190–120	–19––23	–2,5––6,0	4–9	0,5	NaCl-H ₂ O, NaCl-KCl-H ₂ O
	ПВ	VL	48	180–120	–21––24	–2,5––5,0	4,5–8,0	–	NaCl-H ₂ O, NaCl-KCl-H ₂ O
Пострудные кварц-турмалиновые жилы / Post-ore quartz-tourmaline veins									
ХС-70	ПВ	VL	45	265–210	–22––24	–6,4––8	8–10,4	–	NaCl-KCl-H ₂ O
ХС-10	ПВ	VL	23	255–210	–21––23	–3,3––5,1	5,5–8	–	NaCl-KCl-H ₂ O
	П	VL	11	240–252	–33––34	–3,8––5	6–7,9	–	MgCl ₂ -H ₂ O

Примечание: n – количество анализов, $T_{\text{гом}}$ – температура гомогенизации, $T_{\text{эвт}}$ – температура эвтектики, $T_{\text{пл. льда}}$ – температура плавления льда. Включения: П – первичные, ПВ – псевдотеричные, В – вторичные; * – включения декрипировали; ж – жидкая фаза, г – газовая фаза.

Note: n – number of analyzes, T_{hom} – homogenization temperatures, T_{eut} – eutectic temperatures; $T_{\text{ice melt}}$ – final melting temperatures; П – primary inclusions, ПВ – pseudosecondary inclusions, В – secondary inclusions; * – inclusions were decrypted; ж – liquid, г – gas.

В кварце лиственитов выявлены псевдотворичные и вторичные VL флюидные включения. Первые тяготеют к трещинам в кварце, образовавшимся в процессе его отложения и не выходящим за пределы крупных зерен. Они имеют овальную и изометричную форму, размеры 9–13 мкм с долей газовой фазы до 40 об. %. Псевдотворичные включения содержат хлориды натрия и калия ($T_{\text{эвт.}} = -15^\circ\text{C}$). Концентрации солей по температурам плавления льда ($T_{\text{пл.}} = -4 \dots -2^\circ\text{C}$) составляют 3,4–6,5 мас. % NaCl-экв. Температуры гомогенизации включений в жидкую фазу составили 220–250 °C.

Вторичные включения имеют округлую и удлиненную форму с неровными краями, размеры до 5 мкм; доля газовой фазы составляет до 15 об. %. Для них получены концентрации солей 0,5–0,9 мас. % NaCl-экв. ($T_{\text{пл.}} = -0,3 \dots -0,5^\circ\text{C}$) и температуры гомогенизации (в жидкость) 160–180 °C (табл. 2).

В кварце золото-галенит-арсенопирит-теннантит-теннантит-кварцевой жилы I рудной стадии проанализированы газовой-жидкие (VL) включения нескольких генераций: первичные, псевдотворичные и вторичные. Первичные включения встречаются обособленно или в виде малочисленных групп, имеют изометричную форму с элементами кристаллографических граней и размеры до 12 мкм. Псевдотворичные включения трассируют залеченные трещины в кристаллах кварца и характеризуются удлиненной формой и размерами 8–12 мкм. Вторичные включения имеют изометричную или округлую форму и размеры 3–7 мкм и маркируют поздние прожилки в кварце. По данным рамановской спектроскопии, первичные VL включения в газовой фазе содержат углекислоту. Для них получены температуры эвтектики, равные $-30 \dots -28^\circ\text{C}$, и температуры плавления льда от $-15,2$ до $-14,5^\circ\text{C}$. Эти данные отвечают хлоридному раствору, содержащему ионы Fe и Na, с концентрацией 18,2–18,8 мас. % NaCl-экв. Температуры гомогенизации (в жидкость) составили 270–310 °C. Псевдотворичные VL включения содержат раствор хлоридов Fe и Na с концентрацией 17,5–17,9 мас. % NaCl-экв. ($T_{\text{эвт.}} = -27 \dots -25^\circ\text{C}$; $T_{\text{пл.}} = -14,2 \dots -13,7^\circ\text{C}$). Газовая фаза представлена углекислотой. Температуры их гомогенизации (в жидкость) составляют 200–220 °C. Вторичные VL включения гомогенизируются в жидкую фазу при 160–180 °C (табл. 2).

В кварце золото-электрум-галенит-халькопирит-тетраэдрит-кварцевой жилы I рудной стадии проанализированы первичные VLC и VLS и псевдотворичные VL включения. Первичные включения имеют округлую изометричную, реже остроугольную или вытянутую форму с элементами кристаллографических граней и размеры 7–18 мкм. Солевой состав растворов, оцененный по температурам эвтектики, соответствует хлоридному с ионами Na и K с концентрациями 7,5–14 мас. % NaCl-экв. Температуры гомогенизации включений (в жидкость) составляют 210–250 °C. Псевдотворичные включения имеют изометричную и удлиненную форму и размеры 5–9 мкм. Газовая фаза первичных VLS включений представлена углекислотой, минеральная фаза – светлоокрашен-

ная изотропная кубического габитуса, вероятно, является хлоридом. При нагревании включения декрипитировали при температурах 260–270 °C. В первичных VLC включениях при комнатной температуре газовые фазы не наблюдались. При их охлаждении наблюдалось отделение газовой вакуоли, которая переходила обратно в газовую фазу при температурах $+8 \dots +9,2^\circ\text{C}$. Температуры гомогенизации первичных VLC включений варьируют от 260 до 280 °C. Полученным температурам гомогенизации углекислоты и полной гомогенизации включений соответствуют плотность углекислоты $\approx 0,13 \dots 0,12 \text{ г/см}^3$ и давление 750–600 бар. В отдельных случаях во включениях этого типа наблюдается черная минеральная фаза, вероятно, представленная рудным минералом (рис. 3, з). Сонахождение пересыщенных VLS и существенно углекислотных VLC включений свидетельствует о процессе кипения флюида [7]. Псевдотворичные VL включения в газовой фазе содержат углекислоту, иногда отмечается водяной пар. Температуры гомогенизации установить не удалось, так как при нагреве до температур 190–250 °C включения декрипитировали (табл. 2).

В кварце золото-гессит-науманнит-теннантит-тетраэдрит-кварцевой жилы II рудной стадии изучены первичные VL и VLS и псевдотворичные VL включения, расположенные в виде групп или одиночно, размером 4–7 мкм с элементами кристаллографических граней. Первичные VL включения в газовой фазе содержат углекислоту. Для них установлены температуры гомогенизации (в жидкость) 300–320 °C. Первичные VLS включения имеют изометричную и удлиненную форму и размеры до 20 мкм. Они содержат изотропную светлоокрашенную минеральную фазу, вероятно, представленную хлоридом. В отдельных случаях во включениях находится несколько твердых фаз. Газовая фаза первичных VLS включений представлена CO_2 с примесью CH_4 . Их температуры гомогенизации (в жидкость) равны 280–290 °C, а концентрации солей – 36,7–37,4 мас. % NaCl-экв. В ряде случаев гомогенизация включений не была достигнута, получены температуры декрипитации VLS включений, равные 270–275 °C. Псевдотворичные VL включения характеризуются изометричной формой и размерами 3–5 (до 12) мкм. Они также содержат углекислоту в составе газовой фазы, однако характеризуются более низкими температурами гомогенизации (в жидкость) – 190–270 °C (табл. 2).

