

ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В КВАРЦЕ НА УЧАСТКАХ С УРАНОВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИЕЙ ЛИЦЕВСКОГО РУДНОГО УЗЛА (*Кольский полуостров*)

Т.В. Каулина^{1,2}, А.А. Аведисян^{1,2}, А.А. Томиленко³, М.А. Рябуха³, В.Л. Ильченко¹

¹Геологический институт КНЦ РАН, 184209, Апатиты, ул. Ферсмана, 14, Россия

²Апатитский филиал МГТУ, 184209, Апатиты, ул. Промышленная, 5, Россия

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

На трех участках с урановой минерализацией Лицевского рудного района Кольского полуострова методами микротермометрии, газовой хроматографии и рамановской спектроскопии изучен состав флюидных включений в кварце в породах разного возраста и с разным содержанием урана. Установлены различия в температурах гомогенизации, составе водно-солевой системы и солёности первичных и вторичных флюидных включений в породах по трем участкам (Скальное, Полярное, Дикое) урановой минерализации. Первичные флюидные включения участков Скальное и Дикое характеризуются водно-солевой системой с хлоридами К и Mg (реже Na) и солёностью от 0.2 до 13.9 мас. % NaCl-экв. Во вторичных включениях солёность растворов повышается до 19.5 % NaCl-экв., появляются хлориды Ca. На участке Полярное первичные включения имеют более сложный солевой состав с хлоридами К, Mg, Ca и, возможно, Li, солёность меняется от 1.7 до 10.4 мас. % NaCl-экв. Солёность вторичных включений повышается до 16.9 мас. % NaCl-экв. Газовая составляющая флюида участков Скальное и Дикое представлена практически чистым CO₂ (99.3—100.0 мол. %), в единичных включениях отмечается присутствие N₂ (1.1 мол. %) и CH₄ (0.4 мол. %). На участке Полярное обнаружены только водные включения с азотом. Таким образом, состав флюидов трех участков характеризуется как углекислотно-водный с присутствием хлоридов К, Mg и Ca и незначительной распространенностью водно-солевой системы, представленной только солями Na. Повышение солёности вторичных включений и их более сложный состав, представленный CO₂ с примесью N₂ и CH₄, свидетельствует, что флюид становится более восстановительным и, возможно, с ним связано образование урановой минерализации.

Флюидные включения, кварц, уран, редкоземельные элементы, Лицевский район, Кольский полуостров.

FLUID INCLUSIONS IN QUARTZ FROM URANIUM MINERALIZATION AREAS OF THE LITSA ORE CLUSTER (*Kola Peninsula*)

T.V. Kaulina, A.A. Avedisyan, A.A. Tomilenko, M.A. Ryabukha, and V.L. Il'chenko

Fluid inclusions in quartz from rocks of different ages and with different uranium contents were studied by microthermometry, gas chromatography, and Raman spectroscopy in three areas with uranium mineralization (Skal'noe, Polyarnoe, and Dikoe) in the Litsa ore district of the Kola Peninsula. The studies have revealed differences in the homogenization temperatures, composition of water-salt systems, and salinity of primary and secondary fluid inclusions in the rocks of these areas. Primary fluid inclusions in the rocks of the Skal'noe and Dikoe areas are characterized by a water-salt system with K and Mg (seldom, Na) chlorides and salinity of 0.2 to 13.9 wt.% NaCl equiv. Secondary inclusions are of higher salinity, up to 19.5 wt.% NaCl equiv., and contain Ca chlorides. Primary inclusions in the rocks of the Polyarnoe area show a more complex salt composition with K, Mg, Ca, and, probably, Li chlorides, with salinity varying from 1.7 to 10.4 wt.% NaCl equiv. Salinity of secondary inclusions is higher, up to 16.9 wt.% NaCl equiv. The gas component of fluid in the rocks of the Skal'noe and Dikoe areas is almost pure CO₂ (99.3–100 mol.%); the presence of N₂ (1.1 mol.%) and CH₄ (0.4 mol.%) was revealed in few inclusions only. In the Polyarnoe area, only water inclusions with N₂ were found in the rocks. Thus, the fluids in the rocks of the three areas have mostly a CO₂–H₂O composition with the presence of K, Mg, and Ca chlorides and, seldom, a water-salt composition with the presence of Na salts only. The increased salinity of secondary inclusions and their more complex composition (CO₂ with N₂ and CH₄ impurities) indicate that the fluid became more reducing and might be responsible for the formation of uranium mineralization.

Fluid inclusions, quartz, uranium, REE, Litsa district, Kola Peninsula

ВВЕДЕНИЕ

Лицевский рудный район расположен в северо-западной части Кольского полуострова и является одним из наиболее перспективных в отношении металлогении урана. В результате исследований ГТП «Невскеология» и ВСЕГЕИ [Савицкий и др., 1995] здесь обнаружено около 40 урановых рудопроявлений. Располагаясь в узле пересечения тектонических зон, ограниченных субмеридиональными и субширотными разломами, Лицевский рудный район характеризуется сложным мозаично-блоковым строением. Большинство урановых рудопроявлений Лицевского района расположено в пределах Центрально-Кольского блока, сложенного неоднократно метаморфизованными гнейсами и сланцами Кольской серии архея. Геодинамическая эволюция Лицевского района в составе Центрально-Кольского блока началась в позднем архее и включала несколько тектономагматических циклов, в ходе которых повышалось содержание урана [Афанасьева и др., 2009].

А.В. Савицкий с соавторами [1995] выделили в Лицевском районе четыре типа урановорудной минерализации: 1) редкоземельно-торий-урановая возраста 2750—2650 млн лет в пегматоидных гранитах, кварц-плагиоклаз-ортоклазовых метасоматитах и олигоклазитах; 2) урановая минерализация возраста 2200—2100 млн лет в апогранитных хлорит-альбитовых метасоматитах и альбититах; 3) торий-урановая возраста 1850—1750 млн лет в кварц-альбит-микроклиновых и кварц-микроклиновых метасоматитах и 4) урановая возраста 400—300 млн лет в альбит-гидрослюдисто-хлоритовых метасоматитах.

Урановая минерализация связана в основном с метасоматическими системами в разломных и сдвиговых зонах [Савицкий и др., 1995; Афанасьева и др., 2009; Serov, 2011]. Широкое развитие метасоматических образований во многом обусловлено флюидонасыщенностью сдвиговых зон, что делает необходимым выявление путей миграции флюидов и изучение закономерностей изменения флюидного режима в исследуемых ураново-рудных объектах.

Известно, что на примере изучения составов флюидных включений в крупных урановых месторождениях [Derome et al., 2005; Richard et al., 2010; Мерна, Выгралак, 2011; и др.] выявлены основные закономерности физико-химических условий переноса и отложения урановых руд, которые свидетельствуют о том, что состав флюидных включений во многом обусловлен процессами взаимодействия флюидов с породами, вмещающими урановые рудопроявления. Отложение урановых минералов определяется окислительно-восстановительными условиями, достаточно окислительными, для того чтобы препятствовать осаждению U^{+4} и сохранять U^{+6} в растворе в виде комплексов. Сильно окисленные флюиды должны быть способны к выщелачиванию и транспортировке значительных количеств урана. Осаждение урановых минералов происходит, когда флюид приобретает восстановительные характеристики при смешивании с обогащенными метаном флюидами низкой солености из пород фундамента и/или с флюидами после многочисленных этапов циркуляции, включая флюиды, обогащенные CO_2 как в течение главной стадии отложения руд, так и на более поздних стадиях их преобразования [Мерна, Выгралак, 2011]. Кроме того, в некоторых моделях отмечается необходимость участия в этих процессах сильносоленых растворов (рассолов) [Smith et al., 2013], так как чем выше соленость растворов, тем выше их несущая способность. Однако, согласно некоторым исследователям [Мерна, Выгралак, 2011], изменение солености имеет незначительное влияние на растворимость урана.

В задачу исследований входило изучение различий в составе флюидных включений в разных типах пород на разных участках с урановой минерализацией Лицевского района для выявления закономерностей изменения состава флюидов и их возможного влияния на процессы транспортировки и отложения урана в рудопроявлениях разного типа.

ГЕОЛОГИЯ УЧАСТКОВ С ПРОЯВЛЕНИЯМИ УРАНА

Породы были отобраны по трем участкам с урановой минерализацией: Скальное, Полярное и Дикое (рис. 1). Урановая минерализация на участках Скальное и Дикое относится к редкоземельно-торий-урановому типу в пегматоидных гранитах, кварц-плагиоклаз-ортоклазовых метасоматитах и олигоклазитах (предполагаемого возраста 2.7 млрд лет — $U-Pb$ возраст уранинита [Савицкий и др., 1995]), на участке Полярное — к урановому типу в апогранитных хлорит-альбитовых метасоматитах и альбититах возраста 2.2—2.1 млрд лет ($U-Pb$ и $Pb-Pb$ возраст уранинита [Савицкий и др., 1995]).

