

УДК 553.2: 549.283

**УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ РУДНЫХ И БЕЗРУДНЫХ КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ  
МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗОЛОТА КРАСНОЕ (ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ)  
ПО ДАННЫМ ТЕРМОБАРОГЕОХИМИИ И ИЗОТОПИИ**

**Н.Н. Анкушева<sup>1,2</sup>, Е.Е. Паленова<sup>1</sup>, Е.А. Панкрушина<sup>3</sup>, С.Н. Шанина<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Институт минералогии УрО РАН, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; [ankusheva@mail.ru](mailto:ankusheva@mail.ru)

<sup>2</sup>Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Миассе, ул. 8 Июля 10, г. Миасс, Челябинская обл., 456316 Россия

<sup>3</sup>Институт геологии и геохимии УрО РАН, ул. Ак. Вонсовского 15, г. Екатеринбург, 620016 Россия

<sup>4</sup>Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, ул. Первомайская, 54, г. Сыктывкар, ГСП-2, 167000 Россия

**FORMATION CONDITIONS OF AU-BEARING AND BARREN QUARTZ VEINS  
OF THE KRASNOE GOLD DEPOSIT, EASTERN SIBERIA:  
FLUID INCLUSION AND ISOTOPIC DATA**

**N.N. Ankusheva<sup>1,2</sup>, E.E. Palenova<sup>1</sup>, E.A. Pankrushina<sup>3</sup>, S.N. Shanina<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Institute of Mineralogy UB RAS, Miass, Chelyabinsk region, 456317 Russia [ankusheva@mail.ru](mailto:ankusheva@mail.ru)

<sup>2</sup>South-Urals State University, Miass branch, ul. 8 Iyulya 10, Miass, Chelyabinsk region, 456316 Russia

<sup>3</sup>Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Ekaterinburg, 620016 Russia

<sup>4</sup>Institute of Geology KSC UB RAS, ul. Pervomayskaya 54, Syktyvkar, 167000 Russia

В статье приведены результаты исследования флюидных включений в золотосодержащих и безрудных кварцевых жилах месторождения Красное Бодайбинского района Иркутской области, полученные методами термо- и криометрии, КР-спектроскопии и газовой хроматографии. Установлено, что золотоносные кварцевые жилы отлагались из растворов Mg-Na хлоридного состава с соленостью 6.3–10.6 мас. % NaCl-экв. при температурах 260–330 °С и давлении 1.2–1.6 кбар. Безрудные кварцевые жилы формировались из K-Na растворов с соленостью 7.3–13.9 мас. % NaCl-экв. при температурах 140–280 °С. Главным газовым компонентом флюида является углекислота (до 98 мол. %), наряду с ней установлены вода и азот. Изотопный состав кислорода в кварце золотосодержащих и безрудных жил ( $\delta^{18}\text{O}$  18.5–19.3 ‰) и воды ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  9.82–12.30 ‰) попадает в область метаморфогенных пород и вод.

Илл. 7. Табл. 3. Библ. 50.

*Ключевые слова:* месторождения золота в черных сланцах, Бодайбинский район, месторождение Красное, флюидные включения, кварц.

The paper presents the results of fluid inclusion study of auriferous and barren quartz veins of the Krasnoe gold deposit situated in the Bodaybo area (Irkutsk oblast) using thermo- and criometry, Raman spectroscopy and gas chromatography. The auriferous and barren quartz veins were formed from Mg-Na and K-Na chloride fluids with salinity of 6.3–10.6 and 7.3–13.9 wt. % NaCl-equiv. at temperature 260–330 and 140–280 °C, respectively, and pressure 1.2–1.6 kbar. Carbon dioxide (up to 98 mol. %) is the main component of the fluid followed by H<sub>2</sub>O and N<sub>2</sub>. The O isotopic composition of quartz both from auriferous and barren veins ( $\delta^{18}\text{O}$  18.5–19.3 ‰), as well as the calculated  $\delta^{18}\text{O}$  values of the fluid ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  9.82–12.30 ‰), correspond to those of metamorphic rocks and fluids.

Figures 7. Tables 3. References 50.

*Key words:* black shale-hosted gold deposits, Bodaybo region, Krasnoe deposit, fluid inclusions, quartz.

## Введение

Бодайбинский район расположен в пределах Патомского нагорья и принадлежит Ленской золотоносной провинции, на территории которой с середины XIX в. добыто около 2500 т россыпного золота. Вопрос о типе минерализации, послужившей источником для россыпей, является спорным. Золото-кварц-сульфидный тип руд составляет основу запасов коренных месторождений, включая уникальное Сухой Лог (2956 т Au и 1541 т Ag, Мигачев и др., 2008), крупное Вернинское (до 300 т Au, данные ПАО «Полус Голд», 2017 г.), а также несколько более мелких месторождений и рудопроявлений. Жильный золото-кварцевый тип часто слагает верхние этажи рудных тел или сопровождает сульфидные залежи. Огромные запасы россыпей показывают, что эродированные коренные месторождения были соизмеримы по запасам с Сухим Логом. Вместе с тем, повторяющиеся находки крупных самородков (до 12 кг, Rakovan et al., 2017) говорят о том, что кварцево-жильный тип также внес существенный вклад в формирование россыпей.

Структура Патомского нагорья включает Патомский и Бодайбинский синклиории, разделенные Чуйско-Тонодско-Нечерским поднятием. Основные запасы россыпного и коренного золота локализованы в Бодайбинском синклиории, который сложен углеродистыми терригенными отложениями рифейско-вендского возраста, прорванными раннепалеозойскими гранитоидами мамско-оронского и конкудеро-мамаканского комплексов. В настоящее время золотое оруденение известно на нескольких стратиграфических уровнях вендского разреза (Иванов, 2014) с перспективами дальнейшего расширения (рис. 1). Основные месторождения, включая Сухой Лог, расположены на севере синклиория в пределах Хомолхинского россыпного узла, однако разведочные работы последних десятилетий выявили несколько объектов в центральной части района в россыпном Артемовском узле, в т.ч. крупное месторождение Красное, запасы которого на 2018 г. достигают 80 т (данные ПАО «Высочайший»).

Генезис коренных месторождений Ленской провинции обсуждается с момента открытия месторождения Сухой Лог в 1969 г. (Буряк, 1982). Ряд исследователей признают преобладающую роль первичного концентрирования металла в ходе докембрийского осадконакопления, а его дальнейшее перераспределение и формирование рудных

тел связывают с процессами метаморфизма (Немеров, 1989; Буряк, Хмелевская, 1997; Large et al., 2007; Palenova et al., 2015). По другим точкам зрения, золото привнесено из глубинного источника, с которым также связаны палеозойские гранитоиды (Шер, 1974; Рундквист и др., 1992) или орогенный метаморфизм (Distler et al., 1996; Кучеренко и др., 2011; Yakubchuk et al., 2014; Yudovskaya et al., 2016). Все гипотезы имеют ряд слабых и сильных сторон, поэтому существуют попытки увязать процессы рудогенеза с многостадийной геологической историей региона (Meffre et al., 2008; Кряжев и др., 2009). По имеющимся представлениям вкрапленные золото-кварц-сульфидные руды месторождения Сухой Лог сформировались около 500–450 млн лет назад в процессе регионального метаморфизма (Виноградов и др., 1996; Лаверов и др., 2007; Meffre et al., 2008; Юдовская и др., 2011; Yakubchuk et al., 2014), а жильные золото-кварцевые – около 320 млн лет назад, что близко к возрасту первой фазы конкудеро-мамаканского комплекса (Бухаров и др., 1992; Лаверов и др., 2007). Для других месторождений датирование разных типов руд не проводилось, а сведения об условиях формирования отрывочны. В связи с этим, а также с учетом продолжающихся геологоразведочных работ и перспективой начала эксплуатации месторождения Красное, актуально исследование вещественного состава и условий формирования руд разных промышленных типов. Данная работа посвящена оценке условий образования и источника флюида золотосодержащих и безрудных кварцевых жил месторождения Красное методами термо- и криометрии, а также изотопного анализа.

## Геологическое строение

В строении месторождения Красное участвуют углеродсодержащие кварцевые песчаники и алевролиты аунакитской ( $R_3au$ ), вачской ( $R_3vc$ ) и анангской (Van) свит. Золотоносными являются отложения аунакитской и, возможно, вачской свит, рудная минерализация приурочена к шарниру субширотной антиклинали сложного строения (Кузьменко, 2013) (рис. 2). Вмещающие породы месторождения, представленные кремнистыми алевролитами и кварцевыми песчаниками с прослоями углеродисто-глинистых сланцев, обогащены углеродистым веществом (3–10 об. %, в среднем, 5 об. %) и метаморфизованы в условиях серицит-хлоритовой субфации зеленосланцевой фации. Вмещающие породы сложены кварцем, серицитом

