УДК 553.2:549.283 DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-5-706-716

Состав золота и условия образования золото-сульфидно-кварцевого рудопроявления Южный Ак-Даг (Западная Тува)

Н. Н. Анкушева[1, 2], Р. В. Кужугет[3]

[1]*Институт минералогии ЮУ ФНЦ УрО РАН, 456317, г. Миасс, Челябинская обл., Ильменский заповедник, 1, e-mail: ankusheva@mail.ru*
[2]*Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, 456314, г. Миасс, ул. 8 июля, 10,*
[3]*Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН, 667007, г. Кызыл, ул. Интернациональная, 117а, e-mail: rkuzhuget@mail.ru*

Поступила в редакцию 31.12.2019 г., принята к печати 12.02.2020 г.

Объект исследований. Проведены термобарогеохимические и минералогические исследования золото-сульфидно-кварцевого рудопроявления Южный Ак-Даг, приуроченного к антиклинальным структурам Западной Тувы. *Методы.* С помощью термокамеры Linkam TMS-600 и микроскопа Olympus BX 51 оценены температуры минералообразования, солевой состав и концентрации солей во флюидных включениях (ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН). Химический состав золота определен методом сканирующей электронной микроскопии MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding) с системами микроанализа INCA Energy 450+XMax 80 и INCA Wave 500 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd, ИГМ СО РАН, г. Новосибирск); BSE фотографии получены на СЭМ Tescan Vega 3 и Hitachi TM-1000 (ТувИКОПР СО РАН). *Результаты*. Изучен состав самородного золота и условия образования золото-сульфидно-кварцевых жил рудопроявления Южный Ак-Даг Алдан-Маадырского золоторудного узла Западной Тувы. Установлено присутствие в рудах как высокопробного, так и среднепробного золота с содержаниями Ag, достигающими 17.05 мас. %. Средняя проба золота составляет 904‰ при вариациях от 830 до 928‰. Отложение золото-сульфидно-кварцевых жил происходило при температурах 370–240°C из водных растворов с соленостью 8–6.4 мас. % NaCl-экв. при давлении 0.8–1.2 кбар. Узкий интервал солености минералообразующего флюида при снижении температуры, а также преобладание высокопробного золота в сульфидно-кварцевых жилах свидетельствуют об относительно высокой скорости отложения минералов в узкой проницаемой зоне без существенного влияния реакций с вмещающими породами и/или смешения с метеорными водами. *Выводы.* Золотая минерализация рудопроявления Южный Ак-Даг формировалась в течение одной стадии и отвечает золото-галенит-халькопиритовому минеральному типу с баритом. Установление сходных *P-T* условий отложения жил и минералого-геохимических особенностей самородного золота данного рудопроявления с другими объектами Алдан-Маадырского золоторудного узла, а также сопряженность оруденения с березитами указывают на перспективность объекта на выявление промышленного оруденения и подтверждают парагенетическую связь с девонской магматической активностью региона.

Ключевые слова: *самородное золото, месторождения золота, кварц, флюидные включения, Тува*

Источник финансирования

Полевые и минералого-геохимические исследования выполнены в рамках государственного задания ТувИКОПР СО РАН (0384-2016-0012), термобарогеохимические исследования проведены по госзаданию ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (2019–2021)

Gold composition and conditions of Southern Ak-Dag gold-sulfide-quartz ore occurrence formation (Western Tuva)

Natalia N. Ankusheva[1, 2], Renat V. Kuzhuget[3]

[1]*Institute of Mineralogy SU FRC MG UB RAS, Ilmensky Reserve, 1, Miass, Chelyabinsk region, 456317 Russia, e-mail: ankusheva@mail.ru*
[2]*South-Urals State University, Miass Branch, 10 8 July st., Miass 456314, Russia*
[3]*Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources SB RAS, Internatsionalnaya st., 117a, Kyzyl, 667007 Russia, e-mail: rkuzhuget@mail.ru*

Received 31.12.2019, accepted 12.02.2020

Для цитирования: Анкушева Н.Н., Кужугет Р.В. (2020) Состав золота и условия образования золото-сульфидно-кварцевого рудопроявления Южный Ак-Даг (Западная Тува). *Литосфера*, **20**(5), 706-716. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-5-706-716

For citation: Ankusheva N.N., Kuzhuget R.V. (2020) Gold composition and conditions of Southern Ak-Dag gold-sulfide-quartz ore occurrence formation (Western Tuva). *Litosfera*, **20**(5), 706-716. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-5-706-716

© Н.Н. Анкушева, Р.В. Кужугет, 2020

Research subject. The paper presents data on the mineralogical, geochemical and fluid inclusion features of the Southern Ak-Dag gold-sulphide-quartz ore occurrence in Western Tuva. *Methods*. Mineral formation temperatures, salt composition and fluid salinity were examined using a Linkam TMS-600 cryostage and an Olympus BX 51 microscope. The chemical composition of samples was identified using a MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding) scanning electron microscope equipped with INCA Energy 450+XMax 80 and INCA Wave 500 microanalysis systems; BSE photos were taken by Tescan Vega 3 and Hitachi TM-1000 SEM instruments. *Results.* The ores under study were found to contain both high-grade and medium-grade gold with an Ag content of up to 17.05 wt %. The average gold fineness comprised 904 ‰, ranging from 830 to 928 ‰. According to fluid inclusion data, gold-sulphide-quartz veins were formed at temperatures of 280–240 °C and pressures of 0.8–1.2 kbar from aqueous fluids having a salinity of 8.6–6.4 wt % NaCl eq. The narrow range of fluid salinity at decreasing temperatures and the prevalence of high-grade gold in sulphide-quartz veins indicate a relatively high rate of mineral formation in a narrow permeable zone without any significant interaction with host rocks or mixing with meteoric waters. *Conclusions*. Gold mineralization in the Southern Ak-Dag ore occurrence, which was formed within one ore substage, corresponds to the type of gold-galena-chalcopyrite with barite. The established similarity of native gold in the Southern Ak-Dag occurrence and other deposits in the Aldan-Maadyr ore cluster in terms of P-T parameters of ore formation and mineralogical and geochemical features, as well as association of the ore mineralization with beresites, indicate the possibility of discovering industrial ore deposits in the region and confirm its paragenetic relation with Devonian magmatic activity.

Keywords: *native gold, gold deposits, quartz, fluid inclusions, Tuva*

Funding information

The field works and the mineralogical and geochemical study were supported by the State Contract of TuvICENR SB RAS (0384-2016-0012), the fluid inclusion study was supported by the State Contract of IM SU FSC MG UB RAS (2019–2021)

ВВЕДЕНИЕ

Геолого-съемочные и поисковые работы 1952–1977 гг. на площади Алдан-Маадырского золоторудного узла (АМРУ) выявили золото-сульфидно-кварцевые объекты в лиственитах (Хаак-Саир), березитах (Арыскан, Дуушкуннуг), конгломератах и алевролитах (Улуг-Саир) (Зайкова, Зайков, 1969).

