

Многостадийная и долгоживущая (ок. 1000 млн лет) магмато-гидротермальная система Zr-REE-Nb-Th месторождений Кейвского щелочногранитного комплекса, Кольский полуостров: новые данные по U-Pb возрасту цирконов и изотопный состав кислорода

Зозуля Д.Р. ¹, Захаров Д.О. ²

¹ Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты

² Департамент геологических наук и наук об окружающей среде, Университет Западного Мичигана, Каламазу, Мичиган 49008, США

Аннотация. Приводятся уточненные данные по U-Pb (*in situ*) возрасту циркона из Кейвских щелочных гранитов Кольского п-ова и связанных с ними редкометалльных образований. Результаты SIMS датирования циркона из самих щелочных гранитов показывают, что его кристаллизация происходила в интервале 2660–2670 млн лет, при этом наиболее точная датировка, 2673.5 ± 0.3 млн лет, получена методом CA-ID-TIMS. U-Pb датирование по SIMS и LA-ICP-MS данным показывает, что формирование редкометалльных пегматитов, кварцолитов и метасоматитов приурочено к магматической стадии. При этом циркон из кварцолитов был значительно перекристаллизован в ходе Свекофенского метаморфизма – 1770–1790 млн лет назад. Заключительная стадия ремобилизации (амазонитовые пегматиты) и/или перекристаллизации (кварцолиты) редкометалльной минерализации может быть связана с флюидо-термальной активизацией Фенноскандинавского щита в период 1670–1690 млн лет. Впервые проведенные изотопные исследования кислорода в цирконе, породообразующих минералах и валовых породах Кейвского комплекса показали, что значительную роль в эволюции его магмато-гидротермальной системы имели метеорные воды.

Ключевые слова: циркон, изотопы, кислород, кварцолит, пегматит, метасоматит, щелочной гранит.

Multistage and long-lived (ca. 1000 Ma) magmatic-hydrothermal system of Zr-REE-Nb-Th deposits of the Keivy peralkaline granite complex, Kola Peninsula: updated U-Pb zircon ages and O-isotope composition

Zozulya D.R. ¹, Zakharov D.O. ²

¹ Geological Institute, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity 184209, Russia

² Department of Geological and Environmental Sciences, Western Michigan University, Kalamazoo, Michigan 49008, USA

Abstract. Here we present updated U-Pb (*in situ*) ages of zircon from the Keivy peralkaline granites, Kola Peninsula, and related rare-metal deposits and ore occurrences. The SIMS dating of zircon from the peralkaline granites show that magmatic crystallization occurred in the interval 2660–2670 Ma, with the most accurate date of 2673.5 ± 0.3 Ma obtained by the CA-ID-TIMS method. The SIMS and LA-ICP-MS zircon dates from the rare-metal pegmatites, quartzolites and metasomatites are confined to the magmatic interval. At the same time, zircon from quartzolites contains abundant domains that were significantly recrystallized during the Svecofenian metamorphism at 1770–1790 Ma. The final stage of remobilization/anatexis (amazonite pegmatites) and/or recrystallization (quartzolites) of rare-metal mineralization may be related to the fluid-thermal activation of the Fennoscandian Shield in the period 1670–1690 Ma. The first isotopic studies of oxygen in zircon, rock-forming minerals, and bulk rocks of the Keivy complex showed that meteoric waters played a significant role in the evolution of its magma-hydrothermal system.

Keywords: zircon, isotopes, oxygen, quartzolite, pegmatite, metasomatite, peralkaline granite.

Введение

Кейвская щелочная провинция состоит из шести массивов щелочных гранитов и единичных массивов нефелиновых сиенитов общей площадью около 2500 км². Массивы образуют лополитоподобные, пластообразные тела, штоки, кольцевые дайки и небольшие жильные тела. Возраст гранитов, определенный U-Pb изотопными методами по циркону (в том числе *in situ*) составляет 2.66–2.67 млрд лет (Митрофанов и др., 2000; Zozulya et al., 2005; Ветрин, Родионов, 2009; Zakharov