В кварце золото-ртутисто-халькопирит-теннантит-тетраэдрит-кварцевых жил II рудной стадии изучены VLC и VL первичные и псевдотворичные включения. Включения имеют округлую или вытянутую форму и размеры до 15 мкм. Солевой состав, оцененный по температурам эвтектики, соответствует хлоридному флюиду с ионами Na и K с концентрациями 3,2–5,2 мас. % NaCl-экв. Температуры их гомогенизации (в жидкость) составили 230–180 °C. Жидкая фаза в трехфазных VLC включениях представлена углекислотой. Температура плавления углекислоты ($-56,6^\circ\text{C}$) свидетельствует об отсутствии примесей других газов. Температуры гомогенизации CO_2 в

жидкую фазу (26,5–28,7 °С) и полной (230–180 °С) гомогенизации VLC включений в жидкость указывают на давление флюида ~0,5 кбар. Флюид содержит хлориды Na и K. Температуры гомогенизации (в жидкость) псевдотермических VL и VLC включений составляют 190–120 °С.

В кварце пострудных кварц-турмалиновых прожилков изучены первичные и псевдотермические двухфазные VL флюидные включения. Они имеют размеры до 15 мкм, овальную либо округлую форму с крупными газовыми вакуолями (до 20–25 об. %). Плавление эвтектики растворов первичных включений происходило при температурах от –33 до –33,9 °С, следовательно, флюид имеет $MgCl_2-H_2O$ состав. Температуры гомогенизации (в жидкость) варьируют от 240 до 250 °С. Соленость флюида составляет 6–8 мас. % NaCl-экв. Температуры эвтектики псевдотермических включений образуют интервал –21...–24 °С, что отвечает $NaCl-KCl-H_2O$ флюиду с концентрациями солей 5,5–10 мас. %. Температуры гомогенизации составили 210–265 °С.

Геохимические особенности флюида

Валовый анализ водных и газовых вытяжек из флюидных включений из монофракций кварца по методике [8] дал информацию об элементном составе флюида рудных стадий рудопроявления Хаак-Саир. Во включениях в кварце I рудной стадии (табл. 3) среди катионов (г/кг H_2O) преобладает Na (4,54), в подчиненном количестве находятся K (0,24), Ca (0,14) и Mg (0,004). Установлены значимые количества (г/кг H_2O): CO_2 (131), HCO_3^- (10,43), Cl^- (1,39) и CH_4 (0,08). Из микрокомпонентов в значительных количествах присутствует (мг/кг р-ра): B (393,6), Sb (134,7), As (112,5), Ba (18), Sr (15,4), Fe (5,5), Cu (1,12) и Ag (1,73).

Во включениях в кварце II рудной стадии также преобладает (г/кг H_2O) Na (4,3–7,17), а Ca (0,00–1,8), K (0,37–1,6) и Mg (0,2–0,46) находятся в подчиненном количестве. Содержания летучих компонентов флюида выявлены в следующих концентрациях (г/кг H_2O): CO_2 (27,8–154,9), HCO_3^- (17,69–20,68), Cl^- (0,34–1,74) и CH_4 (0,071–0,236). Из микрокомпонентов в значимых количествах присутствуют (мг/кг р-ра): Sb (1539–7441), As (120–804), B (123–1076), Ba (449–2807), Sr (41,7–78,8), Fe (8,3–26,7), Mn (4,1–25,2), Pb (0,09–62), Ni (2,8–26,8), Mo (3–6,7), Cu (10,2), Ag (2–6,24), W (6,24) и Bi (до 0,02).

Средний химический состав флюида рудопроявления Хаак-Саир показан на рис. 7.

Изотопный состав S, O и C

Значение $\delta^{34}S$ галенита из жил I рудной стадии составляет –0,6 ‰, II рудной стадии – –0,4 ‰, т. е. величины изотопного состава характеризуются устойчивыми околонулевыми значениями в интервале от –0,6 до –0,4 ‰.

Значения $\delta^{34}S_{H_2S}$ флюида в соответствии с уравнением фракционирования [9, 10] I рудной стадии находятся в интервале +1,5...+2,1 ‰ ($T=280–210$ °С),

II рудной стадии – +1,6...+2,6 ‰ ($T=290–190$ °С), что свидетельствует об участии магматической серы и магматическом генезисе флюида [9–12].

Величина $\delta^{18}O$ кварца рудных жил рудопроявления изменяется от 17,0 до 17,4 ‰, в том числе в кварце ранней рудной стадии – от 17,2 до 17,4 ‰, II – 17,0 ‰ [13]. Значения $\delta^{18}O$ флюида в соответствии с уравнением фракционирования [14, 15] I рудной стадии находятся в интервале +8,0...+5,7 ‰ ($T=250–210$ °С), II рудной стадии – +6,7...–1,7 ‰ ($T=230–120$ °С).

Таблица 3. Валовый состав растворов флюидных включений в кварце

Table 3. Bulk fluid inclusion composition in quartz

Компоненты Components	Рудные стадии/Ore substages				Среднее Average
	I	II			
	Проба/Sample				
	CT-31-8	CT-31-6	CT-4-1	CT-29	
Макрокомпоненты, г/кг воды Bulk components, g/kg H ₂ O					
CO ₂	131,36	154,99	27,85	63,91	94,53
CH ₄	0,075	0,071	0,129	0,236	0,13
Cl ⁻	1,39	0,34	1,74	0,72	1,05
HCO ₃ ⁻	10,43	17,69	18,40	20,68	16,80
Na	4,54	4,66	7,17	4,38	5,19
K	0,24	0,37	0,85	1,61	0,77
Ca	0,14	1,40	0,00	1,80	0,83
Mg	0,004	0,210	0,212	0,457	0,22
Микрокомпоненты, 10 ⁻³ г/кг воды Trace elements, 10 ⁻³ g/kg H ₂ O					
Sb	134,73	1539,05	—	7441,08	2278,72
Ba	18,01	449,57	1428,77	2807,79	1176,04
B	393,64	679,13	122,57	1076,02	567,84
As	112,25	288,2	119,93	804,44	331,21
Sr	15,36	41,75	66,37	78,81	50,57
Fe	5,56	8,32	20,58	26,67	15,28
Mn	1	4,15	25,2	27,49	14,46
Pb	0,1	2,42	0,09	62,16	16,19
Mo	—	3,07	6,59	6,47	4,033
Li	1,55	3,24	5,73	5,26	3,95
Ni	1,98	2,84	26,76	3,43	8,75
Cu	1,12	—	10,2	—	2,83
Zn	—	141,71	—	—	35,43
Ag	1,73	2,03	6,24	4,31	3,58
W	—	0,77	6,24	—	1,75
Rb	0,23	0,79	0,85	2,13	1
Cr	0,09	0,29	1,55	0,49	0,61
Cd	0,27	1,03	0,21	0,27	0,45
Cs	0,38	0,45	0,35	0,23	0,35
Co	0,07	0,49	0,36	0,31	0,31
Hg	0,24	—	—	0,76	0,25
Ge	0,1	0,06	0,02	0,18	0,09
Au	0,02	0,05	—	0,14	0,05
Tl	—	0,01	0,02	0,05	0,02
Bi	—	0,01	0,02	—	0,008
REE	0,02	0,26	0,96	0,58	0,46
Na/K	18,92	12,59	8,47	2,72	10,68
CO ₂ /CH ₄	1751,47	2182,96	215,9	270,81	1105,29
K/Rb	1043	468	1000	756	816

Примечание. Анализы выполнены в ФГУП ЦНИГРИ (аналитик С.Г. Кряжев). «–» – не обнаружено.

Note. The analyses are performed in FSBI TSNIGRI (operator S.G. Kryazhev). «–» – below the detection limit.