В 2009–2012 гг. ОАО "Красноярскгеолсъемка" проводило поисковые работы в пределах АМРУ за счет средств федерального бюджета (Кононенко, 2011). В результате работ были оценены прогнозные ресурсы Au на Сарыг-Дашском рудном поле категории P_2 в 18 т до глубины 200 м при среднем содержании Au 2 г/т, на Улуг-Саирском рудном поле – в 20 т. Прогнозные ресурсы Au категории P_3 по АМРУ оценены в 80 т. В ходе поисковых работ на Алашском участке (площадь 12.7 км^2) в процессе литогеохимического опробования по вторичным ореолам рассеяния по сети 200 × 50 м получены цепочечно-узловые аномальные ореолы золота с внешним контуром 10 мг/т, длиной до 1000 м, вытянутые вдоль березитизированной дайки риолит-порфиров Дуушкуннугского рудопроявления на 6 км. Кроме того, в северо-восточной части Алашского участка обнаружена линейная структурированная аномалия золота длиной 500 м и шириной 150 м со значениями 20 мг/т по контуру и 200 мг/т – в эпицентре, которая располагалась между Дуушкуннугским (600 м к северу) и Ак-Дагским (Северный Ак-Даг) (650 м к югу) рудопроявлениями, в ядре Ак-Дагской антиклинальной складки среди рассланцованных пород верхнеадырташской подсвиты ордовика, пронизанных дайками габбро и диоритов. Данная аномалия не была заверена по причине труднодоступности (крутизна склона, расстояние от транспортных средств).

Полевыми работами 2016 г. на южных склонах горы Ак-Даг в пределах данной аномалии авторами были выявлены золото-сульфидно-кварцевые жилы и жильные зоны, сопряженные с березитизированными осадочными породами, которые были отнесены к рудопроявлению Южный Ак-Даг.

Целью данной работы является установление геолого-минералогических особенностей и условий формирования золотосодержащих жил рудопроявления Южный Ак-Даг.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ

АМРУ находится в Западной Туве, на левобережье р. Хемчик, в области сочленения метатерригенных комплексов Западного Саяна, венднижнекембрийских океанических комплексов Западной Тувы, ордовик-силурийской молассы Хем-

чикско-Сыстыгхемского коллизионного прогиба и девонских вулканитов Тувинского рифтогенного прогиба. Рудный узел вытянут с запада на восток на 60 км, с юга на север – на 15 км, рудные объекты, в основном, сосредоточены в субширотной узкой полосе размером 45 × (5–7) км.

Золоторудная минерализация АМРУ парагенетически связана с малыми интрузиями и дайками гранодиорит-, тоналит-порфиров I фазы и дайками риолитов II фазы баянкольского комплекса (D_3) (Зайков и др., 1981) и сопряжена со среднетемпературными метасоматитами лиственит-березитовой серии, развитыми по интрузивным и осадочным породам. Возраст даек габбро III фазы баянкольского комплекса (D_3) в сланцах чингинской свиты на участке Тлангара этого рудного узла, определенный Ar-Ar методом по роговой обманке, составляет 376.5 ± 3.4 млн лет, что соответствует D_3 (Монгуш и др., 2011). Размещение золотого оруденения в пределах узла определяется, главным образом, структурно-тектоническим и магматическим факторами, контролируется разломами, оперяющими Хемчикско-Куртушибинский (Саяно-Тувинский) глубинный разлом, и приурочивается, в частности, к диагонально примыкающим к нему узким линейным антиклиналям и горстантиклиналям субширотного простирания и секущим их разрывным нарушениям той же ориентировки.

Рудопроявление Южный Ак-Даг (размером 0.35 × 1.2 км) расположено в центральной части АМРУ, на южных склонах одноименной горы. Оно приурочено к осевой части Ак-Дагской антиклинальной структуры ВСВ простирания, сложенной рассланцованными алевролитами и гравелитами верхней подсвиты адырташской свиты ордовика (O_3ad_2). Ак-Дагская антиклинальная структура состоит из двух антиклиналей второго порядка, разделенных синклиналью. Простирание осей складок ВСВ. Оси складок почти горизонтальны; в восточной части структуры погружаются полого (5–10°) на восток, в западной части – на запад. В поперечном разрезе складки симметричные; падение пород на крыльях – 40–80°. Осевая плоскость вертикальна либо имеет падение на север до 70–80°.

В пределах рудопроявления развиты березиты по осадочным породам, а также различные по мощности и морфологии кварцевые, сульфидно-кварцевые жилы и жильно-прожилковые зоны с золотой минерализацией. Простирание жил ВСВ, падение близкое к вертикальному, мощность варьирует от 0.2 до 1.5 м, протяженность – от 2 до 40 м (рис. 1). Жильные зоны имеют ширину до 3 м и протяженность от 5 до 10 м. Кварцевые жилы и жильно-прожилковые зоны сопровождаются телами тонкокристаллических кварц-карбонатных пород рыжего и желтоватого цвета с вкрапленностью пирита (до 1 %) и чешуйками серицита (до 10 %), пронизанных тонкими прожилками кварца с пиритом. Содержания анкерита и сидерита достигают 25 %. По минеральному составу метасоматиты являются типичными березитами, развитыми по алевролитам с прослоями кварцевых песчаников, и с ними ассоциирует золотое оруденение. Березиты характеризуются лепидогранобластовой и реликтовой обломочной структурами с размером обломков 0.04–0.3 мм и массивной текстурой. Минеральный состав представлен кварцем (45–50 %), серицитом (45 %), железистым карбонатом (5 %), пиритом (лимонит, 1–2 %).

В гипергенных условиях железистые карбонаты частично разложены с образованием гидроксидов железа. Протяженность березитизированных пород достигает 250 м, они не выдержаны по мощности (от 0.5 до 2.5 м). Залегание пород крутое (с углом падения 85–80°), иногда вертикальное.

На рудопроявлении нами установлены следующие стадии: *дорудная* березитовая (кварц, серицит, кальцит, сидерит, анкерит, альбит, пирит), *рудная* – золото-сульфидно-кварцевая (кварц, халькопирит, пирит, галенит (Se – до 0.74 мас. %), золото), *пострудные* – карбонатно-кварцевая (кварц, кальцит, анкерит) и кварц-хлоритовая (кварц, хлорит) (рис. 2). Золотоносные кварцевые жилы и жильные зоны сложены пиритом, халькопиритом, галенитом и видимым золотом. Содержание сульфидов в рудах не превышает 3 %.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Образцы руд отобраны из коренных выходов рудопроявления. Химический состав золота определялся методом сканирующей электронной микроскопии MIRA 3 LMU (Tescan Orsay Holding) с системами микроанализа INCA Energy 450+XMax 80 и INCA Wave 500 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd, Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск, аналитик Н.С. Карманов). Фотографии в отраженных электронах получены с помощью СЭМ Tescan Vega 3 и Hitachi TM-1000 (ТувИКОПР СО РАН, оператор Р.В. Кужугет).

Для характеристики золота и твердых растворов системы Au–Ag использована терминология, принятая в работе (Петровская, 1973): самородное золото 1000–700 (весьма высокопробное – 1000–950, высокопробное – 950–900, среднепробное – 900–800, низкопробное – 800–700), электрум 700–300 и кюстелит – 300–100, а также Au-содержащее серебро – с пробностью меньше 100.