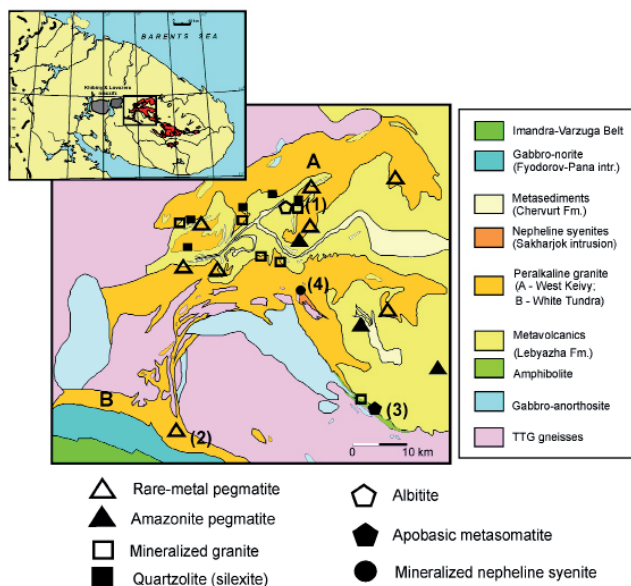


Рис. 1. Геологическая карта-схема западной части Кейвской щелочной провинции, Кольский полуостров, северо-запад России с указанием различных генетических Zr-REE-Nb-Th рудопроявлений и месторождений. Пронумерованы изученные в работе проявления (1 – кварцолит Рова; 2 – пегматит Белой тундры; 3 – апобазитовые и апогранитные метасоматиты Ельозеро; 4 – амазонитовый пегматит г. Плоской). На врезке показано расположение и структура Кейвского комплекса щелочных гранитов.

Fig. 1. Simplified geological map of the western part of the Keivy alkaline province, Kola Peninsula, NW Russia, showing the location of Zr-REE-Nb-Th ore occurrences and deposits associated with different lithologies. Numbered occurrences are studied in this paper (1 – Rova quartzolite; 2 – White Tundra pegmatite; 3 – El'ozero apobasic and apogranite metasomatites; 4 – Ploskaya amazonite pegmatite). The insert shows the location and structure of the Keivy peralkaline complex in the Kola Peninsula (boxed area).

et al., 2022). По своим геохимическим данным (агпаитовые и высокожелезистые характеристики, высокие содержания HFS элементов), Кейвские граниты относятся к А-типу (Митрофанов и др., 2000; Zozulya et al., 2005), при этом это одно из древнейших в мире проявлений анорогенного щелочногранитного магматизма. Большинство массивов является рудоносными и несут многочисленные редкометалльные образования, специализированные преимущественно на Zr, Nb, Y, REE, Th и приуроченные, главным образом, к апикальным частям интрузий и вмещающим породам кровли, а также к тектонически ослабленным зонам (рис. 1). Ведущими процессами рудообразования является кристаллизационная и эманационная дифференциация, пегматитообразование, метасоматоз, наиболее поздние гидротермальные преобразования. Генетические типы, общие черты строения и особенности состава руд редкометалльных месторождений и проявлений, связанных с щелочными гранитами Кейвской провинции, представлены в таблице 1. Формирование Кейвского комплекса гранитов, метасоматитов и пегматитов подчеркивает многостадийность и сложность процессов связанных с внедрением щелочногранитных магм в неоархейское время. Процессы деформации и перекристаллизации гранитов и вмещающих пород во время последующего метаморфизма дополнительно усложнили схемы дифференциации и рудообразования этого комплекса. Далее мы приводим характеристику щелочных гранитов и рудных тел, которые иллюстрируют многостадийность процессов. Уран-свинцовое определение и изотопные отношения кислорода помогают в понимании длительности процессов и влияния поверхностных флюидов во время кристаллизации и гидротермальной циркуляции флюидов, сопровождающей внедрение магм.

Геологическое строение и минерало-геохимическая типизация исследованных редкометалльных проявлений Кейвского комплекса

Исследованный пегматит из массива Белая Тундра представляет собой тело вытянутой формы 2×5 м и имеет кварцевое ядро, окруженное крупнозернистой кварц-арфведсонитовой/рибекитовой (+/- полевой шпат, биотит) породой с обильным содержанием (местами до 30–40 об. %) Zr-Y-REE-Nb-Th-Ti-минералов. Вмещающими породами пегматита являются пегматоидные биотит-арфведсонитовые граниты. Лялина Л.И. с соавторами (Лялина и др., 2012) разделили тело на пять зон, отражающих его минералогическое разнообразие: крупнозернистые граниты; пегматит, обогащенный астрофиллитом; пегматит, обогащенный цирконом, галенитом и астрофиллитом; зона вторичной Y-HREE минерализации (карбонаты и силикокарбонаты REE); кварцевая зона. Наиболее распространенными минералами редких элементов и актиноидов в пегматите являются циркон, торит и кайнозит-(Y). Пегматит относится к NYF (Nb-Y-F)-семейству и гадолинитовому типу со специализацией на Y, HREE, Zr, Ti, Nb (Nb >> Ta), F по классификации (Černý, Ercit,