Участок Скальное географически расположен на Пароварской дороге между губами Печенга и Титовка на разломе, разделяющем Суормусский и Лиинахамарский блоки. Регионально участок попадает на пересечение тектонических зон Колмозеро-Воронья с Ладожско-Баренцеевской (см. рис. 1). Участок сложен мигматизированными биотитовыми и гранат-биотитовыми гнейсами и плагиогранитами с прослоями амфиболовых гнейсов, телами амфиболитов и дайками габбро-диабазов. Как правило, среднее фоновое содержание урана в позднеархейских гнейсах и гранитоидах ниже 2.5 г/т. Урановые аномалии связаны с телами кварц-полевошпатовых метасоматитов и пегматоидных гранитов в мигматизированных гнейсах. Максимальное содержание урана до 0.4 % [Афанасьева и др., 2009].

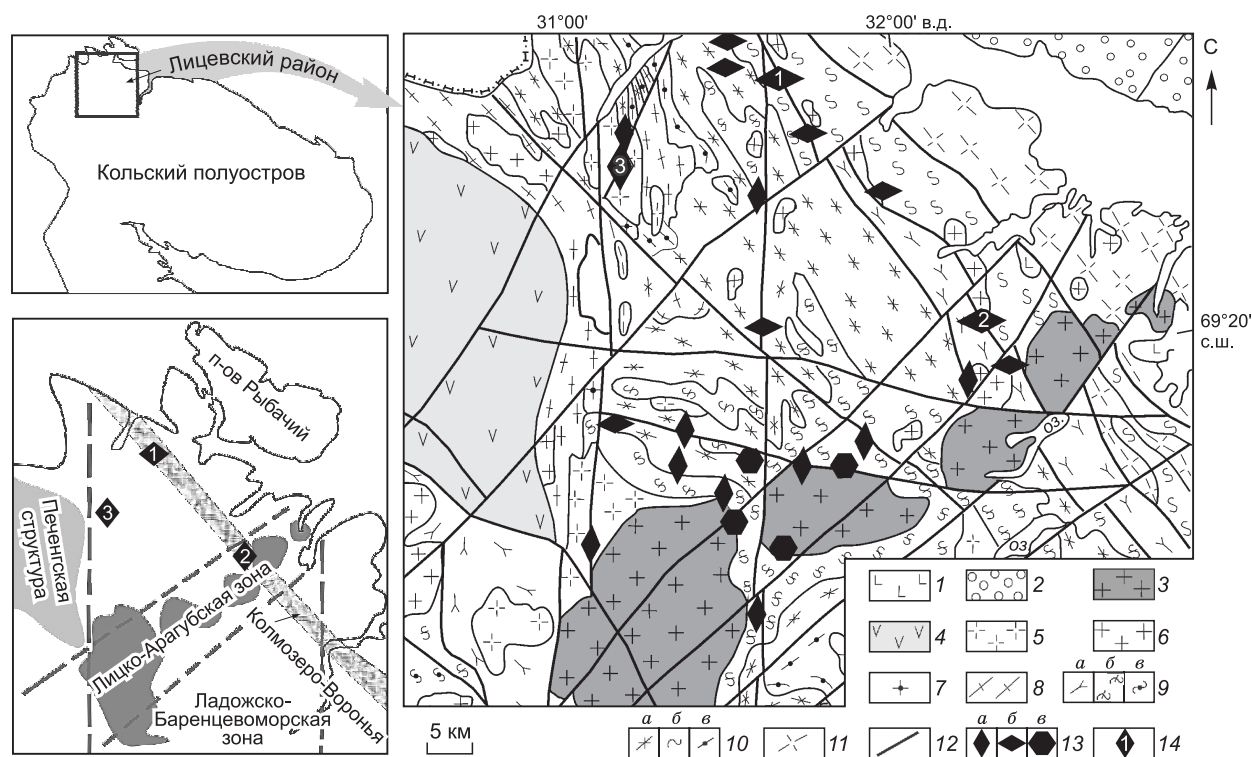


Рис. 1. Фрагмент схематической геологической карты Лицевского района, по [Савицкий и др., 1995], с участками уранового оруденения.

1, 2 — рифей: 1 — габбро-долериты и долериты мурманского комплекса, 2 — песчаники, алевролиты, аргиллиты кильдинской серии; 3—5 — нижний протерозой: 3 — граниты-гранодиориты лицко-арагубского комплекса, 4 — вулканогенно-осадочные породы печенгской серии, 5 — граниты каскельярского комплекса; 6—10 — верхний архей: 6 — граниты вороньинского комплекса, 7 — граниты туломского комплекса, 8 — диориты-плагииграниты порярвинского комплекса, 9 — гнейсы и кристаллосланцы тундровской серии (а — амфиболовые, б — биотитовые, в — нерасчлененные), 10 — гнейсы и кристаллосланцы кольской серии (а — высокоглиноземистые, б — гранат-биотитовые, амфибол-биотитовые, в — амфиболовые и пироксеновые); 11 — нижний архей: тоналиты и плагииграниты; 12 — разломы; 13 — типы уранового оруденения (а — урановый в апогранитоидных хлорит-альбитовых метасоматитах и альбититах, б — редкоземельно-торий-урановый в пегматоидных гранитах, кварц-плаггиоклаз-ортоклазовых метасоматитах и олигоклазитах, в — урановый в альбит-гидрослюдисто-хлоритовых метасоматитах); торий-урановое оруденение в кварц-альбит-микроклиновых и кварц-микроклиновых метасоматитах развито локально в пределах некоторых других рудопроявлений; 14 — участки работ (1 — Скальное, 2 — Дикое, 3 — Полярное).

Участок Полярное расположен на правом берегу р. Печенга в районе оз. Питкяярви в пределах Ровенского блока. В региональном масштабе — на западном фланге Ладожско-Баренцевоморской тектонической зоны (см. рис. 1). Урановое оруденение тяготеет к западному контакту массива гранитов каскельярского комплекса [Савицкий и др., 1995]. Участок сложен мигматизированными биотитовыми и глиноземистыми гнейсами кольской серии и плагиигранитами, метаморфизованными в амфиболитовой фации. В гнейсах широко развиты жильные тела микроклиновых гранитов, амфиболитов, пегматоидных лейкогранитов и пегматитов. Все породы пересекаются зонами катаклаза и милонитизации. Повышенное содержание урана до 0.2 % [Савицкий и др., 1995] связано с линзами хлорит-альбитовых метасоматитов и альбититов во внутренних участках зон катаклаза и милонитизации.

Участок Дикое расположен в районе р. Западная Лица рядом с оз. Дикое в пределах Суормусского блока на пересечении Лицко-Арагубской тектонической зоны и Колмозеро-Вороньей (см. рис. 1). В сильнодеформированных биотитовых, гранат-биотитовых и двуслюдяных гнейсах тундровой серии выявлены две области (1×5 и 1.5×6.0 км) северо-западного простирания, содержащие жильные тела пегматоидных гранитов и кварц-полевошпатовых метасоматитов с аномальной радиоактивностью (100—2700 мкР/ч) и с максимальным содержанием урана до 0.2 % [Serov, 2011].

На участках Скальное и Дикое выделяются два основных минеральных типа оруденения — монацит-циркон-уранинитовый и молибденит-торит-уранинитовый [Савицкий и др., 1995]. Уранинит наблюдается в сростках с апатитом и цирконом. Из сульфидов отмечаются пирит, молибденит, пирротин и галенит.

На участке Полярное урановая минерализация в большинстве случаев представлена уранинитом и вторичными минералами урана (уранофан, казолит и др.). Присутствуют сульфиды: пирит, молибденит, галенит, сфалерит. На хлорит-альбитовые породы с уранинитом иногда накладываются карбонатные изменения с галенитом, сфалеритом, пиритом, в отдельных случаях наблюдаются тонкие прожилки настурана [Савицкий и др., 1995].

При полевых работах были отобраны пробы из основных типов пород на каждом участке на геохимические исследования и изучение флюидных включений в кварце.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование флюидных включений было выполнено в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск). Флюидные включения исследовались методами микротермометрии, КР-спектроскопии (раман-спектроскопии) и газовой хроматографии. Для определения температур общей гомогенизации, температур эвтектики и плавления льда растворов использовалась микротермокамера THMSG-600 фирмы Linkam с диапазоном измерений температур от -196 до $+600$ °С. Соленость минералообразующих растворов находили по температуре плавления льда, используя двухкомпонентную водно-солевую систему ($\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$) [Киргинцев и др., 1972]. Состав водной фазы включений определялся на основании температуры эвтектики, характеризующей водно-солевую систему [Борисенко, 1977].