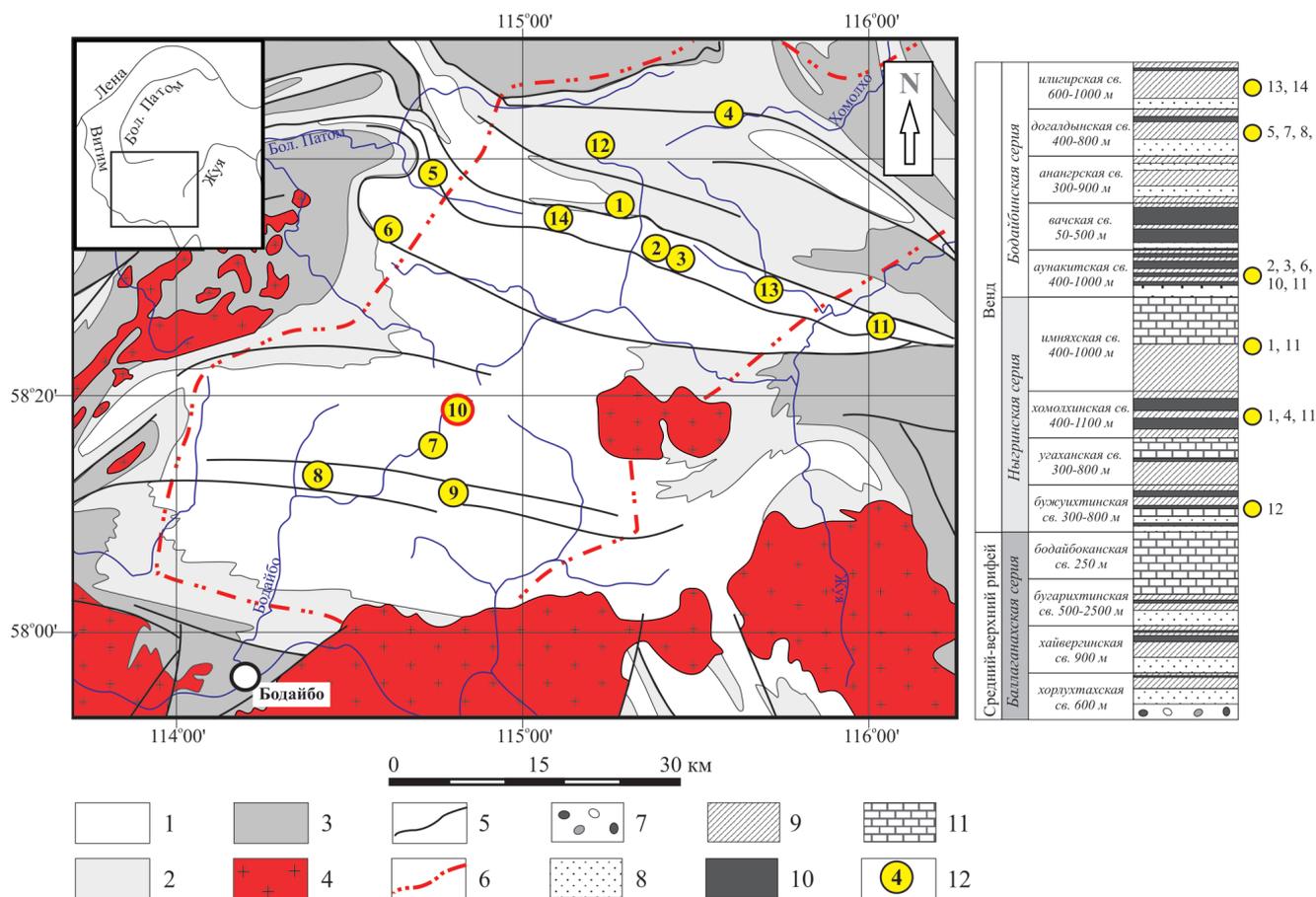


Рис. 1. Геологическое строение Бодайбинского рудного района и стратиграфическая колонка позднего протерозоя патомского комплекса (Иванов, 2014, с упрощениями).

1–3 – рифейско-вендские отложения: 1 – венд, бодайбинская серия, 2 – венд, ныгринская серия, 3 – средний-верхний рифей, баллаганакская серия; 4 – верхнепалеозойские гранитоиды; 5 – разрывные нарушения; 6 – изограда биотита регионального метаморфизма; 7 – конгломераты; 8 – песчаники; 9 – флишевые песчано-сланцевые отложения; 10 – углеродистые сланцы; 11 – известняки и доломиты; 12 – золоторудные месторождения: 1 – Сухой Лог, 2 – Вернинское, 3 – Невское, 4 – Высочайшее, 5 – Ожерелье, 6 – Ыкан, 7 – Догалдынская Жила, 8 – Копыловское, 9 – Кавказ, 10 – Красное, 11 – Светловское, 12 – Верхне-Угаханское, 13 – Атырканское, 14 – Ровнинское.

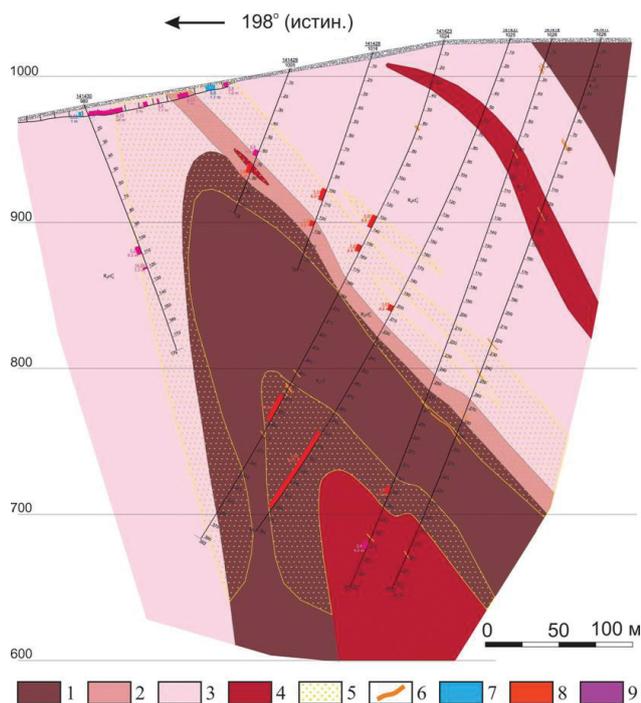
Fig. 1. Geological map and stratigraphic column of the Bodaybo ore region, simplified after Ivanov (2014).

1–3 – Riphean to Vendian sediments: 1 – Vendian Bodaybo Group, 2 – Vendian Nygri Group, 3 – Middle to Upper Riphean Ballaganakh Group; 4 – Late Paleozoic granitic rocks; 5 – faults; 6 – biotite isograde of regional metamorphism; 7 – conglomerates; 8 – sandstones; 9 – flysch sands and shales; 10 – carbonaceous shales; 11 – limestones, dolomites; 12 – gold deposits: 1 – Sukhoi Log, 2 – Verninskoe, 3 – Nevskoe, 4 – Vysochayshee, 5 – Ozherel'e, 6 – Ykan, 7 – Dogaldyn, 8 – Kopylovskoe, 9 – Kavkaz, 10 – Krasnoe, 11 – Svetlovskoe, 12 – Verkhne-Ugakhhan, 13 – Atyrkan, 14 – Rovninskoe.

и иллитом, а также карбонатами сидерит-магнезитового и анкерит-доломитового рядов. Акцессорные минералы – обломочные циркон, турмалин, монацит, ксенотим, рутил, эпидот, новообразованный флоренсит (Паленова, 2015).

Сульфидная минерализация на месторождении образует послынную и рассеянную вкрапленность в углеродисто-глинистых сланцах, песчаниках, алевритовых и кварцевых жилах и кварц-пиритовые прожилки в штокверковых зонах.

Кварцевые жилы представлены 1) мощными (1–8 м) седловидными жилами в замках складок и флексур (тип 1), 2) тонкими (от нескольких миллиметров до 1–5 см) кварц-пиритовыми прожилками, согласными со слоистостью и сланцеватостью (тип 2) и 3) секущими жилами мощностью от 1 см до  $n \cdot 10$  см (тип 3) (рис. 3). Седловидные жилы сложены молочно-белым кварцем, иногда с карбонатами, практически не содержат сульфидной минерализации и не являются золотоносными. Тонкие



пирит-кварцевые прожилки образуют штокверковые руды. Среди секущих наблюдаются кварцевые жилы небольшой мощности (2–10 см) с крупными гнездами галенита, халькопирита, иногда блеклой руды с благороднометальной минерализацией.

Золотое оруденение приурочено к зонам рассеянной вкрапленности пирита, в меньшей степени, кварцевым жилам и прожилкам с сульфидной минерализацией. Второстепенными рудными минералами являются галенит, сфалерит, халькопирит, блеклые руды, ковеллин. Золото образует округлые и более сложной формы включения и вроски в пирите и содержит примесь Ag 10.42–16.07 мас. % (Паленова и др., 2013). Галенит срастается с самородным золотом во включениях в пирите чаще, чем другие второстепенные рудные минералы. Впервые на месторождении в галените обнаружены включения теллуридов, сульфотеллуридов и сульфосолей Ag в сростаниях с электрумом и серебросодержащими сфалеритом и халькопиритом (Паленова и др., 2015). Они встречаются в галенит-кварцевой жиле мощностью 10 см, прорывающей кварцевые песчаники с рассеянной вкрапленностью пирита. Жила расположена в интервале переслаивания песчаников и алевролитов мощностью 26.4 м со средними содержаниями золота 1.13 г/т (рис. 3б). Галенит в жиле образует гнезда ксеноморфных агрегатов размером до 5 см. Золото в сростаниях с галенитом имеет пробность 565–650 и содержит примеси (мас. %) Ag 35.15–42.33 и Cu до 1.16.

Рис. 2. Геологический разрез месторождения Красное (Божко, Кузнецов, 2012ф, с изменениями).

1–4 – метаморфизованные отложения аунакитской свиты: 1 – алевролиты, 2 – песчаники, 3, 4 – переслаивание алевролитов и песчаников: 3 – грубое, 4 – тонкое; 5 – зоны пиритизации; 6 – кварцевые жилы; 7–9 – содержания золота: 7 – <1 г/т, 8 – 1–2 г/т, 9 – >2 г/т.

Fig. 2. Cross-section of the Krasnoe deposit, modified after (Bozhko, Kuznetsov, 2012).

1–4 – metamorphosed Aunakit Formation: 1 – siltstones, 2 – sandstones, 3, 4 – intercalation of siltstones and sandstones: 3 – thin; 4 – thick; 5 – zones of pyritization; 6 – quartz veins; 7–9 – gold contents: 7 – <1 g/t, 8 – 1–2 g/t, 9 – >2 g/t.

## Методика исследования

Для оценки температур минералообразования, солевого состава и солёности растворов были проанализированы флюидные включения (ФВ) в плоско-полированных шлифах кварца. Для исследования использованы образцы из золотоносных послойных и секущих кварцевых жил (жилы типа 2 и 3, соответственно) с содержанием Au 1.13–1.85 г/т в интервале kernового опробования, включающем изученные образцы (данные ООО «Красный»: Божко, Кузнецов, 2012ф) (рис. 3а–в), а также образцы безрудных послойных и седловидных жил (типы 2 и 1, соответственно), в которых содержание золота составляет менее 0.1 г/т (рис. 3г–ж).