2005). Кроме типичного редкометалльного оруденения (циркон, фергусонит-(Y), торит, монацит-(Ce), алланит-(Ce), кайнозит-(Y), астрофиллит, титанит, чевкинит-(Ce), гадолинит-(Y), хингганит-(Y), минералы группы бритолиита), пегматит Белой тундры характеризуется обильным галенитом и вторичной минерализацией REE (тенгерит-(Y), бастнезит-(Y)). По совокупности предыдущих исследований (Zozulya et al., 2021; 2022) предполагаемая последовательность кристаллизации основных минералов REE и HFSE и титаносиликатов в пегматите следующая: циркон – фергусонит-(Y) – монацит-(Ce) – бритолиит-(Y) – астрофиллит – титанит – алланит-(Ce) – чевкинит-(Ce) – ильменит – кайнозит-(Y) – карбонаты REE. Циркон полигенен и образует отдельные кристаллы и каймы на поздних стадиях пегматитогенеза и на высоко- и низкотемпературных гидротермальных стадиях (Лялина и др., 2012; Zozulya et al., 2022).

Таблица 1. Генетические типы, общие черты строения и особенности состава руд редкометалльных месторождений и проявлений, связанных с щелочными гранитами Кейвского комплекса (курсивом выделены проявления, изученные в данной работе).

Table 1. Genetic types, common structural features, and compositional features of ores from rare-metal deposits and ore occurrences associated with peralkaline granites of the Keivy complex (the occurrences studied in this work are in italics).

Месторождения и рудопроявления	Рудовмещающая порода	Морфология рудных тел	Главные рудные минералы	Основные геохимические характеристики
Ровозеро (Пьедестал), Юмперуайв, Туарвыд	минерализованные граниты	протяженные зоны (до 5 км) вдоль контакта с породами кровли	циркон, торит, чевкинит-(Ce), алланит-(Ce), фергусонит-(Y), бритолиит-(Y), бастнезит-(Ce), монацит-(Ce)	Zr (0.1–2.0 %), Y (0.02–0.2 %), Nb (0.01–0.1 %), REE (0.1–2.0 %), Th (Nb/Ta = 15–20, Zr/Hf = 40–50)
Лаврентьевское	минерализованные граниты, микроклиниты	тектонически ослабленные зоны; неправильной формы тела, приуроченные к контакту в приподошвенной части массива	циркон, торит, касситерит, пироксенол, W-пироксенол	Zr (0.1–4 %), Sn (0.01–0.3 %), W (до 25 г/т), REE (0.1–0.6 %), Th (Nb/Ta = 8–10, Zr/Hf = 25)
<i>Ельозеро</i>	апобазитовые и апогранитные метасоматиты, альбититы, микроклиниты, минерализованные граниты	неправильной формы тела, на контакте щелочных гранитов с основными породами, неоднородные по строению; минерализованные жилы	циркон, торит, алланит-(Ce), фергусонит-(Y), чевкинит-(Ce), гадолинит-(Ce), пироксенол, бритолиит-(Ce), флюорит, касситерит, даналит, монацит-(Ce), таленит	Zr (0.1–10 %), REE (0.1–2.0 %), Nb (0.01–0.4 %), W (до 1000 г/т), Th, Sn, Be (Nb/Ta=10–24, Zr/Hf=30–50)
<i>Рова, Платон-гора, Пурнач</i>	кварцолиты, альбититы	неправильной формы, иногда жильные тела (до 1–2 м) в эндо- и экзоконтакте апикальных частей массива	циркон, бритолиит-(Y), фергусонит-(Y), чевкинит-(Ce), бастнезит-(Ce), монацит-(Ce), ксенотим-(Y), торит, флюорит, эшинит-(Y), таленит, иттриалит-(Y)	Zr (0.1–10 %), Y (0.1–2 %), Nb (0.1–2 %), REE (1.0–7.0 %), Th, (Nb/Ta = 15–20, Zr/Hf = 50–60)
<i>Белотундровское, Вюнцпахк, Пессарйок, Серповидное, Ровогорское</i>	кварц-полевошпатовые пегматиты	крупные (до 30×10 м) жильные тела пегматоидного строения	циркон, бритолиит-(Y), фергусонит-(Y), чевкинит-(Ce), гадолинит-(Y), эшинит-(Y), кайнозит-(Y), астрофиллит	Y, HREE, Nb, Be NYF-семейство
<i>Плоскогорское, Парусное</i>	амазонитовые пегматиты	крупные (сотни метров) жильные тела зонального пегматоидного строения; вмещающие породы в кровле массивов	микролит, колумбит, бетафит, W-пироксенол, иттрифлюорит, ксенотим, гадолинит-(Y), кайнозит-(Y), гентгельвин, касситерит, галенит, молибденит	Y, Yb, Nb, Ta, F, Li, Sn, Pb, Mo NYF-LCT-семейство