Условия формирования минеральных ассоциаций исследовались по индивидуальным флюидным включениям в кварце с помощью стандартных термобарогеохимических методов (Реддер, 1987). Флюидные включения проанализированы

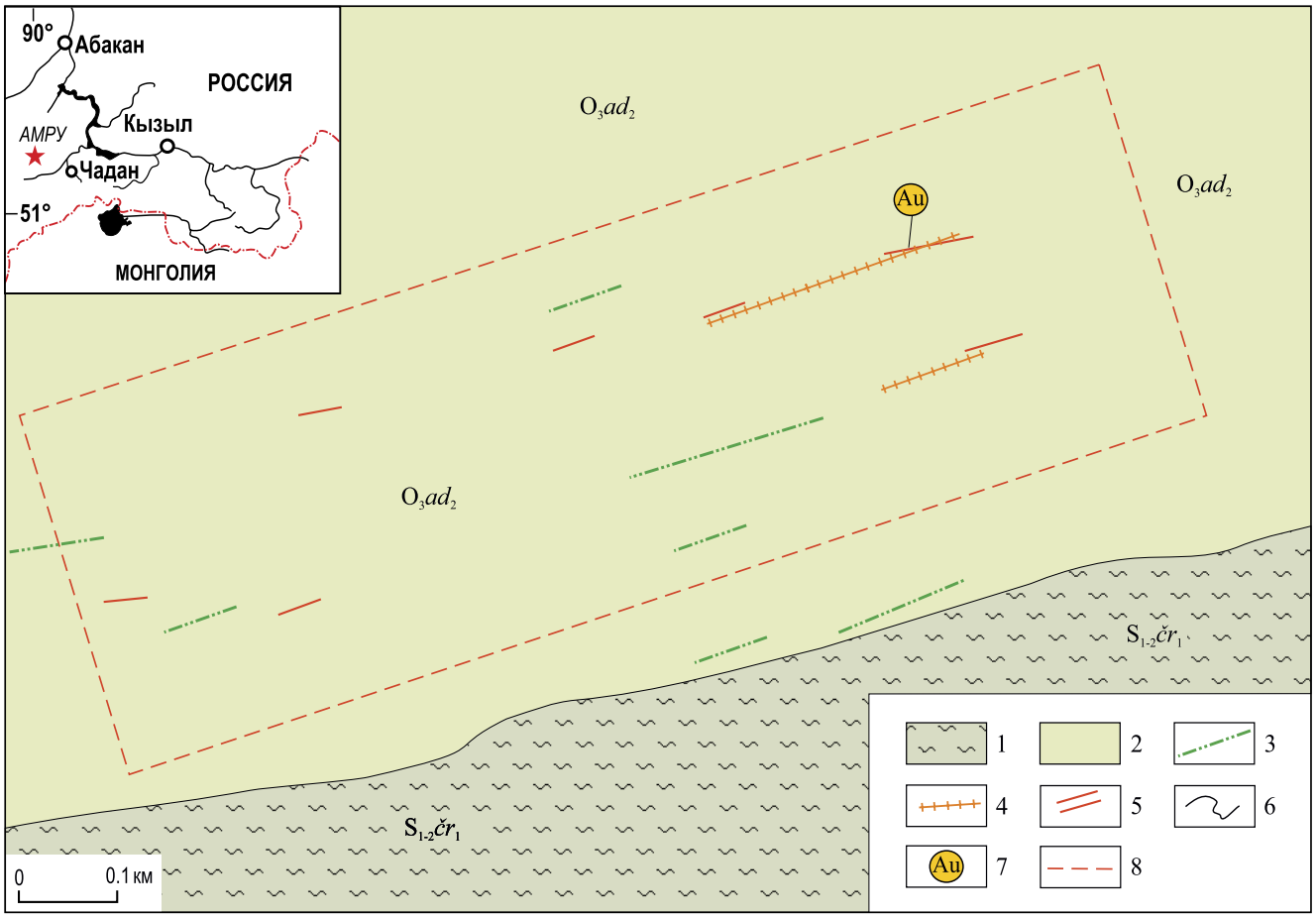

Рис. 1. Схема геологического строения рудопроявления Южный Ак-Даг.

1 – серицит-глинистые сланцы и алевролиты нижней подсвиты чергакской свиты ($S_{1-2}čr_1$), 2 – алевролиты и песчаники нижней подсвиты адырташской свиты (O_3ad_1), 3 – дайки габбро и диоритов III фазы баянкольского комплекса (D_3bn), 4 – березитизированные кварцевые песчаники и алевролиты ордовика, 5 – кварцевые жилы и жильные зоны, 6 – границы геологические, 7 – точки с видимым золотом, 8 – контур рудопроявления.

Fig. 1. Geological scheme of Southern Ak-Dag ore occurrence.

1 – sericite-clayey shale and aleurolites of the Early subsuit of Chergak Suit ($S_{1-2}čr_1$), 2 – aleurolites and sandstones of the Early subsuit of Adyrdash Suit (O_3ad_1), 3 – gabbro and diorite dykes of III phase of Bayankol complex (D_3bn), 4 – Ordovician berezitized quartz sandstones and aleurolites, 5 – quartz veins and veined zones, 6 – geological boundaries, 7 – visible gold mineralization, 8 – ore occurrence contour.

в термокамере TMS-600 (Linkam), позволяющей производить измерения температур фазовых переходов в интервале от –196 до +600 °C, с микроскопом Olympus BX 51 (лаборатория термобарогеохимии Южно-Уральского государственного университета, г. Миасс, аналитик Н.Н. Анкушева). Программное обеспечение LinkSys 32 DV-NC. Солевой состав растворов во включениях оценивался по температурам эвтектик (Борисенко, 1982). Концентрации солей в растворах рассчитывались по температурам плавления последних кристаллических фаз по данным (Bodnar, Vityk, 1994). Обработка результатов измерений выполнена в программе Statistica 12.

СОСТАВ САМОРОДНОГО ЗОЛОТА

Золото встречается в виде вкрапленности в кварце, заполняя межзерновые пространства и микротрещины, реже образует срастания с пиритом, халькопиритом. Морфология выделений золота разнообразна: преобладают интерстициальные, комковато-ячеистые и комковато-ветвистые формы (рис. 3); реже отмечаются кристалломорфные формы, представленные октаэдрами, кубооктаэдрами, срастаниями кристаллов, а также комковидными, слабоограненными выделениями. Поверхность зерен золота шагреневая, реже гладкая.

Рис. 2. Стадийность минералообразования на рудопроявлении Южный Ак-Даг.

1 – дорудная стадия (березитовая); 2 – рудная стадия (золото-сульфосольно-сульфидно-кварцевая); 3, 4 – пострудные стадии: карбонатно-кварцевая (3) и кварц-хлоритовая (4). Толщина линий указывает на относительную степень распространенности минерала.

Fig. 2. Paragenetic scheme of Southern Ak-Dag ore occurrence.

1 – pre-ore stage (beresite); 2 – ore stage (gold-sulfosalt-sulfide-quartz); 3, 4 – post-ore stages – carbonate-quartz (3) and quartz-chlorite (4). The line thickness indicates the relative mineral prevalence.

Минералого-геохимическими исследованиями установлено, что по химическому составу золото рудопроявления образует следующий ряд (мас. %): 1) высокопробное: Au – 89.23–92.79, Ag – 7.21–9.99; 2) среднепробное: Au – 83.21–89.98, Ag – 9.98–17.05.

Характерной примесью в золоте является Ag, содержание которого достигает 17.05 мас. %, другие элементы-примеси (Cu, Hg, Te), если и присутствуют, то в ничтожно малых количествах – ниже пределов обнаружения (табл. 1). В зернах золота отмечается прямая зональность, выражающаяся в более низких (на 1–2 мас. %) содержаниях Ag в их центральных частях по сравнению с краевыми. Средняя проба золота (по 37 изученным зернам, 77 ан.) составляет 904 ‰ при вариациях от 830 до 928 ‰. В рудах количественно преобладает высокопробное золото (рис. 4).