Анализ валового состава газовой фазы включений в кварце выполнен на хроматографической установке для одновременного определения CO_2 , CO , N_2 , H_2 , H_2S , SO_2 , H_2O , O_2 , CH_4 и других углеводородов, для которых экспериментально установлены следующие пределы обнаружения (нг): CO_2 — 0.06; H_2O — 0.4; H_2 — 0.13; N_2 — 0.03; CO — 0.5; CH_4 — 0.03; C_2H_2 — 0.05; $\text{C}_2\text{H}_4+\text{C}_2\text{H}_6$ — 0.04; C_3H_8 — 0.05; C_4H_{10} — 0.09; C_5H_{12} — 0.08; C_6H_{14} — 0.1 [Осоргин, 1990]. Калибровка хроматографической установки, выполненная путем введения известных количеств чистых газовых компонентов, позволила установить погрешность определения компонентов: CO_2 , C_2-C_n , N_2 , CO , CH_4 — 2 отн. %; H_2 и H_2O — 10 отн. %. Вскрытие флюидных включений проводилось при температуре 600 °С из навески кварца (300 мг) размером 0.25—0.50 мм, отобранного вручную под бинокулярным микроскопом [Томиленко, Гибшер, 2001]. Состав газовой фазы индивидуальных флюидных включений исследован на Раман-спектрометре Horiba Lab Ram HR 800 с полупроводниковым детектором с помощью твердотельного лазера с длиной волны 514 нм, мощностью 50 мВт по методике, изложенной в работе [Dubessy et al., 1989]. Для идентификации фаз использовалась база данных по КР-спектрам фаз во флюидных включениях [Frezzotti et al., 2012].

Изучение флюидных включений позволяет также определять давление и плотность флюидов по двум сингенетичным включениям, находящимся в пределах одного зерна: одно включение существенно водное, газовой-жидкое, второе углекислотное. По газовой-жидкому включению замерялась температура общей гомогенизации, а по углекислотному определялся вид гомогенизации и замерялась температура частичной гомогенизации. Плотность и давление флюида в системе чистой CO_2 , учитывая значение молярного объема и температуру общей гомогенизации, рассчитывались с использованием уравнения Боттинга и Рише [Bottinga, Richet, 1981].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Флюидные включения изучались в зернах кварца в разных типах пород, представленных на участках урановых рудопроявлений, относящихся к двум различным типам [Савицкий и др., 1995]. Представлены породы разного возраста с разным содержанием урана (табл. 1). В отобранных пробах было проведено предварительное оптическое изучение включений в кварце в полированных пластинках (морфология, размеры, фазовые соотношения и ориентировочный состав, их распределение в объеме минеральных зерен и по отношению друг к другу), и сделан вывод об их первичности или вторичности.

Во всех пробах установлено присутствие в кварцевых зернах многочисленных флюидных включений, характеризующихся очень мелкими размерами, не превышающими первые микрометры, что создает определенные трудности в поиске включений, которые могли быть использованы для проведения микротермометрических исследований. Форма включений, как правило, либо округлая, либо слегка удлиненная, в некоторых шлифах отмечается присутствие также включений неправильной, амёбовидной формы. Наряду с однофазными флюидными включениями присутствуют также двухфазные с относительно небольшим газовым пузырьком, занимающим не более 1/5 объема включения.

Включения в метаморфических минералах отнесены Н.П. Ермаковым к отдельному классу [Ермаков, 1972; Ермаков, Долгов, 1979], в котором выделяются 4 основных вида: углекислотные, углеводородные, азотные и водно-солевые [Томиленко, Чупин, 1983]. В изученных нами шлифах присутствуют единичные первичные, первично-вторичные и многочисленные вторичные газовой-жидкие включения.

Таблица 1. Результаты исследования индивидуальных флюидных включений в кварце в породах на участках с урановой минерализацией Лицевского рудного района Кольского полуострова

Проба	Порода (возраст, млрд лет)	U, г/т	Генера- ция вклю- чения	$T_{\text{общ. гом.}}$ °C	$T_{\text{эвт.}}$ °C	Соленость, мас. % NaCl-экв.	$T_{\text{пл. льда}}$ °C	$T_{\text{пл. CO}_2}$ °C	$T_{\text{част. гом.}}$ °C	Вид гомоге- низаци
Скальное										
КТ-1/12	Плагиогранит (2.8)	1.0	П	—	—	—	—	–56.4	–5.1...+3.0	Ж
			В	170–285	–30...–31	0.2–5.3	–0.1...–3.2	—	—	—
КТ-2/12	Плагиогранит (2.8)	0.5	П	—	–23...–41	6.5–18.6	–4.0...–15	—	—	—
			В	96–180	–37...–40	3.4–9.2	–2.0...–6	—	—	—
КТ-3/12	Микроклино- вый гранит (2.5)	5.3	П	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	—
			В							
КТ-4/12	Bt гнейс (2.9—2.8)	4.8	П	133–323	–30...–31	4.8–7.8	–2.9...–5.0	–	–	—
			В	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	—
КТ-4а/12	Qtz-Pl метасо- матит (1.83) ¹	3.9	П, ПВ	122–168	–22...–25	4.5	–2.7	–56.6... –61.0	9.2...27.1	Ж
			В		–46	8.4–13.3	–5.4...–9.4	–56.6	3.2...19.5	»
КТ-5/12	Mu-Bt гнейс (2.9—2.8)	3.0	П, ПВ	150–298	–20...–23	0.4–2.6	–0.2...–1.5	–56.8... –57.0	0.2...21.2	»
			В	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	—
Полярное										
КТ-7а/12	Grt-Bt гнейс (2.9—2.8) ²	2.4	П	124–219	–38...–69	5.9–10.4	–3.6...–6.9	—	—	—
			В	180	–45	2.1	–1.2	—	—	—
КТ-7б/12	Grt-Bt-Qtz порода (2.9— 2.8?)	2.1	П		–49...–50	11.7	–8.0	—	—	—
			В	155–260	–51...–57	12.9–13.9	–9.6...–10.0	—	—	—
КТ-8/12	Сиенит (?)	3.9	П	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	—
			В	184	—	2.6	–1.5	—	—	—
КТ-9/12	Монцогранит (2.7) ⁴	3.4	П	—	—	—	—	–56.6	+13.2	Ж
			В	140–250	–42...–58	6.0–16.9	–3.7...–13.0	—	—	—
КТ-10/12	Bt-Amph гнейс (2.9—2.8) ²	2.4	П	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	—
			В	146	–25...–57	13.4	–9.5	—	—	—
КТ-11/12	Bt гнейс (2.9—2.8) ²	5.0	П	139–262	–28...–42	1.7–5.1	–1...–3.1	—	—	—
			В	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	—
КТ-12/12	Mc гранит (2.4—2.2) ³	1.1	П	»	»	»	»	»	»	—
			В	»	»	»	»	»	»	—
Дикое										
КТ-14/12	Mc гранит кр/з (2.4—2.5)	13.6	П, ПВ	150–158	–35	3.7	–2.2	–56.3...–56.7	–23.2...+24.6	Ж
			В	125–138	–45...–57	17.8–19.5	–14...–16.0	–	–	—
КТ-15/12	Mu-Bt гнейс (~2.8) ²	2.4	П	150–225	–27...–38	1.4–8.4	–0.8...–5.4	–56.3...–56.7	–27.8...+25	Ж
			В	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	—
КТ-16/12	Mu-Bt гнейс (~2.8) ²	1.7	П	270–280	–	1.2	–0.7	–	–	—
			В	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	—
КТ-18/12	Bt-Mu гней- согранит (2.76—2.7) ⁴	0.7	П	152–235	–28...–43	6.5–13.9	–4.0...–10.0	–56.6	–14.2...+9.6	Ж
			В	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	—
ТК-20/14	Пегматит (2.0- 2.2)	110	П, ПВ	»	–42...–48	11.7–16.0	–8.1...–12.0	–56.4...–57.0	+13.0...+27.5	Ж
			В	164 – 186	–34...–39	14.7–16.0	–10.7...–12.0	Не опр.	Не опр.	—
ТК-473а	Mu-Kfs-Qtz метасоматит (2.0—2.2)	25	П	Не опр.	Не опр.	Не опр.	Не опр.	»	»	—
			В	»	»	»	»	»	»	—

Примечание. Содержание урана в породах изучались методом ICP-MS на квадрупольном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ELAN 9000 PRC-e) в Институте химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева (ИХТРЭМС РАН, г. Апатиты). П – первичные включения, В – вторичные включения, ПВ – первично-вторичные. Возраст пород приведен по U-Pb неопубликованным данным авторов или по литературным данным: ¹[Serov, 2011]; ²[Мысцова и др., 2010]; ³[Савицкий и др., 1995]; ⁴[Козлов и др., 2006].

