

УДК 550.42-552.125

**ПРОЦЕССЫ ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ В ЦИРКОНЕ  
КАК ОТРАЖЕНИЕ ГЕОХИМИИ УРАНА В ПОРОДАХ  
(НА ПРИМЕРЕ УРАНОВОГО РУДОПРОЯВЛЕНИЯ СКАЛЬНОЕ  
ЛИЦЕВСКОГО РАЙОНА КОЛЬСКОГО ПОЛУОСТРОВА)\***

**Т. В. Каулина<sup>1</sup>, Л. М. Лялина<sup>1</sup>, Л. И. Нерович<sup>1</sup>, А. А. Аведисян<sup>1</sup>, В. Л. Ильченко<sup>1</sup>,  
В. Н. Бочаров<sup>2</sup>, Е. А. Ниткина<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>ФГБУН Геологический институт КНЦ РАН

<sup>2</sup>СПбГУ РЦ «Геомодель»

**Аннотация**

Проведено комплексное изучение внутреннего строения, химического состава и возраста циркона из гранитоидов уранового рудопоявления Скальное (Лицевский урановорудный район). Степень изменения циркона в гранитоидах на участках гидротермальных проявлений зависит от содержания урана в цирконе и от степени гидротермальной переработки пород. Локальное датирование показывает, что участки вторичных изменений в цирконе из щелочных и субщелочных гранитов Кольского региона образовались в результате гидротермальных процессов, с которыми связано формирование урановых концентраций.

**Ключевые слова:**

*циркон, U-Pb-возраст, гидротермальные изменения, урановые рудопоявления, Лицевский район.*

**PROCESSES OF HYDROTHERMAL CHANGE IN ZIRCON AS MANIFESTATION OF URANIUM  
GEOCHEMISTRY IN ROCKS (A CASE STUDY OF SKALNOYE URANIUM ORE OCCURRENCE  
IN LITSA REGION, KOLA PENINSULA)**

**Tatiana V. Kaulina<sup>1</sup>, Lyudmila M. Lyalina<sup>1</sup>, Lyudmila I. Nerovich<sup>1</sup>, Anaida A. Avedisyan<sup>1</sup>,  
Vadim L. Il'chenko<sup>1</sup>, Vladimir N. Bocharov<sup>2</sup>, Elena A. Nitkina<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Geological Institute of the KSC of the RAS

<sup>2</sup>Centre for Geo-Environmental Research and Modelling (GEOMODEL)

**Abstract**

Zircon from granitoids of the Skalnoye uranium ore occurrence (Litsa uranium ore district) was investigated in details including internal structure, chemical composition and age. The degree of granitoid zircon alteration in hydrothermal manifestation areas depends on the zircon uranium content and the degree of hydrothermal processing of rocks. Zircon from plagiogranites with uranium content below 300 ppm does not change under hydrothermal conditions. Hydrothermal alteration is observed in high-uranium (2 400 ppm) zircon from alkaline granites, where zircon structure is disturbed by radioactive decay, and in zircon from metasomatite, in which, with a relatively low uranium content (up to 1000 ppm), the changes are stipulated by stronger hydrothermal influence. Local (SIMS and LA-ICPMS) age dating shows that secondary areas in zircon crystals from alkaline and subalkaline granites of the Kola Region (Litsa District, Javrozersky District, Keivy Block) are confined to the stages of hydrothermal activity at 1,78–1,65 and 0,42–0,38 Ga, which are associated with the formation of uranium concentrations.

**Keywords:**

*zircon, U-Pb age, hydrothermal alteration, uranium ore occurrences, Litsa District.*

---

\* Работа выполнена в рамках госзадания Геологического института КНЦ РАН с использованием оборудования ресурсного центра Научного парка СПбГУ «Геомодель».

## Введение

Циркон — основной минерал-геохронометр, используемый для датирования процессов в широком диапазоне температур и давлений. Изотопная U-Pb-система циркона представляет собой мощный инструмент прецизионного датирования магматических, метаморфических и метасоматических процессов. Известно также, что растворимость циркона повышается в присутствии воды, CO<sub>2</sub> флюидов и в щелочных магмах [1–3]. Способность циркона к изменению возрастает у кристаллов с нарушенной структурой: обычно это происходит вследствие метамиктности (см. работу [4] и ссылки в ней), а также в результате механической трещиноватости или пластической деформации. Циркон с высокими концентрациями U и Th обычно более подвержен изменениям, поскольку радиоактивный распад этих элементов со временем вызывает серьезное нарушение кристаллической структуры минерала. Степень метамиктности циркона зависит от его возраста и содержания U. Существенное нарушение структуры у докембрийских цирконов наблюдается при содержаниях урана более 1000 ppm, тогда как у циркона моложе 1 млн лет аморфная структура обнаруживается при содержаниях урана в несколько тысяч частей на миллион [4].