Анализ проведен в микротермокамере Linkam TMS-600 с использованием оптического микроскопа Olympus BX 51 и программного обеспечения LinkSystem 32 DV-NC в лаборатории термобарогеохимии ЮУрГУ (г. Миасс). Погрешность измерительной аппаратуры составляет  $\pm 0.1$  °C в интервале от –20 до +80 °C и  $\pm 1$  °C – за пределами этого интервала. Солевой состав растворов оценивался по температурам эвтектик растворов (Davis et al., 1990; Spencer et al., 1990). Температуры гомогенизации ФВ фиксировались в момент растворения газовой вакуоли при нагревании шлифа в микротермокамере. Солёность растворов определена по температурам плавления последних кристаллических фаз во включениях (Vodnar, Vityk, 1994). Дав-

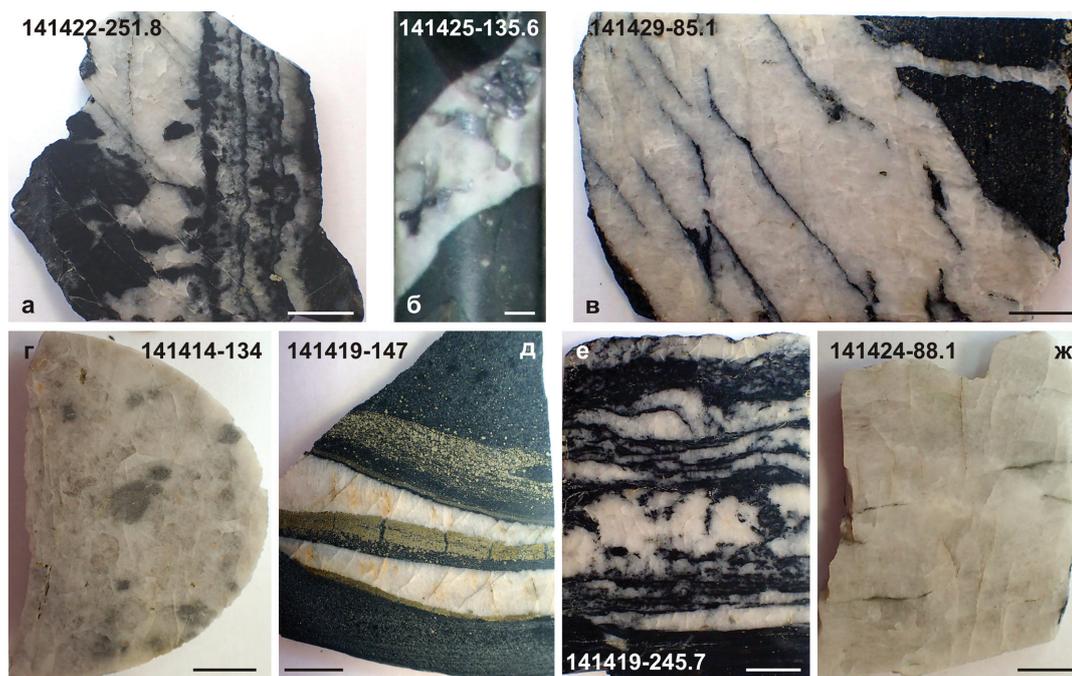


Рис. 3. Кварцевые жилы месторождения Красное: а – прожилки типа 2 с фрагментами вмещающих углеродистых метаалевролитов (содержание Au в керновой пробе интервала 1 м – 1.85 г/т); б – жила типа 3 с галенитом, электрумом и минералами Ag в углеродистом метапесчанике; в – жила типа 2 с фрагментами углеродистых метаалевролитов (содержание Au в керновой пробе интервала 1 м – 1.62 г/т); г – фрагмент безрудной седловидной жилы типа 1; д – безрудные жилы типа 2 в углеродистом сланце с послойной вкрапленностью тонко- и мелкокристаллического пирита; е – безрудные прожилки типа 2 в углеродистом метаалевролите; ж – крупная безрудная седловидная жила типа 1. Номера образцов соответствуют таблицам 1–4.

Длина масштабной линейки 1 см.

Fig. 3. Quartz veins of the Krasnoe deposit: a – type 2 veinlets with fragments of host carbonaceous metasiltstone (Au content of a 1 m core sample is 1.85 g/t); б – type 3 vein with galena, electrum and Ag minerals in carbonaceous metasandstone; в – type 2 vein with fragments of carbonaceous metasiltstone (Au content of a 1 m core sample is 1.62 g/t); г – fragment of barren saddle type 1 vein; д – barren type 2 veins in carbonaceous shale with layered impregnation of fine and crystalline pyrite; е – barren type 2 veinlets in carbon metasiltstone; ж – fragment of large barren saddle type 1 vein.

Numbers correspond to those in Tables 1–4. Scale bar is 1 cm.

ление и плотность флюида рассчитаны в программе Flincor (Brown, 1989). Результаты измерений обработаны в программе Statistica 6.1.

Газовый состав флюида по индивидуальным ФВ определен на рамановском спектрометре Horiba LabRam HR800 Evolution с микроскопом Olympus BX-FM (объектив MPlan N × 100) и He-Ne-лазером (длина волны возбуждения 514 нм), дифракционной решеткой 1800 шт/мм, работающем в режиме конфокальной съемки с пространственным латеральным разрешением ~2 мкм и ~3 мкм глубиной в ЦКП УрО РАН «Геоаналитик» (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург).

Валовый состав газов ФВ проанализирован на газовом хроматографе «Цвет-800» (колонка GS-Q с пиролитической приставкой и форколонкой в ЦКП «Геонаука» (ИГ КНЦ УрО РАН, г. Сыктывкар)). ФВ вскрывались при температуре 500 °С из навески

кварца, отобранного вручную под бинокулярным микроскопом. Хроматографические сигналы обработаны в программе TWS-MaxiChrom. Вероятная относительная погрешность метода составляет 16 %.

Изотопный состав кислорода кварца определен в Аналитическом центре ДВГИ РАН (г. Владивосток, аналитик Т.А. Веливецкая) на изотопном масс-спектрометре Finnigan MAT 253 (Thermo Scientific, Germany) (Паленова, 2015). Изотопный состав кислорода воды в кварце рассчитан по уравнению фракционирования изотопов между кварцем и водой по методике (Clayton et al., 1972) при температуре 300 и 250 °С, что, в среднем, соответствует температурному режиму образования золотоносных и безрудных жил месторождения, соответственно.

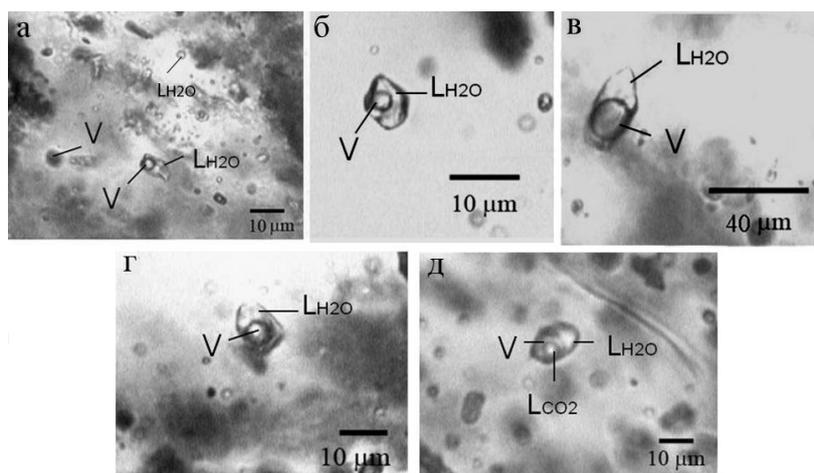


Рис. 4. Типы флюидных включений в кварце месторождения Красное: а – сосуществующие однофазные (V – газ,  $L_{H_2O}$  – водный раствор) и двухфазные флюидные включения; б, г – первичные двухфазные включения; в, д – трехфазные включения с жидкой углекислотой ( $L_{CO_2}$ ).

Fig. 4. Coexisting fluid inclusions in quartz of the Krasnoe deposit: а – coexisting one-phase (V – vapor,  $L_{H_2O}$  – water fluid) and two-phase fluid inclusions; б, г – primary two-phase fluid inclusions; в, д – three-phase fluid inclusions with liquid  $CO_2$  ( $L_{CO_2}$ ).

### Результаты исследований

Флюидные включения в кварце золотоносных и безрудных сульфидно-кварцевых жил представлены двухфазными первичными, первично-вторичными и вторичными вакуолями (Ермаков, 1972; Реддер, 1978). Первичные и первично-вторичные ФВ размером до 20–40 мкм располагаются в центральных частях зерен и имеют сходную удлиненную или изометричную округлую форму, без отростков, иногда с элементами кристаллографических граней. Газовые вакуоли занимают до 20–30 % объема включения (рис. 4). Первично-вторичные ФВ тяготеют к трещинам в кварце, образовавшимся в процессе его отложения. Результаты термобарогеохимических измерений первичных и первично-вторичных включений близки (табл. 1).

В золотоносном кварце обнаружены многочисленные округлые однофазные существенно водные и газовые включения размером до 3–5 мкм, которые образуют незакономерные скопления, ассоциируя с первичными и первично-вторичными ФВ. Кварц также разбит трещинами, которые трассируются двухфазными вторичными ФВ размером до 5 мкм трубчатой формы, часто с отростками. Трехфазные ФВ (водно-солевой раствор + жидкая углекислота + газ) обнаружены только в кварце рудной зоны, имеют размеры 20–25 мкм и изометричную округлую форму.

Температуры эвтектики растворов ФВ в кварце из золотоносных и безрудных жил отлича-

ются. В первых они варьируют от –31 до –36 °С, что позволяет охарактеризовать солевую систему как  $MgCl_2$ -NaCl, а во вторых – от –23 до –26 °С, что указывает на присутствие во флюиде растворенных солей NaCl с возможной примесью KCl.