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЖИЛ

Кварц золото-сульфидно-кварцевых жил рудопроявления Ак-Даг представлен крупными прозрачными или полупрозрачными зернами с характерным волнистым погасанием. В кварце фиксируются первичные и первично-вторичные двухфазные включения размером 10–20 мкм. Газовые вакуоли в них занимают до 15–20 % объема включения. Включения имеют овальную, угловатую форму, иногда с небольшими отростками и/или с элементами кристаллографических граней и распространены равномерно по минералу, встречаются как одиночно, так и группами по 2–3 включения. Вторичные двухфазные включения трассируют трещины в кварце, имеют размер до 5 мкм и слагают геометрически линейные цепочечные скопления. Однофазные включения размером до 5 мкм также распространены в минерале равномерно, ассоциируя с двухфазными включениями (рис. 5а).

Для двухфазных включений получены температуры эвтектики, равные –21…–23 °C, и температуры плавления льда –4…–5.5 °C. Эти результаты указывают на хлоридный состав флюида, содержащего ионы K и Na, с концентрацией 6–8.6 мас. % NaCl-экв. с распределением значений в виде гистограммы асимметричной формы (см. рис. 5в). Температуры гомогенизации (в жидкость) составили 240–275 °C с пиком 245–250 °C (см. рис. 5б). Вторичные включения гомогенизировались в жидкую

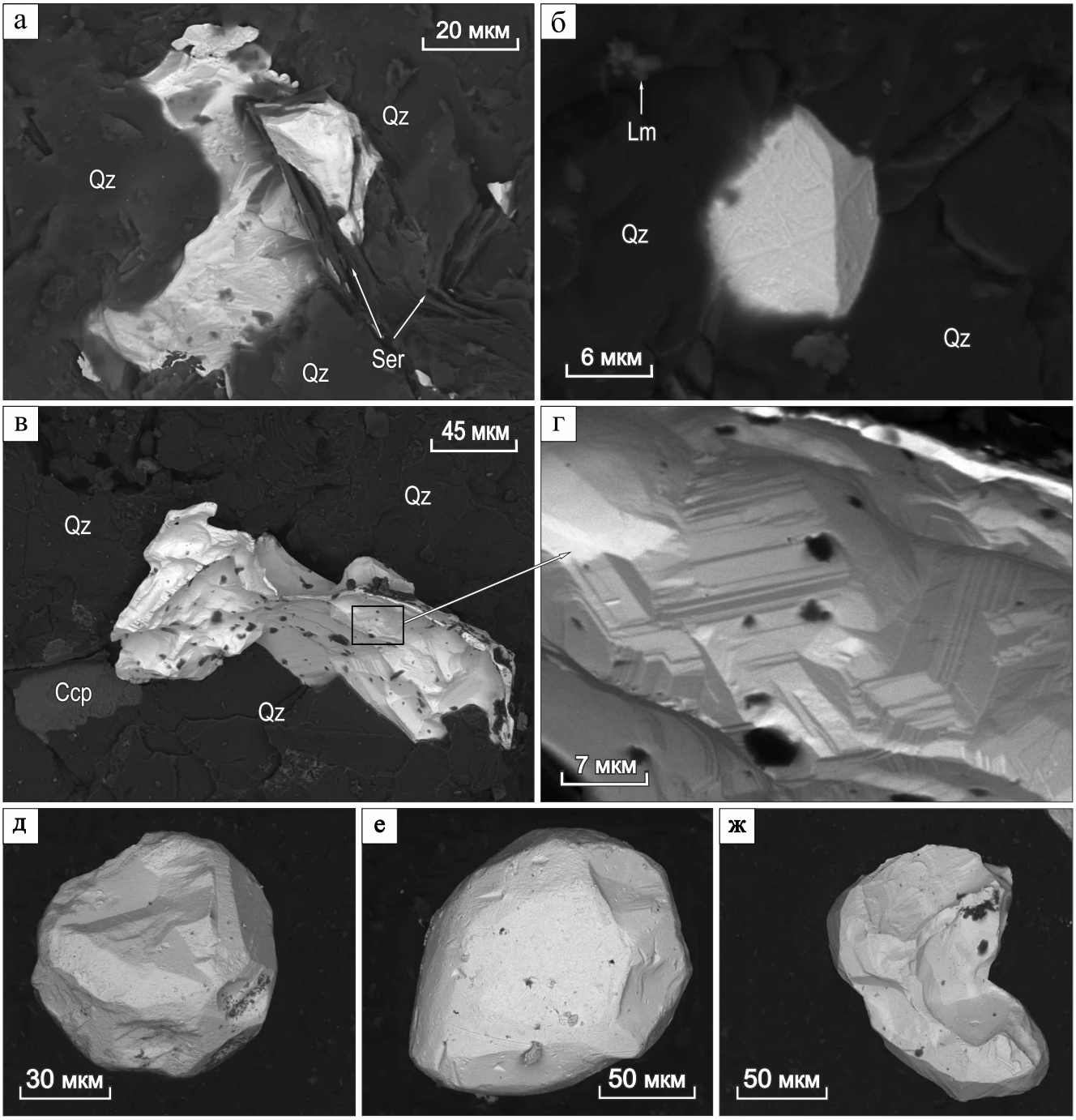

Рис. 3. Формы выделения золота рудопроявления Южный Ак-Даг. BSE-фото.

а – ксеноморфные зерна золота (светлое) в кварце (*Qz*) и на контакте серицита (*Ser*); б – идиоморфное зерно золота в кварце с лимонитом (*Lm*); в – зерно золота (светлое) с элементами кристаллографических граней в кварце с халькопиритом (*Ccp*); г – увеличенный фрагмент зерна золота со ступенями роста; д – идиоморфное зерно золота с развитием комбинаций форм куба и октаэдра; е – слабоограненный кристалл золота; ж – гемиидиоморфное золото с ограненными выступами.

Fig. 3. Gold from Southern Ak-Dag ore occurrence. BSE-image.

а – anhedral gold grains (light) in quartz (*Qz*) and on the contact with sericite (*Ser*); б – euhedral gold in quartz with limonite (*Lm*); в – gold grain with crystal elements in quartz with chalcopyrite (*Ccp*); г – detailed gold grain fragment with growth stages; д – euhedral gold grain with cube and octahedron faces; е – subhedral rounded gold crystal; ж – subhedral gold with crystal elements.