Ельозерское редкометальное месторождение приурочено к линейной тектонической зоне между Кейвским и Центральнокольским террейнами Балтийского щита. Зона простирается на 12 км в ЮВ-СЗ направлении и имеет ширину от 200 до 1500 м. Месторождение генетически связано с позднеархейскими Кейвскими щелочными гранитами и состоит из нескольких сотен апогранитных и аплитовых жил протяженностью 50–500 м и мощностью 3–50 м во вмещающих габбро-анортозитах, амфиболитах и гнейсах. Выделены две группы рудных тел, различающихся по происхождению и минеральным парагенезисам: 1) минерализованные (циркон, торит) кварц-альбитовые с эгирином жилы (апогранитные метасоматиты); 2) высокоминерализованные (минералы Zr, REE, Nb, Th) кварц-эпидот-лепидомелановые с Ca-Na амфиболом жилы и тела неправильной формы (апобазитовые метасоматиты на контакте гранитов и основных пород). Формирование аутометасоматитов (минерализованных гранитов) соответствует поздне- и постмагматическому этапу эволюции рудоматматической системы, апобазитовые метасоматиты формировались в наиболее низкотемпературных гидротермальных условиях. Содержание Zr в метасоматитах первого типа достигает 19000–38000 ppm, метасоматит второго типа характеризуется высокими содержаниями таких редких элементов как REE (до 85000 ppm), Y (до 42000 ppm), Nb (до 62000 ppm), Zr (до 67000 ppm), Th (до 17000 ppm). Распределение REE в апобазитовых метасоматитах имеет V-образную форму, что характерно для пород, испытавших гидротермальную переработку фторсодержащими растворами (Bagiński et al., 2016; Zozulya et al., 2019). В апобазитовых метасоматитах установлены следующие редкометалльные минералы и определена их последовательность кристаллизации: рудообразующие (главные) фазы (от ранних к поздним: торит, циркон, фергусонит-(Y), самарскит-(Y), чевкинит-(Ce), алланит-(Ce)) и второстепенные (и акцессорные) фазы (монацит-(Ce), эшинит-(Y), эшинит-(Ce), пирохлор, Nb-содержащий рутил, давидит-(La), уранинит, торогумит, гадолинит-(Ce), хинганит-(Ce), фторбритолит-(Ce), даналит, бастнезит-(Ce), гидроксилбастнезит-(Ce)). LREE накапливаются преимущественно в минералах группы чевкинита (до 45 мас. %) и алланита (до 22 мас. %); Y-Nb оксиды являются основными носителями Y (25–28 мас. %) и HREE (9–11 мас. %).

Кварцолиты проявления Рова приурочены к пологим контактам щелочных гранитов Западнокейвского массива и располагаются как внутри гранитов, так и в гнейсах экзоконтактных зон. Кварцолитовые тела весьма разнообразны по форме, размеру (от 0.5 до 1.5 м) и составу. Кварцолиты представляют собой неравномернозернистые такситовые породы, содержащие не менее 50 об. % кварца и не более 10 об. % полевых шпатов и в качестве второстепенных минералов – эгирин, арфведсонит, аннит, магнетит, ильменит, флюорит. Значительное количество флюорита и других F- или OH-содержащих минералов указывает на активное участие флюида при формировании кварцолитов. Редкометалльная минерализация в кварцолитах достигает 20–30 об. % и характеризуется разнообразным составом (более 10 минералов Y, Nb, REE, Zr, Th). Распределение REE в кварцолитах сходно с таковым для апобазитовых и апогранитных метасоматитов (Zozulya et al., 2019), при этом некоторые образцы имеют даже обратный наклон в распределении REE, то есть породы также испытали гидротермальную переработку фторсодержащими растворами. Типоморфным сквозным минералом редкометалльной ассоциации в кварцолитах является циркон. К нему добавляются развитые резко неравномерно (от первых граммов до десятков килограммов на тонну породы) и не повсеместно – эшинит-(Y), чевкинит-(Ce), фергусонит-(Y), фторбритолит-(Y), иттриалит-(Y), торит, монацит-(Ce), ксенотим-(Y), бастнезит-(Ce). Фторбритолит-(Y) и иттриалит-(Y) являются главными носителями REE, их содержание в некоторых телах может достигать 10–15 об. %. Распределение редкоземельных элементов во фторбритолите-(Y) характеризуется синусоидальной формой с преобладанием HREE над LREE и ярко выраженными минимумами для Pr и Nd (Лялина и др., 2013; Zozulya et al., 2019). Распределение редкоземельных элементов в иттриалите-(Y) сходно с таковым для фторбритолита-(Y), отличаясь меньшим количеством наиболее легких REE. В целом, данное распределение REE является характерным для REE-минералов, кристаллизующихся в гидротермальных условиях (см. обзор в Zozulya et al., 2019).

