

---

---

**МИНЕРАЛЫ  
И ПАРАГЕНЕЗИСЫ МИНЕРАЛОВ**

---

---

**СОСТАВ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В КВАРЦЕ ИЗ ПОРОД УЧАСТКА  
БЕРЕГОВОГО ЛИЦЕВСКОГО УРАНОВОРУДНОГО РАЙОНА,  
КОЛЬСКИЙ РЕГИОН**

© 2020 г. д. чл. Т. В. Каулина<sup>1, \*</sup>, А. А. Аведисян<sup>1</sup>, М. А. Рябуха<sup>2</sup>, В. Л. Ильченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Геологический институт Кольского научного центра РАН,  
ул. Ферсмана, д. 14, Апатиты, 184209 Россия

<sup>2</sup>Институт геологии и минералогии им В.С. Соболева СО РАН,  
пр. Академика Коптюга, д. 3, Новосибирск, 630090 Россия

\*e-mail: kaulina@geoksc.apatity.ru

Поступила в редакцию 06.02.2020 г.

После доработки 24.03.2020 г.

Принята к публикации 08.04.2020 г.

Проведено изучение водно-солевого и газового состава флюидных включений в кварце из пород участка Берегового Лицевского урановорудного района, где было обнаружено несколько урановых рудопроявлений с возрастом 1.8 и 0.4 млрд лет. Состав флюидных включений изучен методами микротермометрии и рамановской спектроскопии. По данным проведенных исследований компонентами рудоносного флюида выступали растворы  $MgCl_2-H_2O$  и  $CaCl_2-H_2O$  средней и высокой солёности (7–21 мас. % NaCl экв.). Подобный флюид формировался за счет магматических и постмагматических источников в интервале 1.85–1.75 млрд лет. В последующий период состав флюида во включениях из кварц-полевошпатовых жил эволюционировал в направлении NaCl–KCl состава. Формирование урановых рудопроявлений участка Береговое происходило в интервале температур от 100 до 250 °С в малоглубинных условиях (0.5–0.9 кбар) в открытой системе при участии водных растворов и газовой фазы, в составе которой преобладали метан и азот, либо газовой фазы углекислотного состава с примесью азота и метана.

*Ключевые слова:* флюидные включения, гидротермальная урановая минерализация, Лицевский район, Кольский регион

**DOI:** 10.31857/S086960552003003X

## ВВЕДЕНИЕ

Лицевский урановорудный район расположен на северо-западе Кольского региона и является одним из наиболее перспективных. Северо-запад Кольского региона представляет собой длительно развивавшуюся полициклическую структуру, Лицевский район приурочен к узлу пересечения разрывных структур среди архейских метаморфических пород и мигматит-гранитов. В исходных супракрустальных толщах и образованных по ним метаморфических породах кольской серии неоднократно формировались метаморфогено-метасоматические рудогенные системы различной продуктивности (Виноградов, Виноградова, 1984). В результате проведенных в Лицевском районе исследований установлено, что формирование и преобразование урановых рудопроявлений было связано с масштабной протерозойской и палеозойской гидротермальной деятельностью, проявившейся в зонах региональных долгоживущих разломов (Савицкий и др., 1995; Афанасьева и др., 2009; Serov, 2011).

Широкое развитие метасоматических образований во многом обусловлено флюидонасыщенностью вмещающих толщ, что делает необходимым изучение закономерностей изменения флюидного режима в исследуемых урановорудных объектах. Исследования флюидных включений в кварце из жил и линз, а также вмещающих пород урановых рудопроявлений Лицевского района направлены на выявление различий химизма, условий и механизмов взаимодействия рудообразующих флюидов, способствовавших переносу и отложению руд.

Ранее нами были изучены флюидные включения в кварце на участках с ранней урановой минерализацией возраста 2.3–2.1 млрд лет (Скальное, Полярное и Дикое) (Каулина и др., 2017). В настоящей статье приводятся данные по флюидным включениям на рудопроявлениях участка Береговое с более поздней урановой минерализацией возраста 1850–1750 и 400–380 млн лет (Савицкий и др., 1995; Serov, 2011).

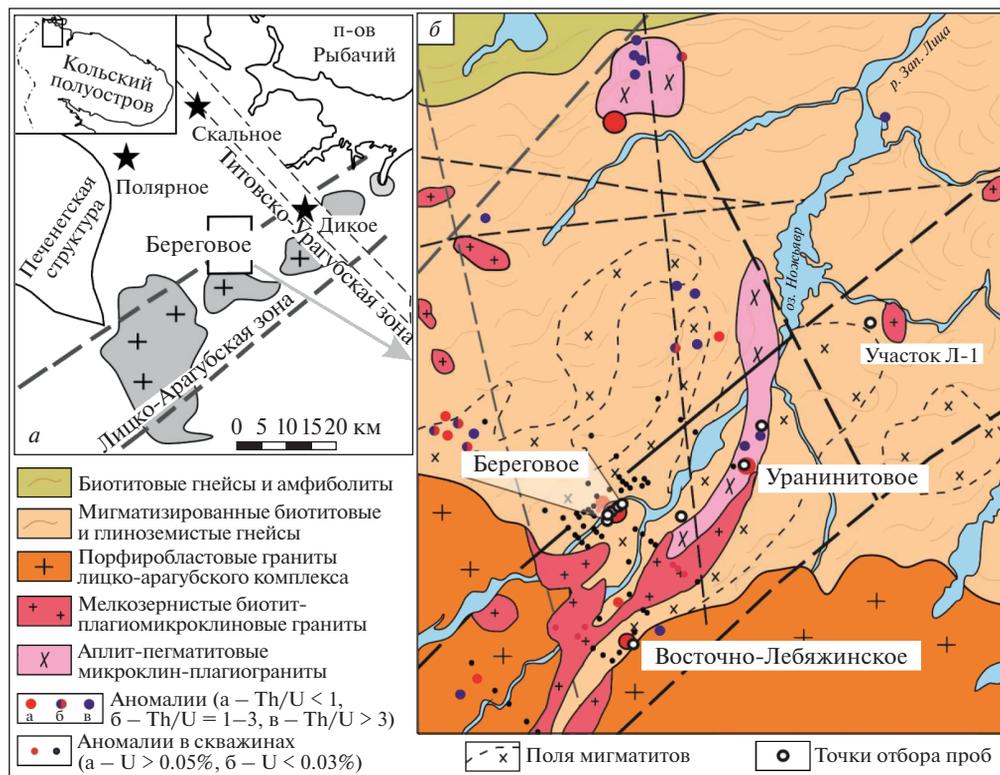
### ГЕОЛОГИЯ УЧАСТКА БЕРЕГОВОЕ

Участок Береговое расположен в северном экзоконтакте массива Лебяжка комплекса лицко-арагубских гранитоидов и сложен мигматизированными биотитовыми, гранат-биотитовыми и двуслюдянными гнейсами кольской серии с телами мелкозернистых лейкократовых биотитовых гранитов и аплит-пегматоидных микроклиновых гранитов. В пределах участка Береговое выделяются несколько рудопроявлений урана: Береговое, Уранинитовое и Восточно-Лебяжинское (рис. 1).