Таблица 1. Химический состав золота рудопроявления Ак-Даг, мас. %

Table 1. Chemical composition of gold from Ak-Dag ore occurrence, wt %

№ зерна	Зона зерна	Au	Ag	Сумма	Кристаллохимическая формула	Проба
1	Центр	88.11	11.43	99.54	$(Au_{0.81}Ag_{0.19})_{1.00}$	885
	Каемка	83.21	17.05	100.26	$(Au_{0.73}Ag_{0.27})_{1.00}$	830
2	Центр	92.74	7.88	100.62	$(Au_{0.87}Ag_{0.13})_{1.00}$	922
	Каемка	91.11	8.55	99.66	$(Au_{0.85}Ag_{0.15})_{1.00}$	914
3	Центр	90.37	8.85	99.22	$(Au_{0.85}Ag_{0.15})_{1.00}$	911
	Каемка	90.98	9.25	100.23	$(Au_{0.84}Ag_{0.16})_{1.00}$	908
4	Центр	90.11	8.96	99.07	$(Au_{0.85}Ag_{0.15})_{1.00}$	910
	Каемка	90.99	8.82	99.81	$(Au_{0.85}Ag_{0.15})_{1.00}$	912
5	Центр	92.28	8.05	100.33	$(Au_{0.86}Ag_{0.14})_{1.00}$	920
	Каемка	91.06	8.09	99.15	$(Au_{0.86}Ag_{0.14})_{1.00}$	918
6	Центр	90.78	8.54	99.32	$(Au_{0.85}Ag_{0.15})_{1.00}$	914
	Каемка	91.21	8.68	99.89	$(Au_{0.85}Ag_{0.15})_{1.00}$	913
7	Центр	89.36	9.79	99.15	$(Au_{0.83}Ag_{0.17})_{1.00}$	901
	Каемка	89.91	9.94	99.85	$(Au_{0.83}Ag_{0.17})_{1.00}$	900
8	Центр	89.96	9.31	99.27	$(Au_{0.84}Ag_{0.16})_{1.00}$	906
9	–”–	91.8	8.20	100	$(Au_{0.86}Ag_{0.14})_{1.00}$	918
	Каемка	91.44	8.56	100	$Au_{0.85}Ag_{0.15})_{1.00}$	914
10	Центр	92.09	7.91	100	$(Au_{0.86}Ag_{0.14})_{1.00}$	921
11	–”–	89.56	10.01	99.57	$(Au_{0.83}Ag_{0.17})_{1.00}$	899
	Каемка	88.5	10.66	99.16	$(Au_{0.82}Ag_{0.18})_{1.00}$	892
12	Центр	90.33	9.67	100	$(Au_{0.84}Ag_{0.16})_{1.00}$	903
	Каемка	90.1	9.75	99.85	$(Au_{0.84}Ag_{0.16})_{1.00}$	902
13	Центр	89.9	9.82	99.72	$(Au_{0.83}Ag_{0.17})_{1.00}$	902
	Каемка	89.63	10.13	99.76	$(Au_{0.83}Ag_{0.17})_{1.00}$	898
14	Центр	89.97	10.03	100	$(Au_{0.83}Ag_{0.17})_{1.00}$	900
	Каемка	89.98	10.02	100	$(Au_{0.83}Ag_{0.17})_{1.00}$	900
16	Центр	90.1	9.58	99.68	$(Au_{0.84}Ag_{0.16})_{1.00}$	904
	Каемка	89.41	9.72	99.13	$(Au_{0.83}Ag_{0.17})_{1.00}$	902
16	Центр	90.32	9.68	100	$(Au_{0.84}Ag_{0.16})_{1.00}$	903
	Каемка	90.17	9.99	100.16	$(Au_{0.83}Ag_{0.17})_{1.00}$	900
17	Центр	90.66	9.88	100.54	$(Au_{0.83}Ag_{0.17})_{1.00}$	902
18	–”–	92.79	7.21	100	$(Au_{0.88}Ag_{0.12})_{1.00}$	928
	Каемка	92.33	7.49	99.82	$Au_{0.87}Ag_{0.13})_{1.00}$	925
19	Центр	88.42	10.9	99.32	$(Au_{0.82}Ag_{0.18})_{1.00}$	890
	Каемка	88.11	11.2	99.31	$(Au_{0.81}Ag_{0.19})_{1.00}$	887
20	Центр	89.60	9.70	99.3	$(Au_{0.83}Ag_{0.17})_{1.00}$	902
	Каемка	89.92	9.2	99.12	$(Au_{0.84}Ag_{0.16})_{1.00}$	907
21	Центр	89.76	9.71	99.47	$(Au_{0.84}Ag_{0.16})_{1.00}$	902
	Каемка	89.52	9.98	99.5	$(Au_{0.84}Ag_{0.16})_{1.00}$	900
22	Центр	89.24	9.77	99.01	$(Au_{0.83}Ag_{0.17})_{1.00}$	901
23	–”–	91.66	7.53	99.19	$(Au_{0.87}Ag_{0.13})_{1.00}$	924
	Каемка	91.79	7.93	99.72	$(Au_{0.86}Ag_{0.14})_{1.00}$	920
24	Центр	89.44	9.68	99.12	$(Au_{0.83}Ag_{0.17})_{1.00}$	902
25	Каемка	89.27	10.18	99.45	$(Au_{0.83}Ag_{0.17})_{1.00}$	898
26	Центр	89.60	9.84	99.44	$Au_{0.83}Ag_{0.17})_{1.00}$	901
27	–”–	90.12	9.81	99.93	$(Au_{0.83}Ag_{0.17})_{1.00}$	902
28	–”–	89.23	9.94	99.17	$(Au_{0.83}Ag_{0.17})_{1.00}$	900
	Каемка	89.85	9.36	99.21	$(Au_{0.84}Ag_{0.16})_{1.00}$	906
29	Центр	90.40	9,60	100	$(Au_{0.84}Ag_{0.16})_{1.00}$	904
	Каемка	89.79	9,28	99.07	$(Au_{0.84}Ag_{0.16})_{1.00}$	906
30	Центр	90.48	9.52	100	$(Au_{0.84}Ag_{0.16})_{1.00}$	905
31	–”–	90.67	9.07	99.74	$(Au_{0.85}Ag_{0.15})_{1.00}$	909
32	–”–	90.61	9.39	100	$(Au_{0.84}Ag_{0.16})_{1.00}$	906
33	–”–	89.56	10.13	99.69	$(Au_{0.83}Ag_{0.17})_{1.00}$	898
34	–”–	90.18	9.82	100	$(Au_{0.83}Ag_{0.17})_{1.00}$	902
	Каемка	88.77	10.23	99	$(Au_{0.83}Ag_{0.17})_{1.00}$	897

Примечание. Химический состав золота определен на растровом электронном микроскопе с энергодисперсионным анализатором MIRA LM (аналитик Н.С. Карманов, ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Кристаллохимическая формула золота рассчитана по сумме металлов, равной 1. Проба (пробность) самородного золота определялась по формуле Au/(Au+Ag) × 1000. В таблице указаны только наиболее представительные анализы.

Note. Chemical composition of gold determined on electronic microscope equipped with MIRA LM EDS (operator N.S. Karmanov, IGM SB RAS, Novosibirsk). The crystallochemical formula is calculated per the metal sum equal to 1. The native gold standard is calculated according Au/(Au+Ag) × 1000 plot. The table includes the most representative analyses.

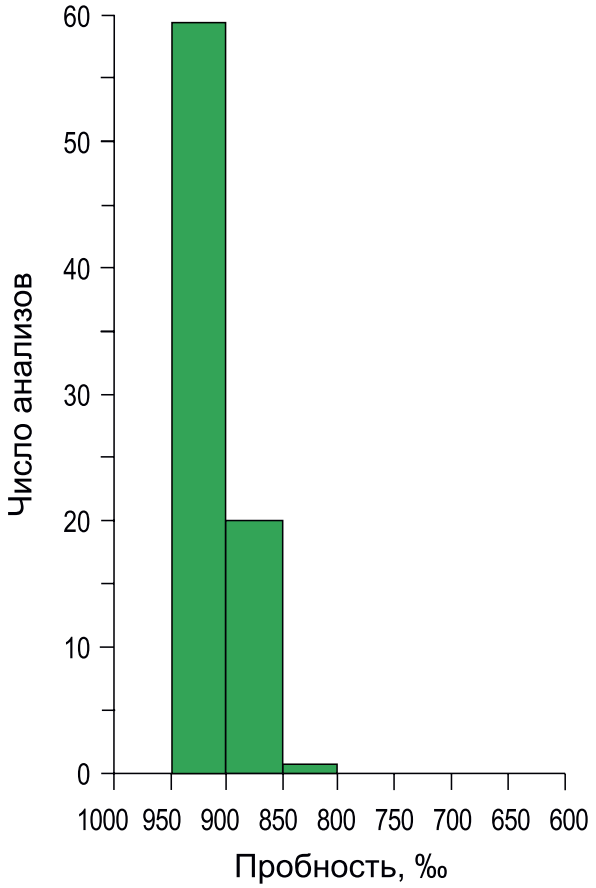

Рис. 4. Гистограммы пробности самородного золота.