Соленость растворов ФВ рудных и безрудных жил также отлична. В золотоносном кварце температуры плавления последней кристаллической фазы варьируют от –4 до –7 °С, и соленость составляет 6.3–10.6 мас. % NaCl-экв. с пиком 6.5–8 мас. %. (рис. 5а). В трехфазных ФВ температуры плавления газгидратов составляли 5.5–7 °С, соответственно соленость равна 5.3–8.2 мас. % NaCl-экв. (Darling, 1991). В безрудном кварце при температурах плавления последнего кристалла льда (от –5.5 до –10 °С) соленость растворов в ФВ составила 7.3–13.9 мас. % NaCl-экв. с пиком в интервале 10–12 мас. %.

Температуры гомогенизации ФВ в кварце рудных жил составили 260–330 °С. Большая часть ФВ гомогенизировалась при температурах 300–320 °С (рис. 5б). Гомогенизация ФВ происходит в жидкую фазу. Между значениями температур гомогенизации и солености наблюдается слабая положительная зависимость (рис. 5в). Температуры гомогенизации ФВ в безрудном кварце варьируют от 140 до 280 °С. Гистограмма имеет вид двумодального распределения со слабым пиком 160–180 °С и выраженным – 240–260 °С. Наблюдается слабая обратнопропорциональная зависимость между значениями температуры гомогенизации

Таблица 1

## Результаты термобарогеохимических исследований кварца месторождения Красное

Table 1

## Fluid inclusion data of quartz of the Krasnoe deposit

№ п/п	№ обр.	Тип ФВ	n	T <sub>3</sub> , °C, солевой состав	T <sub>пл. льда</sub> , °C * T <sub>пл. газидрата</sub>	C, мас. % NaCl-экв.	T <sub>гом</sub> , °C
1	141425-135.6	П, ПВ Т	40 10	-31...-33	-4...-7	6-10 5.3-8.2	260-310 311-330
				(NaCl-MgCl <sub>2</sub> )	+5.5...+7*		
2	141422-253	П, ПВ, В	40 13	-30...-33	-4...-5.7	6.3-8.8	300-330 150-165
				(NaCl-MgCl <sub>2</sub> )			
3	141429/84.2	П, ПВ В	30 11	-35...-36	-3.6...-6	5.8-9	270-330 160-174
				(MgCl <sub>2</sub> -NaCl)			
4	141414-130	П, ПВ В	25 11	-22...-23	-7...-8.9	10-12.7	230-280 137-155
				(NaCl±KCl)			
5	141419-145	П, ПВ В	40 15	-21...-24	-6.4...-10	9.7-13	180-260 140-155
				(NaCl±KCl)			
6	141424-86.9	П, ПВ В	15 10	-22...-24	-4.6...-6.3	7.3-9.6	200-230 137-168
				(NaCl±KCl)			
7	141419-244	П, ПВ В	40	-23...-26	-5.7...-8	8.8-11.9	140-190 147-176

*Примечание.* T<sub>3</sub> – температура эвтектики; T<sub>пл. льда</sub> – температура плавления последнего кристалла льда; C – соленость; T<sub>гом</sub> – температура гомогенизации; n – число измерений. Кварц: 1–3 – золотоносный; 4–7 – безрудный. Типы включений: П – первичные, ПВ – первично-вторичные, В – вторичные, Т – трехфазные (с жидкой CO<sub>2</sub>).

*Note.* T<sub>3</sub> – first melting temperature; T<sub>пл. льда</sub> – final melting temperature; C – salinity; T<sub>гом</sub> – homogenization temperature; n – number of measurements. Quartz: 1–3 – auriferous; 4–7 – barren. Fluid inclusion types: П – primary, ПВ – primary-secondary, В – secondary, Т – three-phased (VLL<sub>CO2</sub>).

и солености этих включений. Из-за малых размеров вторичных двухфазных ФВ определены только температуры гомогенизации – 130–180 °C.

Давление флюида определено по трехфазным углекислотным ФВ, ассоциирующим с первичными двухфазными ФВ в золотоносном кварце. Температура плавления углекислотной фазы в них меняется от –56.7 до –57.1 °C, температуры гомогенизации CO<sub>2</sub> в жидкую фазу варьируют от 16.1 до 21.3 °C. Температура полной гомогенизации трехфазных ФВ составляет 311–330 °C, ассоциирующих с ними двухфазных ФВ – 310–320 °C. Плотность CO<sub>2</sub> 0.80–0.85 г/см<sup>3</sup>, молярный объем 57–58 см<sup>3</sup>/моль (Thiery et al., 1994). При этих параметрах рассчитанное давление для T = 300 °C составляет 1.2–1.6 кбар (Brown, 1989).

Для КР спектроскопии были использованы первичные двухфазные ФВ в золотоносном и безрудном кварце размером ~40 мкм округлой и формы «негативного кристалла» (рис. 6). По данным качественного анализа спектров КР установлено, что летучие компоненты флюида представлены CO<sub>2</sub> и N<sub>2</sub>. Согласно расчетам, мольная доля CO<sub>2</sub> в газовой фазе таких ФВ составляет для кварца золотоносных жил 96.9–98.6 мол. %, а безрудных – 88.3–

98.0 мол. % (табл. 2). Согласно работам (Kawakami et al., 2003; Frezzotti et al., 2012), для гомогенных включений с содержанием растворенного газа N<sub>2</sub> (CH<sub>4</sub>) не более 5 % расстояние между линиями ν<sub>1</sub> и 2ν<sub>2</sub> (Δ) в КР спектре молекулы CO<sub>2</sub> пропорционально плотности флюида. В соответствии с этим, плотности флюида в кварце исследуемых золотоносных и безрудных жил сходны.

По данным газовой хроматографии ФВ из монофракций кварца золотоносной галенит-кварцевой жилы, растворы во включениях содержат (г/т) H<sub>2</sub>O (до 300), CO<sub>2</sub> (до 240), N<sub>2</sub> (до 4.4), CH<sub>4</sub> (0.37). Отношение CO<sub>2</sub>/(CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O) составляет 0.39–0.61, CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> – 643–2051; соотношение компонентов в объеме вскрывшихся газов в кварце – H<sub>2</sub>O > CO<sub>2</sub> > N<sub>2</sub> > CH<sub>4</sub>. С целью независимого контроля газово-хроматографическим методом определены валовый состав ФВ и мольная доля компонентов; значения X(CO<sub>2</sub>), рассчитанные по двум независимым методам (КР и газовой хроматографии), в целом, согласуются, за исключением присутствия CH<sub>4</sub>, не обнаруженного КР спектроскопией, поскольку его содержание ниже предела чувствительности рамановского спектрометра (см. табл. 2).

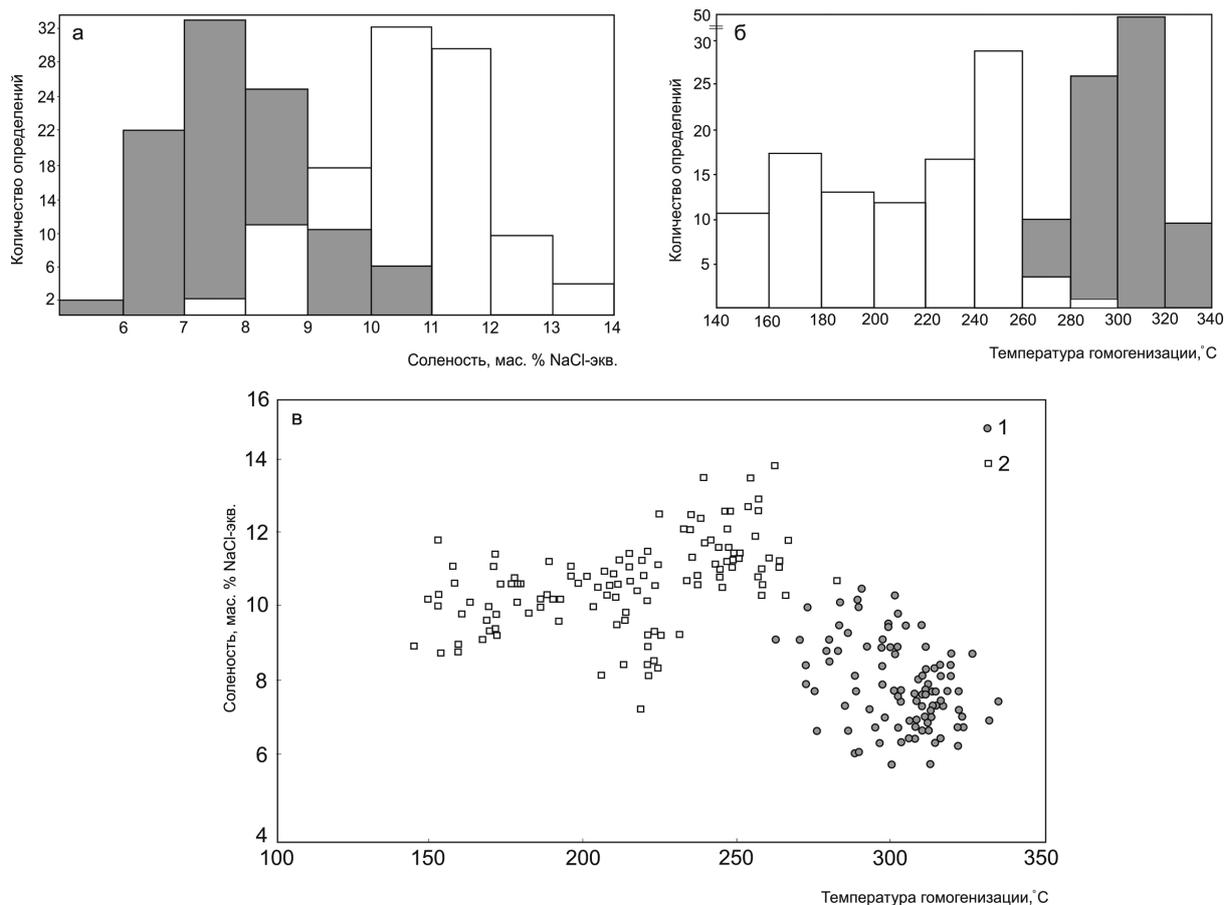


Рис. 5. Результаты исследования флюидных включений в кварце месторождения Красное: а, б – гистограммы солености (а) и температур гомогенизации (б) флюидных включений; в – зависимость между температурой гомогенизации и соленостью растворов включений в кварце.