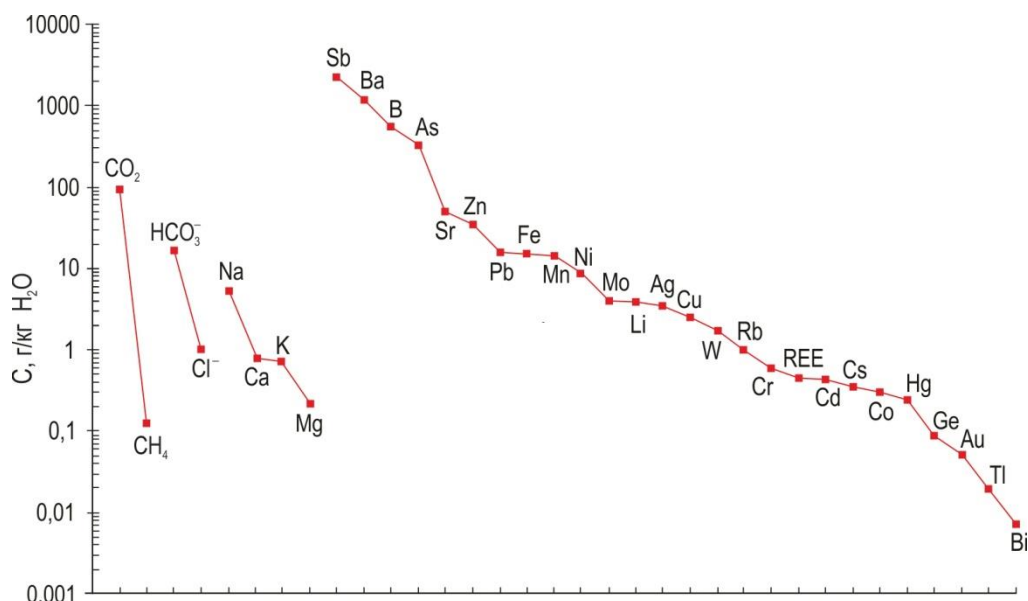


Рис. 7. Средний химический состав флюида рудопроявления Хаак-Саир.

Fig. 7. Average chemical fluid composition of Khaak-Sair ore occurrence

Величины $\delta^{18}\text{O}$ доломита I рудной стадии находятся в интервале от +17,4 до +17,8 ‰, кальцита II рудной стадии – +16,5 ‰. Изотопные составы $\delta^{18}\text{O}$ флюида, из которого отлагался доломит, в соответствии с уравнением фракционирования [9, 10], образуют интервал от +8,1 до +5,7 ‰ ($T=250\text{--}210^\circ\text{C}$),

кальцит – –2,2 ... +5,9 ‰ ($T=230\text{--}120^\circ\text{C}$). Соответственно, изотопный состав кислорода флюида, ответственного за отложение минеральных ассоциаций I рудной стадии, характеризуется значениями от +8,1 до +5,7 ‰, II рудной стадии – +6,7 ... –2,2 ‰ (рис. 8).

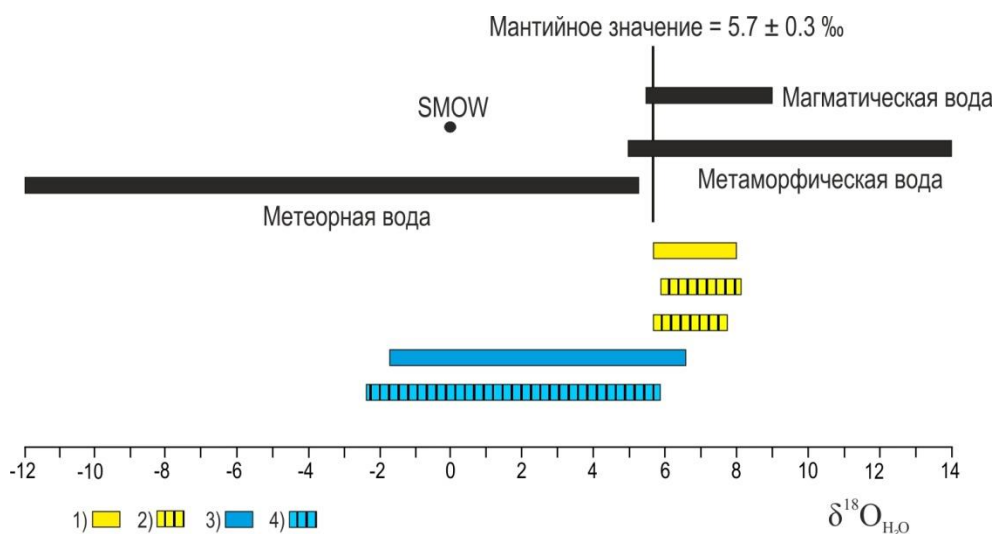


Рис. 8. Изотопный состав кислорода флюида I (1 – кварц, 2 – доломит) и II (3 – кварц, 4 – кальцит) рудных стадий рудопроявления Хаак-Саир

Fig. 8. Oxygen isotopic composition of the fluid of I (1 – quartz, 2 – dolomite) and II (3 – quartz, 4 – calcite) ore substages of Khaak-Sair ore occurrence

Изотопные данные кислорода флюида I рудной стадии попадают в область значений для флюидов как магматического, так и метаморфического происхождения, но не выходят за пределы поля магматического флюида. Эти данные и значения $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ флюида от +1,5 до +2,1 ‰, предполагают поступление воды из магматического источника ($\delta^{18}\text{O}=+5,5 \dots +9 \text{ ‰}$). Изотопные данные кислорода флюида (от +6,7 до –2,2 ‰) II рудной стадии указывают на смешение рудонос-

ных магматических флюидов с метеорной водой (рис. 6).

Величины $\delta^{13}\text{C}$ доломита II рудной стадии варьируют от –0,4 до –0,7 ‰; кальцита II рудной стадии составляет –0,3 ‰, и рассчитанные величины изотопного состава $\delta^{13}\text{C}$ во флюиде, в соответствии с уравнениями [16, 17], изменяются от –1,2 до +0,1 ‰ ($T=250\text{--}210^\circ\text{C}$) и от –3,3 до +0,5 ‰ ($T=230\text{--}120^\circ\text{C}$), соответственно.

Изотопный состав $\delta^{13}\text{C}$ флюида (от $-3,3$ до $+0,5$ ‰) предполагает поступление в гидротермальную систему углерода из разных источников: гранитоидных магм и заимствование его из вмещающих карбонатных и терригенных пород. Отметим, что значения мантийного $\delta^{13}\text{C}$ составляют от -7 до -2 ‰, гранитоидных магм – -6 ... -2 ‰ [18].

Обсуждение результатов

Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования синрудных лиственитов ($379,4 \pm 4,4$ млн лет) рудопроявления хорошо согласуются с $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возрастом ($376,5 \pm 3,4$ млн лет) даек габбро III фазы баянкольского комплекса (D_3bn), что подтверждает парагенетическую связь оруденения с баянкольским комплексом позднего девона.

Проведенные исследования флюидных включений в кварце методами термометрии и рамановской спектроскопии показали, что сопряженные листвениты отлагались при участии Na-K хлоридного флюида с соленостью $3,5$ – $6,5$ мас. % NaCl-экв. при температурах не менее 200 – 250 °C. Эти данные согласуются с ранее полученными результатами по флюидным включениям в кварце из лиственитов Сарыгдашского рудного поля (Хаак-Саирского рудопроявления) [19], установившими, что турмалинсодержащие листвениты образовались при участии углекислых растворов при 150 – 325 °C и $P \sim 0,4$... $1,0$ кбар ($\sim 1,2$... 3 км). Отметим, что по данным [20] при близких температурах (150 – 275 °C) и солености 6 – 8 мас. % NaCl экв. образовались турмалинсодержащие листвениты Эдыгейского гипербазитового массива, расположенного в 25 км к ЮЗ от рудопроявления Хаак-Саир.