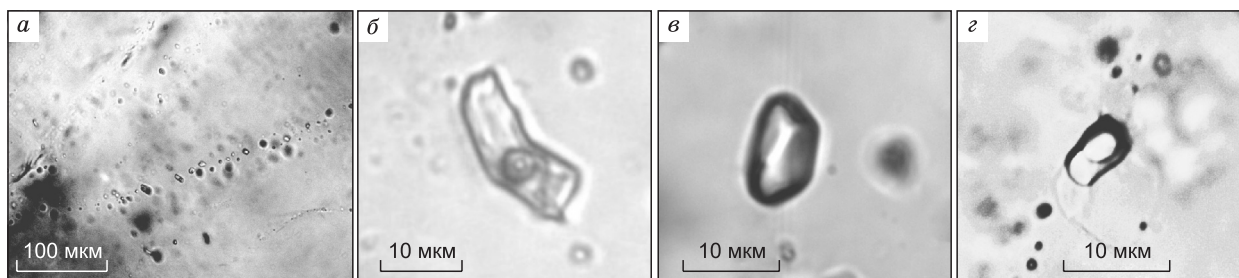


Рис. 2. Основные типы флюидных включений в исследованных породах:

a — первично-вторичные включения, приуроченные к залеченным трещинам; *б* — вторичное водное 2-фазное включение $\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \Gamma$; *в* — единичное первичное однофазное включение CO_2 ; *з* — 2-фазное включение сложного состава ($\text{Ж}_{\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{CH}_4} + \Gamma_{\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{CH}_4}$).

Преобладающие в шлифах вторичные включения образуют системы протяженных цепочек, приуроченных к залеченным трещинам (рис. 2, *a*).

В целом среди изученных флюидных включений можно выделить следующие основные типы:

1. Многочисленные первично-вторичные включения, приуроченные к залеченным трещинам. Как правило, это двухфазные включения, представленные $\text{Ж}_{\text{CO}_2} + \Gamma_{\text{CO}_2}$ (см. рис. 2, *a*).
2. Менее распространенные первично-вторичные и вторичные водные двухфазные включения $\text{Ж}_{\text{H}_2\text{O}} + \Gamma$ (см. рис. 2, *б*).
3. Единичные первичные однофазные включения, представленные чистым CO_2 (см. рис. 2, *в*).
4. Единичные двухфазные включения сложного состава: $\text{Ж}_{\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{CH}_4} + \Gamma_{\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{CH}_4}$, отмеченные только в жильных телах пегматоидных гранитов рудопоявления Дикое (см. рис. 2, *з*).

Температура общей гомогенизации флюидных включений. По всем участкам интервал температур общей гомогенизации (T_h) включений находится в пределах от 100 до 300 °C (см. табл. 1). Наиболее часто отмечаются температуры гомогенизации от 150 до 200 °C с максимумом для первичных включений на участке Скальное и для вторичных включений на участках Полярное и Дикое (рис. 3, *a-в*). Все включения гомогенизировались в жидкую фазу.

Состав и соленость водной фазы включений. Соленость первичных и вторичных включений по трем участкам варьирует от 0.2 до 20 мас. % NaCl-экв. (см. табл. 1, рис. 3, *з-е*). Среди первичных включений участков Скальное и Дикое преобладают низкосолёные растворы с концентрациями до 5 мас. % NaCl-экв. На участке Полярное преобладают первичные включения с солёностью от 5 до 10 мас. % NaCl-экв. Солёность вторичных включений близка или несколько выше, чем первичных для каждого участка. На участке Скальное интервал солёности вторичных включений близок к этому показателю для первичных. На участке Дикое преобладают вторичные включения с более высокой солёностью до 5—10 мас. % NaCl-экв. На участке Полярное преобладают вторичные включения с солёностью 15—20 мас. % NaCl-экв. (см. рис. 3, *з-е*).

В гнейсах участка *Скальное* (пр. КТ-4/12 и КТ-5/12) обнаружены только первичные включения, характеризующиеся температурами эвтектики ($T_{\text{эвт}}$) от –20 до –31 °C и температурами плавления льда от –5 до +0.5 °C. Это свидетельствует о водно-солевой системе состава NaCl и KCl и невысокой солёности флюидов от 0.4 до 7.8 мас. % NaCl-экв (см. табл. 1, рис. 4, *a*).

В плагиогранитах, отобранных по этому же разрезу (пр. КТ-1/12 и КТ-2/12), обнаружены и первичные, и вторичные включения. Первичные включения имеют $T_{\text{эвт}}$ от –24 до –41 °C, что говорит о наличии флюидов, имеющих разный водно-солевой состав с участием солей KCl и MgCl_2 (см. табл. 1, рис. 4, *a*). В значительных пределах изменяется также и солёность первичных включений, от высокосолёных (18.6 мас. % NaCl-экв.) до среднесолёных (6.5 мас. % NaCl-экв.). Во вторичных включениях $T_{\text{эвт}}$ изменяются от –30 до –41 °C, что свидетельствует о сложном солевом составе с участием хлоридов K, Mg и Ca. Солёность вторичных включений варьирует в широких пределах от 0.2 до 9.2 мас. % NaCl-экв. (температуры плавления льда от –0.1 до +6.0 °C) (см. табл. 1).

В метасоматитах (пр. КТ-4а/12) также установлены и первичные, и вторичные включения. В первичных включениях $T_{\text{эвт}}$ изменяются в узких пределах (от –22 до –25 °C), во вторичных до –46 °C, а солёность 4.5 и 13.3 мас. % NaCl-экв. соответственно.

На участке *Полярное* включения были изучены в гнейсах преимущественно биотитового состава, в гранито-гнейсе, в сиените и метасоматите. В гнейсах (пр. КТ-7а/12, КТ-10/12, КТ-11/12) установлено присутствие как первичных, так и вторичных включений. В первичных включениях $T_{\text{эвт}}$ изменяется от –28 до –69 °C (см. табл. 1, рис. 4, *a*). Последнее значение $T_{\text{эвт}}$ установлено в единичной пробе, поэтому

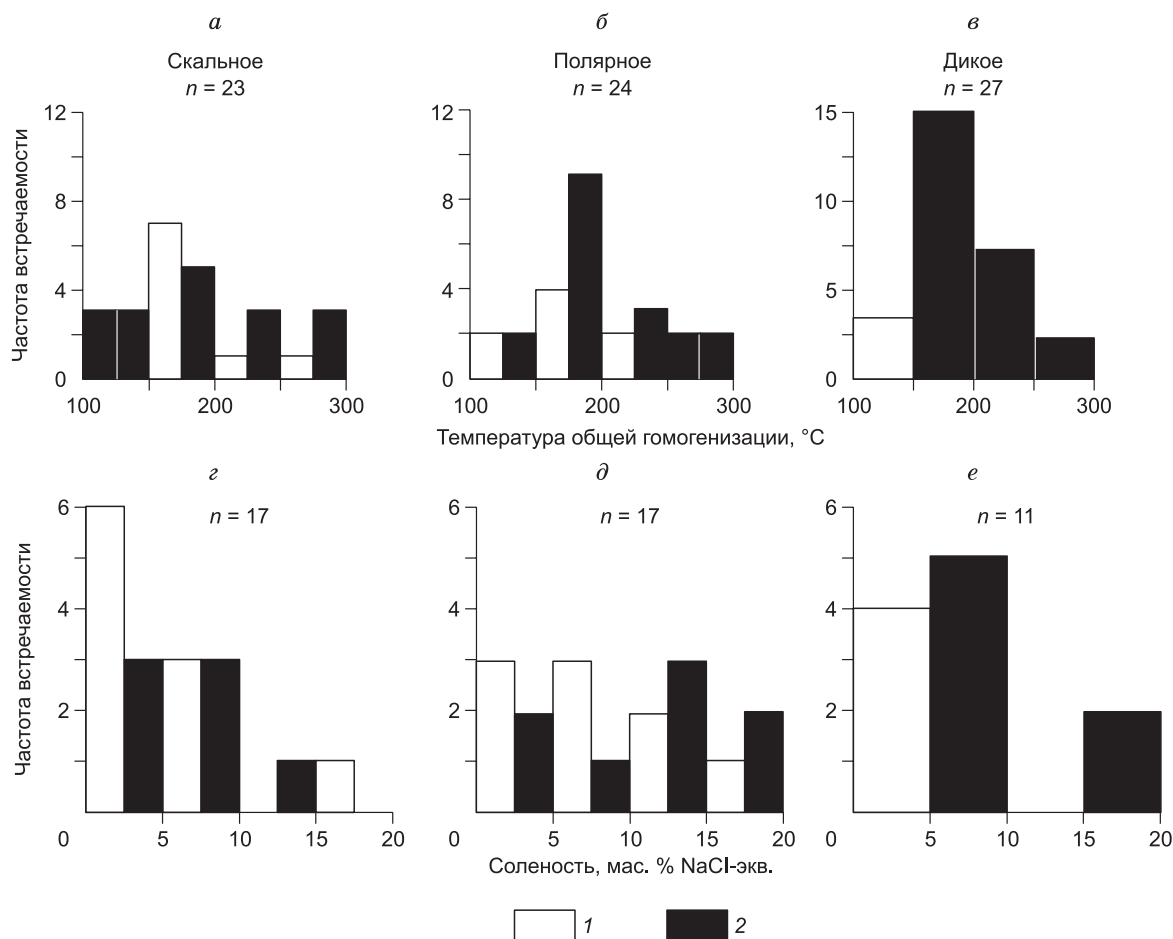


Рис. 3. а, б, в — гистограммы температур общей гомогенизации флюидных включений в зернах кварца по участкам Скальное, Полярное и Дикое; г, д, е — гистограммы значений солености (мас. % NaCl-экв.) растворов флюидных включений.

n — количество определений. 1 — первичное, 2 — вторичные включения.