1 – золотосодержащий кварц; 2 – безрудный кварц.

Fig. 5. Results fluid inclusion study of quartz of the Krasny deposit: a, б – histograms of fluid salinity (a) and homogenization temperatures (б) of fluid inclusions; в – temperature vs. fluid salinity plot.

1 – auriferous veins; 2 – barren quartz.

Таблица 2

Расчетные значения мольной доли компонентов  $X_a$  (мол. %) флюидных включений в кварце месторождения Красное по данным рамановской спектроскопии (РС) и газовой хроматографии (ГХ)

Table 2

Calculated mole fraction  $X_a$  (mol. %) of components of fluid inclusions in quartz of the Krasnoe deposit according to Raman spectroscopy (РС) and gas chromatography (ГХ)

№ п/п	Обр.	РС		ГХ		
		$X_{CO_2} \pm \Delta_{CO_2}$	$X_{N_2} \pm \Delta_{N_2}$	$X_{CO_2}$	$X_{N_2}$	$X_{CH_4}$
1	141425-135.6*	$98.6 \pm 0.6$	$1.4 \pm 0.6$	98.15	1.7	0.045
2	141422-253*	$97.7 \pm 1.0$	$2.3 \pm 1.0$	–	–	–
3	141429-73.95**	$98.3 \pm 0.8$	$1.7 \pm 0.8$	–	–	–
4	141424-86.9**	$97.7 \pm 1.7$	$2.3 \pm 1.7$	–	–	–
5	141414-130**	$96.4 \pm 0.7$	$2.6 \pm 0.7$	–	–	–
6	141422-222**	$98.3 \pm 0.5$	$1.7 \pm 0.5$	–	–	–
7	141419-244**	$85.5 \pm 1.7$	$11.5 \pm 1.7$	–	–	–

Примечание. Здесь и в таблице 3: \* – золотосодержащие кварцевые жилы; \*\* – безрудные кварцевые жилы. Прочерк – не определялось. Погрешность определения  $X_a$  по данным газовой хроматографии составляет 16 %.

Note. Here and Table 3: \* – auriferous quartz veins; \*\* – barren quartz veins. Dash – not analyzed. The measurement error of  $X_a$  according to gas chromatography analysis is 16 %.

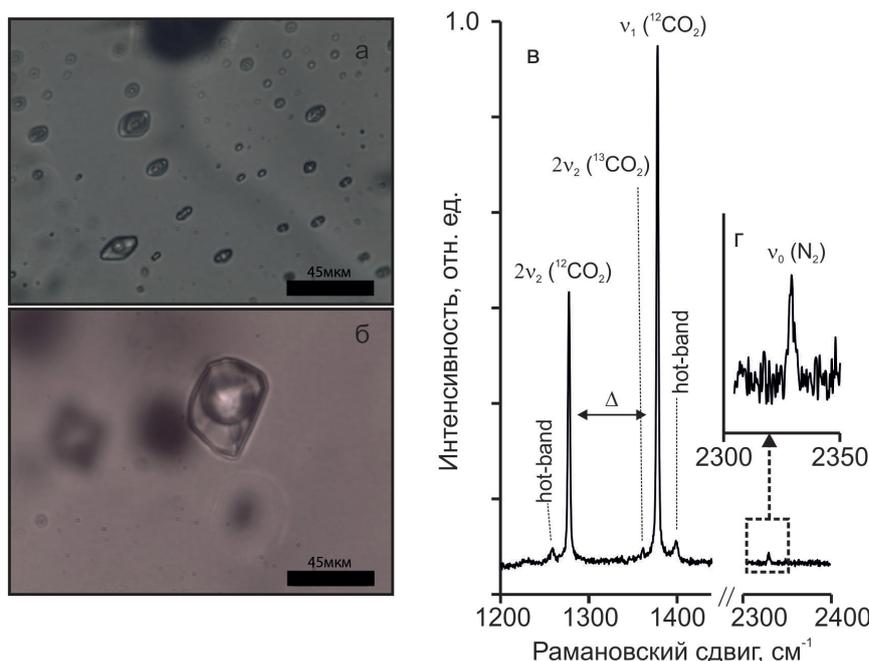


Рис. 6. Первичные двухфазные включения в кварце (а, б) и экспериментальные спектры КР с пиками  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$  (в, г).

Стрелками показаны колебания связей молекул газовой фазы.

Fig. 6. Fluid inclusions in quartz (a, б) and experimental Raman spectra with  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ , and  $\text{CH}_4$  peaks (в, г). The arrows show the bond fluctuations of gas molecules.

Таблица 3

**Изотопный состав кислорода кварца месторождения Красное**

Table 3

**Oxygen isotopic composition ( $\delta\text{O}_{\text{VSMOW}}$ ) of quartz from Krasnoe deposit**

№ п/п	Образец	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ *, ‰
1	141422/251.8*	19.1	12.10
2	141425/135.6*	18.5	11.51
3	141429/85.18*	19.3	12.30
4	141419/147**	19.0	9.92
5	141422/349-349.45**	18.9	9.82

Изотопный состав кислорода кварца из жил месторождения Красное укладывается в узкий диапазон значений (18.5–19.3 ‰), не зависит от содержания Au в жиле (табл. 3) и попадает в интервал, характерный для метаморфических или осадочных пород (рис. 7а) (Паленова, 2015). Эти значения близки данным, полученным для месторождения Сухой Лог, где значения  $\delta^{18}\text{O}$  кварцевых жил составляют 16–18 ‰, что указывает на дегидратационный или метаморфогенный источник флюида (Иконникова и др., 2009; Дубинина и др., 2014). Изотопный состав кислорода воды рассчитывался,

исходя из средних температур образования золотоносных (300 °С) и безрудных (250 °С) жил:  $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$  11.51–12.30 и 9.82–9.92 ‰, соответственно (см. табл. 3). Эти значения характерны для метаморфических вод (рис. 7б).

### Обсуждение и выводы

Как показано в работах (Чугаев и др., 2014; Будяк и др., 2018 и ссылки внутри), приуроченность Красного месторождения к аунакитской свите, которая вмещает также Вернинское месторождение-гигант, дает возможность предполагать перспективы увеличения его запасов, следовательно, изучение условий формирования золото-кварцевых руд Красного месторождения, является актуальным.

Полученные данные показывают, что золотоносные и безрудные кварцевые жилы на месторождении Красное сформировались из различных по солевому составу, температурам и солёности флюидов. Минералообразующие растворы, отложившие золотоносные и безрудные кварцевые жилы, комплексные водно-хлоридные, но отличаются по набору растворенных в них хлоридов: во включениях в кварце рудных жил установлены хлориды Mg и Na, в безрудных жилах – K и Na. Соли Mg в составе

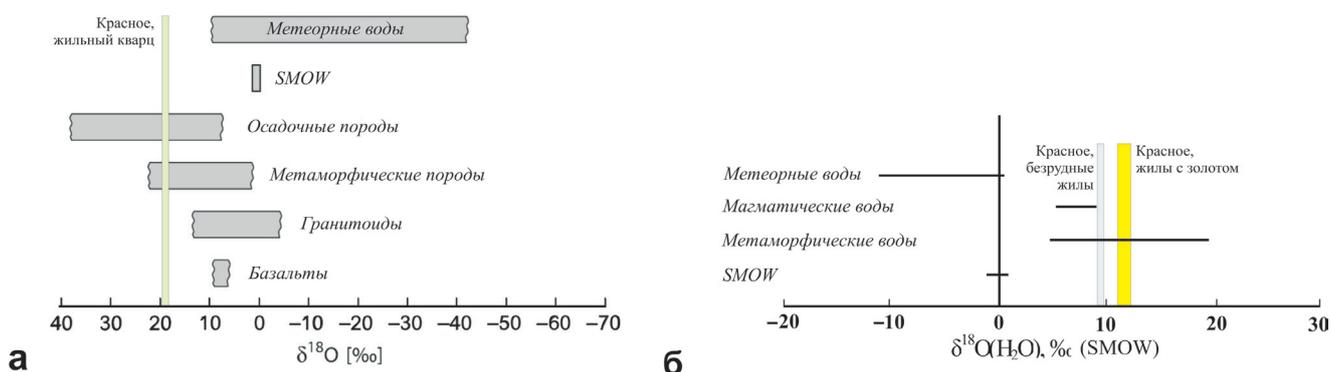


Рис. 7. Изотопный состав кислорода кварца (а) и равновесного флюида (б) месторождения Красное.

Изотопный состав кислорода кварца в базальтах, гранитах, осадочных и метаморфических породах приведен по (Hoefs, 1997), изотопный состав кислорода метеорных, магматических и метаморфических вод – по (Sheppard, 1986).

Fig. 7. Oxygen isotopic composition of quartz (a) and equilibrium fluid (б) for the Krasnoe deposit.

Oxygen isotopic composition of basalts, granites, sedimentary and metamorphic rocks is according J. Hoefs (1997) and oxygen isotopic composition of meteoric, magmatic and metamorphic waters is according S.M.F. Sheppard (1986).

флюида, отложившего золотоносные жилы, могли заимствоваться из вмещающих пород, содержащих железо-магнезиальные карбонаты. Возможно, при понижении температуры флюида, магний мог кристаллизоваться, причем, скорее всего, в виде тех же карбонатов, которые наблюдаются в крупных седловидных кварцевых жилах. Несмотря на низкое содержание  $\text{MgO}$  в породах Красного месторождения (0.17–1.14 мас. %), в единичных пробах оно достигает 2 мас. %. В жилах месторождения Кавказ оно значительно выше – 3.06–6.27 мас. %, Копыловского месторождения – 3.53–4.85 мас. % (Паленова, 2015).