Ранние рудные жилы рудопроявления с золотом, электрумом, арсенопиритом и блеклыми рудами отлагались при $P \sim 0,6$ – $0,75$ кбар ($\sim 1,8$ – $2,3$ км) водно-углекислотным флюидом состава $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$, $\text{NaCl-FeCl}_2\text{-H}_2\text{O} \pm \text{CO}_2$ с концентрациями солей $7,5$ – $18,8$ мас. % NaCl-экв. при 210 – 310 °C.

Поздние рудные жилы с ртутистым золотом, селенидами Au, Ag и Hg, гесситом, акантитом, бурнонитом, аргентотетраэдритом и баритом отлагались при $P \sim 0,5$ кбар ($\sim 1,5$ км) при участии флюида состава $\text{NaCl-H}_2\text{O}$, $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O} \pm \text{CO}_2 \pm \text{CH}_4$ с концентрациями солей 4 – $32,9$ мас. %. при 120 – 320 °C.

Сосуществующие однофазные газовые, жидкостные и более концентрированные VL и VLS включения свидетельствуют о гетерогенизации флюида [21], что позволяет считать температуры гомогенизации включений истинными температурами флюида при минералообразовании. В свою очередь, наличие гетерогенного флюида, состоящего из высококонцентрированного водно-солевого раствора в равновесии с газовой фазой, свидетельствует о его вскипании, а уменьшение концентраций солей при снижении температур могло быть вызвано их смешением с метеорными водами [22]. Об этом свидетельствует также разброс и падение значений $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ флюида от $+8,0$ до $-1,6$ ‰, что обеспечено участием в рудообразовании низкоконцентрированных изотопно-облегченных метеорных вод [23].

Пострудные кварц-турмалиновые прожилки образовались из водно-хлоридного $\text{Na-K} \pm \text{Mg}$ флюида с концентрациями солей $5,5$... $10,4$ мас. % NaCl-экв. при температурах 200 – 360 °C. Сравнивая с генетически родственным рудопроявлением Улуг-Саир АМРУ, можно предположить, что ранние предрудные кварц-турмалиновые жилы на Хаак-Саире отлагались при более высоких температурах из растворов с хлоридами Na, K, Mg, т. к., по нашим данным, на рудопроявлении Улуг-Саир сходные ранние предрудные турмалин-кварцевые жилы отлагались из комплексных растворов состава $\text{MgCl}_2\text{-H}_2\text{O} + \text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$ с концентрациями солей 8 ... $10,6$ мас. % NaCl-экв. при 320 – 375 °C.

Развитие кварц-турмалиновых метасоматитов и жил на рудопроявлении Хаак-Саир косвенно указывает на магматогенное происхождение минералообразующего флюида [24]. В пользу этого также свидетельствует изотопный состав $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ флюида I (от $+1,5$ до $+2,1$ ‰) и II ($+1,6$... $+2,6$ ‰) рудных стадий. Кроме того, это подтверждают высокие значения солёности флюида и его комплексный солевой состав с хлоридами натрия, калия и магния и гидрокарбонатами. Подобные признаки участия магматических флюидов установлены в ряде современных [25] и палеозойских золотосодержащих гидротермальных систем [26, 27].

По данным ICP-MS, среди анионов во флюиде преобладают гидрокарбонаты, концентрации которых существенно выше концентрации хлора. Из катионов флюид наиболее обогащен Na с примесями Ca, K и Mg, и его можно отнести к гидрокарбонатно-хлоридно-натриевому типу, что не противоречит данным термометрии. Обогащение флюида рудными элементами (Sb, As, Cu, Zn, Pb, Ag, Ba, Sr) отражает состав сульфосолей, сульфидов и сульфатов золотосодержащих минеральных ассоциаций. Присутствие в нем Mo, Ba и Sr свидетельствует о генетической связи оруденения с гранитоидным магматизмом, а Ni, Co и Cr обусловлены составом рудовмещающих пород.

Обобщая результаты исследования флюидных включений, установлено, что флюид имел метан-углекислотно-водно-хлоридный состав. В процессе минералообразования от ранних жил к поздним наблюдается снижение доли CO_2 во флюиде. На заключительных стадиях минералообразования флюид представлен водно-солевым раствором с повышенными содержаниями Ba, Sb и As, что согласуется с минералогическими данными (наличием барита и широким развитием блеклых руд). Степень окисленности флюида ($\text{CO}_2/\text{CO}_2 + \text{CH}_4$) стабильна и составляет $0,9$.

Изотопный состав кислорода воды и серы флюида рудопроявления Хаак-Саир свидетельствует об участии магматогенного флюида в отложении минеральных ассоциаций ранних стадий, а на завершающих стадиях происходило смешение магматического флюида с метеорными водами.

Изотопные значения углерода флюида (от $-3,3$ до $+0,5$ ‰) свидетельствуют о заимствовании части углерода из вмещающих терригенных пород.

Минеральные парагенезисы ранней рудной стадии (I) свидетельствуют о том, что рудоотложение происходило при высокой фугитивности (f) сульфидной серы $\lg f(S_2)=10^{-15.5}-10^{-6}$ (при $T=200$ °C), поздней рудной стадии (II) – при $\lg f(S_2)=10^{-25}-10^{-9}$, $\lg f(Fe_2)=10^{-21}-10^{-9}$ и $\lg f(Se_2)=10^{-21}-10^{-12}$ (при $T=200$ °C) [28–30]. Уменьшение fS_2 сопровождалось ростом fO_2 , т. к. широкое развитие минералов ртутистого золота и селенидов Au, Ag и Hg в поздних рудных жилах свидетельствует о рудообразовании при высокой fO_2 , предположительно, из-за смешения рудоносного флюида с высокоазрированными метеорными водами [31].

Относительно невысокое давление (0,5–0,75 кбар), определенное для рудных стадий, косвенно указывает на малый уровень среза, а также на близость значений полученных температур гомогенизации к истинным температурам минералообразования. Эти результаты согласуются с минералого-геохимическими особенностями руд на рудопроявлении Хаак-Саир (широкое развитие минералов ртутистого золота, серебристых блеклых руд, минералов селена и теллура), свидетельствующими о близповерхностном (~1,5–3 км) уровне отложения оруденения [1].

Таким образом, результаты изотопно-геохимических и термобарогеохимических исследований хорошо согласуются с полученными ранее данными по минеральным парагенезисам и типоморфным особенностям золота [4]. Важную роль в процессе рудообразования играли температурный геохимический барьер и гетерофазное состояние флюида, связанное с его вскипанием [22], фиксирующимся, по термобарогеохимическим данным, наличием высококонцентрированного (до 37 мас. % NaCl-экв.) водно-солевого флюида в равновесии с газовой фазой. Полученные результаты указывают на сходство генезиса рудопроявления Хаак-Саир с эпите-

мальными Au-Ag месторождениями, где часто наблюдается участие метеорных вод и широкий разброс значений изотопного состава $\delta^{18}O$ [32–42].

Заключение

Возраст синрудных лиственитов (379,4±4,4 млн лет) рудопроявления Хаак-Саир соответствует возрасту становления баянкольского комплекса позднего девона. Рудные жилы отлагались при давлении 0,5–0,75 кбар (~1,5–2,3 км) с участием гетерофазного метан-углекислотно-водно-хлоридного (Na-K±Fe) флюида с вариациями солености 4–37 мас. % NaCl-экв. в температурном интервале 320–120 °C при изменении fO_2 , fS_2 , fSe_2 и fTe_2 .