Уникальное *пегматитовое тело амазонит-кварц-альбитового состава (г. Плоская)* интрузирует метавулканический комплекс Кейв. Оно имеет несколько сотен метров в длину и несколько де-

сятков метров в ширину. Редкометалльная и типоморфная акцессорная минерализация представлена кеноплумбомикролитом, микролитом, бетафитом, воджинитом, колумбитом-(Fe), колумбитом-(Mn), пироксеном, кеноплумбопироксеном, кейвиитом-(Y), кейвиитом-(Yb), флюоритом, иттрифлюоритом, твейтитом-(Y), ксенотимом-(Y), ксенотимом-(Yb), цирконом, монацитом-(Ce), гадолинитом-(Y), хингганитом-(Y), хингганитом-(Yb), кулиокитом-(Y), вюнцпахкитом-(Y), бастнезитом-(Ce), тенгеритом-(Y), кайсикхитом-(Y), чевкинитом-(Ce), бритолитом-(Y), таленитом-(Y), фергусонитом-(Y), форманитом-(Y), кайнозитом-(Y), торитом, уранинитом, даналитом, гентгельвином, полилитионитом, циннвальдитом, касситеритом, магнетитом, гематитом, англезитом, вульфенитом, модибденитом, галенитом, казолитом, висмутитом, церусситом, др. (полный список минералов см. в (Волошин, Пахомовский, 1986)) и имеет геохимическую специализацию на Y, Yb, Nb, Ta, F, P, Li, Be, Sn, Pb, W, Mo, указывающую на смешанное NYF (Nb-Y-F) – LCT (Li-Cs-Ta) пегматитовое семейство. Высокое содержание богатых летучими веществами минералов указывает на решающую роль F и CO₂ в образовании пегматита. Близконкордантные U-Pb-возраста 1673±3, 1682±35, 1695±5 млн лет были получены для пегматитовых монацита, циркона и ксенотима, соответственно (Баянова, 2004). В Кейвах и на Кольском п-ве не известны граниты с таким возрастом, поэтому формирование пегматита предполагается либо путем 1) метаморфической ремобилизации редких металлов и несовместимых элементов из щелочного гранита (Zr, REE, Nb, F) и вмещающего комплекса (метавулканиды средне-кислого состава, мусковитовые сланцы), как источников Sn, W, Pb, Mo, Li, P; или 2) анатексиса верхнекоровых пород. Следует отметить, что сходный по времени возраст (1665±22 млн лет) был получен U-Th-Pb (EMPA) методом для монацита-(Ce) из Кейвских кварцолитов (Macdonald et al., 2017). Данный временной этап, скорее всего, связан с флюидотермальной активизацией всего Феноскандинавского щита (в его южной части этот период характеризуется интрузиями рапакиви-гранитов (Rämö, Naapala, 1995), а в северо-западной части – гранитными пегматитами (Berg et al., 2015)).

Новые данные по U-Pb датированию (SIMS, CA-ID-TIMS и LA-ICP-MS) цирконов из Кейвских щелочных гранитов и связанных с ними редкометалльных образований

Захаров Д.О. с соавторами (Zakharov et al, 2022) провели прецизионное U-Pb датирование (SIMS) цирконов из Кейвских щелочных гранитов и связанных с ними редкометалльных образований (рис. 2). Средний ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb возраст конкордантных цирконов из Понойского массива составляет 2670 ± 4 млн лет. При этом краевые участки зерен дают конкордантный ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb возраст 1831 ± 6 млн лет. Цирконы из щелочных гранитов массива Белых тундр дают близконкордантный возраст с верхним пересечением 2672 ± 11 млн лет (10 конкордантных точек имеют средний ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb возраст 2676 ± 3 млн лет (MSWD = 0.81)). Циркон из редкометалльных жил Ельозерского Zr-Th-REE-Nb месторождения имеет ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb возраст 2668 ± 2 млн лет. Цирконы из трех образцов редкометалльных кварцолитов проявления Рова (массив Западных Кейв) имеют дискордантные возрасты по верхнему пересечению в 1766 ± 12 млн лет, 1789 ± 10 млн лет и 1792 ± 8 млн лет, соответственно. При этом, существуют единичные определения в сохранившихся ядрах в пределах 2650–2660 млн лет. Большинство изучаемых цирконов из кварцолита Рова имеют высокие содержания U, иногда достигающих 5800 ppm. Из-за высокого содержания урана и их древнего возраста, большинство цирконов содержат метамиктные домены и при изучении под сканирующим электронным микроскопом имеют изменённый облик. Поэтому мы интерпретируем некоторые возрасты с уран-свинцовыми отношениями выше линии конкордии (рис. 2) как продукт анализа высокоурановых метамиктных цирконов.