Fig. 4. The frequency of native gold standard.

фазу при температурах 160–180°C. Ввиду малых размеров вторичных включений удалось установить только единичные значения температур эвтектики и плавления последних кристаллических фаз, согласно которым флюид, законсервированный во вторичных включениях, имеет Na-K хлоридный состав и соленость 5–6 мас. % NaCl-экв.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Минералого-геохимические исследования показали, что на рудопроявлении Южный Ак-Даг присутствует высокопробное и среднепробное золото. Содержание Ag в золоте достигает 17.05 мас. %, другие элементы-примеси (Cu, Hg, Te) находятся ниже пределов обнаружения. Средняя проба золота составляет 904 ‰ при вариациях от 830 до 928 ‰. В рудах количественно преобладает высокопробное золото.

По минералого-геохимическим особенностям золото рудопроявления Южный Ак-Даг сходно с золотом других рудопроявлений АМРУ – Арыскан, Дуушкуннуг, Улуг-Саир (Кужугет, 2014; Кужугет и др., 2014, 2017).

В результате термобарогеохимических исследований флюидных включений выявлено, что золотоносные кварцевые жилы рудопроявления образовались при участии водного K-Na хлоридного флюида с соленостью 6–9 мас. % NaCl-экв. при *T* не менее 240–275°C. Низкотемпературные (<160°C) включения, по-видимому, содержат пострудные растворы.

Давление в процессе минералообразования на рудопроявлении Ак-Даг (Северный Ак-Даг), рассчитанное по углекислотным включениям, составило 0.8–1.2 кбар (Борисенко и др., 1979). Если принять, что глубины формирования рудопроявлений Северный и Южный Ак-Даг близки, то истинные температуры минералообразования образуют интервал 320–370°C. Отсутствие значимых количеств $MgCl_2$ и $CaCl_2$ можно объяснить кристаллизацией магнезиальных карбонатов в березитах и березитизированных породах рудопроявления.

Соленость флюида в подавляющем большинстве случаев оставалась постоянной – 6.5–8 мас. % NaCl-экв. при остывании флюида в процессе минералообразования. Стабильность солености флюида может отражать относительно быстрый процесс отложения минералов в золотоносных жилах без существенного влияния реакций с вмещающими породами и/или смешения с метеорными водами. Косвенным свидетельством этого также является преобладание высокопробного золота в рудных жилах. Кроме того, устойчивый интервал солености указывает на то, что флюиды циркулировали в узкой, проницаемой линейной трещинной зоне, что подтверждается геологическими данными (Борисенко и др., 1979).

Близкий состав растворов первичных и вторичных включений позволяет сделать вывод о том, что формирование кварцевых жил и отложение золота происходили в условиях эволюции (остывания) от 370 до 200°C единого по составу и генезису флюида.

Исследованиями предшественников получены геологические, структурные и минералогические признаки парагенетической связи процессов формирования золоторудных месторождений Алдан-Маадырской зоны с девонской магматической активностью региона (Зайкова, Зайков, 1969; Васильев и др., 1977; Зайков и др., 1981).

Кроме того, полученные термобарогеохимические данные рудопроявления Ак-Даг отвечают интервалам температур и давлений, характерным для большинства мезотермальных золоторудных месторождений России (Березовское, Кочкарское и др.) (Бакшеев и др., 1998; Прокофьев, 2000; Прокофьев, Спиридонов, 2005) и мира (Ansdell, Kyser, 1992; Klein et al., 2008; Yoo et al., 2006, 2010), для которых доказано участие магматических флюидов в процессах минералообразования.

Полученные нами минералогические и термобарогеохимические данные не противоречат этим

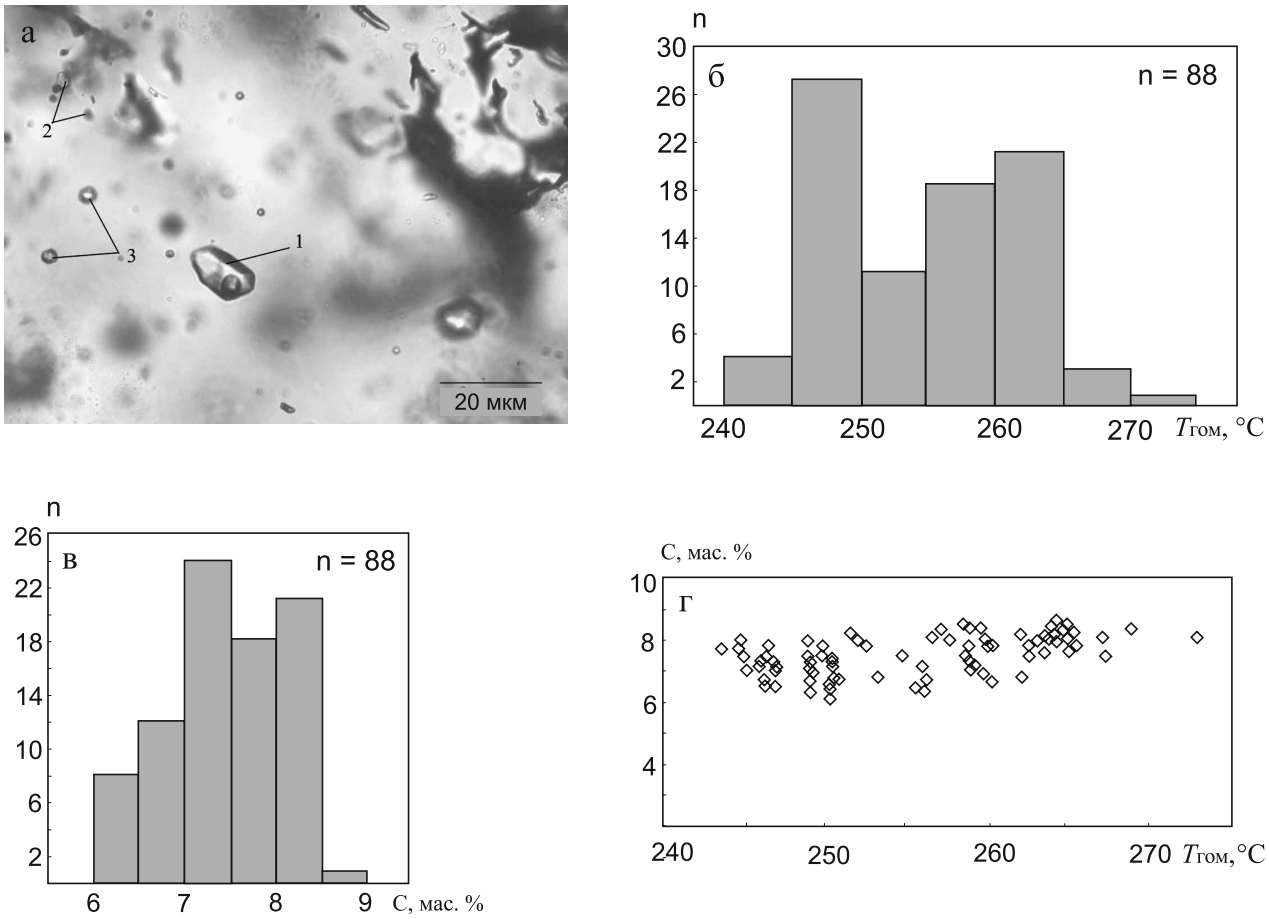

Рис. 5. Результаты исследования флюидных включений в кварце рудопроявления Южный Ак-Даг.