Метамиктный циркон создает проблемы при датировании, поскольку под воздействием флюидов выщелачивается в первую очередь Pb и, следовательно, возрастает степень дискордантности U-Pb-возрастов [1, 5]. Тем не менее, именно благодаря способности метамиктного циркона к растворению его можно использовать для датирования наложенных гидротермальных процессов.

Циркон является основным концентратором урана (и тория) в породе. Считается, что он содержит в 150–250 раз больше урана и в 15–20 раз больше тория, чем порода-хозяин [6]. Поскольку уран, как несовместимый элемент, накапливается в расплаве, наиболее высокое его содержание отмечается в магматическом цирконе из гранитов и пегматитов, то есть связь магматического циркона с геохимией урана очевидна. Наша задача — проследить связь вторичных преобразований циркона с геохимией урана.

Экспериментальное изучение поведения циркона в гидротермальных условиях показывает, что происходит как частичное растворение исходного зерна циркона с нарушением его U-Pb-системы, так и образование новой фазы циркона [1, 5, 7]. Нарушение U-Pb-системы исходного циркона, обычно определяемое нижним пересечением дискордии с конкордией, а также возраст нового циркона могут отражать время гидротермального процесса, что говорит о применимости циркона как геохронометра в низкотемпературных флюидонасыщенных зонах.

Для определения возможной связи процессов гидротермального преобразования циркона с геохимией урана в породах был изучен циркон из гранитоидов рудопроявления Скальное Лицевского урановорудного района и проведено сравнение полученных результатов с изученным ранее цирконом из гранитов других районов Кольского п-ова: Яврозерского района пояса Танаэлв и хребта Серповидного Кейвского блока [7] (рис. 1). Общее для всех этих районов — повышенная проницаемость пород в результате процессов деформации: Лицевский район находится в зоне пересечения разломных и сдвиговых зон [8], пояс Танаэлв — в зоне сдвиговых деформаций регионального масштаба, район хребта Серповидного находится в подошве надвиговой пластины [9, 10], следовательно, флюидная переработка пород там повышена, соответственно высокоурановый циркон из гранитов должен подвергаться изменению и/или растворению.

Рудопроявление Скальное было выбрано как урановорудный объект, на котором время проявления гидротермальных процессов можно контролировать прямым датированием урановых минералов, связанных с этими процессами.