Характерной особенностью участка Береговое является его расположение в пределах Лицко-Арагубской тектонической зоны, которая сформировалась в результате резкого изменения тектонического плана на заключительной стадии карельского этапа тектоногенеза. Тектонические процессы сопровождались внедрением гранитов по северо-восточным разломам, ориентированным вкрест общего простирания Печенгско-Имандра-Варзугского пояса. Ураноносные метасоматиты в пределах этой зоны приурочены к разрывным нарушениям ранне- и позднекарельской протоактивизации и узлам их пересечения с поперечными разрывными структурами, среди которых наиболее четко выражены северо-восточные и субширотные зоны дробления и трещиноватости (Савицкий и др., 1995).

В пределах участка выделяется два типа оруденения: раннее Th-U в кварц-альбит-микроклиновых и кварц-микроклиновых метасоматитах и позднее урановое в альбит-гидрослюдисто-хлоритовых метасоматитах. Оруденение первого типа имеет в районе ограниченное распространение. Оно развито в основном в экзоконтактовых и реже в апикальных частях Лицкого и Лебяжинского массивов гранитоидов лицко-арагубского комплекса (Савицкий и др., 1995). Все точки урановой минерализации этого типа размещаются в биотит- и силлиманит-биотитовых гнейсах, пересекаемых дайками основных пород с интенсивными гидротермально-метасоматическими изменениями. Урановая минерализация, в основном, вскрыта скважинами, имеет гнездово-вкрапленный и редко линзообразный характер с содержанием урана выше 0.01%, отмечается до глубин 300–400 м. Основные радиоактивные минералы – уранинит, браннерит, торит. Возраст уранинита из кварц-альбит-микроклиновых метасоматитов, оцененный уран-свинцовым методом, варьирует от 1850 до 1750 млн лет, возраст браннерита составляет  $1830 \pm 20$  млн лет (Савицкий и др., 1995).

Урановое оруденение второго типа контролируется зонами дробления и интенсивной тектонической трещиноватости. Мощность этих зон достигает 40–50 м. Рудные тела залегают в метасоматитах в виде пологонаклонных линз и штокверков, протяженностью от первых метров до десятков метров. Содержание урана в них варьирует от 0.01 до 0.1 мас. % при величине Th/U отношения менее 0.1. Первичные урановые минералы представлены преимущественно настураном, а также коффинитом и уранинитом. В ассоциации с урановыми минералами отмечаются пирит, халькопирит,



**Рис. 1.** Схема Лицевского урановорудного района с участками урановых рудопроявлений (а, серым цветом выделены тела лицко-арагубских гранитоидов) и геологическая карта участка Береговое (б, по: Serov, 2011).

**Fig. 1.** Scheme of the Litsa uranium-ore area with uranium ore occurrences (а, bodies of litsa-araguba granitoids are marked by gray color) and geological map of the Beregovoe locality (б, after Serov, 2011).

пирротин, сфалерит и галенит. Возраст уранового оруденения этого типа, определенный U-Pb методом по настурану на соседнем Лицевском месторождении, равен  $370 \pm 20$  млн. лет (Савицкий и др., 1995). Урановая минерализация вскрыта также скважинами (Serov, 2011).

По литературным и нашим данным восстанавливается следующая возрастная последовательность в районе: гнейсы кольской серии – 2.9–2.8 млрд лет (Мыскова и др., 2010), лейкограниты – 2.8–2.7 млрд лет (неопубликованные данные авторов), гранитоиды лицко-арагубского комплекса – 1.77–1.75 млрд лет (Ветрин, 2014), микроклин-кварцевые жилы – 1.85–1.75 млрд лет (Савицкий и др., 1995), пегматитовые жилы и линзы – предположительно 1.75 млрд лет, зоны кварц-хлоритовых изменений – 0.40–0.38 млн лет (Савицкий и др., 1995; Serov, 2011).

**Точки отбора проб и описание образцов.** Для изучения флюидных включений на каждом рудопроявлении были отобраны образцы преимущественно из крупнозернистых пород (рис. 1, табл. 1). Большинство из них представлено гранитами или лейкогранитами с массивной текстурой и гипидиоморфнозернистой структурой, обусловленной идиоморфизмом плагиоклаза и микроклина по отношению к кварцу. Вторичные минералы представлены серицитом, глинистыми минералами, хлоритом, которые раз-

виваются по плагиоклазу, мусковиту и биотиту соответственно. Ниже представлено краткое описание участков отбора образцов.

*Рудопроявление Береговое* расположено на правом берегу реки Западная Лица. Вмещающие породы представлены мигматизированными биотитовыми, гранат-биотитовыми и двуслюдяными гнейсами с телами лейкогранитов. Гнейсы секутся дайками базитов с интенсивно проявленными процессами хлоритизации. Также отмечается локальная карбонатизация и альбитизация. Урановая минерализация вскрыта 5-ю скважинами (Савицкий и др., 1995; Афанасьева и др., 2009). Для изучения флюидных включений в кварце были отобраны образцы из лейкогранитов (Б-4ф и Б-5ф), из пегматитовой жилы (Б-8ф) и вмещающих биотитовых гнейсов (Б-6ф).

*Рудопроявление Уранинитовое* сложено лейкогранитами, в которых развиты крупнозернистые и пегматоидные полевошпат-кварцевые жилы и линзы. Образцы отобраны из пегматоидной полевошпат-кварцевой (У-1ф) линзы с кристаллами кварца размером до 15 см в диаметре и крупнозернистой плагиоклаз-кварцевой (У-1-1ф) жилы, а также из биотитовых гнейсов (У-2/16) и лейкогранитов (У-2ф и У-4ф).

*Рудопроявление Восточно-Лебяжинское* локализовано в биотитовых гнейсах непосредственно на контакте с массивом гранитов лицко-арагубского комплекса. Образцы отобраны из лейкогранитов лицко-арагубского комплекса (ВЛ-1/16) и вмещающих гнейсов (ВЛ-2/16).

*Участок Л-1* расположен в биотитовых гнейсах, где обнажены тела мелкозернистых плагиомикроклиновых гранитов. Отобран образец Л-1-2/16, представленный кианит-биотитовым гнейсом.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Включения в кварце изучались в петрографических шлифах и пластинках, полированных с двух сторон, методами оптической микроскопии (ГИ КНЦ РАН, г. Апатиты), микротермометрии и КР-спектроскопии (Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск). 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 рассчитывалась по температуре плавления льда с использованием двухкомпонентной водно-солевой системы  $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$  (Киргинцев, Трушников, 1972). Состав водной фазы включений определялся на основании температуры эвтектики, характеризующей водно-солевую систему (Борисенко, 1977). Состав газовой фазы индивидуальных флюидных включений исследован на рамановском спектрометре Horiba Lab Ram HR 800 с полупроводниковым детектором с помощью твердотельного лазера с длиной волны 514 нм, мощностью 50 мВт (Гибшер и др., 2011).