Формирование кварцевых жил с золотом происходило при снижении температур от 330 до 260 °C из растворов с соленостью 6–10 мас. % при давлениях 1.2–1.6 кбар. Минералообразующие растворы содержали  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$  с малым количеством  $\text{CH}_4$ , которые могли высвобождаться при взаимодействии флюид/порода при разрушении вмещающих черных сланцев и, в частности, углеродистого вещества (Bottrell, Miller, 1990; Xu et al., 2011). Это подтверждается также составом углеродистого вещества пород месторождения Красное, в котором присутствуют хлороформенный ( $\text{C} = 74.82\text{--}77.15$ ;  $\text{H} = 9.99\text{--}10.08$ ;  $\text{N} + \text{S} + \text{O} = 12.86\text{--}15.10$ ) и спиртобензольный ( $\text{C} = 63.79\text{--}64.91$ ;  $\text{H} = 7.15\text{--}7.60$ ;  $\text{N} + \text{S} + \text{O} = 22.67\text{--}27.94$ ) битумоиды (Будяк и др., 2018). Ассоциация  $\text{N} + \text{S} + \text{O}$  указывает на их органическое происхождение. Присутствие  $\text{N}$  в рудоносном флюиде могло иметь каталитическое

влияние на степень выщелачивания тяжелых металлов ( $\text{Au}$ ,  $\text{Ag}$ , ЭПГ) из вмещающих пород в процессе метаморфогенно-метасоматических преобразований и их последующего отложения на геохимических барьерах восстановительного характера (Будяк и др., 2018). Сосуществующие однофазные газовые, жидкостные и более концентрированные двухфазные и трехфазные включения свидетельствуют о гетерогенизации флюида (Прокофьев и др., 1994 и ссылки внутри), что может являться причиной осаждения золота (Bowers, 1991).

Соединения углерода в рудообразующем процессе могут формировать металлоорганические соединения, в т.ч. с золотом, либо служить сорбционным барьером (Юдович, Кетрис, 1994). Кроме того, углеродистое вещество чувствительно к процессам, протекающим при повышении температуры и давления, и может являться индикатором условий метаморфических преобразований.

Формирование безрудных кварцевых жил происходило при более низких температурах от 280 до 140 °C. Соленость растворов несколько выше – до 7–14 мас. %. Углекислота во флюидных включениях также преобладает. Но ФВ в кварце безрудных жил содержат меньше  $\text{CO}_2$  и воды, чем рудные жилы (газонасыщенность 115 против 507 г/т, соответственно). Повышенная соленость и пониженные количества летучих компонентов в безрудном гидротермальном растворе могут быть связаны со смешением с флюидами метаморфических пород, часто сопровождающимся реакциями дегидрата-

ции флюида (Shepherd et al., 1991; Прокофьев и др., 1994).

Результаты наших исследований были сопоставлены с аналогичными данными для месторождения Сухой Лог. РТ условия образования безрудных кварцевых жил и кварц-сульфидных прожилков месторождения Сухой Лог составили: 185–385 °С, 130–2450 бар и 130–385 °С, 190–2290 бар, соответственно (Distler et al., 2004). Согласно (Гаврилов, Кряжев, 2008), образование жильного рудного и безрудного кварца происходило при температуре 300–350 °С по первичным и 190–290 °С по вторичным ФВ при 0.8–1 кбар. Сходные с полученными нами температуры и давления получены В.Л. Русиновым с соавторами (2008) для месторождений Ленского золоторудного района: 200–355 °С и 0.8–1 кбар. В солевом составе жидкой фазы участвуют ионы  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{Cl}^-$  (Гаврилов, Кряжев, 2008; Русинов и др., 2008). Газовая фаза состоит из  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ , и  $\text{CH}_4$  (Distler et al., 2004; Гаврилов, Кряжев, 2008; Русинов и др., 2008) с резким преобладанием  $\text{CO}_2$  и равными количествами  $\text{N}_2$  и  $\text{CH}_4$ . Из сравнения видно, что температуры образования жил и прожилков и давления, зафиксированные на месторождения Сухой Лог, выше таковых месторождения Красное.

Согласно геологическим наблюдениям и нашим данным по ФВ, образование кварцевых жил на месторождении Красное происходило последовательно. Предположительно, золотоносные и безрудные жилы образовались из одного исходного флюида метаморфогенного происхождения, о чем свидетельствует близкий изотопный состав кислорода кварца и равновесного флюида, а также сходный газовый состав флюидных включений. Однако отложение золотоносных жил происходило раньше при более высоких температурах, тогда как безрудный кварц формировался позже при понижении температуры и в условиях пластичных и хрупких деформаций пород, о чем свидетельствует локализация безрудных жил в шарнирах складок и их секущая позиция. Такая же закономерность – понижение температур гомогенизации от золотоносных (380–447 °С) к безрудным (154–87 °С) жилам отмечалась и для месторождения Чертово Корыто, расположенного в пределах Тонодского поднятия Ленской провинции и приуроченного к раннепротерозойским углеродисто-терригенным породам михайловской свиты (Тарасова, Будяк, 2017). Для этой свиты установлено два этапа метаморфизма: высокотемпературный до эпидот-амфи-

болитовой фации и ретроградный зеленосланцевой фации (Yudovskaya et al., 2016). Возможно, именно этим обусловлены более высокие температуры образования золотоносных жил на месторождении Чертово Корыто. Также для него установлено уменьшение доли углекислоты от жил с высоким содержанием золота до безрудных (от примерно 100 % до примерно ½ части).

*Работа поддержана РФФИ (проект № 16-05-00580). Газовохроматографические исследования поддержаны программой УрО РАН № 18-5-5-44.*

## Литература

**Божко Е.Н., Кузнецов А.Ю.** (2012ф) Информационный отчет по результатам поисково-оценочных работ на рудопроявлении «Красное» в 2011–2012 гг. (лиц. № ИРК 2804 БР). Бодайбо, 85 с.

**Будяк А.Е., Тарасова Ю.И., Чугаев А.В.** (2018) Структурная и геохимическая характеристика месторождения Красное (Байкало-Патомское нагорье). *Металлогения древних и современных океанов–2018. Вулканизм и рудообразование*, Миасс, ИМин УрО РАН, 199–202.

**Буряк В.А.** (1982) *Метаморфизм и рудообразование*. М., Недра, 256 с.

**Буряк В.А., Хмелевская Н.М.** (1997) Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира (генезис, закономерности размещения оруденения, критерии прогнозирования). Владивосток: Дальнаука, 156 с.

**Бухаров А.А., Халилов В.А., Страхова Т.М., Черников В.В.** (1992) Геология Байкало-Патомского нагорья по новым данным U-Pb датирования акцессорного циркона. *Геология и геофизика*, **33**(12), 29–39.

**Виноградов В.И., Пичугин Л.П., Быховер В.Н.** (1996) Изотопные признаки и время эпигенетических преобразований верхнедокембрийских отложений Уринского поднятия. *Литология и полезные ископаемые*, **1**, 68–78.

**Гаврилов А.М., Кряжев С.Г.** (2008) Минералогическо-геохимические особенности руд месторождения Сухой Лог. *Разведка и охрана недр*, **8**, 3–16.

**Дубинина Е.О., Чугаев А.В., Иконникова Т.А., Авдеев А.С., Якушев А.И.** (2014) Источники вещества и флюидный режим формирования кварц-карбонатных жил на месторождении золота Сухой Лог, Байкало-Патомское нагорье. *Петрология*, **22**(4), 347–379.

**Ермаков Н.П.** (1972) *Геохимические системы включений в минералах*. М.: Недра, 376 с.

**Иванов А.И.** (2014) *Золото Байкало-Патома (геология, оруденение, перспективы)* М.: ЦНИГРИ, 215 с.

**Иконникова Т.А., Дубинина Е.О., Сароян М.Р., Чугаев А.В.** (2009) Изотопный состав кислорода жиль-

ного кварца и вмещающих пород на месторождении Сухой Лог (Россия). *Геология рудных месторождений*, **51**(6), 560–567.

**Кряжев С.Г., Устинов В.И., Гриненко В.А.** (2009) Особенности флюидного режима формирования золоторудного месторождения Сухой Лог по изотопно-геохимическим данным. *Геохимия*, **10**, 1108–1118.

**Кузьменко А.А.** (2013) Золотое оруденение в пределах Артемовского рудного узла на примере месторождения «Красное» (Бодайбинский район, Восточная Сибирь). *III Всероссийская молодежная школа «Новое в познании процессов рудообразования»*. М.: ИГЕМ РАН, 146–150.

**Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю., Мартыненко В.Г., Верховин А.В.** (2011) Петролого-геохимические черты окolorудного метасоматизма в золоторудном месторождении Сухой Лог (Ленский район). Ч.1. Обзор петролого-геохимических исследований рудовмещающего субстрата. *Известия Томского политехнического университета*, **319**(1), 35–41.

**Лаверов Н.П., Чернышев И.В., Чугаев А.В., Барилова Э.Д., Гольцман Ю.В., Дистлер В.В., Юдовская М.А.** (2007) Этапы формирования крупномасштабной благороднометальной минерализации месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь): результаты изотопно-геохронологического изучения. *Доклады академии наук*, **415**(2), 236–241.

**Мигачев И.Ф., Карпенко И.А., Иванов А.И.** (2008) Золоторудное месторождение Сухой Лог – переоценка и оценка прогноза рудного поля и района. *Отчетственная геология*, **2**, 55–67.

**Немеров В.К.** (1989) Геохимическая специализация позднекембрийских черносланцевых толщ Байкало-Патомского нагорья. *Автореф. дис. ... к.г.-м.н.* Иркутск, ИГХ СО АН СССР, 19 с.

**Паленова Е.Е.** (2015) Минералогия месторождений золота Копыловское, Кавказ, Красное (Артемовский рудный узел, Бодайбинский район). *Автореф. дис. ... к.г.-м.н.* М., ИГЕМ РАН, 24 с.

**Паленова Е.Е., Белогуб Е.В., Новоселов К.А., Заботина М.В.** (2013) Минералого-геохимическая характеристика углеродистых толщ золоторудных объектов Артемовского узла (Бодайбинский район). *Известия СО РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений*, **43**(2), 29–36.

**Паленова Е.Е., Блинов И.А., Заботина М.В.** (2015) Минералы серебра в кварцевых жилах рудопроявления золота Красное (Бодайбинский район). *Минералогия*, **2**, 9–17.

**Прокофьев В.Ю., Афанасьева З.Б., Иванова Г.Ф., Буарон М.К., Мариньяк Х.** (1994) Исследование флюидных включений в минералах Олимпиадинского Au-(Sb-W) месторождения (Енисейский край). *Геохимия*, **7**, 1012–1029.

**Реддер Э.** (1978) Флюидные включения в минералах. М., Мир, 360 с.

**Рундквист И.К., Бобров В.А., Смирнова Т.Н.** (1992) Этапы формирования Бодайбинского золоторудного района. *Геология рудных месторождений*, **6**, 3–15.

**Русинов В.Л., Русинова О.В., Кряжев С.Г., Щегольков Ю.В., Алышева Э.И., Борисовский С.Е.** (2008) Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе. *Геология рудных месторождений*, **50**(1), 3–46.

**Тарасова Ю.И., Будяк А.Е.** (2017) Параметры рудоформирующего флюида месторождения Чертово Корыто. *Основные проблемы в учении об эндогенных рудных месторождениях: новые горизонты. Мат. Всерос. конф.* ИГЕМ РАН, 231–234.

**Чугаев А.В., Плотинская О.Ю., Чернышев И.В., Котов А.А.** (2014) Неоднородность изотопного состава Pb в сульфидах различных парагенетических ассоциаций на золоторудном месторождении Вернинское (Байкало-Патомское нагорье, Россия). *Доклады академии наук*, **457**(3), 337–342.

**Шер С.Д.** (1974) Металлогения золота. М.: Недра, 256 с.

**Юдович Я.Э., Кетрис М.П.** (1994) Геохимия черных сланцев. Л., Наука, 272 с.

**Юдовская М.А., Дистлер В.В., Родионов Н.В., Мохов А.В., Антонов А.В., Сергеев С.А.** (2011) Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении Сухой Лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов. *Геология рудных месторождений*, **53**(1), 32–64.

**Bodnar R.J., Vityk M.O.** (1994) Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions. *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*, 117–130.

**Bottrell S.H., Miller M.F.** (1990) The geochemical behavior of nitrogen compounds during the formation of black shale hosted quartz-vein gold deposits, north Wales. *Applied Geochemistry*, **5**, 289–296.

**Bowers T.S.** (1991) The deposition of gold and other metals: pressure-induced fluid immiscibility and associated stable isotope signatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **55**, 2417–2434.

**Brown P.E.** (1989) FLINCOR: a new microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data. *American Mineralogist*, **74**, 1390–1393.

**Clayton R.N., O'Neil J.R., Mayeda T.** (1972) Oxygen isotope exchange between quartz and water. *Journal of Geophysical Researches*, **77**, 3057–3067.

**Darling R.S.** (1991) An extended equation to calculate NaCl contents from final clathrate melting temperatures in H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl fluid inclusions: Implications for P-T isochore location. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **55**, 3869–3871.

**Davis D.W., Lowenstein T.K., Spenser R.J.** (1990) Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl-H<sub>2</sub>O, NaCl-

KCl-H<sub>2</sub>O, NaCl-MgCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O and CaCl<sub>2</sub>-NaCl-H<sub>2</sub>O. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **54**(3), 591–601.

**Distler V.V., Mitrofanov G.L., Nemerov V.K., Kovalenker V.A., Mokhov A.V., Semeikina L.K., Yudovskaya M.A.** (1996) Modes of occurrence of the platinum group elements and their origin in the Sukhoi Log gold deposit (Russia). *Geology of Ore Deposits*, **38**(6), 413–428.

**Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokofiev V.Yu., Lishnevski E.N.** (2004) Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. *Ore Geology Reviews*, **24**, 7–44.

**Frezzotti M.L., Tecce F., Casagl A.** (2012) Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, **112**, 1–20.

**Hoefs J.** (1997) Stable Isotope Geochemistry. Springer, 286 p.

**Kawakami Y., Yamamoto J., Kagi H.** (2003) Micro-Raman Densimeter for CO<sub>2</sub> Inclusions in Mantle-Derived Minerals. *Applied Spectroscopy*, **57**(11), 1333–1339.

**Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevsky L., Chang Z.** (2007) Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Goldfield, Russia. *Economic Geology*, **102**, 1233–1267.

**Meffre S., Large R.R., Scott R., Woodhead J., Chang Z., Gilbert S.E., Danyushevsky L.V., Maslennikov V., Hergt J.M.** (2008) Age and pyrite Pb isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **72**, 2377–2391.

**Palenova E.E., Belogub E.V., Plotinskaya O.Yu., Novoselov K.A., Maslennikov V.V., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Kuzmenko A.A., Griboedova I.G.** (2015) Chemical evolution of pyrite at the Kopylovskoe and Kavkaz black shale-hosted gold deposits, Bodaibo district, Russia: evidence from EPMA and LA-ICP-MS data. *Geology of Ore Deposits*, **57**, 64–84.

**Rakovan J., Lüders V., Massanek A., Nolze G.** (2017) Gold crystals from the Lena goldfields, Bodaibo area, eastern Siberia, Russia: exceptional hoppers octahedra and pseudomorphs after pyrite. *Rocks & Minerals*, **92**(5), 410–425.

**Sheppard S.M.F.** (1986) Characterization and isotopic variations in natural waters. In: *Stable Isotopes in High Temperature Geological Processes. Reviews in Mineralogy*, **16**, 165–183.

**Shepherd T., Bottrell S.H., Miller M.F.** (1991) Fluid inclusion volatiles as an exploration guide to black shale-hosted gold deposits, Dolgellau gold belt, North Wales, UK. *Journal of Geochemical Exploration*, **42**(1), 5–24.

**Spenser R.J., Moller N., Weare J.N.** (1990) The prediction of mineral solubilities in mineral waters: a chemical equilibrium model for the Na-K-Ca-Mg-Cl-SO<sub>4</sub> system at temperatures below 25°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **54**(3), 575–590.

**Thiery R., Vidal J., Dubessy J.** (1994) Phase equilibria modeling applied to fluid inclusions: liquid vapor equilibria

and calculations of the molar volume in the CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub> system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **58**, 1073–1082.

**Xu J., Hart C.J., Wang L., Chu H., Lin L., Wei H.** (2011) Carbonic fluid overprints in volcanogenic massive sulfide deposits: examples from The Kelan volcanosedimentary basin, Altaides, China. *Economic Geology*, **106**, 145–158.

**Yakubchuk A., Stein H., Wilde A.** (2014) Results of pilot Re-Os dating of sulfides from the Sukhoi Log and Olympiada orogenic gold deposits, Russia. *Ore Geology Reviews*, **56**, 21–28.

**Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akinfiyev N.N.** (2016) Gold mineralization and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits. *Geoscience Frontiers*, **7**(3), 453–481.

## References

**Bodnar R.J., Vityk M.O.** (1994) Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions. *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*, 117–130.

**Bottrell S.H., Miller M.F.** (1990) The geochemical behavior of nitrogen compounds during the formation of black shale hosted quartz-vein gold deposits, north Wales. *Applied Geochemistry*, **5**, 289–296.

**Bozhko E.N., Kuznetsov A.Yu.** (2012f) An informational report about the results of prospecting and evaluation of Krasnoe deposit in 2011–2012 (lic. № ИРК 2804 БР). Bodaybo, 85 p.

**Budyak A.E., Tarasova Yu.I., Chugaev A.V.** (2018) [Structural and geochemical characteristics of Krasnoe deposit (Baikal-Patom)]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov «Vulcanizm i rudoobrazovaniye» [Metallogeny of ancient and modern oceans. Volcanism and ore formation]*, 199–202.

**Buryak V.A.** (1982) Metamorphism and ore formation. M.: Nedra, 256 p.

**Buryak V.A., Khmelevskaya N.M.** (1997) Sukhoi Log is one of the largest gold deposits of the world (genesis, ore location, and criteria of prognosis). Vladivostok: Dalnauka, 156 p.

**Bukharov A.A., Khalilov V.A., Strakhova T.M., Chernikov V.V.** (1992) Geology of Baikal-Patom Highlands according to new data of U-Pb dating of accessory zircon. *Russian Geology and Geophysics*, **33**(12), 29–39.

**Bowers T.S.** (1991) The deposition of gold and other metals: pressure-induced fluid immiscibility and associated stable isotope signatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **55**, 2417–2434.

**Brown P.E.** (1989) FLINCOR: a new microcomputer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data. *American Mineralogist*, **74**, 1390–1393.