требует осторожного отношения к интерпретации и проведения дополнительных исследований. Тем не менее такой широкий разброс значений температур эвтектики свидетельствует о сложном солевом составе с участием хлоридов K, Mg и Ca, а также, возможно, и Li. Соленость первичных включений также изменяется в широких пределах от 1.7 до 10.4 мас. % NaCl-экв. (см. табл. 1). Вторичные включения близки и по составу, и по солености к первичным. В них $T_{\text{эвт}}$ изменяются от -25 до -57 °C, а соленость — от 2.1 до 13.4 мас. % NaCl-экв.

В гнейсогранитах (пр. КТ-9/12, КТ-12/12) первичные включения, по которым было возможно провести микротермометрические исследования, не были обнаружены, поэтому температуры эвтектики и температуры плавления льда были определены только во вторичных включениях. Температуры эвтектики в них изменяются в довольно узком диапазоне от -42 до -58 °C при солености от 6.0 до 16.9 мас. % NaCl-экв.

В метасоматите (пр. КТ-76/12) установлены и первичные, и вторичные включения, причем они характеризуются близкими значениями $T_{\text{эвт}}$ и $T_{\text{пл. льда}}$, т. е. имеют близкий водно-солевой состав и значения солености. Значения $T_{\text{эвт}}$ в них варьируют от -49 до -57 °C, а значения солености — от 11.7 до 13.9 мас. % NaCl-экв. (см. табл. 1, рис. 4, а).

В гнейсах участка Дикое (КТ-15/12, КТ-16/12) $T_{\text{эвт}}$ и $T_{\text{пл. льда}}$ были изучены только в первичных включениях, так как вторичных включений достаточных размеров для проведения термометрических исследований обнаружено не было. Установленные в них значения $T_{\text{эвт}}$ -27 и -38 °C свидетельствуют о водно-солевой системе с хлоридами калия и магния и солености от 1.2 до 8.4 мас. % NaCl-экв. (см. табл. 1, рис. 4, а).

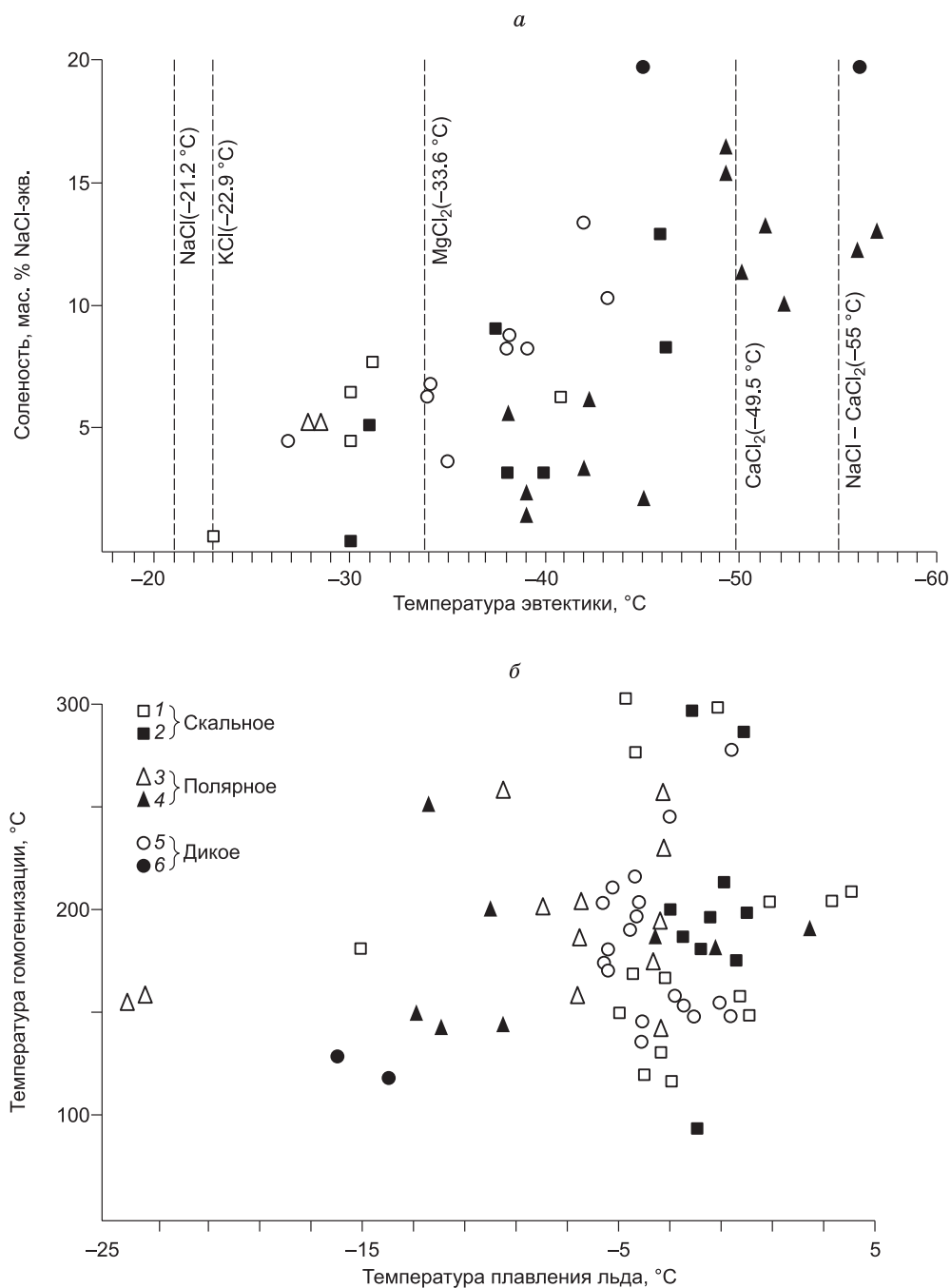


Рис. 4. а — соотношение солёности и температур эвтектики флюидных включений [Бхаттачарайа, Паниграйн, 2011]; **б** — соотношение температур гомогенизации и солёности (температур плавления льда) флюидных включений по трем исследованным участкам с урановой минерализацией.

1, 3, 5 — первичные включения, 2, 4, 6 — вторичные включения.

В биотит-мусковитовом гранитогнейсе (КТ-18/12) также были изучены только первичные включения, в которых $T_{\text{эвт}}$ изменялись от -28 до -43 °C, а солёность — от 6.5 до 13.9 мас. % NaCl-экв.

В жильных телах пегматоидных гранитов участка Дикое (пр. КТ-14/12) было установлено присутствие как первичных, так и вторичных включений. Микротермометрическими исследованиями в первичных включениях установлены $T_{\text{эвт}} -35$ °C, при солёности 3.71 мас. % NaCl-экв. ($T_{\text{пл. льда}} = -2.2$ °C), а во вторичных интервал изменения значений $T_{\text{эвт}}$ составляет от -45 до -57 °C, а солёность — от 17.8 до 19.5 мас. % NaCl-экв. ($T_{\text{пл. льда}} = -14$ и -16 °C) (см. табл. 1, рис. 4, а).