Рудоотложение протекало в условиях эволюции единого по генезису гетерофазного магматического флюида, сопровождающейся его вскипанием и/или смешением с высокоазрированными приповерхностными водами. Предполагается, что в процессе отложения ранних рудных жил участвовал среднеконцентрированный магматический флюид, а на завершающих стадиях он смешивался с метеорными водами, становясь более низкотемпературным водно-солевым раствором с пониженной соленостью. Вовлечение в рудообразующую систему метеорных вод, обогащенных кислородом, способствовало росту fO_2 с одновременным понижением fS_2 , что обусловило разнообразие минеральных форм Au, Ag и Hg.

Авторы благодарны Е.К. Дружковой за помощь в проведении работ. Полевые и изотопные исследования выполнены по государственному заданию ТувИКОПР СО РАН (0384-2016-0012, 0307-2021-0002), термобарогеохимические исследования выполнены в рамках государственных заданий ИГМ СО РАН (0330-2016-0002) и ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кужугет Р.В. Золото-теллуридное оруденение Алдан-Маадырского рудного узла (Западная Тува): минералого-геохимические особенности руд и условия их образования: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Новосибирск, 2014. – 20 с.
2. Рудные формации Тувы / В.В. Зайков, В.И. Лебедев, В.Г. Тюлькин, В.Н. Грецишева, К.С. Кужугет. – Новосибирск: Наука, 1981. – 201 с.
3. Кононенко Н.Б. Предварительные результаты по золотоносной Алдан-Маадырской зоне (Республика Тыва) // Геология и минеральные ресурсы Центральной Сибири: Материалы научно-практической конференции. – Красноярск: Красноярскгеолсъемка, 2011. – С. 162–166.
4. Золоторудная минерализация Хаак-Саирского золото-кварцевого рудопроявления в лиственитах (Западная Тува) / Р.В. Кужугет, В.В. Зайков, В.И. Лебедев, А.А. Монгуш // Геология и геофизика. – 2015. – Т. 56. – № 9. – С. 1693–1712.
5. Монгуш А.А., Кужугет Р.В., Дружкова Е.К. Особенности состава магматических пород и Ag-Ag данные о возрасте базитовых даек Алдан-Маадырской золоторудной зоны (Западная Тува) // Металлогения древних и современных океанов-2011. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2011. – С. 262–268.
6. Реддер Э. Флюидные включения в минералах. – М.: Мир, 1978. – Т. 1. – 360 с.
7. Особенности эпитепимального рудообразования в Кедонском палеозойском вулканоплутоническом поясе Северо-Востока России, по данным геохимических исследований Au-Ag оруденения / А.В. Волков, А.А. Сидоров, Н.Е. Савва, В.Ю. Прокофьев, Е.Е. Колова, К.Ю. Мурашов, М.И. Земскова // Вулканология и сейсмология. – 2016. – № 6. – С. 3–21.
8. Кряжев С.Г., Прокофьев В.Ю., Васюта Ю.В. Использование метода ICP MS при анализе рудообразующих флюидов // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. – 2006. – № 4. – С. 30–36.
9. Ohmoto H., Rye R.O. Isotopes of sulfur and carbon // Geochemistry of hydrothermal ore deposits. – N.Y.: John Wiley and Sons, 1979. – P. 509–567.
10. Li Y., Liu J. Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides // Geochimica Cosmochimica Acta. – 2006. – V. 70. – P. 1789–1795.
11. Ohmoto H. Stable isotope geochemistry of ore deposits // Review Mineralogy. – 1986. – V. 16. – P. 491–560.
12. Hoefs J. Stable isotope geochemistry. – Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2009. – 281 p.
13. Мелекесцева И.Ю., Каварая Х., Мацубая О. Источник флюида при формировании золото-кварцевых жил Хаак-Саирского и Улуг-Саирского месторождений (Западная Тува) по данным изотопного состава кислорода // Металлогения древних и современных океанов-2012. – Миасс: ИМин УрО РАН, 2012. – С. 210–213.
14. Oxygen isotope fractionation in the quartz-water-salt system / L-G. Zhang, J.-X. Liu, H.B. Zhou, Z.-S. Chen // Economic Geology. – 1989. – V. 89. – P. 1643–1650.
15. Zheng Y.F. Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals // Geochemical Journal. – 1999. – V. 33. – P. 109–126.
16. Bottinga Y. Calculated fractionation factors for carbon and hydrogen isotope exchange in the system calcite-carbon dioxide-