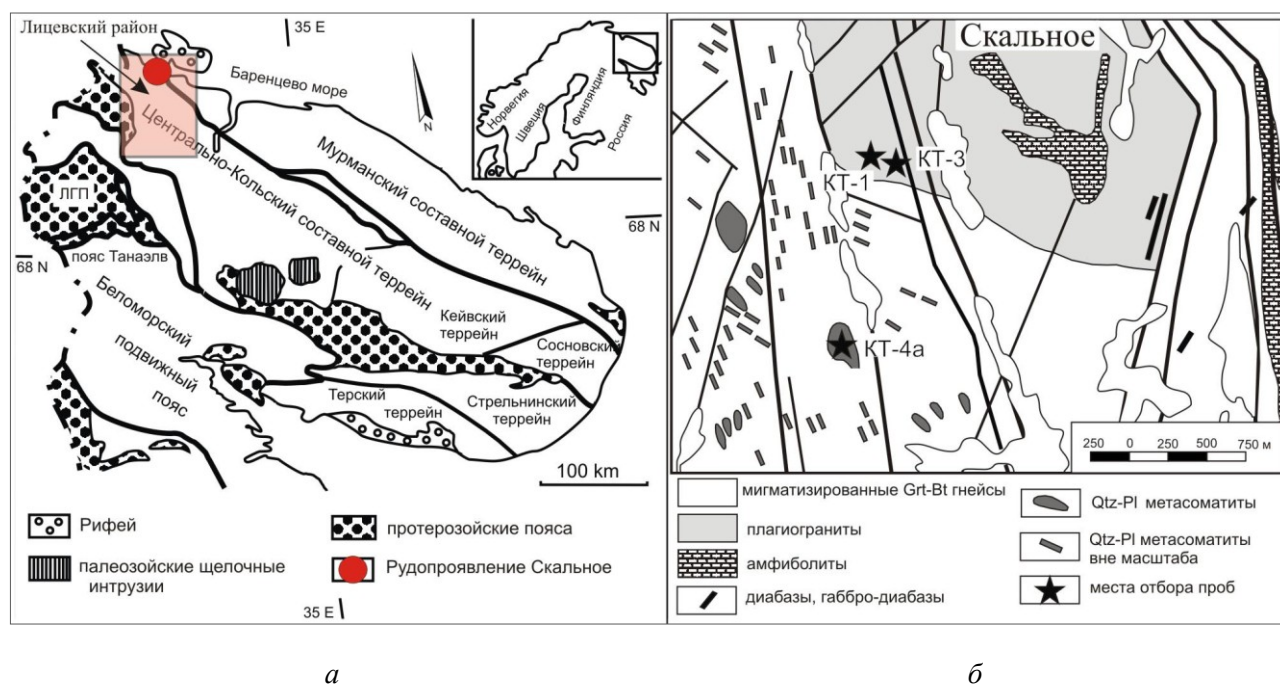


Рис. 1. Положение Лицевского района в пределах Кольского региона (а) и геологическая карта участка Скальное [по 11] с точками отбора проб (б)

### Краткая геология участка Скальное

*Рудопроявление Скальное* находится в Лицевском урановорудном районе [8], который выделен на северо-западе Кольского п-ова (рис. 1). В региональном масштабе участок Скальное расположен в зоне сочленения Центрально-Кольского и Мурманского блоков и северо-западного продолжения зоны Колмозеро-Воронья.

В геологическом строении участка Скальное основная роль принадлежит мигматизированным гранат-биотитовым гнейсам кольской серии с телами плагиогранитов и прослоями амфиболовых гнейсов, сланцев и амфиболитов. В плагиогранитах отмечаются жилы и небольшие тела крупнозернистых микроклиновых гранитов.

На участке широко развиты процессы катаклаза и брекчирования. Проведенные нами петрофизические исследования пород показывают, что район подвергался неоднократному динамическому воздействию, причем главные составляющие полей напряжений, выявленные в образцах, имели разные ориентировки. Интересно, что большая часть образцов с участков урановых аномалий относится к умеренно или слабоанизотропным, что обусловлено, вероятно, гидротермальной проработкой (несущей урановую минерализацию) с эффектом залечивания микротрещин. Также отмечаются участки с высоким уровнем микротрещиноватости и соответственно с повышенным уровнем напряженно-деформированного состояния пород. Об этом свидетельствуют высокие показатели анизотропии упругих свойств с эффектами «разбегания» значений показателей анизотропии А и В (А — для скоростей распространения продольных волн, В — для поперечных волн), характерными для пород, которые в значительно меньшей степени оказались подверженными гидротермальной переработке (т. е. с незалеченной микротрещиноватостью) [12].

Пробы на участке Скальное были отобраны из плагиогранитов (проба КТ-1/12, КТ-2/12), микроклиновых (щелочных) гранитов (проба КТ-3/12) и из кварц-альбит-микроклинового метасоматита из зоны дробления и брекчирования (проба КТ-4а/12) (рис. 1, б).

Плагиограниты представляют собой средне- и мелко-среднезернистые биотитовые и мусковит-биотитовые плагиогранитоиды с разной степенью сохранности магматической гипидиоморфнозернистой структуры. Породы имеют повышенное отношение ( $Al/(Ca + Na + K)$ , mol.) и относятся к пералюминиевым образованиям.

Микроклиновые (щелочные) граниты представляют собой массивные крупнозернистые породы с хорошо проявленной гипидиоморфнозернистой (и пойкилитовой) структурой, с отчетливым идиоморфизмом плагиоклаза по отношению к кварцу и микроклин-пертит. Содержание  $SiO_2$  варьирует от 69,1 до 73,8 %,  $Na_2O + K_2O$  в пределах 8,66–11,41 %, тип щелочности — натрий-калиевый, при  $Na_2O/K_2O = 0,3–0,6$ .

Метасоматиты представляют собой массивную, крупно-среднезернистую катаклазированную и брекчированную породу, образовавшуюся по граниту, в которой микроклин-пертит, плагиоклаз (альбит) и амфибол погружены в кварцевый цемент.

### Методы исследования

Изучение строения циркона из гранитоидов участка Скальное в обратно-рассеянных электронах (BSE) и определение состава отдельных участков циркона было проведено в ГИ КНЦ РАН (г. Апатиты) на электронном микроскопе LEO 1450 с волновым спектрометром QUANTAX 200 Bruker и на микроанализаторе Cameca MS-46. Рамановская спектрометрия циркона проводилась в Ресурсном центре «Геомодель» (Санкт-Петербург) на рамановском спектрометре HORIBA Jobin-Yvon Labram HR800, Ar-лазер 514,5 нм, время экспозиции — 3 с, число повторений — 5, мощность лазера — 50 мВт. Локальное U-Pb-датирование циркона проводилось в LA-ICP-MS лаборатории Университета Тасмании (Австралия) на масс-спектрометре Agilent 7700 с помощью аналитической системы Resonetics RESolution для лазерной абляции. Система оснащена когерентным эксимером COMPEX Pro ArF с длиной волны 193 нм.

### Строение и состав циркона в гранитоидах участка Скальное

Циркон во всех пробах имеет сложное строение с ядрами, каймами и участками преобразования, которые хорошо проявлены в обратно-рассеянных электронах (рис. 2, 3). В плагиогранитах (проба КТ-1/12, рис. 2) циркон имеет типичный призматический габитус с тонкой магматической зональностью, характерной для магматического циркона. Процессы вторичных изменений циркона минимальны. В пробе щелочных гранитов (проба КТ-3/12, рис. 2) кристаллы циркона сохраняют длиннопризматический габитус и тонкую ростовую зональность, но процессы изменения более проявлены. Это выражается в появлении криволинейных, фестончатых участков другого оттенка в BSE, развитых по трещинам и зонам роста, что свидетельствует о частичном растворении участков циркона и росте новой генерации, которая отличается по химическому составу и структуре. Циркон в метасоматитах (проба КТ-4а/12, рис. 2) существенно более изменен, чем циркон из гранитов, тем более плагиогранитов, он теряет ростовую зональность, приобретает микроблочное строение и представляет собой смесь участков разного состава и строения.

Отличным инструментом для изучения радиационно-индуцированной метамиктизации циркона на микроуровне ( $< 1$  мкм) является рамановская спектрометрия [13]) С увеличением структурных повреждений кристаллической решетки форма и положение отдельных рамановских мод изменяется: 1) полосы становятся шире; 2) уменьшается общая интенсивность спектра; 3) полосы смещаются в сторону меньших волновых чисел; 4) пики становятся асимметричными [13, 14].

Для обычного циркона с ненарушенной кристаллической структурой характерны следующие КР-полосы: 1008, 975, 439, 393, 355, 269, 225, 214 и 202  $\text{см}^{-1}$  [15] (показаны пунктиром на рис. 2). Раман-спектры циркона из плагиигранитов соответствуют кристаллическому циркону (проба КТ-1/12, рис. 2), хотя в отдельных зернах отмечается некоторое снижение интенсивности пиков и смещение в сторону меньших длин волн. Раман-спектры циркона из метасоматитов показывают, что циркон имеет очень нарушенную структуру (проба КТ-4а/12, рис. 2). Интенсивность КР-полос падает, происходит уширение и смещение пиков, почти пропадает сигнал от 975 и от 1008  $\text{см}^{-1}$ , что свидетельствует о появлении аморфной фазы [16].

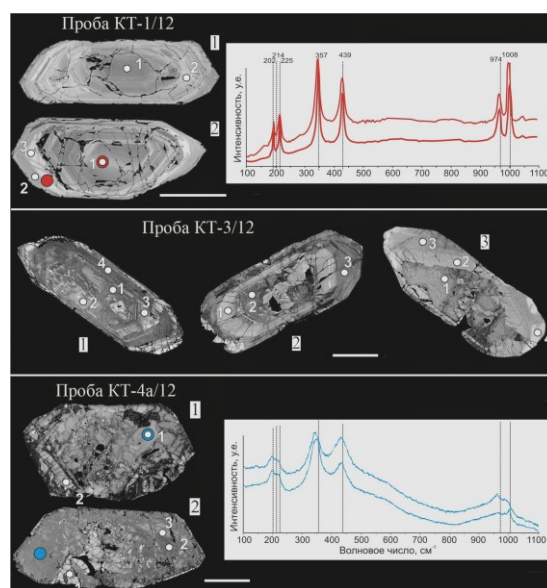


Рис. 2. Фотографии циркона из гранитоидов участка Скальное в обратно-рассеянных электронах с точками микрозондового анализа (белые кружки) и точками анализа (цветные кружки) с соответствующими рамановскими спектрами. Масштабная линейка 100 мкм.

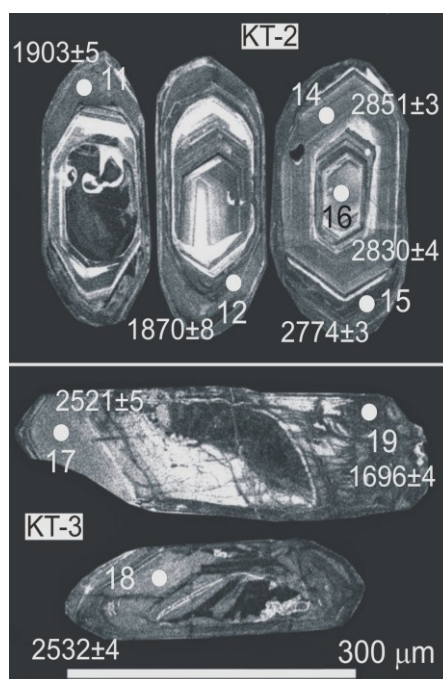


Рис. 3. Фотографии циркона в катодоллюминесценции с точками LA-ICPMS анализа и  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -возрастом

**Химический состав циркона**

Изучение химического состава разных участков циркона показывает, что в изученных породах минерал существенно различается по химическому составу (табл. 1). Циркон в плагиигранитах содержит относительно невысокое количество элементов-примесей, в том числе и гафния, что приводит к высоким (до 62) Zr/Hf-отношениям; в щелочных гранитах и метасоматитах содержание всех его примесей повышается (табл. 1). Помимо первичных участков циркона с ростовой зональностью, появляются измененные участки с повышенным содержанием неформульных элементов (Ca, Mn, Fe, Al), что говорит о нарушении структуры и гидратации циркона, об этом же свидетельствует и значительное количество воды (до 6 вес. %). Повышается содержание гафния, особенно в цирконе метасоматитов, которое достигает 2,1 % и является самым высоким из всех изученных проб. Можно предполагать, что флюид был обогащен гафнием. Проба метасоматита показывает, что степень изменения циркона зависит от степени гидротермальной переработки пород.

Таблица 1

Микрозондовый анализ отдельных участков циркона  
из гнейсов и гранитоидов участка Скальное

Номер зерна – номер точки	Элемент, ppm									
	Si	Al	P	Ca	Mn	Fe	Yb	Zr	Hf	Zr/Hf
Проба КТ-1/12 плагиигранит										
1–1	14,546	0,041	0	0,555	0,078	0,245	0	47,291	1,232	38
1–2	15,067	0,040	0	0	0	0	0	48,930	1,449	34
2–1	14,958	0,031	0	0,014	0,032	0,010	0	49,287	0,798	62
2–2	15,054	0	0	0	0	0,011	0	49,313	0,800	62
2–3	14,817	0,046	0	0,077	0	0,087	0	48,956	1,142	43
Проба КТ-3/12 микроклиновый гранит										
1–1	16,104	0,494	0,068	1,106	0,151	0,886	0,225	46,382	1,484	31
1–2	14,746	0,078	0	1,442	0,075	0,424	0	47,231	1,597	30
1–3	15,204	0,255	0	1,034	0,072	0,665	0	46,163	1,518	30
1–4	16,577	0,432	0	0,993	0,108	0,647	0,450	47,744	1,439	33
2–1	15,054	0	0	0,378	0,124	0,076	0	46,566	1,505	31
2–2	15,789	0,588	0	1,132	0,130	0,872	0,247	43,796	1,669	26
2–3	15,232	0,210	0	0,981	0,077	0,428	0	46,597	1,467	32
3–1	14,537	0,164	0,174	1,478	0	0,222	0,337	45,394	1,701	27
3–2	15,367	0	0	0,318	0,047	0	0	47,893	1,832	26
3–3	15,365	0	0,064	0,573	0,060	0,444	0	47,848	1,693	28
3–4	15,575	0	0	0	0	0	0	48,755	1,728	28
Проба КТ-4а кварц-альбит-микроклиновый метасоматит из зоны дробления										
1–1	14,773	0,227	0,193	1,497	0,145	0,418	0,302	44,182	1,571	28
1–2	14,918	0,078	0,128	0,667	0,130	0,318	0	45,907	2,122	22
2–1	15,378	0,184	0	0,465	0,123	0,266	0	45,214	1,897	24
2–2	15,782	0,438	0	1,228	0,184	0,648	0,346	45,921	1,805	25
2–3	15,305	0,224	0,058	1,103	0,095	0,452	0	44,028	2,001	22

*Примечания.* Измерения химического состава циркона проведены на микроанализаторе Cameca MS-46 (ГИ КНЦ РАН, Апатиты) при ускоряющем напряжении 22 кВ и токе 40 нА.

Аналитические линии и эталоны: ZrL $\alpha$  и SiK $\alpha$  — синтетический циркон; HfL $\beta_1$  — чистый металл.

### U-Pb-возраст циркона

Результаты LA-ICPMS анализа для циркона из плагиогранитов (пробы КТ-1/12 и КТ-2/12) показали, что возраст кристаллизации плагиогранитов составляет  $2829 \pm 10$  млрд лет [17]. Наиболее характерные зерна магматического циркона из плагиогранитов приведены на рис. 3 (точки 14, 16). Ядра содержат мало урана — 214–245 ppm и имеют повышенные торий-урановые отношения 0,4–0,6 (табл. 2). Более высокоурановая кайма циркона (точки 11 и 12) имеет возраст 1,87–1,9 млрд лет. Надо отметить, что ядра практически не изменены, то есть при образовании кайм (скорее всего, из расплава, судя по тонкой зональности) они не растворялись и более поздняя гидротермальная переработка на цирконе никак не отразилась.

Таблица 2

Результаты LA-ICPMS анализа циркона из гранитоидов участка Скальное Лицевского района

Номер точки	Изотопный состав, ppm					Изотопные отношения				Возраст, Ma
	Pbtot	<sup>232</sup> Th	<sup>238</sup> U	<sup>56</sup> Fe	<sup>178</sup> Hf	<sup>238</sup> U/ <sup>206</sup> Pb	±1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	±1σ	
Плагиограниты (проба КТ-2/12)										
11	197	29	1404	2331	12360	7,89	0,09	0,1165	0,0007	1903±5
12	176	28	1381	3496	13071	8,64	0,13	0,1143	0,0010	1870±8
14	170	123	245	1277	11935	1,94	0,02	0,2031	0,0008	2851±3
15	223	106	275	393	13134	1,63	0,02	0,1937	0,0008	2774±3
16	158	129	214	801	10697	1,82	0,02	0,2005	0,0009	2830±4
Микроклиновые граниты (проба КТ-3/12)										
17	740	45	2339	4239	13639	3,83	0,05	0,1663	0,0005	2521±3
18	646	191	2409	5782	15615	4,97	0,07	0,1674	0,0008	2532±4
19	208	11	1653	4488	14850	9,09	0,11	0,1040	0,0005	1696±4

Два зерна циркона с ростовой зональностью из микроклиновых гранитов (проба КТ-3/12) имеют возраст  $2526 \pm 19$  млн лет (рис. 3). Точки очень дискордантны, что связано с сильными изменениями циркона. Химический состав циркона, определенный на масс-спектрометре (табл. 2), показывает, что он существенно обогащен ураном и железом, это подтвердил и микрозондовый анализ (табл. 1). Возраст измененного участка циркона —  $1696 \pm 4$  млн лет (рис. 3), в пределах ошибки совпадает со временем гидротермальной переработки пород, определенной Rb-Sr-методом. Rb-Sr-возраст, который рассчитан по изохроне, построенной по точкам породы, апатита и мусковита из микроклиновых гранитов участка Скальное, определяет возраст метасоматоза в  $1788 \pm 32$  млн лет [17]. Надо отметить, что здесь новый циркон образовался не в виде каймы, а как участок замещения в магматическом цирконе. Магматический циркон растворялся, скорее всего, из-за нарушений структуры в связи с повышенным содержанием урана (и тория) — до 2600 ppm (табл. 2).

### Обсуждение результатов

Мы рассмотрели циркон из трех пород участка Скальное: плагиогранитов, микроклиновых (щелочных) гранитов и метасоматитов, которые различаются по содержанию урана и тория и геологическому положению. Как уже отмечалось, способность циркона к изменению пропорциональна содержанию в нем урана и возрасту. Концентрация урана и тория в плагиогранитах наиболее низкая: U — 0,5–1 ppm, Th — 1,1–1,5 ppm, соответственно магматический циркон в плагиогранитах содержит мало урана (214–275 ppm) и тория (106–129 ppm). Несмотря на то, что плагиограниты — наиболее древние породы из рассматриваемых,

при таком низком содержании, как показывает рамановская спектроскопия, радиоактивных элементов существенного нарушения структуры циркона не происходит. Циркон из плагиогранитов не реагирует на гидротермальную переработку и не отражает ее.

Возраст гидротермальной переработки на участке Скальное, в результате которой образовалась урановая минерализация, определен в 1,79–1,83 млрд лет Rb-Sr-методом по  $WR + Ar + Mc$  из щелочных гранитов [17] и U-Pb-методом по ураниниту. Возраст уранинита участка Скальное, полученный на масс-спектрометре SHRIMP II, равен  $1825 \pm 20$  млн лет [12]. Также присутствует более поздний уранинит: по урановой смолке получен U-Pb-возраст в  $455 \pm 6$  млн лет [12].

В щелочных гранитах содержание урана (и тория) повышается: U — до 5,3 ppm, Th — до 25 ppm, также увеличивается содержание урана — 2339–2314 ppm и в меньшей степени тория — 45–191 ppm в цирконе. При такой высокой концентрации урана структура циркона нарушается, хотя щелочные граниты на 300 млн лет моложе плагиогранитов. Наложенная гидротермальная переработка выражается в появлении участков замещения возраста 1,7 млрд лет в магматическом цирконе возраста 2,53 млрд лет.

Метасоматиты содержат несколько больше урана — 4,8 ppm и тория — 8,9 ppm, чем плагиограниты, но меньше, чем щелочные граниты. Циркон в метасоматитах содержит 900–980 ppm урана (данные получены на электронном микроскопе в Ресурсном центре «Геомодель», СПбГУ). Возраст циркона не определялся, но на основании общей геологической ситуации и геохронологических данных по другим участкам Лицевского района [17], исходная магматическая порода (гранит) образовалась около 2,55 млрд лет, а метасоматические процессы в ней произошли после 2,3 млрд лет. Более низкие, чем в цирконе из щелочных гранитов, содержания урана не могли привести к полной метамиктизации структуры циркона. Вероятно, в данном случае проявился комплексный эффект повышенного содержания урана и высокой степени гидротермальной переработки пород, связанной с нахождением метасоматитов в зоне брекчирования. Надо отметить, что низкоуровневый циркон в гнейсах, находящихся на контакте с метасоматитами, никаких изменений не претерпел.

Анализ флюидных включений в кварце из плагиогранитов, щелочных гранитов и метасоматитов показал, что газовая составляющая флюида участка Скальное представлена практически чистым  $CO_2$  (99,3–100 мол. %), что, как известно, более способствует выщелачиванию урана из циркона и его переносу [3], поскольку в настоящее время общепризнано, что наиболее реальной формой переноса урана являются уранил-карбонатные ионы.

Изучение вторичных структур в цирконе из гранитоидов других районов Кольского п-ова, показало, что циркон с высоким содержанием урана отражает гидротермальные процессы. Локальное SIMS-датирование измененных участков циркона из субщелочных гранитов Яврозерского района и пород Кейвского блока с уран-ториевой минерализацией определяет два возраста — 1,78–1,76 и 0,48–0,40 млрд лет [7]. Эти данные говорят о приуроченности вторичных структур в цирконе к широко проявленным в Кольском регионе этапам гидротермальной переработки метаморфических комплексов пород в 1,78–1,65 и 0,42–0,38 млрд лет (см. [7] и ссылки там). С этими же рубежами связано перераспределение и накопление основных урановых концентраций [8].

## Выводы

Степень изменения циркона в гранитоидах на участках гидротермальных проявлений зависит от содержания урана в цирконе и от степени гидротермальной переработки пород. Возраст измененных участков циркона из щелочных и субщелочных гранитов Кольского региона (Лицевский и Яврозерский районы, Кейвский блок) определяет интервалы 1,78–1,76 и 0,48–0,40 млрд лет, что говорит о приуроченности вторичных структур в цирконе к широко проявленным в Кольском регионе этапам гидротермальной переработки метаморфических комплексов пород, с которыми связано формирование урановых концентраций.



ЛИТЕРАТУРА

1. Динамика взаимодействия циркона с гидротермальным углекислым флюидом / *Н. Г. Ризванова [и др.]* // Геохимия. 1996. № 3. С. 253–263.
2. *Watson E. B., Harrison T. M.* Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types // *Earth and Planetary Science Letters*. 1983. Vol. 64. P. 295–304.
3. *Kepler H., Wyllie P. J.* Role of fluids in transport and fractionation of uranium and thorium in magmatic processes // *Nature*. 1990. 348. P. 531–533.
4. Radiation effects in zircon / *R. C. Ewing [et al.]*; P. Hoskin (eds) // *Zircon*. Mineralogical Society of America Reviews in Mineralogy & Geochemistry. 2003. Vol. 53. P. 387–425.
5. *Geisler T., Schaltegger U., Tomaschek F.* Re-equilibration of zircon in aqueous fluids and melts // *Elements*. 2007. No. 3. P. 43–50.
6. *Hoskin P., Rodgers K. A.* Raman spectral shift in the isomorphous series  $(Zr_{1-x}Hf_x)SiO_4$  // *Eur. J. Solid State Inorg. Chem.* 1996. Vol. 33. P. 1111–1121.
7. *Kaulina T. V., Sinai M. Yu., Savchenko E. E.* Crystallogenic models for metasomatic replacement in zircons: implications for U–Pb geochronology of Precambrian rocks // *Intern. Geol. Rev.* 2015. Vol. 57, No. 11–12. P. 1526–1542.
8. Урановое оруденение Лицевского района на Кольском полуострове (Россия) / *А. В. Савицкий [и др.]* // *Геология рудных месторождений*. 1995. № 5. С. 403–416.
9. *Балаганский В. В.* Главные этапы тектонического развития северо-Востока Балтийского щита в палеопротерозое: автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. СПб., 2002. 32 с.
10. Альпинотипная тектоника в палеопротерозойском Лапландско-Кольском орогене / *С. В. Мудрук [и др.]* // *Геотектоника*. 2013. № 4. С. 13–30.
11. *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 // Nancy. France. 2011. 166 p.
12. *Ильченко В. Л., Афанасьева Е. Н.* О вариациях анизотропии упругих свойств горных пород в районе У-рудопоявления Скальное, Центрально-Кольский мегаблок, Балтийский щит // *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2011. № 8. С. 180–183.
13. *Nasdala L., Imer G., Wolf D.* The degree of metamictization in zircon: a Raman spectroscopic study // *Eur. J. Mineral.* 1995. No. 7. P. 471–478.
14. *Кожееников В. Н., Ивашевская С. Н., Кевлич В. И.* Геохимия и рамановские спектры цирконов из рудных (PGE-Au) амфиболитов массива Травяная губа, Северная Карелия // *Труды Карельского научного центра РАН*. 2015. № 7. С. 36–53.
15. *Hoskin P., Schaltegger U.* The Composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis // *Reviews in mineralogy & geochemistry*. 2003. Vol. 53. P. 27–62.
16. Metamictization of zircon: Raman spectroscopic study / *M. Zhang [et al.]* // *J. Phys.* 2000. No. 12. P. 1915–1925.
17. Поведение Rb–Sr и U–Pb-систем в породах и минералах Лицевского урановорудного района (Кольский полуостров) / *Т. В. Каулина [и др.]* // *Геодинамика раннего докембрия: сходства и различия с фанерозоем и путеводитель научных экскурсий: материалы науч. конф. Петрозаводск, 2017. С. 110–113.*

**Сведения об авторах**

*Каулина Татьяна Владимировна* — доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: [kaulina@geoksc.apatity.ru](mailto:kaulina@geoksc.apatity.ru)

*Лялина Людмила Михайловна* — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: [lialina@geoksc.apatity.ru](mailto:lialina@geoksc.apatity.ru)

*Нерович Людмила Ивановна* — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: [nerovich@geoksc.apatity.ru](mailto:nerovich@geoksc.apatity.ru)

*Аведисян Анаида Акоповна* — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: [avedisyan@geoksc.apatity.ru](mailto:avedisyan@geoksc.apatity.ru)

*Ильченко Вадим Леонидович* — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: [vadim@geoksc.apatity.ru](mailto:vadim@geoksc.apatity.ru)

*Бочаров Владимир Николаевич* — специалист Ресурсного центра «Геомодель» СПбГУ

E-mail: [bocharov@molsp.phys.spbu.ru](mailto:bocharov@molsp.phys.spbu.ru)

*Ниткина Елена Анатольевна* — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН

E-mail: [nitkina@geoksc.apatity.ru](mailto:nitkina@geoksc.apatity.ru)

#### **Autor Affiliation**

*Kaulina Tatiana Vladimirovna* — Dr. Sci. (Geology & Mineralogy), Leading Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: kaulina@geoksc.apatity.ru

*Lialina Lyudmila Mikhailovna* — PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: lialina@geoksc.apatity.ru

*Nerovich Lyudmila Ivanovna* — PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: nerovich@geoksc.apatity.ru

*Avedisyan Anaida Akopovna* — PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: avedisyan@geoksc.apatity.ru

*Il'chenko Vadim Leonidovich* — PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: vadim@geoksc.apatity.ru

*Bocharov Vladimir Nikolaevich* — Researcher at the Centre for Geo-Environmental Research and Modelling (GEOMODEL)

E-mail: bocharov@molsp.phys.spbu.ru

*Nitkina Elena Anatol'evna* — PhD (Geology & Mineralogy), Researcher of the Geological Institute of the KSC of the RAS

E-mail: nitkina@geoksc.apatity.ru

#### **Библиографическое описание статьи**

Процессы гидротермального изменения в цирконе как отражение геохимии урана в породах (на примере уранового рудопроявления Скальное Лицевского района Кольского полуострова) / Т. В. Каулина [и др.] // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2017. — № 3 (9). — С. 54–63.

#### **Reference**

*Kaulina Tatiana V., Lyalina Lyudmila M., Nerovich Lyudmila I., Avedisyan Anaida A., Il'chenko Vadim L., Bocharov Vladimir N., Nitkina Elena A.* Processes of Hydrothermal Change in Zircon as Manifestation of Uranium Geochemistry in Rocks (A Case Study of Skalnoye Uranium Ore Occurrence in Litsa Region, Kola Peninsula). *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2017, vol. 4 (27), pp. 54–63. (In Russ.).