а – флюидные включения: 1, 2 – двухфазные: первичные (1), вторичные (2); 3 – однофазные; б, в – гистограммы распределения значений температур гомогенизации (б) и солености (в); г – диаграмма соотношения температур гомогенизации и солености включений; n – количество измерений.

Fig. 5. Fluid inclusion data of quartz from Southern Ak-Dag ore occurence.

a – fluid inclusions:1, 2 two-phased; primary (1), secondary (2); monophased (3); б, в – histograms of homogenization temperatures (б) and salinity (в) distribution; г – homogenization temperatures vs. salinity plot; n – number of measurements.

представлениям, а подтверждают то, что золоторудные объекты АМРУ являются производными единой флюидно-гидротермальной рудообразующей системы (Анкушева и др., 2013; Анкушева, Кужугет, 2013; Кужугет, Монгуш, 2013; Кужугет и др., 2014, 2017; Melekestseva et al., 2013).

Таким образом, золотая минерализация на рудопроявлении Южный Ак-Даг формировалась в течение одной стадии и отвечает золото-галенит-халькопиритовому минеральному типу с баритом. Установление сходных *P-T* условий отложения жил и минералого-геохимических особенностей самородного золота рудопроявления с другими объектами АМРУ, а также сопряженность оруденения с березитами указывают на перспективность данного объекта на выявление промышленного оруденения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анкушева Н.Н., Кужугет Р.В. (2013) Условия формирования золото-кварцевых жил рудопроявления Дуушкуннуг (Западная Тува) по результатам изучения флюидных включений. *Металлогения древних и современных океанов.* Миасс: ИМин УрО РАН, 194-198.

Анкушева Н.Н., Мелекесцева И.Ю., Зайков В.В., Котляров В.А. (2013) Физико-химические параметры флюидов при формировании Улуг-Саирского золоторудного месторождения (Западная Тува). *Уральская минералогическая школа*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 21-23.

Бакшеев И.А., Прокофьев В.Ю., Устинов В.И. (1998) Условия формирования жильного кварца Березовского золоторудного поля, Средний Урал, по данным изучения флюидных включений и изотопным данным. *Уральская летняя минералогическая школа*. Екатеринбург: УГГГА, С. 41-49.

Борисенко А.С. (1982) Анализ солевого состава растворов газово-жидких включений в минералах методом криометрии. *Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений.* М.: Недра, 37-46.

Борисенко А.С., Лебедев В.И., Оболенский А.А., Зайков В.В., Тюлькин В.Г. (1979) Физико-химические условия формирования гидротермальных месторождений Западной Тувы. *Основные параметры природных процессов эндогенного рудообразования.* Т. 2. Новосибирск: Наука, 226-235.

Васильев Б.Д., Дружков В.П., Красиков А.И., Боярко Г.Ю. (1977) Ревизионно-оценочные работы на золото в Алашском и Эйлиг-Хемском районах Западной Тувы. 337 с. Кызыл, Геол. фонды.

Зайков В.В., Лебедев В.И., Тюлькин В.Г., Гречищева В.Н., Кужугет К.С. (1981) Рудные формации Тувы. Новосибирск: Наука, 201 с.

Зайкова Е.В., Зайков В.В. (1969) О золотом оруденении в Западной Туве, связанном с девонским магматизмом. *Материалы по геологии Тувинской АССР.* Кызыл, 72-76.

Кононенко Н.Б. (2011) Предварительные результаты по золотоносной Алдан-Маадырской зоне (Республика Тыва). *Геология и минеральные ресурсы Центральной Сибири: материалы науч.-практ. конф.* Красноярск: Красноярскгеолсъемка, 162-166.

Кужугет Р.В. (2014) Золото-теллуридное оруденение Алдан-Маадырского рудного узла (Западная Тува): минералого-геохимические особенности руд и условия их образования: Автореф. дис. … к.г.-м.н. Новосибирск. 20 с.

Кужугет Р.В., Зайков В.В., Анкушева Н.Н. (2017) Минералого-геохимические особенности Арысканского рудопроявления золота кварцево-жильного типа в березитах (Западная Тува). *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*, **1**(29), 98-110.

Кужугет Р.В., Зайков В.В., Лебедев В.И. (2014) Улуг-Саирское золото-турмалин-кварцевое месторождение, Западная Тува. *Литосфера*, (2), 99-114.

Кужугет Р.В., Монгуш А.А. (2013) Алдан-Маадырский золоторудный узел (Западная Тува): особенности геолого-структурного строения и химического состава золота. *Вестник Томского государственного университета*, **369**, 188-192.

Монгуш А.А., Кужугет Р.В., Дружкова Е.К. (2011) Особенности состава магматических пород и Ar-Ar данные о возрасте базитовых даек Алдан-Маадырской золоторудной зоны (Западная Тува). *Металлогения древних и современных океанов.* Миасс: ИМин УрО РАН, 262-268.

Петровская Н.В. (1973) Самородное золото. М.: Наука, 348 с.

Прокофьев В.Ю. (2000) Геохимические особенности рудообразующих флюидов гидротермальных месторождений золота различных генетических типов. Новосибирск: Наука, 192 с.

Прокофьев В.Ю., Спиридонов Э.М. (2005) Состав метаморфогенных флюидов и условия преобразования руд Кочкарского золоторудного месторождения (Южный Урал). *II Всероссийское петрографическое совещание "Петрография на рубеже XXI века".* Т. 3. Сыктывкар, 88-90.

Рёддер Э. (1987) Флюидные включения в минералах. М.: Мир, 632 с.

Ansdell K.M., Kyser T.K. (1992) Mesothermal gold mineralization in a Proterozoic greenstone belt; western Flin Flon Domain, Saskatchewan, Canada. *Econ. Geol.*, **87**, 1496-1524.

Bodnar R.J., Vityk M.O. (1994) Interpretation of microthermometric data for H_2O-NaCl fluid inclusions. *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Pontignana-Siena, 117-130.

Klein E.L., Fuzikawa K., Koppe J.C., Dantas M.S.S. (2008) Fluids associated with the caxias mesothermal gold mineralization, São Luís Craton, northern Brazil: a fluid inclusion study. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**, 322-326.

Melekestseva I.Yu., Zaykov V.V., Ankusheva N.N. (2013) The Aldan-Maadyr zone, Western Tuva, Russia: formation conditions of gold-quartz veins in listvenites, conglomerates, and beresites. "*Ore genesis" International Conference*. Miass, IM UB RAS, 89-97.