Акцессорная минерализация изучалась в аншлифах на электронном сканирующем микроскопе LEO-1450 (Carl Zeiss AG, Oberkochen) с энергодисперсионной приставкой XFlash-5010 Bruker Nano GmbH в Геологическом институте КНЦ РАН, г. Апатиты.

Определение содержаний редких элементов, в том числе урана, в породах проводилось методом ICP-MS на масс-спектрометре ELAN 9000 DRC-e (Perkin Elmer, Waltham, MA, USA) в Центре коллективного пользования в Институте химии и технологии редких элементов и минерального сырья им А.В. Тананаева (ИХТРЭМС РАН, г. Апатиты).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Изучение шлифов (табл. 1) показало, что зерна кварца в большинстве пород, особенно в гнейсах и лейкогранитах, существенно деформированы (имеют блочное и мозаичное погасание) и перекристаллизованы (гранулированы). Следовательно, флюид-

**Таблица 1.** Минералого-петрографическая характеристика образцов, отобранных для изучения флюидных включений в кварце  
**Table 1.** Mineralogy and petrography of samples collected for the study of fluid inclusions in quartz

Номер пробы	Порода	Минеральный состав (об. %)	Характеристика кварца
<i>Рудопоявление Береговое</i>			
Б-4ф и Б-5ф	Лейкограниты – крупно-среднезернистый и мелко-среднезернистый	Кварц 40–35, плагиоклаз 25, микроклин 35, мусковит – до 5, рудный минерал	Кварц образует зерна неправильной формы в интерстициях между субидiomорфными зернами плагиоклаза и микроклина
Б-6ф	Биотитовый гнейс	Кварц 30, плагиоклаз 30, микроклин 25, биотит 15, циркон	Кварц образует ксеноморфные зерна с волнистым погасанием, иногда линзовидные сегрегации, вытянутые вдоль сланцеватости
Б-8ф	Полевошпат-кварцевая пегматитовая жила	Кварц 85, микроклин 10–12, альбит – до 5, мусковит в интерстициях зерен кварца и микроклина, рудный минерал	Две генерации кварца: крупные зерна с блочным и мозаичным погасанием и более мелкие зерна с волнистым, реже мозаичным погасанием
<i>Рудопоявление Уранинитовое</i>			
У-1ф	Полевошпат-кварцевая пегматоидная жила	Кварц 65, микроклин 30, плагиоклаз 5, рудный минерал	Две генерации кварца: 1 – крупный (10–20 мм) сливной кварц, 2 – линзы и цепочки мелких зерен (0.2–5 мм), возникших в результате грануляции сливного кварца при поступлении рудных растворов. Границы зерен – извилистые и зубчатые, подчеркнутые тонкодисперсными выделениями рудных минералов. Сливной кварц имеет блочное погасание, внутри блоков – мозаичное погасание. Мелкий кварц имеет мозаичное и волнистое погасание
У-1-1ф	Пегматитовая линза	Кварц 60, плагиоклаз 30, микроклин 10–8	Кварц представлен зернами сливного кварца, размером до 15 см, в шлифе видно блочное погасание с прямолинейными границами блоков. Есть микроучастки грануляции с образованием более мелкого кварца
У-2ф	Лейкоплагиогранит крупно-среднезернистый	Кварц 50, альбит 30, микроклин 10–12, мусковит 10, биотит – до 3, монацит, рудный минерал	Кварц образует зерна неправильной формы, размером до 5 мм с волнистым и мозаичным погасанием.
У-2/16	Крупнозернистый гранит	Кварц 40, плагиоклаз 35, микроклин 20, мусковит 5	Кварц образует ксеноморфные зерна с волнистым погасанием.
У-4ф	Лейкогранит порфировидный крупнозернистый	Кварц 35, плагиоклаз 30, микроклин 35, мусковит, биотит ≤2	Кварц образует зерна неправильной формы в интерстициях между плагиоклазом и микроклином, грануляция отсутствует
<i>Рудопоявление Восточно-Лебяжинское</i>			
ВЛ-1/16	Лейкогранит среднезернистый	Кварц – 40, альбит – 25, микроклин 30, мусковит ≤5	Кварц развит в интерстициях между полевыми шпатами и представлен неправильной формы зернами с мозаичным погасанием

Таблица 1. Окончание

Номер пробы	Порода	Минеральный состав (об. %)	Характеристика кварца
ВЛ-2/16	Биотитовый гнейс	Плагиоклаз 30, кварц 30, микроклин 28, биотит 12, циркон <1 <i>Участок Л-1</i>	Кварц образует ксеноморфные зерна с волнистым погасанием
Л-1-2/16	Кианит-биотитовый (глиноземистый) гнейс	Плагиоклаз 30, кварц 20, биотит 30, кианит 20, рудный минерал, рутил	Кварц образует ксеноморфные зерна с волнистым погасанием

ные включения в этих зернах характеризуют, скорее всего, состав флюида наложенных метаморфических и гидротермальных процессов.

Предположительно первичные и первично-вторичные включения встречаются в виде небольших скоплений, либо образуют линейно-вытянутые цепочки, не выходящие за пределы кварцевых зерен. Обычно они имеют размеры 20–50 мкм, в единичных случаях – до 80 мкм. Вторичные включения приурочены к залеченным трещинам, секущим границы кварцевых зерен. Основные типы включений в изученных породах представлены на рис. 2.

**Микротермометрические исследования.** Результаты исследований приведены в табл. 2. Все включения гомогенизировались в жидкую фазу. В кварце из лейкогранитов *руднопроявления Берегового* первичные включения имеют температуру гомогенизации 120–130 °С. Соленость включений низкая (0.18–1.7 мас. % NaCl экв.). Температура эвтектики  $T_{эвт}$  меняется от –34 до –49 °С, что указывает на различный водно-солевой состав флюида: от  $MgCl_2-H_2O$  до  $CaCl_2-H_2O$  (по: Борисенко, 1977).