Высокоточное U-Pb изотопное датирование единичных зерен циркона методом химической абразии и термоионизационной масс-спектрометрии с изотопным разбавлением (chemical abrasion bulk dissolution and isotope-dilution thermal ionization mass-spectrometry, CA-ID-TIMS) было использовано для определения возраста кристаллизации Понойского массива (Zakharov et al., 2023). Для этого были взяты 10 кристаллов циркона, которые после реакции с горячей HF (210 °C) распались на несколько фрагментов. В сумме 14 единичных фрагментов были растворены и из-

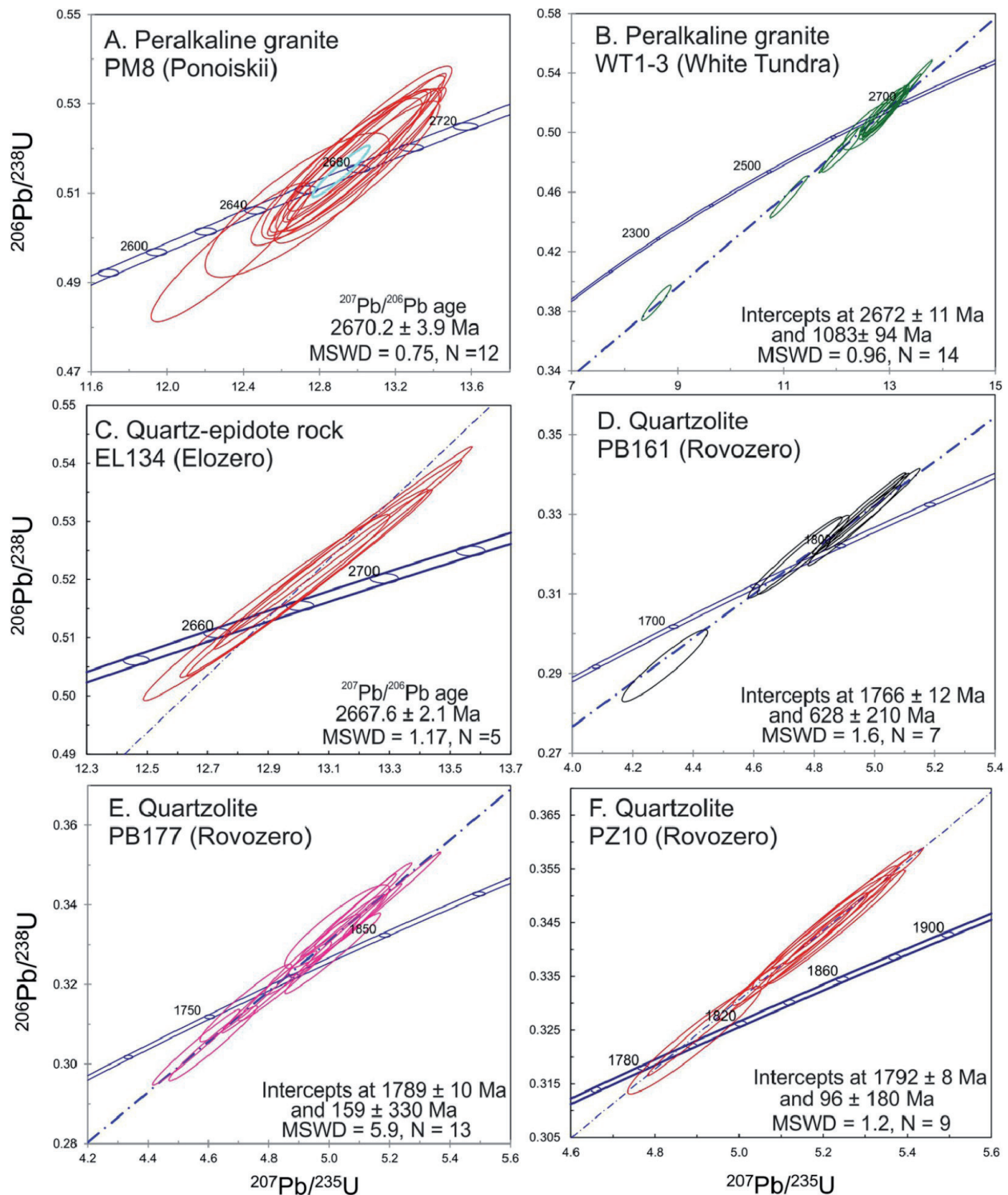


Рис. 2. U-Pb диаграммы с конкордией (SIMS данные) для цирконов из щелочных гранитов, редкометалльных кварцолитов, минерализованных жил и метасоматитов Кейвского комплекса (по Zakharov et al., 2022).

Fig. 2. U-Pb concordia diagrams (SIMS data) for zircons from peralkaline granites, rare-metal quartzolites, mineralized veins and metasomatites of the Keivy complex (after Zakharov et al., 2022).

мерены. Конкордатные единичные измерения фрагментов дали возрасты с ошибкой по отношению $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} < 1.5$ млн лет. Средний $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраст конкордантных цирконов составил 2673.5 ± 0.3 млн лет. Этот возраст является наиболее точным определением магматической кристаллизации Кейвских щелочных гранитов.

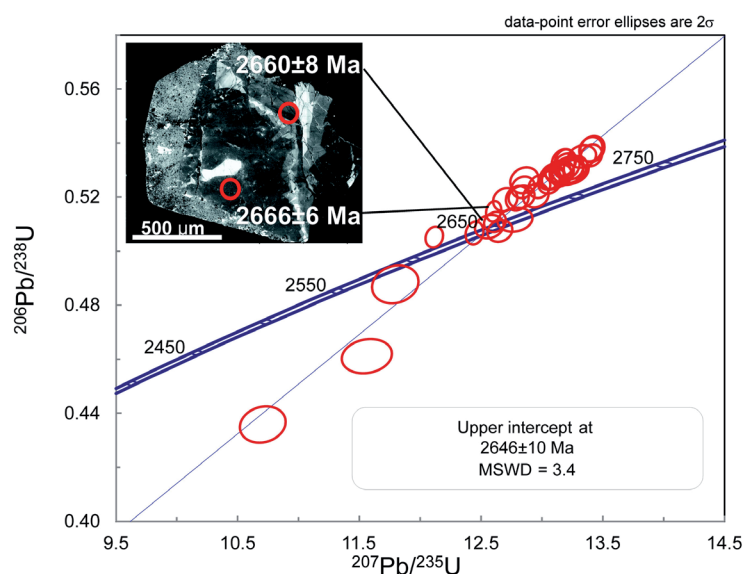


Рис. 3. U-Pb диаграмма с конкордией (по LA-ICP-MS данным) для цирконов из пегматита щелочногранитного массива Белые тундры, Кейвский комплекс. Показаны две из проанализированных конкордантных точек ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возраст) с соответствующим CL изображением кристалла.

Fig. 3. U-Pb concordia diagrams (LA-ICP-MS data) for zircons from White Tundra peralkaline granite pegmatite, Keivy complex. Two of analyzed concordant points ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age) with corresponding CL image of crystal are shown.

из щелочных гранитов. Многие измерения в цирконах из пегматита Белая тундра находятся выше конкордии (рис. 3). Так как во многих цирконах из этого образца были получены высокие содержание нерадиогенного свинца ^{204}Pb , предполагается, что такие изотопные отношения могут объясняться небольшими порциями привнесённого свинца из окружающих пород. При обработке все анализы с сигналами ^{204}Pb отсеивались. Следовательно, даже небольшие порции привнесённого свинца могли существенно повлиять на качество датировок таких цирконов.

Изотопная геохимия кислорода редкометалльных проявлений Кейвского щелочно-гранитного комплекса: источники гидротермального флюида