- graphite-methane-hydrogen-water vapor // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1969. – V. 33. – P. 49–64.
17. Sheppard S.M.F., Schwartz H.P. Fractionation of carbon and oxygen isotopes and magnesium between coexisting metamorphic calcite and dolomite // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1970. – V. 26. – P. 161–198.
18. Jia Y., Kerrich R. Giant quartz vein systems in accretionary orogenic belts: the evidence for a metamorphic fluid origin from $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ studies // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2000. – V. 184. – P. 211–224.
19. Лебедев В.И. Кобальтовые месторождения Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии. – Барнаул: Изд-во «Новый формат», 2018. – 203 с.
20. Борисенко А.С. Физико-химические условия формирования лиственитов Алтае-Саянской складчатой области (по данным изучения газово-жидких включений // *Геология и генезис рудных месторождений Юга Сибири*. – Новосибирск: Наука, 1977. – С. 144–157.
21. Исследование флюидных включений в минералах Олимпиадинского Au-(Sb-W) месторождения (Енисейский край) / В.Ю. Прокофьев, З.Б. Афанасьева, Г.Ф. Иванова, М.К. Буарон, Х. Мариньяк // *Геохимия*. – 1994. – Т. 7. – С. 1012–1029.
22. Wilkinson J.J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits // *Lithos*. – 2001. – V. 55. – P. 229–272.
23. Состав магматогенных флюидов, факторы их геохимической специализации и металлоносности / А.С. Борисенко, А.А. Боровиков, Л.М. Житова, Г.Г. Павлова // *Геология и геофизика*. – 2006. – Т. 47 (12). – С. 1308–1325.
24. Бор и борные кислоты в эндогенных рудообразующих флюидах / В.Ю. Прокофьев, И.С. Перетяжко, С.З. Смирнов, Н.Н. Акинфиев, Ф.Г. Рейф, Ю.М. Ишков, Б.Р. Тагиров, Е.О. Грознова, М.В. Воронин. – М.: Пасва, 2003. – 192 с.
25. Gold-rich polymetallic sulfides from the Lau back arc and implications for the geochemistry of gold in sea-floor hydrothermal systems of the Southwest Pacific / P.M. Herzig, M.D. Hannington, Y. Fouquet, U. Stackelberg, S. Petersen // *Economic Geology*. – 1993. – V. 88. – № 8. – P. 2182–2209.
26. Бакшеев И.А., Прокофьев В.Ю., Устинов В.И. Условия формирования жильного кварца Березовского золоторудного поля, Средний Урал, по данным изучения флюидных включений и изотопным данным // *Материалы Уральской летней минералогической школы-1998*. – Екатеринбург: УГГА, 1998. – С. 41–49.
27. Yang K., Scott S.D. Magmatic fluids as a source of metals in seafloor hydrothermal systems // *Geophysical Monograph Series*. – 2006. – № 166. – P. 163–184.
28. Barton P.B., Skinner B.J. Sulfide mineral stabilities // *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits* / Ed. by H.L. Barnes. – New York: John Wiley and Sons, 1979. – P. 278–403.
29. Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: I. Thermochemical data and calculated equilibria // *Economic Geology*. – 1988. – V. 83. – P. 377–394.
30. Физико-химические условия образования минеральных парагенезисов золота и серебра на месторождении Валунистое (Чукотка) / Т.В. Журавкова, Г.А. Пальянова, Ю.А. Калинин, Н.А. Горячев, В.Ю. Зинина, Л.М. Житова // *Геология и геофизика*. – 2019. – Т. 60. – № 11. – С. 1565–1576.
31. Бортников Н.С., Генкин А.Д., Коваленкер В.А. Минералогеохимические показатели условий гидротермального рудообразования // *Эндогенные рудные районы и месторождения*. – М.: Наука, 1987. – С. 40–59.
32. Berger B.R., Henley R.W. Advances in understanding of epithermal gold-silver deposits with special reference to the Western United States // *Economic Geology*. – 1989. – V. 84. – P. 405–423.
33. Hedenquist J.W., Brown P.R., Allis R.G. Epithermal gold mineralization // *Applied Geology Association*. – Wairakei: New Zealand, 1998. – 162 p.
34. Physicochemical models of formation of gold-silver ore mineralization at the Rogovik deposit (Northeastern Russia) / T.V. Zhuravkova, G.A. Palyanova, K.V. Chudnenko, R.G. Kravtsova, I.R. Prokopyev, A.S. Makshakov, A.S. Borisenko // *Ore Geology Reviews*. – 2017. – V. 91. – P. 1–20.
35. Условия формирования Au-Ag эпипермальной минерализации Кайенмываамского рудного поля (Центральная Чукотка) / В.Ю. Прокофьев, А.В. Волков, Ю.Н. Николаев, И.А. Калько, Е.А. Власов, А.А. Сидоров // *Руды и металлы*. – 2019. – № 1. – С. 52–57.
36. Contrasting fluids in the Svetlinsk gold-telluride hydrothermal system, South Urals / O. Vikent'eva, V. Prokofiev, E. Groznova, I. Vikentyev, N. Bortnikov, A. Borovikov, S. Kryazhev, M. Pritchkin // *Minerals*. – 2020. – V. 1. – P. 1–27.
37. Таежное эпипермальное жильное месторождение серебряных руд (Сихотэ-Алинь): региональная позиция, условия образования, геохимия и минеральный состав / В.В. Раткин, Л.Ф. Симаненко, В.А. Пахомова, О.А. Елисеева // *Тихоокеанская геология*. – 2021. – Т. 40. – № 2. – С. 21–38.
38. Mineral chemistry, fluid inclusion and stable isotope studies of the Suyoc epithermal veins: Insights to Au-Cu mineralization in southern Mankayan Mineral District, Philippines / O.B. Soberano, J.A.S. Gabo-Rati, K.L. Queaño, C.B. Dimalanta, Jr.G.P. Yumul, E.S. Andal, K. Yonezu and A.J. Boyce // *Ore Geology Reviews*. – 2021. – V. 131. – P. 104035.
39. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification / L. Wang, K.-Z. Qin, G.-X. Song, G.-M. Li // *Ore Geology Reviews*. – 2019. – V. 10. – P. 434–456.
40. Гусев А.И., Табакаева Е.М. Магматизм и эпипермальное Ag-Au оруденение Красноярского рудного поля Горного Алтая // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 1. – С. 26–38.
41. Условия формирования Au-Ag эпипермальной минерализации Амгуэмо-Канчаланского вулканического поля (Восточная Чукотка) / А.В. Волков, В.Ю. Прокофьев, А.А. Сидоров, С.Ф. Винокуров, А.А. Елманов, К.Ю. Мурашов, Н.В. Сидорова // *Вулканология и сейсмология*. – 2019. – № 5. – С. 68–80.
42. Эпипермальное Au-Ag месторождение Валунистое (Восточная Чукотка, Россия): геологическое строение, минералогеохимические особенности и условия рудообразования / А.В. Волков, В.Ю. Прокофьев, С.Ф. Винокуров, О.В. Андреева, Г.Д. Киселева, А.Л. Галямов, К.Ю. Мурашов, Н.В. Сидорова // *Геология рудных месторождений*. – 2020. – Т. 62. – № 2. – С. 107–133.

Поступила 28.10.2021 г.

Информация об авторах

Кужугет Р.В., кандидат геолого-минералогических наук, директор Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН.

Анкушева Н.Н., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории минералогии рудогенеза Института минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН.

Кадыр-оол Ч.О., инженер лаборатории геодинамики, магматизма и рудообразования Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН.

Редина А.А., младший научный сотрудник лаборатории рудоносности щелочного магматизма Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Прокофьев И.Р., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник лаборатории рудоносности щелочного магматизма Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Пономарчук А.В., младший научный сотрудник лаборатории изотопно-аналитической геохимии Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

UDC 553.2: 549.283 (571.52)

KHAAK-SAIR GOLD-SULFIDE-QUARTZ ORE OCCURRENCE (WESTERN TUVA): DATING, PT PARAMETERS, FLUID COMPOSITION, AND ISOTOPES OF S, O AND C

Renat V. Kuzhuget¹,
rkuzhuget@mail.ru

Natalia N. Ankusheva²,
ankusheva@mail.ru

Chayana O. Kadyr-ool¹,
kadyrool91@mail.ru

Anna A. Redina³,
anna-red@outlook.com

Ilya R. Prokopyev³,
prokopev_ilya@mail.ru

Anton V. Ponomarchuk³,
antponomar@gmail.com

¹ Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS,
117 a, Internatsionalnaya street, Kyzyl, 667007, Russia.

² Institute of Mineralogy SU FRC MG UB RAS,
1, Ilmensky Reserve, Miass, 456317, Russia.

³ VS Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS,
3, Academician Koptuyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to determine the age and fluid regime of formation of Khaak-Sair gold-sulfide-quartz ore occurrence in listwanites, characterized by a peculiar ore mineral composition, expressed in the presence of mercurial gold, selenides (fichesserite, naumannite, timannite, clautallite) and telurides (hessite, Te-bismuthite and coloradoite).

The research is aimed to date and examine PT ore-bearing fluid parameters and geochemical peculiarities, and the fluid sources of Khaak-Sair gold-sulfide-quartz ore occurrence in Western Tuva.

Methods. ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating was carried out by the method of step heating. The optical studies of ores were performed on Olympus BX41 and P-213M optical microscopes. The mineral composition was detected using MIRA 3 LMU scanning electron microscope with EDU of Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd. The temperatures, salt composition, salinities and fluid pressures were obtained from individual fluid inclusions using Linkam TMS-600 stage equipped with Olympus BX 51 optical microscope; the volatile composition of fluid inclusions was examined on Ramanor U-1000 spectrometer with the Horiba DU420E-OE-323 detector, Millennia Pro laser (Spectra-Physics); the bulk volatile composition of the fluid was determined on the Agilent 6890 gas chromatograph, the anions in the water extraction was estimated on the CVET-3000 ion chromatograph, the cation and trace elements were detected by ICP MS (Elan-6100); the sulfur isotope ratios in galena were calculated on Finnigan MAT Delta gas mass-spectrometer in double-entry mode (analysts V.N. Reutsky and M.N. Kolbasova, IGM SB RAS); $\delta^{18}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopic ratios in quartz and carbonates were examined on Stable Isotope Ratio Mass Spectrometer FinniganTM MAT 253 with Finnigan GasBench II sampler and IAEA standards: NBS-18 and NBS-19 (analyst M.N. Pyryaev, IGM SB RAS) and Isoprime with AQS (Akita Quartz Standard, analysts H. Kavarai, O. Matsubaya, University of Akita), respectively.