Таблица 2. Состав газовой фазы флюидных включений в мономинеральных фракциях кварца и породах участков с урановым рудопроявлением (Скальное, Полярное и Дикое) по данным газовой хроматографии

Участок	Номер образца	Содержание, мг/кг					Содержание, мол. %			$\frac{\text{CO}_2}{\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}}$	CO_2/CH_4
		CO_2	H_2O	H_2	N_2	CH_4	C	O	H		
Скальное	КТ-1/12	150	420	8.0	0.0	10.0	5.18	33.28	61.54	0.26	15
	КТ-2/12	120	640	6.0	0.0	10.0	3.29	33.27	63.43	0.16	12
	КТ-3/12	120	80	7.0	1.0	10.0	12.45	32.11	55.45	0.60	12
	КТ-4/12	140	830	20.0	3.0	20.0	3.38	30.47	66.15	0.14	7
	КТ-4а/12	40	220	5.0	1.0	9.0	3.91	30.03	66.06	0.15	4.4
	КТ-5/12	110	430	20.0	0.0	10.0	4.10	28.71	67.19	0.20	11
Полярное	КТ-10/12	440	540	7.0	0.0	10.0	9.14	38.68	52.18	0.45	44
Дикое	КТ-14/12	210	200	7.0	0.0	10.0	10.41	36.10	53.49	0.51	21
	КТ-15/12	370	690	8.0	3.0	8.0	6.36	36.72	56.92	0.35	46
	ТК-20/14	420	2200	20.0	2.0	10.0	2.78	33.89	63.33	0.16	42
	ТК-473а/14	110	580	10.0	0.0	10.0	3.28	31.96	64.75	0.16	11
Полярное	КТ-7а/12	80	880	30.0	0.0	2.0	1.71	27.92	70.37	0.08	40
	КТ-7б/12	180	3000	50.0	0.0	2.0	0.78	31.07	68.15	0.06	90
	КТ-8/12	340	3700	30.0	0.0	5.0	1.22	32.98	65.81	0.08	68
	КТ-9/12	100	1200	10.0	0.0	3.0	1.34	32.66	66.00	0.08	33
	КТ-11/12	80	3200	0.0	0.0	0.6	0.38	33.61	66.01	0.02	133
	КТ-11/12*	110	820	Следы	0.0	2.0	0.33	31.18	88.49	0.12	55
	КТ-12/12	150	710	6.0	0.0	2.0	2.01	35.1	62.89	0.17	75
Дикое	КТ-14/12	140	520	7.0	0.0	1.0	2.80	34.28	62.91	0.12	140
	КТ-15/12	60	520	6.0	0.0	0.5	3.38	34.13	62.49	0.10	120
	КТ-16/12	120	610	6.0	0.0	1.0	1.52	32.64	65.83	0.16	120
	КТ-18/12	180	8300	110	0.0	2.0	2.44	33.94	63.62	0.02	90

Примечание. Курсивом показаны номера проб, для которых анализ проводился в породе при температуре 600 °С.

* В породе при температуре 800 °С.

Проведенный анализ соотношения температур гомогенизации и солености (температур плавления льда) также выявил определенные закономерности (см. рис. 4, б). Большинство фигуративных точек первичных включений по трем изученным участкам находятся в узкой области от -7 до $+1$ °С, а температуры гомогенизации от $+110$ до $+220$ °С, что свидетельствует о довольно однородном по составу и низкотемпературном характере флюида. В эту же область попадают и фигуративные точки вторичных включений участка Скальное, что свидетельствует о близости составов первичных и вторичных включений этого участка. Из анализа этого же графика (см. рис. 4, б) следует, что вторичные включения участков Дикое и, в большей степени, участка Полярное характеризуются более высокими значениями солености при таких же невысоких температурах гомогенизации.

Состав газовой составляющей флюидов. Изучение состава газовой составляющей методом газовой хроматографии было проведено как в мономинеральных фракциях кварца, так и в породе (табл. 2, рис. 5, а).

Состав газовой составляющей флюидов участка *Скальное* по данным хроматографии представлен (мг/кг): CO_2 (40—150), H_2O (80—830), N_2 (0—3), CH_4 (9—20). Отношение $\text{CO}_2/(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}) = 0.14—0.60$, а $\text{CO}_2/\text{CH}_4 = 4.4—15$.

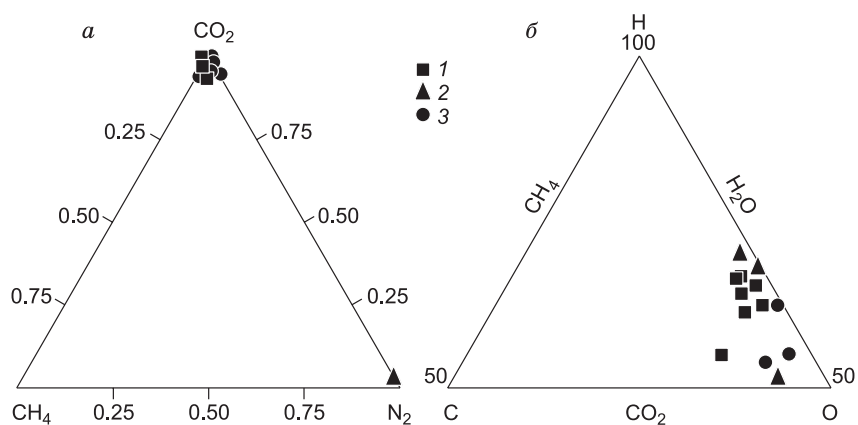
Для участка *Полярное* хроматографический анализ был проведен в мономинеральной фракции кварца только в пр. КТ-10/12 (биотитовый гнейс), в которой содержание $\text{CO}_2 = 440$, $\text{H}_2\text{O} = 550$, $\text{N}_2 = 0$, $\text{CH}_4 = 10$. Отношение $\text{CO}_2/(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}) = 0.45$, а $\text{CO}_2/\text{CH}_4 = 44$ (см. табл. 2).

Для участка *Дикое* содержание $\text{CO}_2 = 110—440$, $\text{H}_2\text{O} = 200—2200$, $\text{N}_2 = 0—3$, $\text{CH}_4 = 8—10$. Отношение $\text{CO}_2/(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}) = 0.16—0.51$, а $\text{CO}_2/\text{CH}_4 = (11—46)$.

Данные газовой хроматографии мономинеральных фракций кварца свидетельствуют, что в составе газовой составляющей исследованных участков с ураново-рудной минерализацией преобладающими компонентами являются вода и уголекислота, а содержание метана не превышает 20 мг/кг, наиболее ча-

Рис. 5. Состав газовой составляющей флюидов (мол. %) в кварце из пород разных участков с урановой минерализацией по данным КР-спектроскопии (а) газовой хроматографии (б).

Участки: 1 — Скальное, 2 — Полярное, 3 — Дикое.



сто отмечаются значения 10 мг/кг. Азот присутствует не во всех пробах и значения его не превышают 3 мг/кг.

Результаты, полученные по породе в целом, также показывают преимущественно углекислотно-водный состав флюида (см. табл. 2).

Исследование газовой фазы индивидуальных флюидных включений методом КР-спектроскопии (табл. 3, рис. 5, б) показало, что газовая составляющая флюидов в кварцах плагиогранитов и метасоматитов участка Скальное представлена практически чистым CO_2 (99.3–100 мол. %), и только в единичных включениях отмечается присутствие азота (1.1 мол. %) и CH_4 (0.4 мол. %).

На участке Полярное были обнаружены только водные включения с азотом, а на участке Дикое в кварце гнейсогранитов флюиды представлены практически чистым CO_2 (95.1–100 мол. %), иногда в них присутствует примесь азота (4.9 мол. %). Более сложный состав флюидов отмечен во включениях в

Таблица 3. Результаты КР-спектроскопических исследований флюидных включений в кварце из пород участков Скальное, Полярное и Дикое (Лицевский район, Кольский полуостров)

Участок	Номер образца и включения	Название породы	Содержание, мол. %		
			CO_2	CH_4	N_2
Скальное	КТ-1/12а-1	Плагиогранит	100	0.0	0.0
	КТ-1/12а-2	«	0.0	0.0	0.0
	КТ-1/12б-1	«	99.3	0.0	1.1
	КТ-1/12а-2	«	0.0	0.0	0.0
	КТ-1/12а-3	«	100	0.0	0.0
	КТ-4а/12б-1	Кварцевый метасоматит	99.6	0.4	0.0
	КТ-4а/12б-2	«	100.0	0.0	0.0
	КТ-5/12-1	Мусковит-биотитовый гнейс	0.0	0.0	100.0
Полярное	КТ-76/12-2	Гранат-биотит-кварцевый метасоматит	0.0	0.0	0.0
	КТ-76/12-3	«	0.0	0.0	0.0
	КТ-10/12б-1	Биотитовый гнейс	0.0	0.0	100.0
Дикое	КТ-14/12а-1	Микроклиновый лейкогранит крупно-гигантозернистый	98.7	Сл.	1.3
	КТ-14/12а-2	«	98.9	Сл.	1.1
	КТ-14/12а-3	«	98.8	0.33	0.8
	КТ-14/12а-10	«	98.6	Сл.	1.3
	КТ-18/12-2	Биотит-мусковитовый лейкократовый гнейсогранит	100.0	0.0	0.0
	КТ-18/12-3	«	95.1	0.0	4.9
	КТ-18/12-5	«	100.0	0.0	0.0
	КТ-18/12-10	«	Н.о.	Н.о.	Н.о.
	КТ-18/12-11	«	100.0	0.0	0.0

Примечание. Сл — следы, Н.о. — не обнаружено.

Таблица 4. Значения давления и плотности, определенные по сингенетичным включениям

Номер образца	Порода	T_h^*	$T_{пл}^* \text{ CO}_2$, °C	$T_{\text{част. гом.}}$ (в жидкость), °C	Плотность, г/см ³	Давление, кбар
КТ-5/12	Кварц из Му-Вт гнейса	298	-56.8	+0.2 ... +15.3	0.82—0.93	1.5—2.3
КТ-14/12	Кварц из жилы микроклинового гранита	150—158	-56.5	-23.2 ... +8.4	0.87—1.05	1.0—1.9
КТ-18/12	Кварц из Вт-Му гнейсогранита	162—235	-56.6	-14.4 ... +9.6	0.87—1.00	1.1—2.3

* Температура гомогенизации (°C).

кварце из жильных тел пегматоидных гранитов (пр. КТ-14/12). Газовая составляющая этих включений представлена преимущественно CO_2 (см. табл. 3), но в ней также присутствует N_2 (0.8–1.3 мол. %) и CH_4 (от следовых количеств до 0.3 мол. %).

Давление и плотность флюидов были определены по парным сингенетичным включениям, обнаруженным в обр. КТ-5/12 (участок Скальное) и в обр. КТ-14/12 и КТ-18/12 (участок Дикое). Полученные значения показали плотность в пределах 0.82–1.05 г/см³ при давлении от 1.0 до 2.3 кбар (табл. 4). Можно отметить более высокую плотность и более низкое давление флюидов в молодых микроклиновых гранитах по сравнению с архейскими гнейсами.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные являются первыми результатами, характеризующими водно-солевой состав флюидных включений в породах Лицевского ураново-рудного района, так как подобные исследования здесь ранее не проводились.

Как уже отмечалось, Лицевский район претерпел несколько последовательных стадий обогащения ураном от архея до палеозоя, которые привели к образованию более чем 40 урановых рудопроявлений различных типов. Как правило, среднее фоновое содержание урана в позднеархейских гнейсах и гранитоидах ниже 2.5 г/т. Лицко-Арагубские гранитоидные массивы возраста 1.7 млрд лет, которые мигматизируют вмещающие гнейсы, характеризуются повышенным содержанием урана (больше 5 г/т) [Serov, 2011]. Наиболее ранняя урановая минерализация связана с урансодержащими пегматоидными гранитами и кварц-полевошпатовыми метасоматитами, которые раньше считались архейскими — 2.7 млрд лет (U-Pb возраст уранинита) [Савицкий и др., 1995], а по данным последних исследований циркона и уранинита имеют протерозойский возраст 2.2–1.83 млрд лет (U-Pb SHRIMP-II) [Serov, 2011]. Участки *Скальное* и *Дикое* являются характерными представителями этого типа урановой минерализации. Геохимические исследования и полевые наблюдения [Serov, 2011] позволили предположить в качестве основного магматического процесса на этих участках частичное плавление архейских пород с последующим обогащением ураном магматического расплава. Дальнейшая ремобилизация урана связана с процессами мусковитизации в сдвиговых зонах [Serov, 2011].

В плагиогранитах участка Скальное состав первичных и вторичных включений очень близок. И в тех, и других включениях водно-солевая система характеризуется присутствием хлоридов К и Mg с соленостью от 0.2 до 9.2 мас. % NaCl-экв. Во вмещающих биотитовых и биотит-мусковитовых гнейсах обнаружены только первичные включения низкой солености с водно-солевой системой с хлоридами Na и К. Необходимо отметить, что водно-солевая система, представленная преимущественно хлоридами Na, отмечается только в первичных включениях гнейсов участка Скальное, а также в первичных включениях метасоматитов на этом же участке. В метасоматитах здесь встречаются и первичные, и вторичные включения. По составу водно-солевой системы и ее концентрации первичные и первично-вторичные включения — низкосолёные с преобладанием хлоридов Na и К. Вторичные включения по составу водно-солевой системы отличаются от первичных, так как они характеризуются присутствием в водно-солевой системе хлоридов Mg и более высокой концентрацией растворов.

На участке Дикое, который относится [Савицкий и др., 1995] к такому же типу урановой минерализации, что и участок Скальное, в первичных включениях микроклиновых гранитов и гнейсогранитов в водно-солевой системе флюидов присутствуют хлориды К и Mg с концентрациями от 3.7 до 13.9 мас. % NaCl-экв., а во вторичных включениях микроклиновых гранитов водно-солевая система характеризуется присутствием солей Mg и Ca с более высокой соленостью от 17.8 до 19.5 мас. % NaCl-экв., т. е. вторичные включения в микроклиновых гранитах имеют другой состав и являются более высококонцентрированными по сравнению с первичными включениями, а также с вторичными включениями плагиогранитов участка Скальное. Вмещающими породами здесь также являются биотитовые и биотит-мусковитовые гнейсы, в которых обнаружены только первичные включения. В отличие от состава

флюидов на участке Скальное, первичные включения в гнейсах участка Дикое имеют состав, сходный с составом включений в микроклиновых гранитах и гнейсогранитах, и характеризуются водно-солевой системой с хлоридами К и Mg с соленостью от 1.4 до 8.4 мас. % NaCl-экв, т. е. несколько ниже, чем в гнейсогранитах.

Анализ соотношения температур гомогенизации и солености (температур плавления льда) первичных включений по трем изученным участкам свидетельствует о довольно однородном по составу и низкотемпературном характере флюида, что позволяет предполагать их метаморфический генезис.

Газовая составляющая флюидов в кварцах участков Скальное и Дикое представлена по данным КР-спектроскопии практически чистым CO_2 , и только в единичных включениях отмечается присутствие азота и CH_4 , а по результатам хроматографического анализа флюиды имеют преимущественно углекислотно-водный состав с незначительным количеством метана.

Более сложный солевой состав с участием хлоридов К, Mg и Са во вторичных включениях гнейсов и древних гранитоидов обоих участков может быть связан с внедрением микроклиновых гранитов возраста 2.5 млрд лет. Отмеченное в целом повышение солености во вторичных включениях, особенно в жильных телах пегматоидных микроклиновых гранитов участка Дикое (возраста 2.4—2.5 млрд лет), в которых также отмечен более сложный состав флюидов, преимущественно представленный CO_2 с примесью N_2 и CH_4 (до 0.3 мол. %), свидетельствует, что флюид становится более восстановительным и, возможно, именно с ним связано образование первой урановой минерализации 2.2—2.1 млрд лет. Тем не менее в собственно ураноносных пегматитах участка Дикое (пр. ТК-20/14 и ТК-473а) возраста 2.2 млрд лет повышается содержание воды, что согласуется с гидротермально-метасоматическим характером урановой минерализации.

Участок *Полярное* относится к другому типу урановой минерализации, связанной с хлорит-альбитовыми метасоматитами и альбититами, развивающимися по вмещающим гнейсам и жилам пегматоидных гранитов, датированных Rb-Sr и U-Pb методами в 2.2 ± 0.2 млрд лет [Виноградов, Виноградова, 1984]. U-Pb-возраст уранинита определен в 2165 ± 42 млн лет, возраст настурана, связанного с карбонатными изменениями 375 ± 18 млн лет [Савицкий и др., 1995].

На участке Полярное во вторичных флюидных включениях гнейсогранитов водно-солевая система так же, как на участке Дикое, характеризуется присутствием хлоридов Mg и Са с соленостью от 6.0 до 16.9 мас. % NaCl-экв. (первичные включения — газовые углекислотные). В гнейсах обнаружены и первичные, и вторичные включения, которые как по составу, так и по солености очень близки.

Сопоставление первичных и вторичных флюидных включений в метасоматитах участка Полярное с метасоматитами участка Скальное свидетельствует о том, что они различаются как по составу, так и по концентрациям. На участке Скальное первичные включения в метасоматитах имеют преимущественно Na-K состав и низкую соленость, а на участке Полярное в них присутствуют главным образом хлориды Mg со средней соленостью. Во вторичных включениях участка Скальное отмечается присутствие преимущественно солей Mg с соленостью растворов от 8.4 до 13.3 мас. % NaCl-экв., в то время как на участке Полярное при сходных значениях солености водно-солевая система характеризуется присутствием преимущественно солей Са.

Возможно, что сложный солевой состав (с хлоридами К, Mg, Са и, возможно, Li) первичных включений в гнейсах на участке *Полярное* обусловлен именно наложенными процессами альбитизации. Подтверждением этому предположению может служить близость составов и солености вторичных и первичных включений. По геохимическим данным, вмещающие породы обладают высокой изменчивостью содержания K-Na-Ca, также предположительно связанной с процессом альбитизации. Возможность отложения уранинита/настурана в результате взаимодействия гидротермальных растворов с вмещающими породами кислого состава, сопровождающегося «раскислением» плагиоклазов до альбита, отмечалась и другими исследователями [Щербина и др., 2013]. Они также отмечали, что при этом происходит поступление в раствор катионов H^+ , образующихся в результате гидролиза при перестройке каркаса породообразующих алюмосиликатов, что компенсируется преимущественным привнесом катионов Са, Mg, Fe. Именно процессы альбитизации рассматриваются как наиболее вероятные для объяснения высвобождения значительных количеств Са на крупных урановых месторождениях Канады [Richard et al., 2010]. По-видимому, эти процессы могут также объяснять преимущественно Са-Mg состав солевых растворов флюидных включений, установленный нами в Лицевском районе. Однако необходимо подчеркнуть, что, в отличие от крупных урановых месторождений, флюиды в Лицевском районе характеризуются не столь высокой соленостью. Это подтверждается сопоставлением полученных физико-химических параметров гидротермальных растворов для трех исследованных участков урановых рудопроявлений в Лицевском районе с данными по 90 урановым месторождениям и рудопроявлениям [Наумов и др., 2015]. Установленные нами наиболее благоприятные температуры гомогенизации, давления и плотности флюидных включений находятся в пределах значений, отмеченных для этой выборки. Различия заметны только в значениях солености рудоносных растворов. Как было установлено

[Наумов и др., 2015], более 42 % месторождений урана характеризуются значениями солености от 10 до 30 мас. % NaCl-экв., в то время как, по нашим данным, в Лицевском районе соленость большинства флюидных включений находится в интервале до 10 мас. % NaCl-экв.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые проведены исследования водно-солевого состава флюидных включений в кварце различных пород по трем участкам с ураново-рудными проявлениями в Лицевском районе Кольского полуострова. Полученные результаты показали, что состав флюидов характеризуется преобладанием преимущественно хлоридов K, Mg и Ca и незначительной распространенностью водно-солевой системы только с солями Na. Предположительно, низкосолёные и низкотемпературные водно-углекислотные флюиды первичных включений могут иметь метаморфогенный генезис. Фазовое разделение этого метаморфогенного флюида могло привести к появлению чисто водного флюида с низкой соленостью и углекислотного флюида [Бхаттачарья, Паниграи, 2011]. Эти представления хорошо согласуются с предложенным ранее механизмом формирования некоторых рудопроявлений урана, согласно которому одним из ведущих факторов рудообразования является дегазация рудоносного раствора [Щербина и др., 2013]. В настоящее время считается общепризнанным, что наиболее реальной формой переноса урана могут быть уранил-карбонатные ионы, и отложение урана (в форме уранинита/настурана) связано с разрушением этих комплексных ионов, которое может происходить при подъеме рудоносного раствора в верхние уровни земной коры и поступлении в систему сопряженных трещин. В результате падения общего давления, под которым находился гомогенный рудоносный раствор, насыщенный газовыми компонентами, в частности углекислотой, являющейся характерным компонентом ураноносных гидротермальных растворов, происходит расслоение раствора на газовую и жидкую фазы. Таким путем могло происходить удаление углекислоты из рудоносного раствора, что сопровождалось изменением его кислотности, разрушением уранил-карбонатных комплексных ионов, восстановлением и отложением урана [Щербина и др., 2013].

Вероятным источником флюидов средней и реже высокой солености (часто характеризующихся присутствием Ca) во вторичных включениях могли служить гранитоидные массивы, внедрение которых было вызвано процессами активизации. Смешение окисленных флюидов с более восстановленными флюидами могло привести к осаждению урана, подобно тому, как это описывается в публикациях по крупным урановым месторождениям Канады и Австралии [Derome et al., 2005; Richard et al., 2010; Мер-на, Выгралак, 2011; и др.]. Возможно, отсутствие значимого месторождения в Лицевском рудном районе не может быть объяснено низкой минерализацией флюидов фундамента, а также сравнительно невысокой минерализацией более поздних флюидов, так как считается, что чем выше соленость, тем выше несущая способность растворов.

Работа проводилась в рамках выполнения Госзадания ГИ КНЦ РАН. Изучение флюидных включений в ИГМ СО РАН проведено при поддержке РФФИ (грант 14-05-00443).

ЛИТЕРАТУРА

Афанасьева Е.Н., Михайлов В.А., Былинская Л.В., Липнер А.А., Серов Л.В. Ураноносность Кольского полуострова // Информационный сборник «Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов». М., ВИМС, 2009, вып. 153, с. 18—26.

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

Бхаттачарья С., Паниграи 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.

Виноградов А.И., Виноградова Г.В. Эволюция ультраметабазитов и диафорических процессов и связанного с ними уран-ториевого и редкоземельного минералогенеза в полиметаморфическом комплексе Кольских гнейсов // Метаморфизм и метаморфогенное рудообразование раннего докембрия. Апатиты, КФ АН СССР, 1984, с. 37—46.

Ермаков Н.П. Геохимические системы включений в минералах. М., Недра, 1972, 376 с.

Ермаков Н.П., Долгов Ю.А. Термобарогеохимия. М., Недра, 1979, 272 с.

Киргинцев А.Н., Трушников Л.Н., Лаврентьева В.Г. Растворимость неорганических веществ в воде. Л., Химия, 1972, 244 с.

Козлов Н.Е., Сорохтин Н.О., Глазнев В.Н., Козлова Н.Е., Иванов А.А., Кудряшов Н.М., Мартынов Е.В., Тюрменов В.А., Матюшкин А.В., Осипенко Л.Г. Геология архея Балтийского щита. СПб., Наука, 2006, 345 с.

Мерна Т.П., Выгралак Э.С. Исследование флюидных включений урановых и медных минеральных систем в прослое Мерфи (Северная Австралия) // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (11), с. 1802—1820.

Мыскова Т.А., Глебовицкий В.А., Милькевич Р.И., Бережная Н.Г., Скублов С.Г. Уточнение состава и возраста глиноземистых гнейсов Урагубской зеленокаменной структуры позднего архея, Кольский полуостров // Зап. РМО, 2010, № 3, с. 15—21.

Наумов В.Б., Дорофеева В.А., Миронова О.Ф. Физико-химические параметры формирования гидротермальных месторождений по данным исследований флюидных включений. III. Месторождения урана // Геохимия, 2015, № 2, с. 123—143.

Осоргин Н.Ю. Хроматографический анализ газовой фазы в минералах. Новосибирск, 1990, 32 с. (Препринт / ИГиГ СО АН СССР, № 11).

Савицкий А.В., Громов Ю.А., Мельников Е.В., Шариков П.И. Урановое оруденение Лицевского района на Кольском полуострове (Россия) // Геология рудных месторождений, 1995, № 5, с. 403—416.

Томиленко А.А., Чупин В.П. Термобарогеохимия метаморфических комплексов. Новосибирск, Наука, 1983, 201 с.

Томиленко А.А., Гибшер Н.А. Особенности состава флюида в рудных и безрудных зонах Советского кварц-золоторудного месторождения (по данным изучения флюидных включений) // Геохимия, 2001, № 2, с. 167—177.

Щербина В.В., Наумов Г.Б., Макаров Е.С., Герасимовский В.И., Ермолаев Н.П., Тарасов М.С., Тугаринов А.И., Барсуков Вик.Л., Соколова Н.Т., Коченов А.В., Германов А.И. Основные черты геохимии урана. Томск, Из-во STT, 2013, 374 с.

Bottinga Y., Richet P. High pressure and temperature equation of state and calculation of the thermodynamic properties of fluid carbon dioxide // Amer. J. Sci., 1981, v. 281, p. 615—660.

Derome D., Cathelineau M., Cuney M., Fabre C., Lhomme T., Banks D.A. Mixing of sodic and calcic brines and uranium deposition at McArthur River, Saskatchewan, Canada: a Raman and laser-induced breakdown spectroscopic study of fluid inclusions // Econ. Geol., 2005, v. 100, p. 1529—1545.

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. Miner., 1989, № 1, p. 517—534.

Frezzotti M.L., Tecce F., Casagli A. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis // J. Geochem. Explor., 2012, v. 112, p. 1—20.

Richard A., Pettke T., Cathelineau M., Boiron M.C., Mercadier J., Cuney M., Derome D. Brine-rock interaction in the Athabaska basement (McArthur River U deposit, Canada): consequences for fluid chemistry and uranium uptake // Terra Nova, v. 22, 2010, p. 303—308.

Serov L. Métallogénèse de l'uranium dans la région de Litsa (Péninsule de Kola, Russie). Docteur de l'Université Henry Poincaré (en Géosciences). Soutenance publique le 24 juin 2011. Nancy, France, 2011, 166 p.

Smith M.P., Gleeson S.A., Yardley B.W.D. Hydrothermal fluid evolution and metal transport in the Kiruna District, Sweden: Contrasting metal behavior in aqueous and aqueous-carbonic brines // Geochim. Cosmochim. Acta, 2013, v. 102, p. 89—112.

*Рекомендована к печати 8 февраля 2017 г.
Н.В. Соболевым*

*Поступила в редакцию
28 апреля 2016 г.*