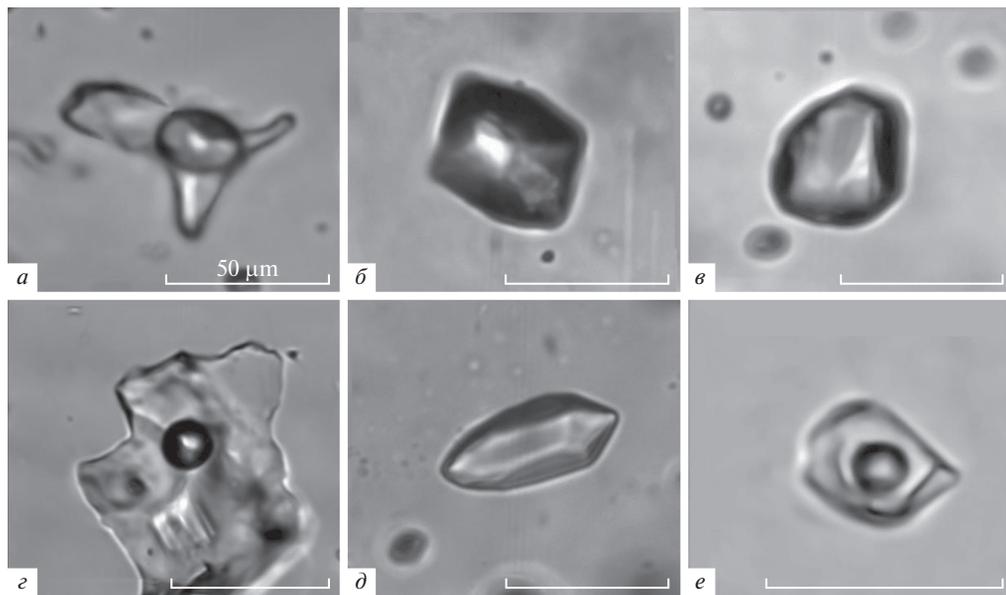
Вторичные включения в кварце лейкогранита Б-4ф отличаются значительно более высокими значениями солености, составляющими 9.2–20.7 мас. % NaCl экв. (температуры плавления льда от –6.0 до –17.6 °С). Состав водно-солевой системы представлен преимущественно хлоридами Са с температурами эвтектики от –46 до –51 °С.

В кварце пегматитовой жилы (Б-8ф) состав включений согласно температуре эвтектики (–22 до –39 °С) варьирует от NaCl–KCl–H<sub>2</sub>O до  $MgCl_2-H_2O$  состава. Соленость включений средняя (7.0–13.8 мас. % NaCl экв.). Гомогенизация происходит в интервале температур от 153 до 240 °С в жидкую фазу.

В однофазных включениях в кварце из жилы, представленных жидкой углекислотой, температура частичной гомогенизации изменяется от +27.7 до +30.7 °С. По сингенетичным включениям, находящимся в одной группе, были определены плотность и давление рудообразующего флюида (по: Гибшер и др., 2011), которые составили 0.63–0.66 см<sup>3</sup>/г и 0.5–0.7 кбар соответственно.

В кварце из пород *руднопроявления Уранинитового* обнаружено наибольшее количество включений размером до 80 мкм, пригодных для исследования микротермометрическим методом (рис. 2). Температура гомогенизации первичных включений во всех породах меняется в довольно широком интервале (от 100 до 240 °С).

В пегматоидной полевошпат-кварцевой жиле (У-1ф) первичные включения в кварце характеризуются температурой эвтектики от –35 до –46 °С, что предполагает преимущественно  $MgCl-CaCl_2$  состав водно-солевой системы с низкой соленостью (1.4–2.2 мас. % NaCl экв.). Вторичные включения характеризуются более высокой температурой эвтектики (от –26 до –30 °С) и водно-солевым составом NaCl–KCl–H<sub>2</sub>O при



**Рис. 2.** Флюидные включения в кварце из пород участка Береговое. *a* – двухфазовое включение состава  $H_2O-CO_2-CH_4$  в пробе Б-8ф, *б* – включение жидкой углекислоты в пробе Б-8ф; *в* – газовое включение  $CH_4 + N_2$  в пробе ВЛ-2/16; *г* – двухфазовое включение состава  $H_2O-N_2$  в пробе У-1-1ф; *д* – водное включение в пробе У-1ф; *е* – двухфазовое включение состава  $H_2O-CH_4$  в пробе У-2ф.

**Fig. 2.** Fluid inclusions of different type in quartz from rocks of the Beregovoe site. *a* – two-phase inclusion of  $H_2O-CO_2-CH_4$  composition in the sample B-8f, *б* – inclusion of liquid  $CO_2$  in the sample B-8f; *в* – gas inclusion of  $CH_4-N_2$  composition in the sample VL-2/16; *г* – two-phase inclusion of  $H_2O-N_2$  composition in the sample U-1-1f; *д* – water inclusion in the sample U-1f; *е* – two-phase inclusion of  $H_2O-CH_4$  composition in the sample U-2f.

более высокой солёности (до 10 мас. % NaCl экв.). В пегматитовой линзе (У-1-1ф) наблюдается такая же закономерность: первичные включения с солями Mg и низкой солёностью (1.7–4.3 мас. % NaCl экв.), вторичные включения –  $NaCl-KCl-H_2O$  состава средней солёности (7.8–8.6 мас. % NaCl экв.).

В лейкоплагиограните (У-2ф) в первичных включениях более низкой температуре эвтектики (–35...–39 °С) отвечает водно-солевой состав с солями Mg при средней солёности (5.0–10.5 мас. % NaCl экв.). Вторичные включения  $NaCl-KCl-H_2O$  состава имеют низкую солёность (2.7–3.9 мас. % NaCl экв.) В крупнозернистом граните (У-2/16) первичные и вторичные включения имеют состав  $MgCl_2-KCl-H_2O$ , но разную солёность (2.4–2.9 и 11.0–14.5 мас. % NaCl экв. соответственно). В порфириновидном лейкограните (У-4ф) первичные и вторичные включения отличаются по температурам гомогенизации (129–180 и 178–240 °С соответственно) и солёности: первичные включения – более солёные (7.9–10.5 мас. % NaCl экв.), вторичные – менее солёные (1.7–4.2 мас. % NaCl экв.). Водно-солевая система флюида образована преимущественно хлоридами Mg.

*Восточно-Лебяжинское рудопроявление и участок Л-1.* Температуры гомогенизации первичных и вторичных включений в кварце гнейсов и гранитов меняются в интервале от 127 до 250 °С. Первичные включения в кварце лейкогранитов лишко-арагубского комплекса характеризуются довольно высокими значениями солёности (от 10.5 до

**Таблица 2.** Результаты исследования флюидных включений в кварце в породах рудопроявлений участка Береговое  
**Table 2.** Results of fluid inclusions study in quartzs from rocks of the ore-occurrences of the Beregovoe area