Results. The ⁴⁰Ar/³⁹Ar dating of synore listwanites is shown 379,4±4,4 million years that corresponds to the Late Devonian. We identified that the ore hosted listwanites were formed due to aqueous Na-K-chloride fluid with salinity of 3,4–6,5 wt. % NaCl eqv and temperatures at least 325–200 °C. Gold-sulfide-quartz veins were formed at P~0,5–0,75 kbar (~1,5–2,3 km) due to CO₂-water chloride (Na-K±Fe) fluid containing CH₄ with salinity ranged between 4,5 and 37,4 wt. % NaCl eqv. and temperatures from 320 up to 120 °C (I ore substage – 310–200 °C and II ore substage – 320–120 °C), and with fO₂, fS₂, fSe₂ and fTe₂ variations that have contributed to the diversity of Au, Ag and Hg mineral forms. The values of $\delta^{34}\text{S}$ from galena vary from –0,6 to –0,4 ‰, and the calculated values of $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ of I ore substage fluid vary from +1,5 to +2,1 ‰ (for T=280–210 °C), and II ore substage fluid – +1,6...+2,6 ‰ (for T=290–190 °C), which indicates the magmatic origin of sulfur. Values of $\delta^{18}\text{O}$ in quartz from ore veins vary from 17,0 to 17,4 ‰, dolomite – +17,4...+17,8 ‰, calcite – +16,5 ‰, and calculated values of $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{S}}$ of I ore substage fluid vary from +8,1 to +5,7 ‰ (for T=250–210 °C), and II ore substage – +6,7 ‰. ...–2,2 ‰ (for T=230–120 °C) suggested that in the early stages of the ore-forming process fluid was of magmatic origin, and in later stages it was mixed with meteoric waters. The values of $\delta^{13}\text{C}$ in dolomite of I ore substage vary from –0,4 to –0,7 ‰; calcite of II ore substage – –0,3 ‰, and the calculated values of $\delta^{13}\text{C}$ in the fluid vary from –1,2 to +0,1 ‰ (for T=250–210 °C) and from –3,3 to +0,5 ‰ (for T=230–120 °C), respectively. This presupposes carbon inflow from granitoid magmas and/or its borrowing from host rocks. The composition of the fluid was transformed from early to late substages from carbon dioxide to water chloride with a decrease in chloride amounts of alkali and alkali-earth metals (from 37,4 to 4 wt. % NaCl eqv).

Key words:

Native gold, fluid inclusions, quartz, dating, stable isotopes, gold deposits, Tuva.

The authors are grateful to Evgenia K. Druzhkova for research assistance. Mineralogical, geochemical and isotopic researches were supported by the State Contract of TuvIEN SB RAS (0384-2016-0012, 0307-2021-0002), fluid inclusion study was supported by State Contract of the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (0330-2016-0002) and Institute of Mineralogy SU FRC MG UB RAS.

REFERENCES

- Kuzhuget R.V. *Zoloto-telluridnoe orudenie Aldan-Maadyrskogo rudnogo uzla (Zapadnaya Tuva): mineralogo-geokhimicheskie osobennosti rud i usloviya ikh obrazovaniya*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Gold-telluride mineralization of the Aldan-Maadyr ore cluster (Western Tuva): mineralogical and geochemical peculiarities of ores and their formation conditions. Cand. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 2014. 20 p.
- Zaykov V.V., Lebedev V.I., Tyulkin V.G., Grechishcheva V.N., Kuzhuget K.S. *Rudnye formatsii Tuvy* [Ore formations of Tuva]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 201 p.
- Kononenko N.B. Predvaritelnye rezultaty po zolotonosnoy Aldan-Maadyrskoy zone (Respublika Tyva) [Preliminary results of the Aldan-Maadyr gold-bearing zone (Republic of Tyva)]. *Geologiya i mineralnye resursy Tsentralnoy Sibiri: Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Geology and Mineral Resources of Central Siberia. Proceedings of the Scientific and Practical Conference]. Krasnoyarsk, Krasnoyarskgeolsemka Publ., 2011. pp. 162–166.
- Kuzhuget R.V., Zaikov V.V., Lebedeva V.I., Mongush A.A. Gold mineralization of the Khaak-Sair gold-quartz ore occurrence in listwanites (western Tuva). *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, pp. 1332–1348.
- Mongush A.A., Kuzhuget R.V., Druzhkova E.K. Osobennosti sostava magmaticheskikh porod i Ar-Ar dannye o vozraste bazitovykh daek Aldan-Maadyrskoy zolotorudnoy zony (Zapadnaya Tuva) [Composition of igneous rocks and Ar-Ar data on the age of basic dikes of the Aldan-Maadyr gold ore zone (Western Tuva)]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2011* [The metallogeny of ancient and modern oceans]. Miass, IMin UB RAS Publ., 2011. pp. 262–268.
- Roedder E. *Flyuidnye vklucheniya v mineralakh* [Fluid inclusions in minerals]. Moscow, Mir Publ., 1987. 360 p.
- Volkov A.V., Sidorov A.A., Savva N.E., Prokofev V.Yu., Kolova E.E., Murashov K.Yu., Zemskova M.I. Epithermal mineralization in the Kedon Paleozoic volcano-plutonic belt, Northeast Russia: Geochemical studies of Au–Ag mineralization. *Journal of Volcanology and Seismology*, 2019, vol. 11, no. 1, pp. 1–19.
- Kryazhev S.G., Prokofiev V.Yu., Vasyuta Yu.V. Ispolzovanie metoda ICP MS pri analize rudoobrazuyushchikh flyuidov [The usage of ICP MS for ore-forming fluid analysis]. *Vestnik MGU*, 2006, no. 4, pp. 30–36.
- Ohmoto H., Rye R.O. Isotopes of sulfur and carbon. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. N.Y., John Wiley and Sons, 1979. pp. 509–567.
- Li Y., Liu J. Calculation of sulfur isotope fractionation in sulfides. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 2006, vol. 70, pp. 1789–1795.
- Ohmoto H. Stable isotope geochemistry of ore deposits. *Review Mineralogy*, 1986, vol. 16, pp. 491–560.
- Hoefs J. *Stable isotope geochemistry*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2009. 281 p.
- Melekestseva I.Yu., Kavaraya H., Matsubaya O. Istochnik flyuida pri formirovani zoloto-kvartsevykh zhil Khaak-Sairskogo i Ulug-Sairskogo mestorozhdeniy (Zapadnaya Tuva) po dannym izotopnogo sostava kisloroda [The fluid source at the gold-quartz veins formation of Khaak-Sair and Ulug-Sair deposits (Western Tuva)]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2012* [The metallogeny of ancient and modern oceans]. Miass, IMin UB RAS Publ., 2012. pp. 210–213.
- Zhang L.-G., Liu J.-X., Zhou H.B., Chen Z.-S. Oxygen isotope fractionation in the quartz-water-salt system. *Economic Geology*, 1989, vol. 89, pp. 1643–1650.
- Zheng Y.F. Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals. *Geochemical Journal*, 1999, vol. 33, pp. 109–126.
- Bottinga Y. Calculated fractionation factors for carbon and hydrogen isotope exchange in the system calcite-carbon dioxide-graphite-methane-hydrogen-water vapor. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1969, vol. 33, pp. 49–64.
- Sheppard S.M.F., Schwartz H.P. Fractionation of carbon and oxygen isotopes and magnesium between coexisting metamorphic calcite and dolomite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1970, vol. 26, pp. 161–198.
- Jia Y., Kerrich R. Giant quartz vein systems in accretionary orogenic belts: the evidence for a metamorphic fluid origin from $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ studies. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, vol. 184, pp. 211–224.
- Lebedev V. I. *Kobaltovye mestorozhdeniya Tuvy i sopredelnykh regionov Tsentralnoy Azii* [Cobalt deposits of Tuva and adjacent regions of Central Asia]. Barnaul, New format Publ., 2018. pp. 173–174.
- Borisenko A.S. Fiziko-khimicheskie usloviya formirovaniya listvenitov Altae-Sayanskoy skladchatoy oblasti (po dannym izucheniya gazovo-zhidkikh vklucheni) [Physicochemical conditions for the formation of listvenites of the Altai-Sayan folded area (according to the study of gas-liquid inclusions)]. *Geologiya i genezis rudnykh mestorozhdeniy Yuga Sibiri* [Geology and genesis of ore deposits in the South of Siberia]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. pp. 144–157.
- Prokofev V.Yu., Afanaseva Z.B., Ivanova G.F., Buaron M.K., Marinyak H. Issledovanie flyuidnykh vklucheni v mineralakh Olimpiadinskogo Au-(Sb-W) mestorozhdeniya (Eniseyskiy kryazh) [Fluid inclusion study of minerals from Olympiadinsky Au-(Sb-W) deposit (the Yenisey Ridge)]. *Russian Geochemistry*, 1994, vol. 7, pp. 1012–1029.
- Wilkinson J.J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos*, 2001, vol. 55, pp. 229–272.
- Borisenko A.S., Borovikov A.A., Zhitova L.M., Pavlova G.G. Composition of magmatogenic fluids and factors determining their geochemistry and metal contents. *Russian Geology and Geophysics*, 2006, vol. 47, no. 12, pp. 1308–1325. In Rus.
- Prokofev V.Yu., Peretyazhko I.S., Smirnov S.Z., Tagirov B.R., Groznova E.O., Samsonova E.A. *Bor i bornye kisloty v endogennykh rudoobrazuyushchikh flyuidakh* [Boron and boric acid in endogenous ore-forming processes]. Moscow, PASVA Publ., 2003. 192 p.
- Herzig P.M., Hannington M.D., Fouquet Y., Stackelberg U., Petersen S. Gold-rich polymetallic sulfides from the Lau back arc and implications for the geochemistry of gold in sea-floor hydrothermal systems of the Southwest Pacific. *Economic Geology*, 1993, vol. 88, no. 8, pp. 2182–2209.
- Baksheev I.A., Prokofev V.Yu., Ustinov V.I. Usloviya formirovaniya zhilnogo kvartsa Berezovskogo zolotorudnogo polya, Sredniy Ural, po dannym izucheniya flyuidnykh vklucheni i izotopnym dannym [Conditions of formation of vein quartz of the Berezovsky gold ore field, the Middle Urals: fluid inclusions and isotope data]. *Materialy Uralskoy letney mineralogicheskoy shkoly-1998* [Materials of the Ural Summer Mineralogical School-1998]. Ekaterinburg, UGGGA Publ., 1998. pp. 41–49.
- Yang K., Scott S.D. Magmatic fluids as a source of metals in sea-floor hydrothermal systems. *Geophysical Monograph Series*, 2006, no. 166, pp. 163–184.
- Barton P.B., Skinner B.J. Sulfide mineral stabilities. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Ed. by H.L. Barnes. New York, John Wiley and Sons, 1979. pp. 278–403.
- Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: I. Thermochemical data and calculated equilibria; II. Applications to telluride-bearing ore deposits. *Economic Geology*, 1988, vol. 83, pp. 377–394.
- Zhuravkova T.V., Palyanova G.A., Kalinin Y.A., Goryachev N.A., Zinina V.Y., Zhitova L.M. Physicochemical conditions of formation of gold and silver parageneses at the valunistoe deposit (Chukchi peninsula). *Russian Geology and Geophysics*, 2019, vol. 60 (11), pp. 1247–1256.
- Bortnikov N.S., Genkin A.D., Kovalenker V.A. Mineralogo-geokhimicheskie pokazateli usloviy gidrotermalnogo rudoobrazovaniya [Mineralogical and geochemical indicators of hydrothermal ore formation conditions]. *Endogennye rudnye rayony i mestorozhdeniya* [Endogenous ore regions and deposits]. Moscow, Nauka Publ., 1987. pp. 40–59.
- Berger B.R., Henley R.W. Advances in understanding of epithermal gold-silver deposits with special reference to the Western United States. *Economic Geology*, 1989, vol. 84, pp. 405–423.
- Hedenquist J.W., Brown P.R., Allis R.G. Epithermal gold mineralization. *Applied Geology Association*. Wairakei, New Zealand, 1998. 162 p.
- Zhuravkova T.V., Palyanova G.A., Chudnenko K.V., Kravtsova R.G., Prokopyev I.R., Makshakov A.S., Borisenko A.S. Physicochemical models of formation of gold-silver ore mineralization at the