Yoo B.C., Lee H.K., White N.C. (2006) Gold-Bearing Mesothermal Veins from the Gubong Mine, Cheongyang Gold District, Republic of Korea: Fluid Inclusion and Stable Isotope Studies. *Econ. Geol.*, **101**, 883-901.

Yoo B.C., Lee H.K., White N.C. (2010) Mineralogical, fluid inclusion, and stable isotope constraints on mechanisms of ore deposition at the Samgwang mine (Republic of Korea) – a mesothermal, vein-hosted gold-silver deposit. *Miner. Depos.*, **45**, 161-187.

REFERENCES

Ankusheva N.N., Kuzhuget R.V. (2013) The conditions of gold-quartz veins from Doushkunnug ore occurrence (Western Tuva) formation according to fluid inclusion data. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov* [The metallogeny of ancient and modern oceans]. Miass, IM UB RAS, 194-198. (In Russian)

Ankusheva N.N., Melekestseva I.Yu., Zaikov V.V., Kotlyarov V.A. (2013) The physical and chemical forming fluid parameters of Ulug-Sair gold deposit, Western Tuva. *Ural'skaya mineralogicheskaya shkola* [The Urals mineralogical School]. Ekaterinburg, IGG UB RAS, 21-23. (In Russian)

Ansdell K.M., Kyser T.K. (1992) Mesothermal gold mineralization in a Proterozoic greenstone belt; western Flin Flon Domain, Saskatchewan, Canada. *Econ. Geol.*, **87**, 1496-1524.

Baksheev I.A., Prokofiev V.Yu., Ustinov V.I. (1998) Conditions of formation of vein quartz of the Berezovsk gold ore field, Middle Urals, according to the data of study of fluid inclusions and isotope data. *Uralskaya letnyaya mineralogicheskaya shkola* [The Urals Summer Mineralogical School]. Ekaterinburg, UGGGA, 41-49. (In Russian)

Bodnar R.J., Vityk M.O. (1994) Interpretation of microthermometric data for H_2O–NaCl fluid inclusions. *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Pontignana-Siena, 117-130.

Borisenko A.S. (1982) The analysis of salt composition of fluid inclusions by means cryometry. *Ispol'zovanie metodov termobarogeokhimii pri poiskakh i izuchenii rudnykh mestorozhdenii* [The application of thermobarogeochemistry methods for ore deposit prospecting]. Moscow, Nedra Publ., 37-46. (In Russian)

Borisenko A.S., Lebedev V.I., Obolenskii A.A., Zaikov V.V., Tyul'kin V.G. (1979) Physical and chemical conditions of Western Tuva hydrothermal deposits. *Osnovnye parametry prirodnykh protsessov endogennogo rudoobrazovaniya* [The main parameters of natural processes of endogenous ore formation]. V. 2. Novosibirsk, Nauka Publ., 226-235. (In Russian)

Klein E.L., Fuzikawa K., Koppe J.C., Dantas M.S.S. (2008) Fluids associated with the caxias mesothermal gold mineralization, São Luís Craton, northern Brazil: a fluid inclusion study. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**, 322-326.

Kuzhuget R.V. (2014) *Zoloto-telluridnoe orudenenie Aldan-Maadyrskogo rudnogo uzla (Zapadnaya Tuva): mineralogo-geokhimicheskie osobennosti rud i usloviya ikh obrazovaniya.* Diss. kand. geol.-min. nauk [Gold-telluride mineralization of the Aldan-Maadyr ore cluster (Western Tuva): mineralogical and geochemical features of ores and conditions of their formation. Cand. Geol and min. Sci.diss.] Novosibirsk, 20 p. (In Russian)

Kuzhuget R.V., Mongush A.A. (2013) The Aldan-Maadyr gold-bearing cluster, Western Tuva: geological and structural peculiarities and gold chemical composition. *Vestn. Tomsk. Gos. Univer.,* **369**, 188-192. (In Russian)

Kuzhuget R.V., Zaikov V.V., Ankusheva N.N. (2017) The mineralogical and geochemical peculiarities of Aryskan gold-quartz-veined ore occurrence in beresites (Western Tuva). *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri*, **29**(1), 98-110. (In Russian)

Kuzhuget R.V., Zaikov V.V., Lebedev V.I. (2014) Ulug-Sair gold-tourmaline-quartz deposit, Western Tuva. *Litosfera*, (2), 99-114. (In Russian)

Melekestseva I.Yu., Zaykov V.V., Ankusheva N.N. (2013) The Aldan-Maadyr zone, Western Tuva, Russia: formation conditions of gold-quartz veins in listvenites, conglomerates, and beresites. "*Ore genesis" International Conference*. Miass, IMin UB RAS, 89-97.

Mongush A.A., Kuzhuget R.V., Druzhkova E.K. (2011) The peculiarities of magmatic rock compositions and Ar-Ar data of basite dykes from Aldan-Maadyr gold-bearing zone, Western Tuva. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov* [The metallogeny of ancient and modern oceans]. Miass, IMin UB RAS, 262-268. (In Russian)

Petrovskaya N.V. (1973) *Samorodnoe zoloto* [A Native Gold]. Moscow, Nauka Publ., 348 p. (In Russian)

Prokofiev V.Yu. (2000) *Geokhimicheskie osobennosti rudoobrazuyushchikh fluidov gidrotermal'nykh mestorozhdenii zolota razlichnykh geneticheskikh tipov* [Geochemical features of ores forming fluids of hydrothermal gold deposits of various genetic types]. Novosibirsk, Nauka Publ., 192 c. (In Russian)

Prokofiev V.Yu., Spiridonov E.M. (2005) Composition of metamorphogenic fluids and conditions of transformation of ores from Kochkar gold deposit (Southern Urals). *II Vserossiiskoe petrograficheskoe soveshchanie "Petrografiya na rubezhe XXI veka"* [II All-Russian Petrographic Meeting "Petrography at the turn of the XXI century"]. V. 3. Syktyvkar, 88-90. (In Russian)

Redder E. (1987) *Flyuidnye vklyucheniya v mineralakh* [Fluid inclusions in minerals]. Moscow, Mir Publ., 632 p. (In Russian)

Vasil'ev B.D., Druzhkov V.P., Krasikov A.I., Boyarko G.Yu. (1997) Audit and appraisal works for gold in Alash and Eilig-Khem districts of Western Tuva. 37 p. Kyzyl. (In Russian unpubl.)

Yoo B.C., Lee H.K., White N.C. (2006) Gold-Bearing Mesothermal Veins from the Gubong Mine, Cheongyang Gold District, Republic of Korea: Fluid Inclusion and Stable Isotope Studies. *Econ. Geol.*, **101**, 883-901.

Yoo B.C., Lee H.K., White N.C. (2010) Mineralogical, fluid inclusion, and stable isotope constraints on mechanisms of ore deposition at the Samgwang mine (Republic of Korea) – a mesothermal, vein-hosted gold-silver deposit. *Mineral. Depos.*, **45**, 161-187.

Zaikov V.V., Lebedev V.I., Tyulkin V.G., Grechishcheva V.N., Kuzhuget K.S. (1981) *Rudnye formatsii Tuvy* [Ore formations of Tuva]. Novosibirsk, Nauka Publ., 201 p. (In Russian)

Zaikova E.V., Zaikov V.V. (1969) The gold ores of the Western Tuva confined to the Devonian magmatism. *Materialy po geologii Tuvinskoi ASSR* [The Materials of Tuva SSR geology]. Kyzyl, 72-76. (In Russian)