Проба	Порода	U, ррт	Генерация включений	T общ. гом., °C	T эвт., °C	Соленость, мас. % NaCl экв.	T пл. льда, °C	Состав раствора
<i>Рудопроявление Береговое</i>								
Б-4ф	Лейкогранит	59	П	120–130	–34...–49	0.18–1.7	–0.1...–1.0	MgCl <sub>2</sub> и CaCl <sub>2</sub> –NaCl–H <sub>2</sub> O
Б-5ф	Лейкогранит	1.9	В	–	–46...–51	9.2–20.7	–6.0...–17.6	CaCl <sub>2</sub> и CaCl <sub>2</sub> –KCl–H <sub>2</sub> O
Б-6ф	Биотитовый гнейс	1.3	П	–	–39	0.53	0.3	MgCl <sub>2</sub> –KCl–H <sub>2</sub> O
Б-8ф	Полевошпиг-кварцевая пегматитовая жила	0.2	ПВ	150 153–240	–19 –22...–39	–	–	NaCl–H <sub>2</sub> O NaCl и MgCl <sub>2</sub> –KCl–H <sub>2</sub> O
<i>Рудопроявление Уранишитовое</i>								
У-1ф	Полевошпиг-кварцевая пегматитовая жила	0.1	П	100–143	–35...–46	1.4–2.2	–0.8...–1.3	MgCl <sub>2</sub> –NaCl и CaCl <sub>2</sub> –H <sub>2</sub> O
У-1-1ф	Пегматитовая линза	0.1	В	122	–26...–30	10.1	–6.7	NaCl–KCl–H <sub>2</sub> O
У-2ф	Лейколагит	–	П	215	–21...–34	1.7–4.3	–1.0...–2.6	NaCl и MgCl <sub>2</sub> –H <sub>2</sub> O
У-2/16	Крупнозернистый гранит	9.2	В	150–170	–19...–30	7.8–8.6	–5.0...–5.5	NaCl–KCl–H <sub>2</sub> O
У-4ф	Лейкогранит порфиоровидный	2.2	П	159	–35...–39	5.0–10.5	–3.0...–7.0	MgCl <sub>2</sub> –NaCl...MgCl <sub>2</sub> –KCl–H <sub>2</sub> O
			В	–	–26...–31	2.7–3.9	–1.6...–1.7	NaCl–KCl–H <sub>2</sub> O
			П	–	–44...–46	11.0–14.5	–7.4...–10.5	MgCl <sub>2</sub> –KCl–H <sub>2</sub> O
			В	–	–46	2.4–2.9	–1.4...–1.7	MgCl <sub>2</sub> –KCl–H <sub>2</sub> O
			П	128–180	–33...–41	7.9–10.5	–5.0...–7.0	MgCl <sub>2</sub> и MgCl <sub>2</sub> –KCl–H <sub>2</sub> O
			В	178–240	–31...–43	1.7–4.2	–1.1...–2.5	NaCl–КС и MgCl <sub>2</sub> –KCl–H <sub>2</sub> O
<i>Рудопроявление Восточно-Лебяжинское</i>								
ВЛ-1/16	Лейкогранит	3.6	П	134–219	–55...–59	10.5–16.6	–7.0...–12.7	CaCl <sub>2</sub> –NaCl–H <sub>2</sub> O
ВЛ-2/16	Биотитовый гнейс	1.5	В	127–143	–34	1.1	–0.6	MgCl–H <sub>2</sub> O
			П	180–250	–41...–61	5.4–18.6	–3.3...–15.0	MgCl <sub>2</sub> –KCl и CaCl <sub>2</sub> –NaCl–H <sub>2</sub> O
<i>Участок Л-1</i>								
Л-1-2/16	Кианит-биотитовый гнейс	1.5	П	150–184	–44...–59	7.0–18.7	–4.4...–15.2	MgCl <sub>2</sub> –КС и CaCl <sub>2</sub> –NaCl–H <sub>2</sub> O

Примечание. П – первичные включения, В – вторичные включения. Проверк – нет данных.

16.6 мас. % NaCl экв.), температуры плавления льда варьируют от  $-7$  до  $-12.7$  °С. Температура эвтектики, заключенная в пределах от  $-55$  до  $-59$  °С, определяет водно-солевую систему с хлоридами Ca и Na. Вторичные включения характеризуются  $MgCl_2-H_2O$  составом с низкой соленостью (1.1 мас. % NaCl экв). Включения в кварце из вмещающих бититовых гнейсов имеют в основном высокую соленость (13.9–18.6 мас. % NaCl экв.) и характеризуются низкими значениями температуры эвтектики ( $-41...-61$  °С), определяющими  $MgCl_2-KCl-H_2O$  и  $CaCl_2-NaCl-H_2O$  состав водно-солевой системы. Включения в кварце кианит-биотитовых гнейсов участка Л-1 характеризуются таким же составом флюида (с солями Mg и Ca) и значениями солености от 7.0 до 18.7 мас. % NaCl экв.

**КР-спектроскопические исследования.** По данным рамановской спектроскопии флюидные включения на изученных участках представлены двумя основными типами: газово-жидкими и более редкими газовыми (табл. 3). В гнейсах *рудопроявления Береговое* включения представлены, главным образом, двухфазными системами (жидкая  $H_2O$  + газообразный  $N_2$ ). В пегматитовой жиле газовая составляющая первичных включений имеет метаново-углекислотный, метаново-азотно-углекислотный и чисто углекислотный состав. Содержание  $CO_2$  изменяется от 98.6 до 100 мол. %, иногда газовая составляющая содержит примесь метана (0.3–0.4 мол. %) и/или азота (до 1.1 мол. %).

На *рудопроявлении Уранинитовое* в кварце из полевошпат-кварцевой пегматоидной жилы отмечены первичные водные и газовые включения, причем газовая составляющая имеет сложный состав. Присутствуют включения с содержанием  $CO_2$  от 99 до 100 мол. %, в некоторых включениях отмечена примесь азота, составляющая 0.83 мол. %; также встречаются включения с газовой составляющей, полностью представленной азотом. В пегматитовой линзе обнаружены только водные флюидные включения, в одном случае с азотом. В лейкоплагиограните также преобладают водные первичные включения. Наряду с ними встречаются водно-метановые, водно-метаново-азотные и азотно-метаново-углекислотные включения (табл. 3). В гнейсах *рудопроявления Восточно-Лебяжинское* отмечены вторичные газовые включения, состоящие из азота (99%) с небольшой примесью метана.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