- Rogovik deposit (Northeastern Russia). *Ore Geology Reviews*, 2017, vol. 91, pp. 1–20.
35. Prokofyev V.Yu., Volkov A.V., Nikolayev Yu.N., Kalko I.A., Vlasov E.A., Sidorov A.A. Au-Ag epithermal mineralization formation conditions at Kaienmyvaamskoe ore field, Central Chukotka. *Rudy i metally*, 2019, no. 1, pp. 52–57. In Rus.
 36. Vikenteva O., Prokofiev V., Groznova E., Vikentyev I., Bortnikov N., Borovikov A., Kryazhev S., Pritchkin M. Contrasting fluids in the Svetlinsk gold-telluride hydrothermal system, South Urals. *Mine-rals*, 2020, vol. 1, pp. 1–27.
 37. Ratkin V.V., Simanenko L.F., Pakhomova V.A., Eliseeva O.A. Tazhny epithermal deposit of silver ore (Sikhote-Alin): regional position, formation conditions, geochemistry and mineral composition. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2021, vol. 40, no. 2, pp. 21–38. In Rus.
 38. Soberano O.B., Gabo-Ratio J.A.S., Queaño K.L., Dimalanta C.B., Yumul Jr., G.P., Andal E.S., Yonezu K., Boyce A.J. Mineral chemistry, fluid inclusion and stable isotope studies of the Suyoc epithermal veins: insights to Au-Cu mineralization in southern Mankayan Mineral District, Philippines. *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 131, pp. 104035.
 39. Wang L., Qin K.-Z., Song G.-X., Li G.-M. A review of intermediate sulfidation epithermal deposits and subclassification. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 107, pp. 434–456.
 40. Gusev A.I., Tabakaeva E.M. Magmatism and epithermal Ag-Au ore mineralization of Krasnoyarsk gold ore field of Gorny Altai. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 1, pp. 26–38. In Rus.
 41. Volkov A.V., Prokofiev V.Y., Sidorov A.A., Vinokurov S.F., Elmanov A.A., Murashov K.Yu., Sidorova N.V. The conditions of formation of Au–Ag epithermal mineralization of the Amguemo-Kanchalan volcanic field (Eastern Chukotka). *Journal of Volcanology and Seismology*, 2019, vol. 13, no. 5, pp. 335–347. In Rus.
 42. Volkov A.V., Prokofiev V.Y., Vinokurov S.F., Andreeva O.V., Kiseleva G.D., Galyamov A.L., Murashov K.Yu., Sidorova N.V. Valunistoe Epithermal Au–Ag Deposit (East Chukotka, Russia): geological structure, mineralogical–geochemical peculiarities and mineralization conditions. *Geology of Ore Deposits*, 2020, vol. 62, no. 2, pp. 97–121.

Received: 28 October 2021.

Information about the authors

Renat V. Kuzhuget, Cand. Sc., director, Tuvanian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS.

Natalia N. Ankusheva, Cand. Sc., scientist, Institute of Mineralogy SU FRC MG UB RAS.

Chayana O. Kadyr-ool, engineer, Tuvanian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS.

Anna A. Redina, junior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

Ilya R. Prokopyev, Cand. Sc., scientist, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.

Anton V. Ponomarchuk, graduate student, junior researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS.