

РУДНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 548.4:553.21

РУДОНОСНЫЕ ФЛЮИДЫ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЭЛЬДОРАДО
(Енисейский край, Россия)

Н.А. Гибшер, А.А. Томиленко, А.М. Сазонов, Т.А. Бульбак, М.О. Хоменко,
М.А. Рябуха, Е.О. Шапаренко, С.А. Сильянов*, Н.А. Некрасова*

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

* Институт горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета,
660041, Красноярск, просп. Свободы, 79, Россия

Месторождение Эльдorado золото-кварцевой малосульфидной формации с запасами золота более 60 т локализовано в зоне влияния Ишимбинского глубинного разлома на Енисейском кряже. Месторождение залегает в породах сухопитской серии рифея, метаморфизованных в условиях эпидот-амфиболитовой фации. Рудные тела обособлены в четырех субпараллельных зонах интенсивной трещиноватости, где проявлен локальный динамотермальный метаморфизм, представлены сульфидизированными сланцами с жилами, сложенными двумя разновидностями кварца — серым, «пропыленным» графитом, и молочно-белым. В золотоносных телах преобладает серый кварц, углеродистое вещество в котором (по данным рамановской спектроскопии) представлено графитом и аморфным углеродом. Выявлена положительная корреляция между содержанием золота и аморфного углерода в сером кварце месторождения Эльдorado. Методами термобарометрии, газовой хроматографии, газовой хромато-масс-спектрометрии и рамановской спектроскопии изучены флюидные включения в сульфидах, карбонатах, сером и белом кварце. Установлено, что в формировании золоторудных тел месторождения принимали участие гетерогенные, водно-углекисло-углеводородные, восстановленные флюиды в интервале температур от 180 до 490 °С, солености от 9 до 22 мас. % NaCl-экв., сопровождавшихся вариациями флюидного давления от 0.1 до 2.3 кбар. Наличие мантийного (³He) гелия до 11 % во флюидных включениях кварца и изотопов серы ($\delta^{34}\text{S}$) сульфидов в интервале от 7.1 до 17.4 ‰ указывает на глубинные очаги генерации металлоносных флюидов, поднимавшихся по зонам тектонического расщепления, где происходило «кипение» флюида. При этих процессах разрушались металлоносные серо- и азотсодержащие углеводородные соединения: кристаллизовались сульфиды, золото и тонкодисперсные выделения графита и аморфного углерода, последние придали кварцу серый цвет. Незолотоносные кварцевые жилы, сложенные молочно-белым кварцем, сформированы окисленными, существенно водными, гомогенными флюидами соленостью ниже 15 мас. % NaCl-экв. в интервале температур 150—350 °С. На золотоносные кварцевые жилы накладывались высокосолёные (> 30 мас. % NaCl-экв.) хлоридные Na-Ca состава флюиды при температурах 150—260 °С, являющиеся продуцентами нижних горизонтов гидротермально-гранитоидной колонны. Выявлена возрастная близость золотого оруденения (795—710 млн лет), локального динамотермального метаморфизма (836—745 млн лет) и внедрения Каламинского полифазного массива (880—752 млн лет).

Кварц, золото, рудообразующий флюид, углеводороды, $\delta^{34}\text{S}$, ³He/⁴He, Ar-Ar возраст.

ORE-BEARING FLUIDS OF THE ELDORADO GOLD DEPOSIT
(Yenisei Ridge, Russia)

N.A. Gibsher, A.A. Tomilenko, A.M. Sazonov, T.A. Bul'bak, M.O. Khomenko,
M.A. Ryabukha, E.O. Shaparenko, S.A. Sil'yanov, and N.A. Nekrasova

The Eldorado low-sulfide gold-quartz deposit, with gold reserves of more than 60 tons, is located in the damage zone of the Ishimba Fault in the Yenisei Ridge and is hosted by Riphean epidote-amphibolite metamorphic rocks (Sukhoi Pit Group). Orebodies occur in four roughly parallel heavily fractured zones where rocks were subject to metamorphism under stress and heat impacts. They consist of sulfide-bearing schists with veins of gray or milky-white quartz varieties. Gray quartz predominating in gold-bearing orebodies contains graphite and amorphous carbon identified by Raman spectroscopy; the contents of gold and amorphous carbon

are in positive correlation. As inferred from thermobarometry, gas chromatography, gas chromatography–mass spectrometry, and Raman spectroscopy of fluid inclusions in sulfides, carbonates, and gray and white quartz, gold mineralization formed under the effect of reduced H₂O–CO₂–HC fluids with temperatures of 180 to 490 °C, salinity of 9 to 22 wt.% NaCl eq, and pressures of 0.1 to 2.3 kbar. Judging by the presence of 11% mantle helium (³He) in fluid inclusions from quartz and the sulfur isotope composition (7.1–17.4 ‰ δ³⁴S) of sulfides, ore-bearing fluids ascended from a mantle source along shear zones, where they «boiled». While the fluids were ascending, the metalliferous S- and N-bearing hydrocarbon (HC) compounds they carried broke down to produce crystalline sulfides, gold, and disseminated graphite and amorphous carbon (the latter imparts the gray color to quartz). Barren veins of milky-white quartz formed from oxidized mainly aqueous fluids with a salinity of <15 wt.% NaCl eq at 150–350 °C. Chloride brines (>30 wt.% NaCl eq) at 150–260 °C impregnated the gold-bearing quartz veins and produced the lower strata of the hydrothermal-granitoid section. The gold mineralization (795–710 Ma) was roughly coeval to local high-temperature stress metamorphism (836–745 Ma) and intrusion of the Kalama multiphase complex (880–752 Ma).

Quartz, gold, ore-forming fluid, hydrocarbons, δ³⁴S, ³He/⁴He; Ar–Ar age

ВВЕДЕНИЕ

На территории рудных полей Енисейского кряжа выявлено множество (десятки сближенных и рассредоточенных) кварцевых жил различной формы, мощности и протяженности, из которых золотоносны лишь единицы [Середенко, 1985]. Фоновая концентрация кварцевых жил ориентировочно составляет 3–7 жил на км², возрастающая в пределах рудных узлов на порядок и более, например, на месторождении Эльдorado [Сердюк и др., 2004, 2010]. Несмотря на длительную историю изучения месторождения Эльдorado, ответы на многие вопросы его генезиса еще не найдены. В печати опубликованы основные представления о генезисе месторождения. Одни исследователи [Дембо, 1941; Ли, 1968, 1997; Ли, Даценко, 1970] приводят доказательства связи оруденения с магматизмом, вторые [Середенко, 1985; Сазонов, 1998] — с процессами метаморфизма, при которых рудоносные растворы поднимались по зонам тектонического расщепления пород из глубинных очагов гранитоидного палингенеза, третьи [Петров, 1974] утверждают, что первопричиной образования золото-кварцевых жил является повышенная золотоносность вмещающих пород. Наряду с широким спектром проведенных исследований крайне ограничена информация о флюидах, ответственных за формирование, так называемых золотоносных и незолотоносных кварцевых жил. Рудные тела месторождения Эльдorado являются идеальным объектом для выяснения факторов золотоносности кварцевых жил, поскольку ранее было установлено [Сазонов, Бернатонис, 1990], что золотоносные жилы месторождения сложены в основном серым «пропыленным» графитом кварцем (кварц второй генерации), а незолотоносные жилы — белым без графитовых частиц кварцем (третья генерация).

Основная цель статьи — выявить факторы золотоносности флюидов, формирующих рудные тела месторождения Эльдorado. Для этого проведен комплекс термобарогеохимических исследований флюидных включений в кварце, сульфиде и карбонатах, получены характеристики изотопов серы сульфидов и изотопов гелия во флюидных включениях кварца, определен Ar–Ar возраст локального динамометаморфизма гранат-биотитовых сланцев из кварцево-жилных зон, вмещающих рудные тела месторождения Эльдorado. Полученные характеристики флюидов могут иметь практическое значение для прогнозирования золотоносности кварцевых жил при поисково-разведочных и оценочных работах.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЭЛЬДОРАДО

Характеристика месторождения приведена по данным собственных материалов и опубликованным работам [Сазонов, 1985, 1998; Сазонов, Бернатонис, 1990; Сердюк и др., 2010]. Месторождение Эльдorado золото-кварцевой малосульфидной формации с запасами золота более 60 т локализовано в зоне влияния Ишимбинского глубинного разлома на Енисейском кряже. Месторождение залегает в породах горбилкокской свиты сухопитской серии рифея, метаморфизованной в условиях эпидот-амфиболитовой фации. Вмещающие золотое оруденение породы представлены сланцами с изменчивым количественным соотношением породообразующих минералов: кварца, биотита, мусковита, граната, турмалина, хлорита, серицита и плагиоклаза. Непосредственно на месторождении интрузивные образования отсутствуют. Ближайший выход магматических пород находится в 15 км к юго-западу от Эльдorado и представлен Каламинским гранитоидным массивом татарско-аяхтинского комплекса площадью порядка 700 км² [Сердюк и др., 2010]. Время внедрения и кристаллизации многофазного Каламинского массива составляет интервал от 880 до 752 млн лет [Вернико́вская и др., 2004; Сазонов и др., 2010; Ножкин и др., 2011; Полева, Сазонов, 2012]. На месторождении выделены четыре системы разрывных текто-

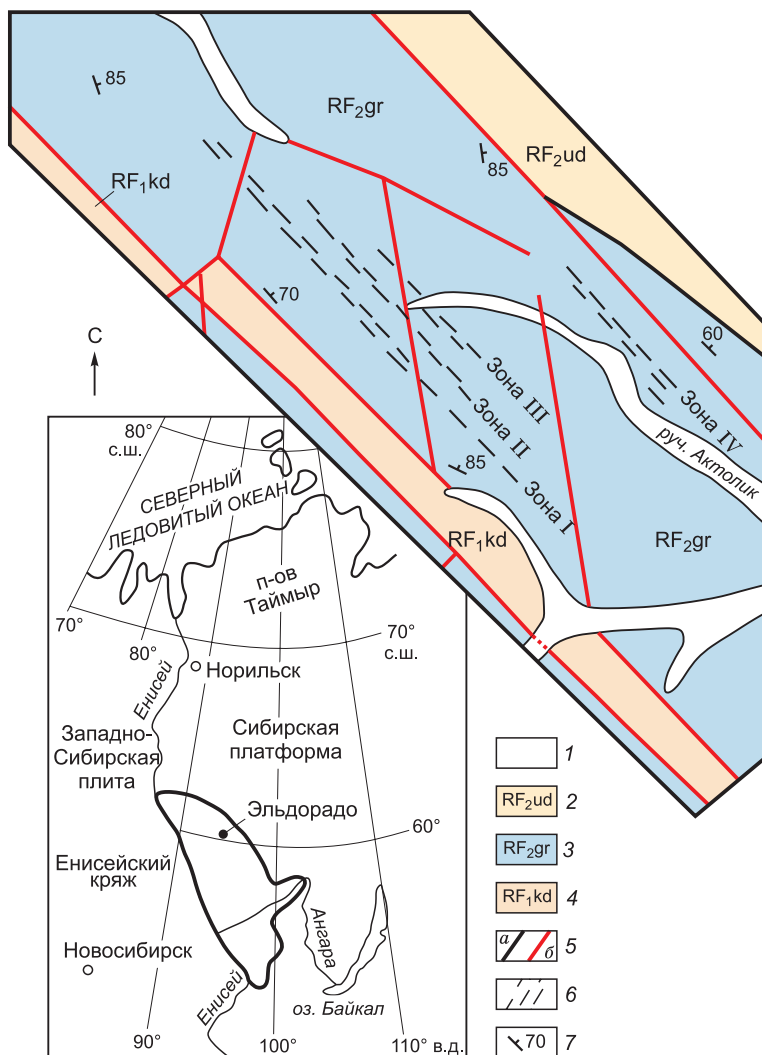


Рис. 1. Схема геологического строения месторождения Эльдорадо, по [Сердюк и др., 2010] с уточнениями авторов.

1 — золотоносные отложения долин рек; 2 — филлиты темно-серые до черных удерейской свиты; 3 — сланцы зеленовато-серые двуслюдяные и гранат-двуслюдяные горбилковской свиты; 4 — светло-серые кварциты и серые с коричневым оттенком сланцы биотит-микроклин-кварцевые кординской свиты; 5 — границы: геологические (а), тектонические разрывные (б); 6 — кварцево-жильные золотоносные зоны; 7 — элементы залегания реликтовой слоистости.

нических нарушений, которые послужили естественными геологическими границами тектонических блоков (рис. 1), и закартированы четыре субпараллельные полосы интенсивной трещиноватости, где проявлен локальный динамотермальный метаморфизм, там же обособлены рудные тела. В практике геолого-разведочных работ эти линейные образования получили название кварцево-жильных зон (см. рис. 1). Четких геологических границ жильные зоны не имеют, а оконтуриваются по отсутствию кварцевого прожилкования в сланцевой толще. Метасоматические изменения пород проявлены только в пределах кварцево-жильных зон. Наиболее характерными изменениями являются окварцевание, серицитизация, биотитизация, хлоритизация, полевошпатизация, сульфидизация, турмалинизация и графитизация.

цитизация, биотитизация, хлоритизация, полевошпатизация, сульфидизация, турмалинизация и графитизация.

На месторождении выделено 22 рудных тела, различных по протяженности, мощности и золотоносности. Как правило, рудные тела представлены сульфидизированными сланцами с жилами двух разновидностей кварца — серым и молочно-белым в самых разнообразных соотношениях. Отмечено, что в золотоносных телах преобладает серый кварц, «пропыленный» графитом. В кварце углеродистое вещество образует сыпь микроскопических включений, из-за чего цвет кварца приобретает серую или темно-серую окраску. Этот кварц, слагающий рудные тела месторождения Эльдорадо, отнесен к золотоносным и фигурирует в рудничной практике как «пропыленный» графитом кварц второй генерации [Сазонов, Бернатонис, 1990; Сердюк и др., 2010]. Методом рамановской спектроскопии нами проведено исследование углеродистого вещества в рудоносном сером кварце. Установлено, что оно представлено графитом, образованиями графита с дефектами на краях и внутри графеновых слоев, а также графитом с межслоевым аморфным углеродом (рис. 2). Пики 1580 и 1608 см⁻¹ характерны для монокристаллического графита с размером микрокристаллитов 39 нм, широкие пики с центрами на частотах 1347, 1445, 1461 и 2718 см⁻¹ идентифицируются с аморфным разупорядочным состоянием углеродистого вещества, где размер микрокристаллитов оценивается в 4 нм [Dresselhaus et al., 2000]. Углеродистое вещество с таким малым размером микрокристаллитов обладает сильноразвитой сетью дефектов, трещин, микропор и для него типичен высокоэффективный механизм осаждения рудных элементов, в том числе и золота [Акимцев и др., 2000]. В рудных телах Эльдорадо выявлена положительная корреляция между содержанием золота и аморфного углерода в кварце [Некрасова, Сильянов, 2017].

Кварцево-жильная зона I (см. рис. 1) характеризуется максимальными размерами и золотоносностью. Ее длина составляет 2650 м, мощность меняется от 10 до 150 м, установленная глубина развития достигает 350 м и на глубину не оконтурена. В зоне I закартировано 17 рудных тел, в них сосредоточено 84.2 % всех запасов месторождения со средним содержанием золота 1.8—4.6 г/т. Протяженность

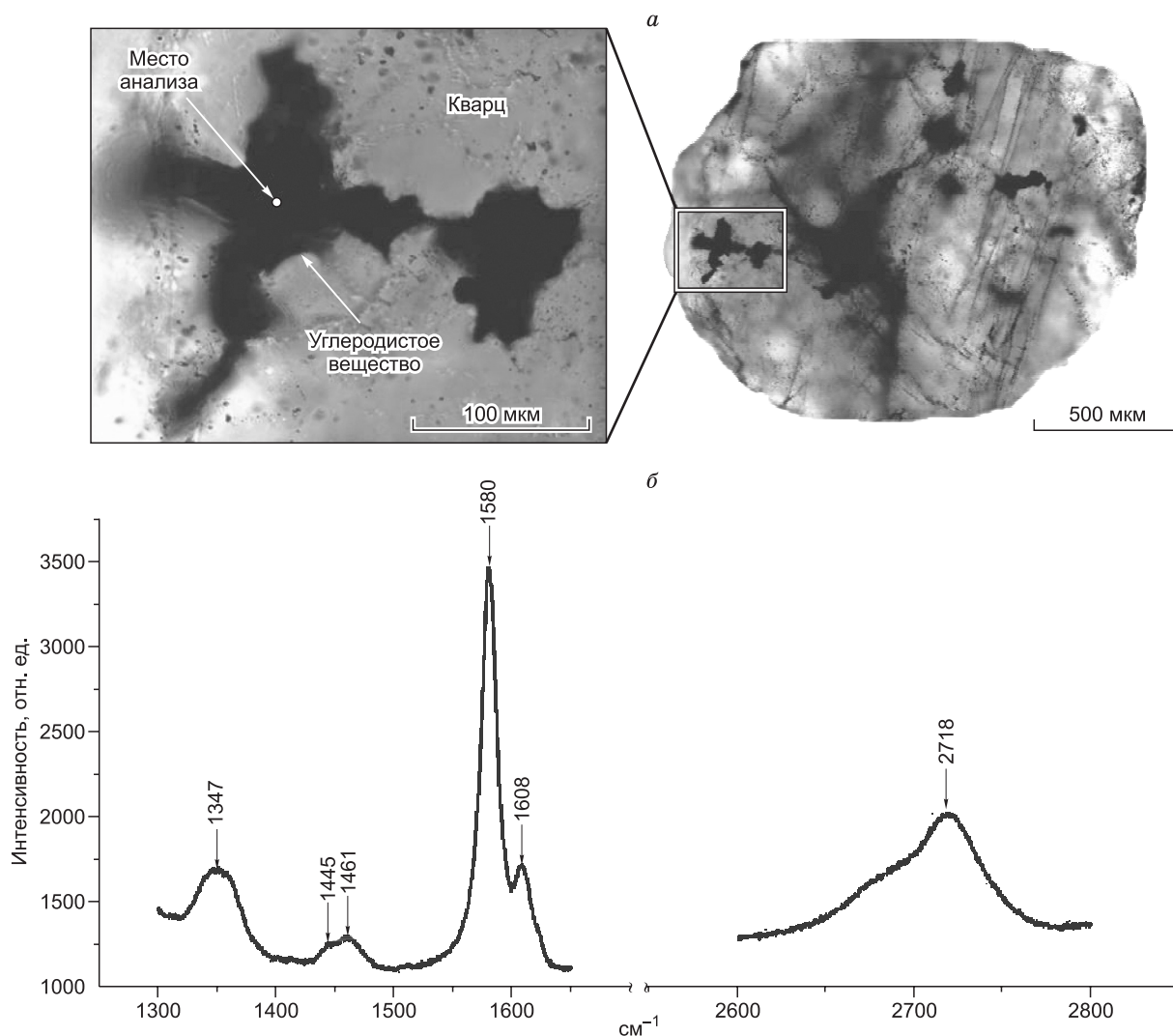


Рис. 2. Включение углеродистого вещества в кварце (*а*) и его рамановский спектр (*б*) месторождения Эльдорадо (Енисейский край), обр. Эл-3-660.2.

кварцево-жильной зоны II составляет около 1500 м, мощность меняется от 10 до 60 м, в ней выделено четыре рудных тела со средним содержанием Au 3.5—5.8 г/т. Кварцево-жильные зоны III и IV представлены редкими прерывистыми кварцевыми жилами в сочетании с короткими кварцевыми линзами и маломощными прожилками. В этих зонах отмечено локальное распределение золота, местами достигающее ураганного содержания — 912.8 г/т по кварцу [Сердюк и др., 2010].

Основные минералы рудных тел месторождения представлены кварцем, сульфидами, золотом и карбонатами. С начальным этапом развития зоны смятия формировались жилы, сложенные молочно-белым кварцем, они распространены незначительно и слабо золотоносны. Внутри жильных зон размещены золотоносные рудные тела, главный минерал которых (кварц) представлен светло-серыми, темно-серыми разностями, насыщенными в разной степени пылевидными включениями углеродистого вещества. Одновременно с кристаллизацией серого кварца образовывались ранние золото-арсенипиритовые и более поздние золото-полиметаллические минеральные ассоциации. Гидротермальное минералообразование на месторождении закончилось формированием одиночных маломощных кварцевых жил и нитевидных кварц-карбонатных прожилков, секущих более ранние жилы.

Золото на месторождении связано в основном с кварцем и в меньшей мере с сульфидами. Выделены две генерации золота. Первая генерация золота ассоциирует с кварцем, насыщенным углеродистым веществом, и ранними сульфидами (арсенипиритом и пиритом). Для этого субмикронного «невидимого» золота характерны более мелкие размеры частиц, большая степень их деформированности, более равномерное распределение. Этим золотом представлены основные запасы металла на месторож-

дении. Вторая генерация золота в виде более крупных выделений сопровождается позднюю полиметаллическую минерализацию, которая представлена сфалеритом, халькопиритом и галенитом.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследованы петрографические шлифы и полированные с двух сторон кварцевые пластинки из 30 образцов, собранных из I кварцево-жильной зоны (рудные тела 1—4) и II зоны (рудное тело 5) (табл. 1). Визуальный осмотр образцов из рудных тел показал, что они, как правило, сложены кварцем серого и молочно-белого цвета в различных соотношениях. Серый кварц преобладает в золотоносных рудных телах, а молочно-белый — в незолотоносных или слабозолотоносных жилах. Серый кварц сложен крупными (0.1—0.5 мм) зернами с четкими границами, без признаков грануляции в межзерновом пространстве. Как правило, внутри этих зерен и в межзерновом пространстве присутствуют углеродистые частицы. Молочно-белый кварц отличается от серого отсутствием углеродистых частиц.

Флюидные включения в кварце и сульфидах исследовались методами термометрии, криометрии, рамановской спектроскопии, газовой хроматографии и газовой хромато-масс-спектрометрии (GC-MS). Для определения температуры общей гомогенизации, температур эвтектики и плавления льда водных растворов, температур частичной гомогенизации и плавления сжиженных газов применялись микро-термокамера THMSG-600 фирмы Linkam с диапазоном от -196 до $+600$ °C. Стандартная аппаратная ошибка измерений составляет ± 0.1 в отрицательной и ± 5 °C в положительной области температур. Давление флюида во включениях определялось по методикам, приведенным в работах [Brown, Lamb, 1989; Thiery et al., 1994; Duan et al., 1996; Bakker, 2001] для систем $H_2O \pm CO_2 \pm NaCl$; H_2O-CO_2 и $CO_2-CH_4 \pm N_2$. Соленость водных растворов во включениях находили по температуре плавления льда, используя двухкомпонентную водно-солевую систему ($NaCl-H_2O$) через эквивалент $NaCl$ [Киргинцев и др., 1972]. Преобладающая соль в водном растворе включений определялась по температуре эвтектики, характеризующей водно-солевую систему [Борисенко, 1977]. Состав газовой фазы индивидуальных флюидных включений исследован на одноканальном КР-спектрометре Ramanor U-1000 фирмы Jobin Yvon с помощью аргонового лазера диаметром 1.5 мкм и мощностью 3 Вт по методике, изложенной в работе [Dubessy et al., 1989]. Валовой состав газовой составляющей флюидов определен методом газовой хроматографии, описанным Н.Ю. Осоргиным [1990], и газовой хромато-масс-спектрометрии, изложенной в работах [Сонин и др., 2014; Sokol et al., 2014; Жимулев и др., 2015; Tomilenko et al., 2015]. На всех этапах подготовки проб к анализу не использовались органические вещества, такие как ацетон и этиловый спирт. Соотношение изотопов серы в сульфидах измерялось в газе SO_2 , полученном при взаимодействии сульфидов с CuO при 1000 °C, и нормировано относительно изотопного состава троилита из метеорита Каньон Дьябло. Воспроизводимость значений $\delta^{34}S$, включая подготовку образца, составляет 0.1 ‰. Методика изложена в работе [Пальянова и др., 2016].

Изотопный состав гелия во флюидных включениях кварца определен в лаборатории геохронологии и геохимии изотопов Геологического института Кольского научного центра РАН (г. Апатиты). Методические приемы определения изотопов гелия во флюидных включениях кварца изложены в работах [Толстихин, Прасолов, 1971; Ветрин и др., 2003; Икорский и др., 2006, 2014]. Изотопно-геохронологические данные получены на основе $Ar-Ar$ метода определения возраста калийсодержащего биотита из гранат-биотитового сланца и биотитовой сегрегации в гранат-двуслюдном сланце из зон катаклазированных, брекчированных, милонитизированных пород кординской свиты. Такие зоны являются результатом локального динамотермального метаморфизма рудовмещающих пород месторождения Эльдорадо. Описание аналитических процедур приведено в работе [Травин, 2016].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристика флюидных включений. Индивидуальные флюидные включения изучены в сером и белом кварце кварцевых жил, условно поделенные на золотоносные и незолотоносные. В золотоносных жилах преобладает серый кварц, «пропыленный» углеродистыми частицами. В зернах этого кварца выделены три генерации флюидных включений: первичные (П) включения образуют группы (от 3 до 10—15 включений), находятся внутри кварцевых зерен без видимой связи с залеченными трещинами; первично-вторичные (ПВ) включения образуют цепочки, не выходящие за пределы границ кварцевых зерен, и вторичные (В) включения, приуроченные к залеченным трещинам, секущим границы кварцевых зерен. Первичные и первично-вторичные флюидные включения представлены следующими типами (рис. 3): существенно водным ($J_{H_2O} + \Gamma$) с меняющимися соотношениями газ:жидкость; водно-углекислотным ($J_{H_2O} + J_{CO_2 \pm N_2 \pm CH_4} + \Gamma$) и существенно газовым ($\Gamma_{CO_2 \pm N_2 \pm CH_4 \pm SO_2} > J_{H_2O}$). Размер этих включений редко превышает 10—15 мкм. К вторичным генерациям флюидных включений в сером кварце отнесены водно-солевые с дочерними кристалликами хлоридов ($J_{H_2O} + \Gamma + Kp$) и газовой-жидкие

Таблица 1. Результаты микротермометрических исследований флюидных включений в кварце золоторудного месторождения Эльдorado (Енисейский край)

Генерация включений	$T_{\text{общ.гом.}}^{\circ}\text{C}$	Вид гомогенизации	$T_{\text{растворения кристаллика}}^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{зпт.}}^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{пл. льда}}^{\circ}\text{C}$	Соленость, мас. % NaCl-экв.
Кварцево-жильная зона I						
Рудное тело 1, серый кварц						
П, ПВ	$\frac{180-390}{310}$ (29)	Ж, Г	—	$\frac{-26.5...-31.0}{-28.0}$ (15)	$\frac{-6.4...-12.0}{-8.5}$ (10)	$\frac{10.5-16.0}{12.5}$ (10)
В	$\frac{170-220}{200}$ (9)	Ж	$\frac{150-170}{160}$ (9)	$\frac{-60.0...-63.5}{-61.5}$ (7)	—	>30
Рудное тело 1, белый кварц						
П, ПВ	$\frac{180-250}{220}$ (15)	Ж	—	$\frac{-20.0...-23.5}{-22.0}$ (9)	$\frac{-5.0...-10.0}{-7.5}$ (9)	$\frac{9.0-15.0}{11.7}$ (9)
В	$\frac{120-190}{180}$ (11)	»	—	$\frac{-10.5...-20.0}{-12.0}$ (8)	$\frac{-3.0...5.0}{-4.0}$ (8)	$\frac{6.0-9.0}{8.0}$ (8)
Рудное тело 2, серый кварц						
П, ПВ	$\frac{210-340}{325}$ (31)	Ж, Г	—	$\frac{-26.0...-35.5}{-32.6}$ (11)	$\frac{-10.5...-16.2}{-14.5}$ (10)	$\frac{10.5-12.5}{11.0}$ (10)
В	$\frac{140-180}{160}$ (27)	Ж	—	$\frac{-21.0...-23.5}{-22.0}$ (16)	$\frac{-0.5...-1.5}{-1.0}$ (16)	$\frac{1.0-3.0}{2.0}$ (16)
»	$\frac{150-210}{190}$ (6)	»	$\frac{150-180}{160}$ (5)	$\frac{-58.0...-62.5}{-60.7}$ (5)	—	>30
Рудное тело 2, белый кварц						
П, ПВ	$\frac{180-350}{210}$ (10)	Ж	—	$\frac{-37.0...-39.0}{-38.0}$ (6)	$\frac{-5.5...-7.0}{-6.0}$ (6)	$\frac{9.5-11.0}{10.0}$ (6)
В	$\frac{100-200}{150}$ (8)	»	—	—	—	—
Рудное тело 3, серый кварц						
П, ПВ	$\frac{190-380}{320}$ (23)	Ж, Г	—	$\frac{-28.3...-33.6}{-31.0}$ (20)	$\frac{-7.0...-19.3}{-18.3}$ (9)	$\frac{11.0-22.0}{18.5}$ (9)
В	$\frac{110-190}{170}$ (11)	Ж	—	$\frac{-17.5...-22.0}{-21.5}$ (8)	$\frac{-0.5...-1.5}{-1.2}$ (8)	$\frac{1.0-3.0}{2.5}$ (8)
»	$\frac{190-220}{200}$ (13)	»	$\frac{180-210}{200}$ (10)	$\frac{-59.3...-64.5}{-63.0}$ (10)	—	>30
Рудное тело 4, серый кварц						
П, ПВ	$\frac{230-470}{360}$ (21)	Ж, Г	—	$\frac{27.5...-35.5}{-32.0}$ (15)	$\frac{-9.0...-14.5}{-13.5}$ (15)	$\frac{11.7-18.5}{16.0}$ (15)
В	$\frac{120-210}{250}$ (16)	Ж	—	$\frac{-17.0...-25.5}{-21.0}$ (9)	$\frac{-1.5...-2.0}{-1.7}$ (9)	$\frac{3.0-4.5}{4.0}$ (9)
»	$\frac{220-260}{250}$ (7)	»	$\frac{210-220}{215}$ (7)	$\frac{-55.5...-58.0}{-57.0}$ (7)	—	>30
Кварцево-жильная зона II						
Рудное тело 5, серый кварц						
П, ПВ	$\frac{240-490}{350}$ (19)	Ж, Г	—	$\frac{-30.0...-34.5}{-33.0}$ (12)	$\frac{-9.5...-13.0}{-12.0}$ (12)	$\frac{14.0-17.5}{16.5}$ (12)
В	$\frac{130-190}{150}$ (14)	Ж	—	$\frac{-18.0...-21.5}{-20.5}$ (11)	$\frac{-0.5...-1.5}{-1.0}$ (11)	$\frac{1.0-3.0}{2.0}$ (11)
»	$\frac{195-240}{220}$ (6)	»	$\frac{180-200}{190}$ (6)	$\frac{-54.5...-66.0}{-60.0}$ (6)	—	>30
Рудное тело 5, белый кварц						
П, ПВ	$\frac{210-350}{310}$ (15)	Ж	—	$\frac{-35.0...-41.5}{-39.3}$ (8)	$\frac{-6.0...-10.0}{-7.5}$ (8)	$\frac{10.0-15.0}{12.0}$ (8)
В	$\frac{190-230}{200}$ (11)	»	—	—	—	—

Примечание. П – первичные, ПВ – первично-вторичные, В – вторичные. Вид гомогенизации: Ж – в жидкость, Г – в газ. Над чертой — интервал, под чертой — среднее, в скобках — количество определений.

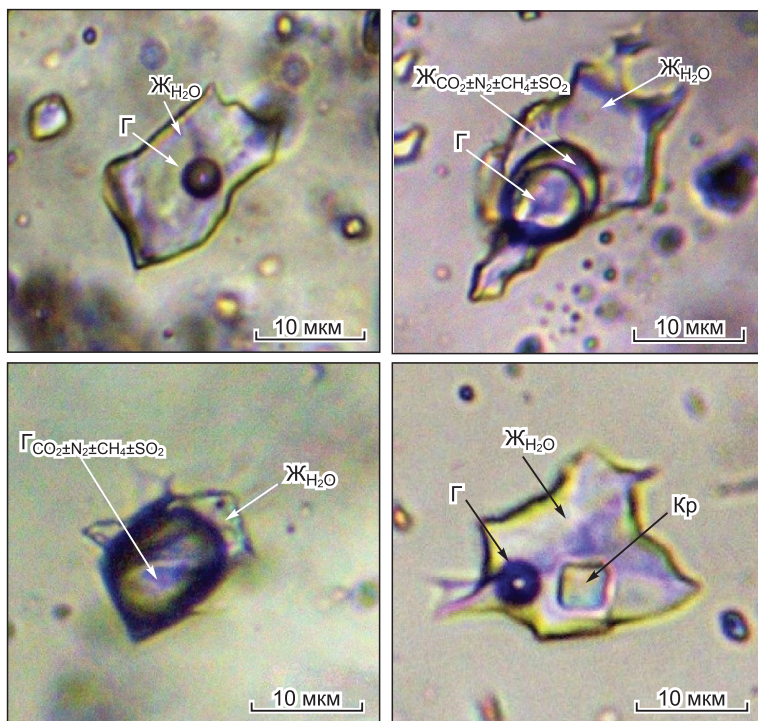


Рис. 3. Типы флюидных включений в кварце золоторудного месторождения Эльдорадо.

Объяснение см. в тексте.

типы, где фаза воды преобладает ($J_{H_2O} > \Gamma$). Вторичные существенно водные включения обычно субмикронного размера (1—3 мкм) приурочены к залеченным трещинам, которые секут границы кварцевых зерен. Многочисленные субпараллельные трещины, декорированные субмикронными включениями, часто группируются в изогнутые полосы, нередко пересекающиеся между собой. Кварц в этих местах имеет волнистое угасание при просмотре шлифов в скрещенных николях. Возникновение субмикронных флюидных включений

связано с процессами частичной деформации кварца, свидетельствуя о тектонической активности в зонах рудообразования.

В белом кварце незолотоносных жил первичные включения представлены существенно водным типом, где преобладает вода ($J_{H_2O} > \Gamma$), и водно-углекислотным ($J_{H_2O} \pm J_{CO_2} + \Gamma_{SO_2 \pm N_2 \pm CH_4 \pm CO_2}$). Вторичные включения в белом кварце рудных тел, так же как и в сером кварце, представлены существенно водным типом. Вторичных включений с кристалликами солей в белом кварце не обнаружено.

Температура общей гомогенизации флюидных включений. Исследовано 232 индивидуальных включения в сером кварце золотоносных рудных тел и 70 включений в белом кварце незолотоносных кварцевых жил (см. табл. 1). В сером кварце температура гомогенизации первичных и первично-вторичных включений колеблется от 180 до 490 °С, с максимальным количеством определений в интервале 290—350 °С. При температурах от 310 до 380 °С происходила гомогенизация в жидкость и газ. Во вторичных включениях с дочерними кристалликами ($J_{H_2O} + \Gamma + Кр$) $T_{общ. гом.}$ составила 150—260 °С при гомогенизации в жидкость, а дочерние кристаллики соли растворялись от 150 до 220 °С, опережая общую гомогенизацию на 10—15 °С. При охлаждении этих включений кристаллики появлялись вновь. Дочерние кристаллики, вероятно, представлены NaCl, на что указывает их кубическая сингония. Температура гомогенизации вторичных существенно водных ($J_{H_2O} > \Gamma$) включений изменяется от 120 до 210 °С при гомогенизации в жидкость. Более низкие температуры общей гомогенизации первичных включений характерны для белого кварца, которые колеблются в интервале от 180 до 350 °С при гомогенизации в жидкость.

Состав и соленость водной фазы включений. Водный раствор первичных и первично-вторичных включений серого кварца представлен в основном хлоридами Mg и Na, о чем свидетельствуют температуры эвтектики, которые меняются от -26.5 до -35.5 °С (см. табл. 1). Температуры плавления льда в этих же включениях варьируют от -5.0 до -19.3 °С, соответствуя солености 9—22 мас. % NaCl-экв. Во вторичных включениях ($J_{H_2O} + \Gamma$) законсервирован водный K-Na-Cl-содержащий раствор, на что указывают замеренные температуры эвтектики в интервале от -10.5 до -25.5 °С, соленость флюида составляла 1—9 мас. % NaCl-экв. Во вторичных включениях с дочерними кристалликами соли ($J_{H_2O} + \Gamma + Кр$) температура эвтектики водной фазы составляет интервал от -54.5 до -66.0 °С, свидетельствуя о наличии во флюидах хлорида кальция, соленость в этих включениях превышала 30—40 мас. % NaCl-экв., поскольку кристаллики соли растворялись от 150 до 220 °С (см. табл. 1). Водная фаза в этих включениях представлена смесью хлоридов Na и Ca.

Для флюидов незолотоносных кварцевых жил характерна соленость 9—15 мас. % NaCl-экв. и Na-Mg-Cl-содержащий состав (см. табл. 1).

Состав газовой составляющей флюидных включений. По данным газовой хроматографии (табл. 2, рис. 4, а) установлено, что газовая составляющая флюидов в кварце представлена H_2O , CO_2 ,

Таблица 2. Состав газовой фазы флюидных включений в кварце золоторудного месторождения Эльдorado (Енисейский кряж) (по данным газовой хроматографии)

№ образца	Содержание, мг/кг				Суммарное содержание газов, мг/кг	CO ₂ /CH ₄
	CO ₂	H ₂ O	N ₂	CH ₄		
Кварцево-жильная зона I						
Рудное тело 1						
Эл-1.620.2	4.0	780	0	13	833	3.1
Эл-1.625.1	20	340	0	3	363	6.7
Эл-1.625.1	20	280	0	2.5	302.5	8
Эл-1.625.2	20	650	0	5.6	675.6	3.6
Эл-1.625.3	20	280	0	2	302	10
Рудное тело 2						
Эл-2.630.1	16	340	2	4	362	4
Эл-2.630.2	10	240	0	4.9	254.9	2
Эл-2.625.1	19	470	0	7	496	2.7
Эл-2.625.1	9	610	0	2	621	4.5
Рудное тело 3						
Эл-3.660.1	17	870	0	1	888	17
Эл-3.660.2	16	610	0	2	628	8
Эл-3.660.2	18	940	0	2	960	9
Рудное тело 4						
Эл-4.630.1	20	820	2	6	848	3.3
Эл-4.630.1	20	910	2	6	938	3.3
Эл-4.630.2	20	380	0	2	402	10
Эл-4.630.2	30	440	0	4.6	474.6	6.5
Кварцево-жильная зона II						
Рудное тело 5						
Эл-5.650.1	40	380	0	1	421	40
Эл-5.650.2	70	640	3	8	721	8.8

Примечание. Температура газовой выделенной 600 °С, навеска 300 мг. Анализ выполнен в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск), аналитик Л.Н. Фомина.

CH₄ и N₂. Содержание H₂O колеблется от 240 до 940 мг/кг, CO₂ от 9 до 70 мг/кг, CH₄ от 1 до 13 мг/кг и N₂ от 0 до 3 мг/кг. В рудных телах 1 и 2, где сосредоточены основные запасы золота, флюиды более обогащены метаном, чем флюиды рудных тел 3—5, с меньшими запасами. На это указывает величина отношения CO₂/CH₄, которая меняется от 2 до 10 в первом случае и от 3.3 до 40.0 — во втором (см. табл. 2). Наличие CO₂, CH₄ и N₂ во флюидах месторождения Эльдorado подтверждено методом рамановской спектроскопии индивидуальных флюидных включений в кварце рудных тел 1—5 (табл. 3, см. рис. 4). Величина отношения CO₂/CH₄ колеблется в широком интервале от 0.6 до 65.3 (см. табл. 3), указывая на меняющиеся содержания CO₂ и CH₄ во флюиде формирующихся рудных тел месторождения. Во флюидах белого кварца незолотоносных кварцевых жил наряду с CH₄, N₂ и CO₂ обнаружен SO₂, доля которого в индивидуальных включениях колеблется от 12.6 до 46.9 мол. % (см. табл. 3). Методом газовой хромато-масс-спектроскопии определен состав летучих компонентов флюидных включений в арсенопирите, пирите, кварце, анкерите и кальците. Проанализировано 24 образца, из них в кварце 12, арсенопирите 9 и по одному в пирите, анкерите и кальците. В таблице 4 приведены наиболее типичные составы летучих компонентов во флюидах месторождения Эльдorado. Остальные результаты учитывались при построении рисунков. В общем списке обнаруженных соединений в арсенопирите присутствуют от 106 до 143 компонентов, в пирите 112, в сером кварце от 100 до 132, в анкерите 98, кальците 62. Наибольшее количество соединений определено в белом кварце незолотоносных кварцевых жил от 209 до 215 (см. табл. 4). В газовой фазе включений изученных минералов преобладает вода и углекислота, так же как и по данным газовой хроматографии (см. табл. 2). Определен широкий спектр углеводородов, серо- и азотсодержащих соединений. Выявлено различное содержание основных компонентов во флюидах арсенопирита, серого золотоносного и белого незолотоносного кварца. Во флюидах арсенопи-

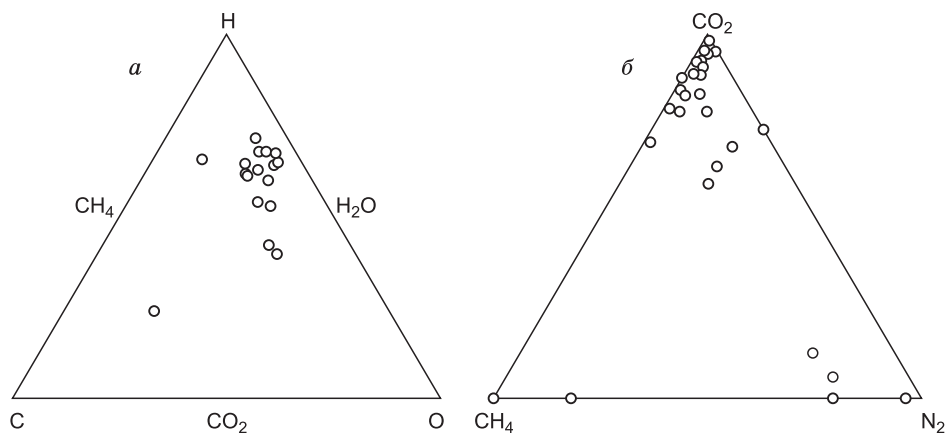


Рис. 4. Состав газовой составляющей флюидных включений в кварце золоторудного месторождения Эльдorado:

по данным газовой хроматографии (а) и рамановской спектроскопии (б).

рита и серого кварца преобладают CO_2 , H_2O и углеводороды. Флюиды незолотоносного белого кварца в основном состоят из воды, с незначительным содержанием CO_2 и углеводородов (рис. 5). В группе алифатических углеводородов алканы доминируют над алкенами при увеличении доли CO_2 во флюидах арсенипирита и кварца, о чем свидетельствует положительный тренд между отношениями $\text{CO}_2/(\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O})$ и алкан/алкенами (рис. 6). Выявлено различие в составе серо- и азотсодержащих летучих компонентов во флюидах золотоносных и незолотоносных кварцевых жил. Безкислородные серосодержащие соединения, такие как тиофены, сероуглерод и сероводород, преобладают в золотоносных кварцевых жилах, а окисленные кислородсодержащие (SO_2 , COS) преобладают в незолотоносных жилах (рис. 7, а). Содержание соединений с азотом во флюидах незолотоносных жил превышает содержание этих же компонентов во флюидах золотоносных жил (см. табл. 4, рис. 7, б)

Давление флюида при формировании золотоносных рудных тел месторождения Эльдorado колебалось в интервале от 0.1 до 2.3 кбар (см. табл. 3).

Изотопный состав серы сульфидов. Результаты изотопного анализа серы сульфидов приведены в табл. 5 и изображены на рис. 8. Изотопный состав серы пирротина колеблется в широком интервале от 7.8 до 17.4 ‰, в более узком (от 11.8 до 13.4 ‰) — определены значения $\delta^{34}\text{S}$ для пирита, а для арсенипирита (концентратора золота) установлен промежуток от 7.1 до 14.7 ‰.

Изотопы гелия. Во флюидных включениях кварца рудного тела 2 из I кварцево-жильной зоны месторождения Эльдorado определены содержания изотопов гелия (^3He и ^4He), которые составляют 0.0351×10^{-12} и 0.026×10^{-6} см³/г соответственно, отношение $^3\text{He}/^4\text{He} = 1.35 \times 10^{-6}$.

Возраст динамотермального метаморфизма в рудном поле месторождения, проявившийся в кварцево-жильных зонах месторождения формированием биотита в гранат-биотитовых сланцах, показал два значения 836.0 ± 6.4 и 745.8 ± 5.9 млн лет (рис. 9).

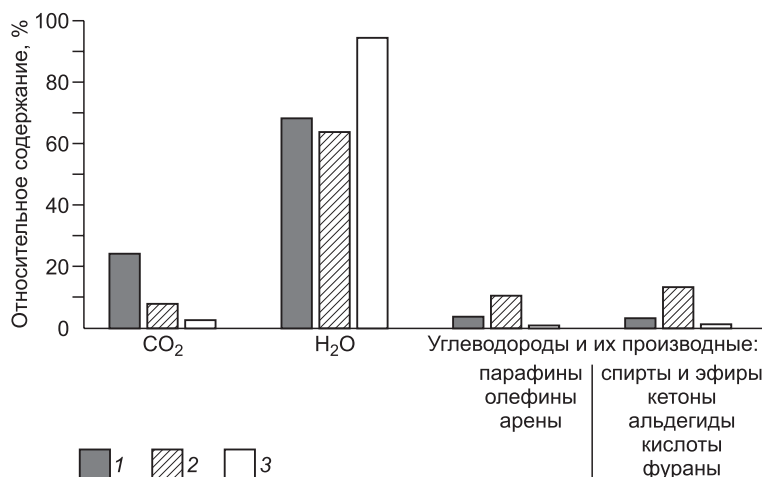


Рис. 5. Относительное содержание CO_2 , H_2O , углеводородов и их производных в арсенипирите (1), золотоносном (2) и незолотоносном (3) кварце месторождения Эльдorado, по данным газовой хромато-масс-спектрометрии.

Таблица 3. Микротермометрические характеристики и состав газовой фазы индивидуальных включений в кварце золоторудного месторождения Эльдorado (по данным термометрии и рамановской спектроскопии)

№ образца/ № включения	$T_{\text{гом.}}$, °C	$T_{\text{пл. CO}_2}$, °C	$T_{\text{гом. CO}_2}$, °C	Вид гомогенизации	Содержание, мол. %				P , кбар	CO ₂ /CH ₄
					CO ₂	CH ₄	N ₂	SO ₂		
Кварцево-жильная зона I										
Рудное тело 1, серый кварц										
Эл-1.625.1/3	275	-57.0	15.0	Ж	96.5	3.3	0.2	—	1.5	29.2
Эл-1.625.2/2	300	-58.4	9.5	»	85.7	13.3	1.0	—	1.7	6.4
Эл-1.625.3/1	285	-60.3	11	Ж	90.6	8.5	0.9	—	1.1	10.7
Эл-1.625.3/2	315	-56.9	7.5	Г	97.7	2.3	0.0	—	0.1	42.5
Эл-1.625.3/3	295	-58.1	-8.6	Ж	98.0	1.5	0.5	—	2.2	65.3
Эл-1.625.2/1	220	-59.8	-10	»	93.2	5.0	1.8	—	1.6	18.6
Рудное тело 2, серый кварц										
Эл-2.625.1/1	320	-62.5	-12.0	Г	94.2	5.8	0.0	—	1.7	16.2
Эл-2.625.1/2	290	-59.5	8.0	Ж	97.7	2.3	0.0	—	1.4	42.5
Эл-2.625.1/3	330	-69.5	16.0	»	94.7	2.3	3.0	—	1.9	41.2
Эл-2.625.1/4	285	-69.3	21.0	Г	5.9	18.1	76.0	—	-	0.3
Рудное тело 2, белый кварц										
595-12-2-1	290	—	—	—	0	14.8	39.6	45.6	—	—
595-12-2-2	—	—	—	—	0	8.9	72.8	18.3	—	—
595-12-4-1	—	—	—	—	0	35.8	44	20.2	—	—
595-12-4-2	—	—	—	—	0	7.9	48.7	43.4	—	—
595-12-4-3	—	—	—	—	0	8.1	79.3	12.6	—	—
Рудное тело 3, серый кварц										
Эл-3.660.1/1	350	-58.5	11.0	Г	80.5	10.0	9.5	—	1.7	8.1
Эл-3.660.1/2	320	-67.3	19.3	Ж	70.4	9.3	20.3	—	1.3	7.6
Эл-3.660.1/3	300	-60.0	13.0	Г	65.0	15.6	19.4	—	1.1	4.2
Эл-3.660.2/1	330	-68.0	18.3	Ж	85.3	9.8	4.9	—	—	8.7
Эл-3.660.2/2	290	-56.7	10.0	»	96.7	2.1	1.2	—	1.5	46.0
Эл-3.660.2/3	310	-57.0	12.0	Г	97.2	0.0	2.8	—	1.8	—
Рудное тело 4, серый кварц										
Эл-4.630.1/1	310	-60.0	10.0	Ж	90.5	6.8	2.7	—	1.4	13.3
Эл-4.630.1/2	270	-96.0	-9.5	»	0.0	82.4	17.6	—	—	—
Эл-4.630.1/3	260	-61.5	4.0	»	80.5	18.1	1.4	—	0.7	4.4
Эл-4.630.2/1	320	-61.5	-11.3	»	60.3	20.0	19.7	—	2	3.0
Эл-4.630.2/2	315	-60.0	10.0	»	75.4	0.0	24.6	—	1.3	—
Кварцево-жильная зона II										
Рудное тело 5, серый кварц										
Эл-5.650.1/1	330	-81.0	-4.0	Г	0.0	4.2	95.8	—	—	0
Эл-5.650.1/2	300	-68.0	11.5	Ж	12.8	19.5	67.7	—	—	0.7
Эл-5.650.1/3	310	-86.0	-13.5	Г	0.0	21.1	78.9	—	—	—
Эл-5.650.1-а	290	-96.5	7.5	Ж	0.0	4.2	95.8	—	—	—
Эл-5.650.1-б	285	-57.5	10.0	»	97.3	2.7	0.0	—	1.5	36.0
Эл-5.650.1-в	295	-58.0	-10.0	»	100.0	0.0	0.0	—	2.3	—
Эл-5.650.1-г	310	-88.0	-10.5	Г	0.0	100.0	0.0	—	—	—
Рудное тело 5, белый кварц										
Эл-5-650.2/1	340	—	—	—	0	11.4	48.8	39.8	—	—
Эл-5-650.2/2	—	—	—	—	18.6	8	33.6	39.8	—	2.3
Эл-5-650.2/3	—	—	—	—	19.4	7.8	36	36.8	—	2.5
Эл-5-650.2/4	—	—	—	—	0	9.1	37.4	46.5	—	—
Эл-5-650.2/5	—	—	—	—	0	6.3	46.8	46.9	—	—

Таблица 4. Состав (отн. %) и количество (в скобках) летучих компонентов, выделившихся при механическом вскрытии флюидных включений в минералах золотоносных и незолотоносных кварцевых жил золоторудного месторождения Эльдorado (по данным газовой хромато-масс-спектрометрии)

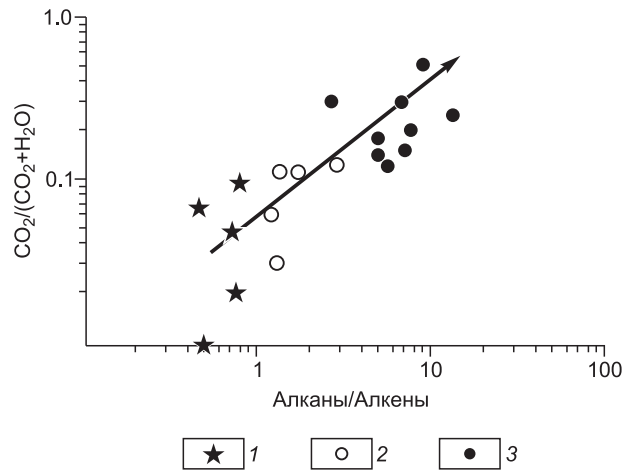
Название компонента	Золотоносные жилы					Незолотоносные жилы	
	арсенопирит	серый кварц	белый кварц	анкерит	кальцит	белый кварц	белый кварц
	Эл-3.660.2	Эл-5.650.1	Эл-1.625.2	Эл-5.650.2	Эл-2.630.1	595-12	630-1
Алифатические углеводороды							
Парафины (алканы)	2.386 (16)	4.163 (14)	0.248 (14)	1.041 (13)	1.933 (10)	1.174 (17)	1.503 (20)
Олефины (алкены)	0.181 (19)	3.06 (9)	0.347 (10)	0.157 (9)	0.478 (4)	1.565 (30)	1.100 (30)
Циклические углеводороды							
Циклоалканы, циклоалкены, арены, ПАУ	0.165 (13)	3.422 (11)	0.215 (10)	0.076 (3)	0.133 (2)	3.641 (44)	1.126 (34)
Кислородсодержащие углеводороды							
Эфиры (простые и сложные), спирты	0.193 (11)	0.780 (6)	0.083 (6)	0.318 (8)	0.552 (7)	0.768 (14)	2.377 (19)
Альдегиды	0.305 (20)	4.168 (15)	0.404 (17)	0.562 (15)	3.552 (15)	1.985 (22)	2.205 (22)
Кетоны	0.281 (18)	3.522 (12)	0.282 (12)	0.397 (19)	1.840 (10)	1.189 (20)	0.71 (19)
Карбоновые кислоты	0.145 (8)	3.893 (6)	0.632 (6)	0.017 (2)	0	1.410 (15)	0.848 (14)
Гетероциклические соединения							
Диоксаны, фураны	0.104 (11)	0.770 (9)	0.101 (10)	0.110 (9)	1.266 (8)	0.195 (12)	0.061 (12)
Азотсодержащие соединения							
Азот, аммиак, нитрилы	0.833 (10)	3.027 (7)	0.175 (7)	1.121 (2)	0.925 (2)	7.503 (19)	9.655 (19)
Серосодержащие соединения							
H ₂ S, SO ₂ , CS ₂ , COS, тиофены	0.889 (15)	1.459 (13)	0.144 (13)	0.156 (16)	0.129 (2)	2.104 (17)	1.799 (18)
Неорганические соединения							
CO ₂	9.46	7.887	2.405	42.811	12.862	8.378	8.817
H ₂ O	85.055	63.841	94.962	53.276	76.329	70.08	69.902
Общее количество компонентов	143	104	107	98	62	212	209
Алканы/Алкены	13.2	1.4	0.7	6.6	4	0.8	1.4
CO ₂ /(CO ₂ +H ₂ O)	0.1	0.1	0.02	0.4	0.1	0.1	0.1

Таблица 5. Изотопный состав серы сульфидов золоторудного месторождения Эльдorado (Енисейский край)

№ зоны	№ рудного тела	№ образца	Минерал	δ ³⁴ S, ‰ (CDT)
I	1	Эл-1.630.2-а	Пирротин	7.8
		Эл-1.630.2-б	»	12.8
		Эл-1.630.2-в	»	14.5
		Эл-1.630.2-г	»	11.3
		Эл-1.625.1-а	Арсенопирит	7.7
		Эл-1.625.1-б	»	7.1
		Эл-1.625.1-в	»	12.5
		Эл-1.625.1-г	»	14.7
	2	Эл-2.625.1	Арсенопирит	14.0
		Эл-2.630.1	Пирит	11.9
		Эл-2.630.2	Пирротин	17.4
	3	Эл-3.660.1	Арсенопирит	13.6
		Эл-3.660.1	Пирротин	7.9
	4	Эл-4.660.2	Арсенопирит	13.4
II	5	Эл-5.650.1	Арсенопирит	9.0
		Эл-5.650.2	Пирит	13.4

Примечание. Изотопный состав серы сульфидов определен в Аналитическом центре ИГМ СО РАН (г. Новосибирск), аналитики В.Н. Реутский, М.Н. Колбасова.

Рис. 6. Соотношение между алканы/алкены и $\text{CO}_2/(\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O})$ во флюидах незолотоносного (1) и золотоносного (2) кварца, сульфидов (3) золоторудного месторождения Эльдorado (Енисейский кряж) по данным газовой хромато-масс-спектрологии.



ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты исследования флюидных включений в сером «пропыленном» графитом кварце показали, что золотоносные тела месторождения Эльдorado сформированы K-Na-Mg-Cl-содержащими водно-углекисло-углеводородными флюидами в интервале температур от 180 до 490 °C и солености от 9 до 22 мас. % NaCl-экв. (см. табл. 1—4). Близкие *PT*-параметры формирования месторождения Эльдorado приведены ранее в работе [Верниковская, Томиленко, 1992]. Разная степень наполнения первичных и первично-вторичных флюидных включений, изменяющаяся от существенно водных до газовых со всеми промежуточными соотношениями газ:жидкость, возникает при колебании флюидного давления от 0.1 до 2.3 кбар (см. табл. 3). Такое колебание приводит к кипению флюида и его разделению на существенно водные и газовые составляющие. При этих процессах происходит разрушение металлоносных соединений и отложение рудных компонентов, в том числе и золота, на что неоднократно указывалось в литературе [Ермаков, Долгов, 1979; Реддер, 1987; Robert, Kelly, 1987; Bowers, 1991; Матель, 2012; Ляхов, Павлуны, 2013]. Причиной изменения флюидного давления на Эльдorado могло быть развитие хрупких деформаций в зонах расланцевания, где происходила гетерогенизация («кипение») поднимающихся гидротермальных растворов и разгрузка золотоносных флюидов, сформировавших рудные тела месторождения. Рудные тела испытывали воздействие высокосоленых (>30 мас. % NaCl-экв.) водно-солевых ($\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl} + \text{CaCl}_2$) растворов, которые в виде вторичных флюидных включений ($\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \text{Г} + \text{Кр}$, см. рис. 3) законсервированы в сером кварце. Присутствие высокосоленых NaCl-CaCl₂-содержащих флюидов на золоторудных месторождениях мира является характерной особенностью протерозойских гидротермальных систем и часто связываются с постмагматическими растворами ближайших гранитоидов [Hardie, 1983; Robert, Kelly, 1987; Xu, 2000; Shelton et al., 2004; Tomilenko et al., 2010; Гибшер и др., 2011; Бхаттачарья, Паниграйн, 2011; Рябуха и др., 2015; Хоменко и др., 2016]. Источником высокосоленых флюидов на месторождении Эльдorado также могли быть постмагматические флюиды ближайшего Каламинского гранитоидного массива. Гранитоиды обычно не рассматриваются как источник золота, поскольку они не могут обеспечить золотом флюиды, проса-

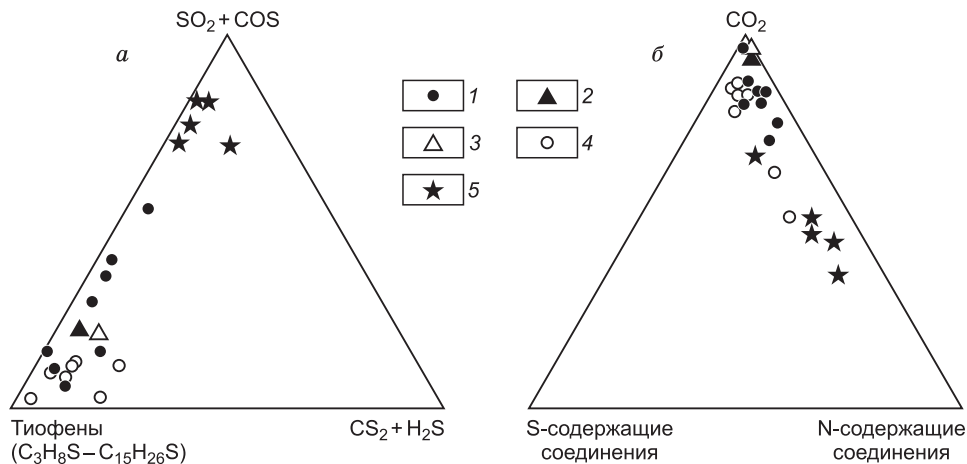


Рис. 7. Серосодержащие соединения (а) и CO_2 , S- и N-содержащие соединения (б), приведенные к 100 %, в газовой фазе флюидных включений кварца, арсенипирита, пирита и анкерита золоторудного месторождения Эльдorado по данным газовой хромато-масс-спектрометрии.

1—4 — золотоносные жилы: 1 — арсенипирит, 2 — пирит, 3 — анкерит, 4 — кварц; 5 — незолотоносные жилы, кварц.

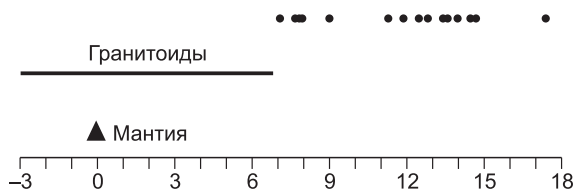


Рис. 8. Изотопный состав (‰) серы сульфидов золоторудного месторождения Эльдорадо.

Изотопный состав серы гранитоидов приведен по данным [Ohmoto, Rye, 1979].

чивающиеся через них [Blevin, Chappell, 1992; Merhagh, Bierlin, 2008; Константинов, 2009]. Вместе с тем гранитоиды могут играть активную роль в перераспределении рудных компонентов, создавая тепловое поле в области рудообразования. Не исключено, что с энергетическим влиянием каламинских гранитоидов связана и поздняя золото-полиметаллическая минеральная ассоциация, в которой отмечено более крупное золото, возникшее за счет перекристаллизации раннего субмикронного («невидимого») золота золото-арсенопиритовой ассоциации [Сазонов, Бернатонис, 1990; Сердюк и др., 2010].

Незолотоносные кварцевые жилы с преобладанием белого кварца сформированы при более низких температурах (180—350 °С), из гомогенных флюидов с соленостью менее 15 мас. % NaCl-экв. Эти жилы не испытывали воздействие высокосоленых флюидов, поскольку в белом кварце не обнаружены флюидные включения с дочерними кристалликами солей.

Основными компонентами флюидов, формирующих кварцевые жилы месторождения Эльдорадо, являются вода, углекислота, углеводороды, серо- и азотсодержащие производные углеводородов (см. табл. 4). Флюиды золотоносных тел обогащены CO₂ и углеводородами по сравнению с флюидами незолотоносных жил (см. рис. 5). Повышенное содержание CO₂ и углеводородов в золотоносных жилах согласуются с экспериментальными и расчетными данными, приведенными в работах [Gize, Macdonald, 1993; Gize, 1999], где показано, что углеводороды транспортируются богатыми CO₂ флюидами, а водные флюиды обеднены этими соединениями, что мы и видим на рис. 5. С увеличением доли CO₂ во флюиде увеличивается и содержание алканов, на что указывает положительный тренд между отношением CO₂/(CO₂+H₂O) и алкан/алкенами в сульфидах и кварцах (см. рис. 6). Отношения алкан/алкены авторы [Norman et al., 2002] предлагают использовать для реконструкции окислительно-восстановительного потенциала флюидов. При доминировании алканов — флюид восстановленный, при преобладании алкенов — флюид окисленный [Blamey, 2012]. По данным газовой хромато-масс-спектрометрии (см. табл. 4), во флюидах месторождения Эльдорадо отношение алканы/алкены колеблется от 2.8 до 13.9 в сульфидах, от 1.2 до 3.0 в сером золотоносном кварце и от 0.8 до 1.4 в белом незолотоносном кварце, указывая на изменение окислительно-восстановительных характеристик флюидов в процессе формирования кварцево-жилных зон месторождения. На восстановленный характер флюидов в золотоносных телах месторождения указывают и серосодержащие соединения, где видно, что в них преобладают безкислородные соединения серы (тиофены, H₂S и CS₂), а кислородсодержащие (SO₂ и COS) — в незолотоносных телах (см. рис. 7, а). В последних отмечено и повышенное содержание молекулярного азота и азотсодержащих соединений, в том числе и NH₃, доля которых может достигать 8.7 и 0.9 отн. % соответственно (см. табл. 4, рис. 7, б). Азот и азотсодержащие соединения присутствуют во флюидах и золотоносных тел, но в меньших количествах — 1.4 и 0.4 отн. % соответственно. Наличие азота и азотсодержащих соединений во флюидных включениях кварца и сульфидов (см. табл. 4), вероятно, связано с химическими реакциями между флюидом и аммонийсодержащими силикатами вмещающих пород, в которых азот в форме NH₄⁺ изоморфно замещает калий [Bottrel, Miller, 1990].

Рудоносный флюид, как показали проведенные исследования (см. табл. 1—4, рис. 2—7), представляет собой сложное химическое соединение, которое осуществляет транспорт рудных элементов, в

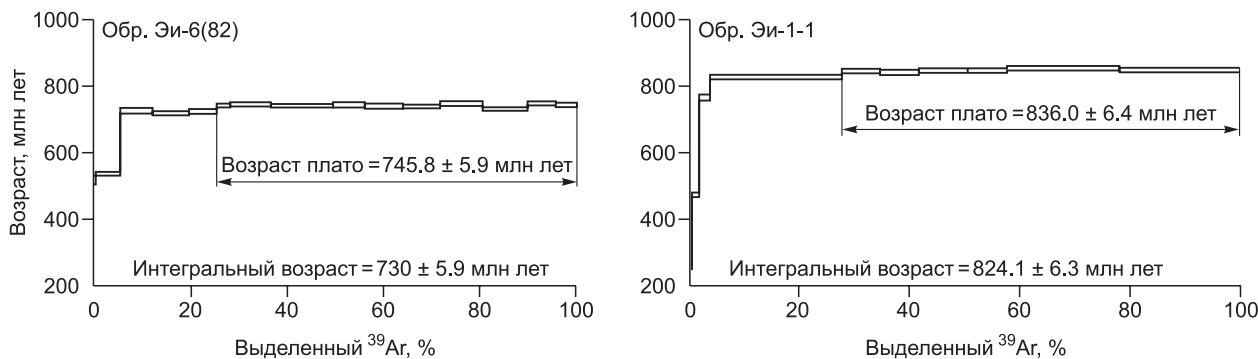


Рис. 9. Спектры Ar-Ar возрастов биотита гранат-биотитовых сланцев из зоны локального динамотермального метаморфизма месторождения Эльдорадо.

том числе и золота. Транспорт золота на месторождении Эльдorado, вероятно, происходил в виде элементоорганических соединений (ЭОС), имеющих в своем составе S, N и C, которые обнаружены во флюидах, доля этих соединений в сумме может достигать 15—20 отн. %. Перенос золота обычно не связывают со «слабыми» лигандами и аквакомплексами и полагают, что флюиды, транспортирующие золото, должны содержать такие лиганды, как Cl^- , HS^- , CN^- , NCO^- , NCS^- , LAuNCS , где в качестве лиганда (L) могут быть NH_3 , CO, алкены и др. [Паддефет, 1982; Марчук, 2008]. Такие лиганды способны вступать с золотом в реакции комплексообразования, образуя соединения $[\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)]^-$; $[\text{Au}(\text{HS}_2)]^-$; $[\text{Au}(\text{CN}_2)]^-$; $[\text{Au}(\text{NH}_3)_4](\text{NO}_3)$, которые разрушаются при гетерогенизации («кипении») гидротерм [Ляхов, Павлуны, 2013]. При этих процессах кристаллизуются золото и сульфиды, а их переносчики (транспортеры) — углеводороды и их S-, N-, C-содержащие производные консервируются во флюидных включениях. Вследствие реакций распада углеводородных соединений образуются и тонкодисперсные выделения графита и аморфного углерода [Буслаева, Новгородова, 1989, 1992], которые в виде черных частичек часто сопровождают флюидные включения. Карбоновые кислоты, присутствующие в составе флюидов (см. табл. 4), также играют положительную роль в комплексообразовании. С одной стороны, карбоновые кислоты хорошо растворяются в воде, образуя металлорганические анионные комплексы, т. е. они потенциально способны транспортировать рудные элементы, в том числе и золото. С другой, — карбоновые кислоты увеличивают пористость вмещающих пород, что способствует миграции металлорганических комплексов [Greenwood et al., 2013].

При затухании гидротермальной деятельности на месторождении Эльдorado, когда формировались кварц-карбонатные прожилки, флюиды уже обеднены сернистыми соединениями, в их составе отсутствуют карбоновые кислоты и в 2—3 раза уменьшилось разнообразие компонентов (см. табл. 4, кальцит).

Во флюидных включениях золотоносного серого кварца месторождения Эльдorado определены содержания изотопов гелия, которые составляют ${}^3\text{He} = 0.0351 \times 10^{-12}$ и ${}^4\text{He} = 0.026 \times 10^{-6}$ $\text{см}^3/\text{г}$ соответственно, при этих параметрах отношение ${}^3\text{He}/{}^4\text{He} = 1.35 \times 10^{-6}$. В работах [Ветрин и др., 2003; Икорский и др., 2006, 2014] показано, что мантийный флюид обогащен изотопом ${}^3\text{He}$, а коровый — ${}^4\text{He}$, а поэтому отношение ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ может быть использовано для диагностики источника флюидов. По данным [Нивин, 2008], большая часть ${}^3\text{He}$ и значительное количество ${}^4\text{He}$, извлекаемых из кварца методом дробления, находятся в тех же флюидных включениях, что и углеводородные компоненты. Выше было показано, что в составе флюидов, сформировавших месторождение Эльдorado, доля углеводородов и их производных достигает 20 отн. %, т. е. они способны транспортировать и гелий. Доля мантийного гелия (${}^3\text{He}$) в золотоносных флюидах Эльдorado, рассчитанная по методу [Халенев, 2010], достигает 11 %. Это дает нам основание считать, что золотоносные флюиды Эльдorado имеют глубинное происхождение.

Полученные изотопные данные серы ($\delta^{34}\text{S}$) сульфидов колеблются в интервале от 7.1 до 17.4 ‰ (см. табл. 5, рис. 8). Большая часть результатов $\delta^{34}\text{S}$ тяжелее значений, приписываемых гранитоидам ($\delta^{34}\text{S} = -3 \dots +7$ ‰) [Ohmoto, Rye, 1979]. Отклонение изотопных величин $\delta^{34}\text{S}$ в положительную сторону, вероятно, свидетельствует о вовлечении в минералообразующую систему серы, ассимилированной поднимающимися гидротермальными растворами с глубинных уровней вмещающих пород.

Не противоречит этому сценарию и возраст формирования месторождения Эльдorado. Возраст регионального метаморфизма кординской свиты, вмещающей месторождение Эльдorado, составляет 1070 ± 130 млн лет [Волобуев и др., 1964; Полева, Сазонов, 2012]. Внедрение и кристаллизация ближайшего Каламинского многофазного гранитоидного массива протекали в период от 880 до 752 млн лет [Ножкин и др., 1999, 2011; Верниковская и др., 2004; Сазонов и др., 2010, 2016; Полева, Сазонов, 2012]. Локальный динамотермальный метаморфизм, результатом которого явились зоны рассланцевания, протекал в период 836—745 млн лет (см. рис. 9). В этих зонах сконцентрированы золоторудные тела, возраст формирования которых составляет 795—710 млн лет [Сазонов и др., 2010]. Наиболее поздние продукты гидротермальной деятельности на месторождении Эльдorado, представленные кварц-калишпатовыми прожилками с пиритом, гематитом, турмалином и хлоритом, имеют возраст по Ar-Ar определениям 549.8 ± 4.6 (плато) и 571.5 ± 4.8 (интегральный) млн лет. Заканчивается гидротермальная деятельность на близлежащем к месторождению Эльдorado месторождении Благодатном формированием безрудных кварц-карбонатных прожилков возрастом 368—364 млн лет [Звягина и др., 2004]. Возрастная близость золотосодержащего оруденения Эльдorado, локального динамотермального метаморфизма позволяет предположить, что активная деятельность гидротермальной системы протекала в зонах рассланцевания и тектонических разломов, спровоцированных внедрением каламинских гранитоидов.

ВЫВОДЫ

Образование золотоносных и незолотоносных кварцевых жил месторождения Эльдorado происходило из различающихся по составу и термобарогеохимическим параметрам флюидов. Золоторудные

тела месторождения сформированы гетерогенными водно-углекисло-углеводородными, восстановленными, металлоносными флюидами в интервале температур от 180 до 490 °С и солёности от 9 до 22 мас. % NaCl-экв., сопровождавшихся вариациями флюидного давления от 0.1 до 2.3 кбар. Наличие манттейного гелия (³He) до 11 % во флюидных включениях кварца и изотопов серы ($\delta^{34}\text{S}$) сульфидов в интервале от 7.1 до 17.4 ‰ указывает на флюиды, поднимающиеся из глубинных очагов по зонам тектонического расщепления, где происходило «кипение» металлоносного флюида. При этих процессах разрушались металлоносные серо- и азотсодержащие углеводородные соединения: кристаллизовались сульфиды, золото и тонкодисперсные выделения графита, аморфного углерода, образуя серый кварц. На золотоносные кварцевые жилы накладывались высокосолёные (>30 мас. % NaCl-экв.) хлоридные флюиды Na-Ca состава при температурах 150—260 °С, являясь результатом воздействия ближайших гранитоидов Каламинского массива.

Незолотоносные кварцевые жилы месторождения Эльдорадо сформированы окисленными, существенно водными, гомогенными флюидами солёностью ниже 15 мас. % NaCl-экв., в интервале температур 150—350 °С.

Выявлена возрастная близость золотого оруденения (795—710 млн лет), локального динамотермального метаморфизма (836—745 млн лет) и внедрение Каламинского многофазного гранитоидного массива (880—752 млн лет). Конструктивные предложения и замечания анонимных рецензентов способствовали улучшению рукописи.

Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № 0330-2016-0005, Российского научного фонда № 14-17-00602П.

ЛИТЕРАТУРА

Акимцев В.А., Пугачев А.М., Суровцев Н.В., Шебанин А.П., Широких И.Н. Идентификация углеродистого вещества из рифейских доломитов Енисейской серии (Кузнецкий Алатау) // Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков. Иркутск, ИГХ СО РАН, 2000, с. 152—153.

Буслаева Е.Ю., Новгородова М.И. Элементоорганические соединения в проблеме миграции рудного вещества. М., Наука, 1989, 152 с.

Буслаева Е.Ю., Новгородова М.И. Элементоорганические соединения в эндогенных рудах. М., Недра, 1992, 234 с.

Борисенко А.С. Изучение солевого состава растворов газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика, 1977, (8), с. 16—27.

Бхаттачарья С., Паниграхи М.К. Гетерогенность флюидных характеристик в районе Рамагри-Пенакачерла восточной части кратона Дарвар: связь с золоторудной минерализацией // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (11), с. 1821—1834.

Верниковская А.Е., Томиленко А.А. Физико-химические особенности формирования золоторудного месторождения Эльдорадо (Енисейский кряж) в условиях эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма // Термобарогеохимия минералообразующих процессов. Новосибирск, ОИГГМ СО РАН, 1992, вып. 2, с. 95—102.

Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Вингейт М.Д., Попов Н.В., Яснев А.М. Древнейшие гранитоиды Заангарья Енисейского кряжа: U-Th-Pb данные по циркону // ДАН, 2004, т. 397, № 2, с. 225—230.

Ветрин В.Р., Каменский И.Л., Икорский С.В., Ганнибал М.А. Ювенильный гелий в архейских эндрейтах и щелочных гранитах Кольского полуострова. // Геохимия, 2003, № 7, с. 699—705.

Волобуев М.И., Зыков С.И., Мусатов С.И., Ступникова Н.И. Стратиграфия и магматические комплексы Енисейского кряжа по геологическим и радиологическим данным // Геология юго-западного обрамления Сибирской платформы. М., Недра, 1964, с. 3—58.

Гибшер Н.А., Томиленко А.А., Сазонов А.М., Рябуха М.А., Тимкина А.Л. Золоторудное месторождение Герфед: характеристика флюидов и *PT*-условия образования кварцевых жил (Енисейский кряж, Россия) // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (11), с. 1851—1867.

Дембо Т.М. Петрология месторождений группы Эльдорадо в Северной Енисейской тайге // Труды НИГРИЗолото, 1941, вып. 7, с. 10—15.

Ермаков Н.П., Долгов Ю.А. Термобарогеохимия. М., Недра, 1979, 271 с.

Жимулев Е.И., Сонин В.М., Бульбак Т.А., Чепуров А.И., Томиленко А.А., Похиленко Н.П. Летучие соединения серы в системе Fe—C—S при 5.3 ГПа и 1300 °С // ДАН, 2015, т. 462, № 3, с. 340—345.

Звягина Е.А., Сазонов А.М., Гончарова С.П. Термодинамические параметры метаморфизма и рудообразования в золоторудном поле месторождения Благодатное // Золото Сибири и Дальнего Востока: геология, геохимия, технология, экономика, экология. Улан-Удэ, Изд-во БНЦ СО РАН, 2004, с. 87—89.

Икорский С.В., Ганнибал М.А., Аведисян А.А. Импрегнирование гелия во флюидные включения в минералах при высоких температурах (по экспериментальным данным на примере кварца и нефелина) // ДАН, 2006, т. 411, № 1, с. 106—110.

Икорский С.В., Каменский И.Л., Аведисян А.А. Изотопы гелия в зонах контакта щелочных интрузивов различного размера (на примерах щелочно-ультраосновного интрузива Озерная, Варака и Ловозерского массива нефелиновых сиенитов, Кольский полуостров) // ДАН, 2014, т. 459, № 4, с. 474—478.

Киргинцев А.Н., Трушников Л.И., Лаврентьева В.Г. Растворимость неорганических веществ в воде. Справочник. Л., Изд-во «Химия», 1972, 247 с.

Константинов М.М. Системы рудообразования в земной коре // Изв. вузов. Геология и разведка, 2009, № 5, с. 22—28.

Ли Л.В. Золоторудные формации Енисейского кряжа // Зап. Красноярского отделения ВМО, 1968, вып. 1, с. 121—127.

Ли Л.В. Золоторудные месторождения докембрия Енисейского кряжа // Геология и полезные ископаемые Центральной Сибири. Вып. 1. Красноярск, КНИИГиМС, 1997, с. 184—248.

Ли Л.В., Даценко В.М. Положение гранитоидных формаций и место золотого оруденения в истории развития Енисейского кряжа // Изв. ТПУ. Вопросы геологии месторождений золота, 1970, т. 239, с. 60—65.

Ляхов Ю.В., Павлунь Н.Н. Некоторые геолого-геохимические особенности процессов золото-концентрации в метаморфогенно-гидротермальных и магматогенно-гидротермальных минералообразующих системах // Рудообразующие процессы: от генетических концепций к прогнозу и открытию новых рудных провинций и месторождений. М., ИГЕМ РАН, 2013, с. 144.

Марчук М.В. Экспериментальное изучение процесса переноса петрогенных и рудных компонентов в восстановленных флюидах: Автореф. дис. ... к.г.-м.н., Иркутск, 2008, 15 с.

Матель Н.Л. Формы нахождения золота в гидротермальных растворах золоторудного месторождения Сухой Лог (Ленский район) (физико-химическое моделирование) // Материалы конференции «Геодинамика, рудные месторождения и глубинное строение литосферы», Екатеринбург, УрО РАН, 2012, с. 169—170.

Некрасова Н.А., Сильянов С.А. Структурная характеристика углеродистого вещества золоторудных месторождений Панимба и Эльдорадо (Енисейский кряж) // Материалы V Международной конференции молодых ученых и специалистов, посвященной памяти академика А.П. Карпинского (Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ). СПб., Изд-во ВСЕГЕИ, 2017, с. 771—774, ISBN-978-5-93761-255-7.

Нивин В.А. Изотопы гелия и аргона в породах и минералах Ловозерского щелочного массива // Геохимия, 2008, № 5, с. 524—545.

Ножкин А.Д., Туркина О.М., Бибикина Е.В., Терлеев А.А., Хоментовский В.В. Рифейские гранитоидные купола Енисейского кряжа: геологическое строение и U-Pb изотопный возраст // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (9), с. 1305—1313.

Ножкин А.Д., Борисенко А.С., Неволько П.А. Этапы позднепротерозойского магматизма и возрастные рубежи золотого оруденения Енисейского кряжа // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (1), с. 158—181.

Осоргин Н.Ю. Хроматографический анализ газовой фазы в минералах (методика, аппаратура, метрология). Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1990, 32 с.

Падефет Р. Химия золота. М., Мир, 1982, 259 с.

Пальянова Г.А., Соболев Е.С., Реутский В.Н., Бортников Н.С. Пиритизированные двусторчатые моллюски из верхнего триаса орогенного золото-сурьмяного месторождения Сентачан (Восточная Якутия): минеральный состав и изотопный состав серы // Геология рудных месторождений, 2016, т. 58, № 6, с. 513—521.

Петров В.Г. Условия золотоносности северной части Енисейского кряжа. Новосибирск, Наука, 1974, 138 с. (Тр. ИГиГ СО АН СССР, вып. 69).

Полева Т.В., Сазонов А.М. Геология золоторудного месторождения Благодатное в Енисейском кряже. М., ОАО «ИТКОР», 2012, 289 с.

Рёддер Э. Флюидные включения в минералах. М., Мир, 1987, т. I, 558 с.

Рябуха М.А., Гибшер Н.А., Томиленко А.А., Бульбак Т.А., Хоменко М.О., Сазонов А.М. РТХ-параметры метаморфогенных и гидротермальных флюидов: изотопия и возраст формирования Богунайского золоторудного месторождения южной части Енисейского кряжа (Россия) // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (6), с. 1153—1172.

Сазонов А.М. Минералогическо-геохимические признаки метаморфогенного генезиса золотого оруденения Средней Сибири // Критерии отличия метаморфогенных и магматогенных гидротермальных месторождений. Новосибирск, Наука, 1985, с. 47—53.

Сазонов А.М. Геохимия золота в метаморфических толщах. Томск, Изд-во ТПУ, 1998, 168 с.

Сазонов А.М., Бернатонис В.К. Особенности формирования золотоносных кварцево-жильных зон в кристаллических сланцах // Геологические и геохимические критерии золотого оруденения. Новосибирск, Наука, 1990, с. 44—57.

Сазонов А.М., Ананьев А.А., Полева Т.В., Хохлов А.Н., Власов В.С., Тимин П.А., Малышева К.И. Золоторудная металлогения Енисейского кряжа: геолого-структурная позиция, структурные типы рудных полей // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии, 2010, № 4, с. 371—395.

Сазонов А.М., Некрасова Н.А., Звягина Е.А., Тишин П.А. Геохронология гранитов, вмещающих сланцев и руд месторождения Панимба (Енисейский кряж) // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии, 2016, № 9, с. 174—188.

Сердюк С.С., Забияка А.И., Гусаров Ю.В. Золото // Тектоника и металлогения Нижнего Приангарья. Красноярск, КНИИГиМС, 2004, с. 203—221.

Сердюк С.С., Коморовский Ю.Е., Зверев А.И., Оябрь В.К., Власов В.С., Бабушкин В.Е., Кириленко В.А., Землянский С.А. Модели месторождений золота Енисейской Сибири. Красноярск, Сибирский федеральный университет, 2010, 584 с.

Середенко Г.А. Генетические особенности развития золотого оруденения Енисейского кряжа // Критерии отличия метаморфогенных и магматогенных гидротермальных месторождений. Новосибирск, Наука, 1985, с. 53—58.

Сонин В.М., Бульбак Т.А., Жимулев Е.И., Томиленко А.А., Чепуров А.И., Похиленко Н.П. Синтез тяжелых углеводородов при температуре и давлении верхней мантии Земли // ДАН, 2014, т. 454, № 1, с. 84—88.

Толстихин И.Н., Прасолов Э.М. Методика изучения изотопов благородных газов из микровключений в горных породах и минералах // Исследования минералообразующих растворов и расплавов по включениям в минералах. Александров, 1971, с. 86—98. (Тр. ВНИИСИМС, т. XIV).

Травин А.В. Термохронология раннепалеозойских коллизионных, субдукционно-коллизионных структур Центральной Азии // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (3), с. 553—574.

Халенев В.О. Изотопный состав гелия и аргона как критерий рудоносности интрузивов Норильского района: Автореф. дис. ... к.г.-м.н. СПб., 2010, 18 с.

Хоменко М.О., Гибшер Н.А., Томиленко А.А., Бульбак Т.А., Рябуха М.А., Семенова Д.В. Физико-химические параметры и возраст формирования Васильковского золоторудного месторождения (Северный Казахстан) // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (12), с. 2192—2217.

Bakker R.J. Fluids: new software package to handle microthermometric data and to calculate isochors // Memoir Geol. Soc., 2001, № 7, p. 23—25.

Blamey N.J.F. Composition and evolution of crustal, geothermal and hydrothermal fluids interpreted using quantitative fluid inclusion gas analysis // J. Geochem. Exp., 2012, v. 116—117, p. 17—27.

Blevin P.L., Chappell B.W. The role of magma sources, oxidation states and fractionation in determining the granite metallogeny of eastern Australia // Trans. R. Soc. Edinburgh: Earth Sci., 1992, v. 83, p. 303—316.

Bottrell S.H., Miller M.F. The geochemical behavior of nitrogen compounds during the formation of black shale hosted quartz-vein gold deposits, North Wales // Appl. Geochem., 1990, v. 5, № 3, p. 289—296.

Bowers T.S. The deposition of gold and other metals: pressure-induced fluid immiscibility and associated stable isotope signatures // Geochim. Cosmochim. Acta, 1991, v. 55, p. 2417—2434.

Brown P.E., Lamb W.M. *P-V-T* properties of fluids in the system $H_2O \pm CO_2 \pm NaCl$: new graphical presentations and implications for fluid inclusion studies // Geochim. Cosmochim. Acta, 1989, v. 53, p. 1209—1231.

Dresselhaus M.S., Pimenta M.A., Eklund P.C. Dresselhaus in «Raman scattering in materials science» / Eds. W.H. Weber, R. Merlin. Springer, 2000, v. 42, 314 p.

Duan Z., Moller N., Weare J.H. A general equation of state for supercritical fluid mixtures and molecular dynamics simulation of mixture *PVTX* properties // Geochim. Cosmochim. Acta, 1996, v. 60, p. 1209—1216.

Dubessy J., Poty B., Ramboz C. Advances in C-O-H-N-S fluid geochemistry based on micro-Raman spectrometric analysis of fluid inclusions // Eur. J. Mineral., 1989, № 1, p. 517—534.

Gize A.F. Organic alteration in hydrothermal sulfide ore deposits // Econ. Geol., 1999, v. 94, p. 967—980.

Gize A.F., Macdonald R. Generation of compositionally atypical hydrocarbons in CO_2 -rich geologic environment // Geology, 1993, v. 21, p. 129—132.

Greenwood P.F., Brocks J.J., Grice K., Schwark L., Dick J.M., Evans K.A. Organic geochemistry and mineralogy. I. Characterisation of organic matter associated with metal deposits // Ore Geol. Rev., 2013, № 50, p. 1—27.

Hardie L.A. Origin of CaCl_2 brines by basalt-seawater interaction insights provided by some simple mass balance calculations // *Contr. Miner. Petrol.*, 1983, v. 82, p. 205—213.

Mernagh T.P., Bierlein F. Transport and precipitation of gold in Phanerozoic metamorphic terranes from chemical modeling of fluid-rock interaction // *Econ. Geol.*, 2008, v. 103, p. 1613—1640.

Norman D.I., Blamey N., Moore J.N. Interpreting geothermal processes and fluid sources from fluid inclusion organic compounds and CO_2/N_2 ratios // *Proceedings of XXVII Workshop on geothermal reservoir engineering*, Stanford University, Stanford, California, January 28—30, 2002, p. 234—241.

Ohmoto H., Rye R.O. Isotopes of sulfur and carbon // *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. N.Y. Wiley, 1979, p. 509—567.

Robert F., Kelly W.C. Ore-forming fluids in Archean gold-bearing quartz veins at Sigma mine, Abitibi greenstone belt, Quebec, Canada // *Econ. Geol.*, 1987, v. 82, p. 1464—1482.

Shelton K.I., McMenam T.A., van Hees E.H., Falck H. Deciphering the complex fluid history of a greenstone-hosted gold deposit: fluid inclusion and stable isotope studies of the Giant Mine, Yellowknife Northwest Territories, Canada // *Econ. Geol.*, 2004, v. 99, p. 1643—1663.

Sokol E., Kozmenko O., Smirnov S., Sokol I., Novikova S., Tomilenko A., Kokh S., Ryazanova T., Reutsky V., Bul'bak T., Vapnik Y., Deyak M. Geochemical assessment of hydrocarbon migration phenomena: Case studies from the south-western margin of the Dead Sea Basin // *J. Asian Earth Sci.*, 2014, v. 93, p. 211—228.

Thiéry R., van den Kerkhof A.M., Dubessy J.J. V_x properties of CH_4 — CO_2 and CO_2 — N_2 fluid inclusions: modelling for $T < 31^\circ\text{C}$ and $P < 400$ bars // *Eur. J. Miner.*, 1994, v. 6, № 6, p. 753—771.

Tomilenko A.A., Gibsher N.A., Dublaynsky Y.V., Dallai L. Geochemical and isotopic properties of fluid from gold-bearing and barren quartz veins of the Sovetskoye deposit (Siberia, Russia) // *Econ. Geol.*, 2010, v. 105, p. 375—394.

Tomilenko A.A., Chepurov A.I., Sonin V.M., Bul'bak T.A., Zhimulev E.I., Chepurov A.A., Timina T.Yu., Pokhilenko N.P. The synthesis of methane and heavier hydrocarbons in the system graphite-iron-serpentine at 2 and 4 GPa and 1200°C // *High Temperatures — High Pressures*, 2015, v. 44, p. 451—465.

Xu G. Fluid inclusions with NaCl - CaCl_2 - H_2O composition from the Cloncurry hydrothermal system, NW Queensland, Australia // *Lithos*, 2000, v. 53, p. 21—35.

*Рекомендована к печати 18 декабря 2017 г.
А.С. Борисенко*

*Поступила в редакцию
21 апреля 2017 г.*