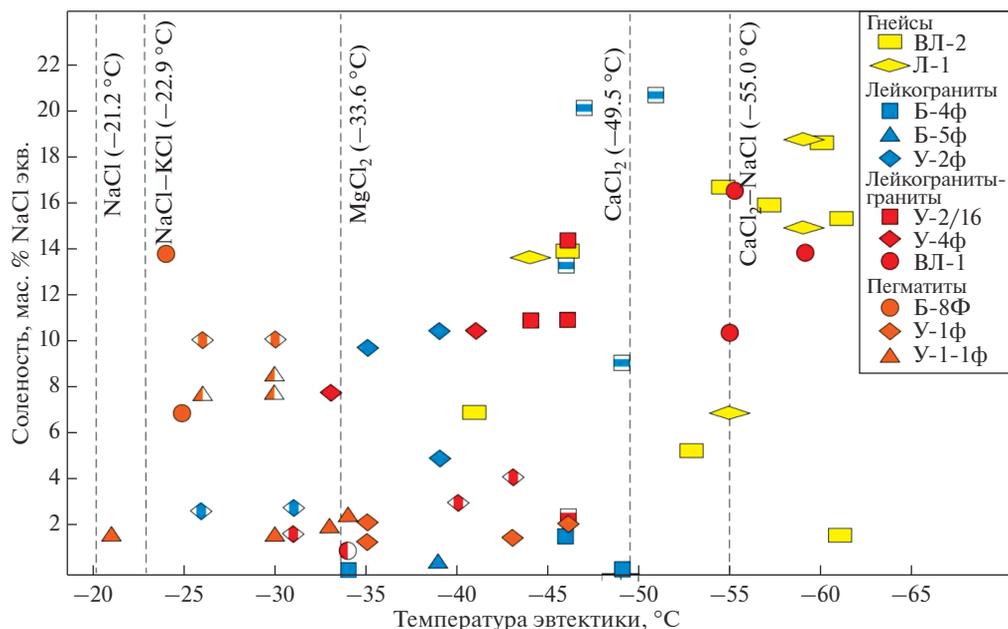
Анализ включений в кварце из пород участка Береговое показал, что можно выделить несколько групп флюидов по соотношению температура эвтектики – соленость: наименее соленые включения имеют  $NaCl-KCl-MgCl_2$  водно-солевой состав, наиболее соленые –  $CaCl_2-H_2O$  и  $CaCl_2-NaCl-H_2O$  состав (рис. 3).

Вторичные включения с наиболее высокой соленостью (до 21 мас. % NaCl экв.)  $Ca-Cl_2$  состава отмечены в линзе лейкогранита (Б-4ф) на рудопроявлении Береговое, тогда как первичные включения в лейкогранитах (Б-4ф и Б-5ф) – низкосоленые. Возможно, именно с высокосолеными включениями связан привнос урана, поскольку содержание урана в линзе Б-4ф повышено до 59 ppm. Дополнительным фактором повышения содержания урана в этой линзе могла служить пересекающая ее дайка основного состава, которая, вероятно, сыграла роль геохимического барьера. В аналогичном лейкограните Б-5ф, где обнаружены только первичные низкосоленые включения, содержание урана низкое (1.3 ppm), как и в плагиогранитах по району в целом.

Флюиды средне-высокой солености  $CaCl_2$  состава, скорее всего, формировались под воздействием магматических источников. Такими источниками были интрузии гранитов, в том числе лицко-арагубских, что подтверждается составом включений в

**Таблица 3.** Состав флюидных включений в кварце по данным КР-спектроскопии  
**Table 3.** Composition of fluid inclusions in quartz according to the Raman spectroscopy

Номер образца, название породы	Номер включения (тип включения)	Состав включений (мол. %)
<i>Рудопроявление Береговое</i>		
Б-6ф, биотитовый гнейс	вкл. 1 (В)	H <sub>2</sub> O–N <sub>2</sub>
	вкл. 2 (В)	H <sub>2</sub> O–N <sub>2</sub>
	вкл. 3 (В)	H <sub>2</sub> O–N <sub>2</sub>
Б-8ф, полевошпат-кварцевая пегматитовая жила	вкл. 1 (П)	H <sub>2</sub> O–CO <sub>2</sub> (99.6)–CH <sub>4</sub> (0.4)
	вкл. 2 (П)	H <sub>2</sub> O–CO <sub>2</sub> (99.7)–CH <sub>4</sub> (0.3)
	вкл. 3 (П)	H <sub>2</sub> O–CO <sub>2</sub> (98.6)–CH <sub>4</sub> (0.3)–N <sub>2</sub> (1.1)
	вкл. 4 (П)	CO <sub>2</sub>
<i>Рудопроявление Уранинитовое</i>		
У-1ф, полевошпат-кварцевая пегматоидная жила	вкл. 1 (П)	N <sub>2</sub>
	вкл. 2 (П)	CO <sub>2</sub> (99.17)–N <sub>2</sub> (0.83)
	вкл. 3 (П)	CO <sub>2</sub>
	вкл. 4 (П)	H <sub>2</sub> O
У-1-1ф, пегматитовая линза	вкл. 1 (П)	H <sub>2</sub> O–N <sub>2</sub>
	вкл. 2 (П)	H <sub>2</sub> O
	вкл. 3 (П)	H <sub>2</sub> O
	вкл. 4 (П)	H <sub>2</sub> O
У-2ф, лейко-плагиогранит	вкл. 1 (П)	H <sub>2</sub> O–CO <sub>2</sub> (57.9)–CH <sub>4</sub> (22.9)–N <sub>2</sub> (19.2)
	вкл. 2 (П)	H <sub>2</sub> O
	вкл. 3 (П)	H <sub>2</sub> O
	вкл. 4 (В)	H <sub>2</sub> O–CH <sub>4</sub> (14.9)–N <sub>2</sub> (85.1)
	вкл. 5 (В)	H <sub>2</sub> O–CH <sub>4</sub> (100.0)
<i>Рудопроявление Восточно-Лебяжинское</i>		
ВЛ-2/16, биотитовый гнейс	вкл. 1 (В)	CH <sub>4</sub> (0.37)–N <sub>2</sub> (99.63)
	вкл. 2 (В)	CH <sub>4</sub> (0.96)–N <sub>2</sub> (99.04)
	вкл. 3 (В)	CH <sub>4</sub> (0.28)–N <sub>2</sub> (99.72)



**Рис. 3.** Соотношение температуры эвтектики и солёности флюидных включений в кварце из пород рудопроявлений Береговое, Уранинитовое, Восточно-Лебяжинское и участка Л-1. Залитые значки – первичные включения, наполовину залитые значки – вторичные включения.

**Fig. 3.** Correlation between eutectic temperature and salinity of fluid inclusions in quartz from rocks of ore occurrences Beregovoe, Uraninitovoe, Vostochno-Lebyazhinskoe, and locality L-1. Filled symbols are primary inclusions, half-filled symbols are secondary inclusions.

самых гранитах (рис. 3). Вероятно, с постмагматическими гидротермальными флюидами связаны также первичные включения  $MgCl_2-H_2O$  состава повышенной солёности, отмеченные в кварце гранитов У-2/16 с повышенным содержанием урана (9.2 ppm). В гнейсах на границе с гранитными телами (рудопроявление Восточно-Лебяжинское и участок Л-1) также появляются флюидные включения  $MgCl_2-CaCl_2$  состава повышенной солёности.

Температуры гомогенизации, полученные для всех включений в кварце, достаточно низкие (100–250 °С), в том числе и для кварца из лицько-арагубских гранитов, что связано с наложенными изменениями, проявленными и в магматическом кварце. Rb-Sr данные также показывают, что после 1.9 млрд лет температура была ниже 350 °С (Kaulina et al., 2018).

С гидротермальными вторичными процессами связаны низко-средне солёные включения  $NaCl-KCl-H_2O$  и  $MgCl_2-H_2O$  состава, проявленные в полевошпат-кварцевых пегматитовых линзах и жилах. В среднесолёных включениях газовая фаза представлена  $CO_2$  с примесью метана и азота. В поле низкосолёных включений попадают вторичные включения в кварце лицько-арагубских лейкогранитов, что позволяет определить относительный возраст образования этих включений (после 1.75 млрд лет).

Согласно А.В. Савицкому с соавторами (1995), на участке Береговое ураноносными являются микроклин-кварцевые жилы возраста 1.85–1.75 млрд лет. В наших образцах

полевошпат-кварцевых жил и линз содержание урана очень низкое (0.1–0.2 ppm), хотя петрографические наблюдения (образец У-1, табл. 1) показывают, что первичный кварц преобразовывался под воздействием рудоносных растворов. Вторичные включения в жилах представлены NaCl–KCl–H<sub>2</sub>O составом средней солености (7–14 мас. % NaCl экв.); именно этот флюид должен был нести уран. Вероятно, низкое содержание урана в образцах связано с преимущественным его осаждением на глубине, поскольку, как уже отмечалось, урановая минерализация вскрыта скважинами.

По характеру водно-солевого состава флюидных включений участок Береговое (со всеми его рудопроявлениями) близок рассмотренным ранее участкам Скальное, Дикое, Полярное, где развиты урансодержащие пегматоидные граниты и кварц-полевошпатовые метасоматиты возраста 2.3–2.2 млрд лет (Каулина и др., 2017), для которых также характерно преобладание в составе флюидных включений солей Mg и Ca с наиболее распространенными значениями солености 7–14 мас. % NaCl экв. Вместе с тем, только на участке Береговое обнаружены более поздние флюиды NaCl–KCl–H<sub>2</sub>O состава. На участках Скальное и Полярное газовая составляющая представлена практически чистой углекислотой. На участке Береговое включения с чистой углекислотой встречаются редко (табл. 3), чаще отмечаются включения со сложным составом газовой фазы с примесью метана и азота. Ранее подобные флюиды со сложным углекислотно-метано-азотным составом были нами отмечены в кварце из ураноносной пегматоидной жилы на рудопоявлении Дикое, которое находится в краевой области Лицко-Арагубской тектонической зоны, ограниченной разломами северо-восточного простирания и, вероятно, подверглось, как и участок Береговое, воздействию позднегерцинской тектоно-магматической активизации (рис. 1). Скорее всего, именно с этой активизацией и связано изменение состава газовой фазы флюидных включений, наблюдаемое на рудопоявлениях участка Береговое и Дикое, по сравнению с участками Скальное и Полярное.

Таким образом, проведенное изучение флюидных включений позволяет предполагать, что формирование урановых рудопоявлений участка Береговое происходило в интервале температур от 100 до 250 °С при давлении от 0.5 до 0.9 кбар (в малоглубинных условиях), по-видимому, в открытой системе, в существенно водной среде с газовой фазой, в которой преобладали метан и азот, либо в газовой фазе углекислотного состава, но с примесью азота и метана. Рудоносные растворы имели преимущественно магниевый и кальциевый солевой состав, который эволюционировал на более поздних стадиях до преимущественно натриевого и калиевого.

Согласно современной классификации (Щербина и др., 2013) существуют два ведущих физико-химических процесса отложения урана, определяющих наличие двух основных типов гидротермальных урановых месторождений: а) реакция флюида с вмещающими породами и б) дегазация рудоносного раствора. Первый процесс характерен для глубинных месторождений, развитых в древних породах основного состава. Месторождения второго типа – менее глубинные, залегают в породах кислого состава, основной рудоконтролирующий фактор для них – структурный. Для этого типа характерно наличие большого количества мелких месторождений с небольшими запасами руд. Лицевский район относится ко второму типу урановых месторождений с большим количеством урановых рудопоявлений, залегающих в гнейсах и гранитоидах на небольшой глубине. Следовательно, наиболее вероятным механизмом их формирования является дегазация рудоносных растворов при их подъеме к поверхности, что сопровождается увеличением величины рН и разрушением уранил-карбонатных комплексных ионов, восстановлением и отложением урана (Щербина и др., 2013).

Можно предположить, что отложение урановых минералов является результатом эволюции флюидных потоков и урансодержащих гидротермальных флюидов из различных источников при их движении вдоль узлов пересечения разрывных структур среди архейских метаморфических пород. На участке Береговое, расположенном в пределах Лицко-Арагубской зоны, ранние флюиды, обогащенные Mg, Ca и CO<sub>2</sub>, смешивались с более поздними флюидами, образовавшимися в результате герцинской тектоно-магматической активизации и обогащенными Na, K, азотом и метаном. Более ранний окисленный флюид способствовал выщелачиванию урана и переводу его в растворимое состояние в виде уранил-карбонатного иона, а более поздний, восстановленный, – восстановлению и осаждению урана.

## ВЫВОДЫ

Изучение флюидных включений в кварце показали, что формирование урановых рудопроявлений участка Береговое происходило в интервале температур от 100 до 250 °С при давлении от 0.5 до 0.9 кбар в малоглубинных условиях, по-видимому, в открытой системе в существенно водной среде с газовой фазой, в которой преобладали метан и азот, либо в газовой фазе углекислотного состава с примесью азота и метана. Рудоносный флюид представлен растворами MgCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O и CaCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O состава средней и высокой солености (7–21 мас. % NaCl экв.). Формирование флюида, скорее всего, связано с магматическими источниками и контролировалось постмагматической гидротермальной деятельностью в возрастном интервале 1.85–1.75 млрд лет. В период после 1.75 млрд лет состав рудоносного гидротермального флюида эволюционировал в сторону NaCl–KCl–H<sub>2</sub>O состава.

Работа выполнена в рамках Госзадания ГИ КНЦ РАН (тема № 0226-2019-0052).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьева Е.Н., Михайлов В.А., Былинская Л.В., Липнер А.А., Серов Л.В.* Ураноносность Кольского полуострова / *Мат. по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов.* М.: ВИМС, **2009.** Вып. 153. С. 18–26.
- Борисенко А.С.* Изучение солевого состава газовой-жидких включений в минералах методом криометрии // *Геол. и геофиз.* **1977.** № 8. С. 16–27.
- Ветрин В.Р.* Длительность формирования и источники вещества гранитоидов лицко-арагубского комплекса, Кольский полуостров // *Геохимия.* **2014.** № 1. С. 38–51.
- Виноградов А.И., Виноградова Г.В.* Эволюция ультра-метагенных и диафорических процессов и связанного с ними уран-ториевого и редкоземельного минералогенеза в полиметаморфическом комплексе Кольских гнейсов / *Метаморфизм и метаморфогенное рудообразование раннего докембрия, Апатиты: КФАН АН СССР,* **1984.** С. 37–46.
- Гишпер Н.А., Томиленко А.А., Сазонов А.М., Рябуха М.А., Тимкина А.Л.* Золоторудное месторождение Герфед: характеристика флюидов и РТ условия образования кварцевых жил (Енисейский край, Россия) // *Геол. и геофиз.* **2011.** Т. 52. № 11. С. 1851–1867.
- Каулина Т.В., Аведисян А.А., Томиленко А.А., Рябуха М.А., Ильченко В.Л.* Флюидные включения в кварце на участках с урановой минерализацией Лицевского рудного узла Кольского полуострова // *Геол. и геофиз.* **2017.** Т. 58. № 9. С. 1332–1345.
- Киргинцев А.Н., Трушников Л.Н., Лаврентьева В.Г.* Растворимость неорганических веществ в воде. Справочник. Л.: Химия, **1972.** 244 с.
- Мыскова Т.А., Бережная Н.Г., Глебовицкий В.А., Милькевич Р.И., Лепехина Е.Н., Матуков Д.И., Антонов А.В., Сергеев С.А., Шулешко И.К.* Находки древнейших цирконов с возрастом 3600 млн. лет в гнейсах кольской серии Центрально-Кольского блока Балтийского щита (U-Pb, SHRIMP-II) // *Докл. РАН.* **2005.** Т. 402. № 1. С. 82–86.

Савицкий А.В., Громов Ю.А., Мельников Е.В., Шариков П.И. Урановое оруденение Лицевского района на Кольском полуострове (Россия) // Геол. рудн. месторождений. **1995**. № 5. С. 403–416.

Шербина 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.

### Composition of Fluid Inclusions in Quartz From Rocks of the Beregovoe Site, Litsa Uranium-ore Area, Kola Region

T. V. Kaulina<sup>a,\*</sup>, A. A. Avedisyan<sup>a</sup>, M. A. Ryabukha<sup>b</sup>, and V. L. Il'chenko<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Geological Institute, Kola Science Centre RAS, Apatity, Russia

<sup>b</sup>Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch RAS, Novosibirsk, Russia

\*e-mail: kaulina@geoksc.apatity.ruu

Water-salt and gas composition of fluid inclusions in quartz was studied for rocks from the Beregovoe locality of the Litsa uranium ore area, where several uranium occurrences of 1.8 and 0.4 Ga have been found. The composition of fluid inclusions was studied by microthermometry and Raman spectroscopy methods. Ore-bearing fluid is represented by MgCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O and CaCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O solutions of medium and high salinity (7–21 wt % NaCl equiv.). The formation of these fluids was most likely associated with magmatic sources and post-magmatic hydrothermal activity in the range of 1.85–1.75 Ga. After 1.75 Ga, the composition of fluid manifested in inclusions from feldspar-quartz veins evolves to predominantly NaCl–KCl composition. The study suggests that the formation of uranium ore occurrences in the Beregovoe area occurred at temperature of 100–250 °C and pressure of 0.5–0.9 kbar (in shallow conditions), apparently in substantially aqueous system with a gas phase presented by methane and nitrogen, or by CO<sub>2</sub> with an admixture of nitrogen and methane.

*Keywords:* fluid inclusions, hydrothermal uranium mineralization, Litsa area, Kola region

### REFERENCES

Afanasyeva E.N., Mikhailov V.A., Bylinskaya L.V., Lipner A.A., Serov L.V. The uranium-bearing capacity of the Kola Peninsula. In: *Materials on the geology of uranium deposits, rare and rare-earth metals*. Moscow: VIMS, **2009**. Iss. 153. P. 18–26 (in Russian).

Borisenko A.S. The salt composition study of gas-liquid inclusions in minerals by the cryometry method. *Geol. Geophys.* **1977**. N 8. P. 16–27 (in Russian).

Gibsher N.A., Tomilenko A.A., Sazonov A.M., Ryabukha M.A., Timkina A.L. Gold field of Gerfed: characteristics of fluids and PT-conditions for the formation of quartz veins (Yenisei Ridge, Russia). *Russian Geol. Geophys.* **2011**. Vol. 52. N 11. P. 1851–1867 (in Russian).

Kaulina T.V., Avedisyan A.A., Tomilenko A.A., Ryabukha M.A., Il'chenko V.L. Fluid inclusions in quartz from uranium mineralization areas of the Litsa ore cluster (Kola Peninsula). *Russian Geol. Geophys.* **2017**. Vol. 58. P. 1059–1069.

Kaulina T.V., Kalinin A.A., Il'chenko V.L., Gannibal M.A., Avedisyan A.A., Elizarov D. V., Nerovich L.I., Nitkina E.A. Age and formation conditions of U mineralization in the Litsa area and the Salla-Kuolajarvi Zone (Kola Region, Russia). *Minerals*. **2018**. Vol. 8. P. 563.

Kirgintsev A.N., Trushnikova L.N., Lavrentyeva V.G. Solubility of inorganic substances in water. Reference book. Leningrad: Chemistry, **1972**. 244 p. (in Russian).

Myskova T.A., Berezhnaya N.G., Glebovitsky V.A., Mil'kevich R.I., Lepekhina E.N., Matukov D.I., Antonov A.V., Sergeev S.A., and Shuleshko I.K. Findings of the oldest (3600 Ma) zircons in gneisses of the Kola Group, Central Kola Block, Baltic Shield: Evidence from U–Pb (SHRIMP-II) data. *Doklady Earth Sci.* **2005**. Vol. 402. N 4. P. 547–550.

Savitsky A.V., Gromov Yu.A., Melnikov E.V., Sharikov P.I. Uranium mineralization of the Litsevsky area of the Kola Peninsula (Russia). *Geol. Ore Deposits*. **1995**. N 5. P. 403–416 (in Russian).

*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. 166 p.

*Shcherbina V.V., Naumov G.B., Makarov E.S., Gerasimovsky V.I., Ermolaev N.P., Tarasov M.S., Tugarinov A.I., Barsukov Vik.L., Sokolova N.T., Kochenov A.V., Germanov A.I.* Main features of the uranium geochemistry. Tomsk: STT, **2013**. 374 p. (*in Russian*).

*Vetrin V.R.* Duration of the formation and sources of the granitoids of the Litsa-Araguba Complex, Kola Peninsula. *Geochem. Int.* **2014**. N 1. P. 33–45.

*Vinogradov A.I., Vinogradova G.V.* Evolution of ultra-metamorphic and diaphthoric processes and associated uranium-thorium and rare-earth mineral formation in the polymetamorphic complex of the Kola gneisses. In: *Metamorphism and metamorphogenic ore formation of the Early Precambrian*. Apatity, **1984**. P. 37–46 (*in Russian*).