**Burke E.A.J.** (2001) Raman microspectrometry of fluid inclusions. *Lithos*, **55**, 139–158.

- Clayton R.N., O'Neil J.R., Mayeda T.** (1972) Oxygen isotope exchange between quartz and water. *Journal of Geophysical Researches*, **77**, 3057–3067.
- Chugaev A.V., Plotinskaya O.Yu., Chernyshev I.V., Kotov A.A.** (2014) Lead isotope heterogeneity in sulfides from different assemblages at the Verninskoe gold deposit (Baikal-Patom Highland, Russia). *Doklady Earth Sciences*, **457** (3), 337–342.
- Darling R.S.** (1991) An extended equation to calculate NaCl contents from final clathrate melting temperatures in H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl fluid inclusions: Implications for P-T-isochore location. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **55**, 3869–3871.
- Davis D.W., Lowenstein T.K., Spenser R.J.** (1990) Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl-H<sub>2</sub>O, NaCl-KCl-H<sub>2</sub>O, NaCl-MgCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O and CaCl<sub>2</sub>-NaCl-H<sub>2</sub>O. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **54**(3), 591–601.
- Distler V.V., Mitrofanov G.L., Nemerov V.K., Kovalenker V.A., Mokhov A.V., Semeikina L.K., Yudovskaya, M.A.** (1996) Modes of occurrence of the platinum group elements and their origin in the Sukhoi Log gold deposit (Russia). *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*, **38** (6), 413–428. (in Russian)
- Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokofiev V.Yu., Lishnevski E.N.** (2004) Geology, composition and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. *Ore Geology Reviews*, **24**, 7–44.
- Dubinina E.O., Chugaev A.V., Ikonnikova T.A., Avdeenko A.S., Yakushev A.I.** (2014) Sources and fluid regime of quartz-carbonate veins at the Sukhoi Log gold deposit, Baikal-Patom Highland. *Petrology*, **22**(4), 329–358.
- Ermakov N.P.** (1972) [Geochemical systems of fluid inclusions in minerals]. Moskva, Nedra, 376 p. (in Russian)
- Frezzotti M.L., Tecce F., Casagli A.** (2012) Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, **112**, 1–20.
- Gavrilov A.M., Kryazhev S.G.** (2008) [Mineralogical and geochemical features of ores from Sukhoi Log deposit]. *Razvedka i ohrana nedr, [Prospect and protection of mineral resources]*. **8**, 3–16. (in Russian)
- Hoefs J.** (1997) Stable Isotope Geochemistry. Springer, 286 p.
- Ikonnikova T.A., Dubinina E.O., Saroyan M.R., Chugaev A.V.** (2009) Oxygen isotopic composition of quartz and host rocks at Sukhoi Log deposit, Russia. *Geology of Ore Deposits*, **51**(6), 505–512.
- Ivanov A.I.** (2014) Gold of Baikal-patom (Geology, Mineralization, Perspectives). Moskva, TSNIIGRI, 215 p. (in Russian).
- Kawakami Y., Yamamoto J., Kagi H.** (2003) Micro-Raman Densimeter for CO<sub>2</sub> Inclusions in Mantle-Derived Minerals. *Applied Spectroscopy*, **57**(11), 1333–1339.
- Kryazhev S.G., Ustinov V.I., Grinenko V.A.** (2009) Fluid regime at the Sukhoi Log gold deposit: isotopic evidence. *Geochemistry International*, **47**(10), 1041–1049.
- Kucherenko I.V., Gavrilov P.Yu., Martinenko V.G., Verkhsosin A.V.** (2011) [Petrological and geochemical features of near-ore metasomatism at Sukhoi Log gold deposit. Part. 1. The overview of petrological and geochemical study of host rocks]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University]*. **319**(1), 35–41. (in Russian)
- Kuzmenko A.A.** (2013) [Gold mineralization within the Artemovsk ore cluster on the example of the Krasnoe deposit (Bodaybo region, Eastern Siberia)]. *III Vseros. molodyozhn. shkola «Novoe v poznanii processov rudoobrazovaniya» [III All-Russian Youth School «New knowledge in ore formation processes»]*. Moskva, IGEM RAN, 146–150. (in Russian)
- Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., Danyushevsky L., Chang Z.** (2007) Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Goldfield, Russia. *Economic Geology*, **102**, 1233–1267.
- Laverov N.P., Chernyshev I.V., Chugaev A.V., Bairova E.D., Gol'tsman Y.V., Distler V.V., Yudovskaya M.A.** (2007) Formation stages of the large-scale noble metal mineralization in the Sukhoi Log deposit, East Siberia: results of isotope-geochronological study. *Doklady Earth Sciences*, **415**(1), 810–814.
- Meffre S., Large R.R., Scott R., Woodhead J., Chang Z., Gilbert S.E., Danyushevsky L.V., Maslennikov V., Hergt J.M.** (2008) Age and pyrite Pb isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **72**, 2377–2391.
- Migachev I.F., Karpenko I.A., Ivanov A.I.** (2008). [The Sukhoi Log gold deposit: reappraisal and estimation of forecasting of orefield and district]. *Otechestvennaya Geologiya, [National Geology]*. **2**, 55–67 (in Russian)
- Nemerov V.K.** (1989). [Geochemical specialization of Late Precambrian black shales of the Baikal-Patom Highland]. [PhD thesis]. Irkutsk, IGH SO AN SSSR, 19 p. (in Russian)
- Palenova E.E.** (2015) [Mineralogy of the Kopylovskoe, Kavkaz, Krasnoe gold deposits (Artemovsk ore cluster, Bodaybo region)]. [PhD thesis]. Moskva, IGEM RAN, 24 p. (in Russian)
- Palenova E.E., Belogub E.V., Plotinskaya O.Yu., Novoselov K.A., Maslennikov V.V., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Kuzmenko A.A., Griboedova I.G.** (2015) Chemical evolution of pyrite at the Kopylovskoe and Kavkaz black shale-hosted gold deposits, Bodaybo district, Russia: evidence from EPMA and LA-ICP-MS data. *Geology of Ore Deposits*, **57**(1), 64–84.
- Palenova E.E., Belogub E.V., Novoselov K.A., Zabolotina M.V.** (2013) [Mineralogical and geochemical characteristics of carbonaceous strata of gold-bearing deposits at Artemovsk ore cluster (Bodaybo region)]. *Izvestiya SO RAEN. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdeniy, mestorozhdeniy, [News of SB RANS. Geology, prospecting and exploration of ore deposits]*. **43**(2), 29–36. (in Russian)

- Palenova E.E., Blinov I.A., Zabolina M.V.** (2015) [Silver minerals from quartz veins of Krasnoe gold deposit, Bodaybo region]. *Mineralogiya, [Mineralogy]*, 2, 9–17. (in Russian)
- Prokofiev V.Yu., Afanasieva Z.B., Ivanova G.F., Boiron M.C., Marignac Ch.** (1994) [Study of fluid inclusions in minerals of the Olympiandinskoe Au-(Sb-W) deposit (Yenisey Ridge)]. *Geokhimiya, [Geochemistry]*, 7, 1012–1029. (in Russian)
- Rakovan J., Lüders V., Massanek A., Nolze G.** (2017) Gold crystals from the Lena goldfields, Bodaibo area, eastern Siberia, Russia: exceptional hoppers octahedra and pseudomorphs after pyrite. *Rocks&Minerals*, 92(5), 410–425.
- Redder E.** (1978) Fluid inclusions in minerals. Moskva, Mir, 360 p.
- Rundqvist I.K., Bobrov V.A., Smirnova T.N., Smirnov M.Y., Danilova M.Y., Ascheulov A.A.** (1992) Stages of formation of the Bodaibo Ore District. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy, [Geology of Ore Deposits]* 34, 3–15 (in Russian).
- Rusinov V.L., Borisovsky S.E., Rusinova O.V., Kryazhev S.G., Shchegol'kov Yu.V., Alysheva E.I.** (2008) Wall-rock metasomatism of carbonaceous terrigenous rocks in the Lena gold district. *Geology of Ore Deposits*, 50(1), 1–40.
- Sheppard S.M.F.** (1986) Characterization and isotopic variations in natural waters. In: *Stable Isotopes in High Temperature Geological Processes. Reviews in Mineralogy*, 16, 165–183.
- Shepherd T., Bottrell S.H., Miller M.F.** (1991) Fluid inclusion volatiles as an exploration guide to black shale-hosted gold deposits, Dolgellau gold belt, North Wales, UK. *Journal of Geochemical Exploration*, 42(1), 5–24.
- Sher S.D.** (1974) [Metallogeny of Gold]. Moskva, Nedra, 256 p. (in Russian)
- Spenser R.J., Moller N., Weare J.N.** (1990) The prediction of mineral solubilities in mineral waters: a chemical equilibrium model for the Na-K-Ca-Mg-Cl-SO<sub>4</sub> system at temperatures below 25 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(3), 575–590.
- Tarasova Yu.I., Budyak A.E.** (2017) [The parameters of ore-forming fluid of Chertovo Koryto deposit]. *Mat. Vses. ros. konf. Osnovnye problemy v uchenii ob ehndogennykh rudnykh mestorozhdeniyakh: novye gorizonty. [Main problems in study of endogenic ore deposits: new perspectives. All-Russian Conference]* IGEM RAN, 231–234. (in Russian)
- Thiery R., Vidal J., Dubessy J.** (1994) Phase equilibria modeling applied to fluid inclusions: liquid vapor equilibria and calculations of the molar volume in the CO<sub>2</sub>-CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub> system. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 1073–1082.
- Vinogradov V.I., Pichugin L.P., Bykhover V.N.** (1996) [Isotopic features and timing of epigenetical transformations of Late Cambrian rocks of Urinsky Highlands]. *Litologiya i poleznye iscopaemiye [Lithology and Mineral Resources]*, 1, 68–78.
- Xu J., Hart C.J., Wang L., Chu H., Lin L., Wei H.** (2011) Carbonic fluid overprints in volcanogenic massive sulfide deposits: examples from The Kelan volcanosedimentary basin, Altaides, China. *Economic Geology*, 106, 145–158.
- Yakubchuk A., Stein H., Wilde A.** (2014) Results of pilot Re-Os dating of sulfides from the Sukhoi Log and Olympiada orogenic gold deposits, Russia. *Ore Geology Reviews*, 56, 21–28.
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P.** (1994) [Geochemistry of black shales]. Leningrad, Nauka, 272 p. (in Russian)
- Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akinfiyev N.N.** (2016) Gold mineralization and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits. *Geoscience Frontiers*, 7(3), 453–481.
- Yudovskaya M.A., Distler V.V., Mokhov A.V., Rodionov N.V., Antonov A.V., Sergeev S.A.** (2011) Relationship between metamorphism and ore formation at the Sukhoi Log gold deposit hosted in black slates from the data of U-Th-Pb isotopic SHRIMP-dating of accessory minerals. *Geology of Ore Deposits*, 53(1), 27–57.

Статья поступила в редакцию 16 января 2019 г.