Недавние анализы, опубликованные по щелочным гранитам, вмещающим породам и кварцолитам и выделенным из них минералам (Zakharov et al., 2022; Zakharov et al., 2023) указывают на повсеместное присутствие низких $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ отношений. Типичные $\delta^{18}\text{O}$ значения (в промилле по отношению к стандарту VSMOW) для коровых и мантийных пород лежат в пределах от +5 до +11 ‰ (Taylor, Sheppard, 1986). Щелочные граниты Кейв дают значения по валовой породе в интервале +1 и +4.5 ‰. Некоторые породы, отобранные из краевых частей массивов дают гораздо более низкие валовые значения, достигающие до -5 ‰. Приконтактовые изменённые породы и кварцолиты дают наиболее обеднённые отношения $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$. Так, например, вмещающие гнейсы в Ровозёрском участке достигают значений до -9 ‰, измеренные в амфиболах. Цирконы из щелочных гранитов, кварцолитов Рова и метасоматитов Ельозера были измерены *in situ* с использованием SIMS. Для измерений цирконов мы использовали $^{16}\text{OH}/^{16}\text{O}$ для отборки доменов, которые могли испытать метамиктизацию и гидратацию. Большинство магматических цирконов в щелочных гранитах Кейв имеют близкое к нулю отношение $^{16}\text{OH}/^{16}\text{O}$ (как и безводные зерна стандартного циркона 91500), что соответствует диапазону значений $\delta^{18}\text{O}$ от -1 ‰ до +2 ‰ (рис. 4). Значения $\delta^{18}\text{O}$ для гидротермального циркона из кварцолитов колеблются от -8 ‰ до +3 ‰ с высоким разбросом $^{16}\text{OH}/^{16}\text{O}$. При этом наименьшие значения $^{16}\text{OH}/^{16}\text{O}$ соответствуют самым низким значениям $\delta^{18}\text{O}$. Цирконы

Циркон из пегматита Белых тундр был продатирован ранее с использованием как валовых навесок методом TIMS (Лялина и др., 2012), так и измерений *in situ* на SHRIMP-RG (Ветрин, Родионов, 2009). Полученные возрасты показали, что кристаллизация пегматита приурочена к магматической фазе в 2.66–2.67 млрд лет. Из-за распространённости дискордантных датировок цирконов из пегматита Белых тундр, в настоящей работе мы измерили зоны, которые имеют наиболее сохранившуюся зональность в катодолюминесценции. Полученный методом LA-ICP-MS дискордантный U-Pb возраст по 37 точкам составляет 2646 ± 10 млн лет, при этом наиболее чистые внутренние зоны в цирконе имеют конкордантные значения около 2660–2670 млн лет (рис. 3), что совпадает с кристаллизацией магматического циркона

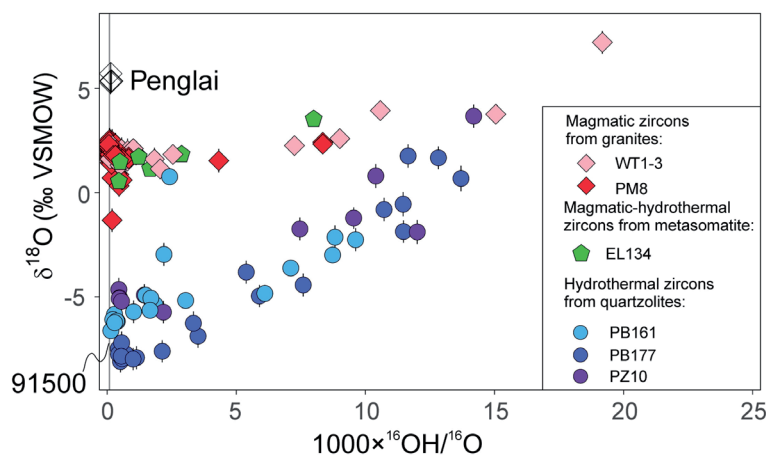


Рис. 4. Значения $1000 \times {}^{16}\text{OH}/{}^{16}\text{O}$, измеренные одновременно с $\delta^{18}\text{O}$ методом SIMS в цирконе из щелочных гранитов, метасоматитов и приконтактовых кварцолитов (с изменениями по Zakharov et al., 2023). Вертикальная полоса показывает ${}^{16}\text{OH}/{}^{16}\text{O}$ значения, измеренные в стандарте 91500.

Fig. 4. $1000 \times {}^{16}\text{OH}/{}^{16}\text{O}$ values measured concurrently with $\delta^{18}\text{O}$ by SIMS in zircon from peralkaline granites, metasomatism and near-contact quartzolites (modified after Zakharov et al., 2023). The vertical bar represents the ${}^{16}\text{OH}/{}^{16}\text{O}$ values measured in the 91500 standard.

из метасоматитов Ельозера имеют отношения сходные с магматическими цирконами из щелочных гранитов (рис. 4). В целом, такие низкие $\delta^{18}\text{O}$ значения в магматических и гидротермальных породах (включая цирконы) были проинтерпретированы как результат неоархейских гидротермальных изменений, которые происходили при внедрении щелочногранитных магм в верхнюю кору. Цирконы, которые отражают магматические процессы (Valley et al., 2005), показывают, что эти значения были унаследованы после переплавления гидротермально изменённых пород в верхней коре. Такие низкие значения, достигающие до $\delta^{18}\text{O} = -9$ ‰, в принципе редки в силикатных породах, но при этом распространены в метеорных водах. С помощью систематики тройных изотопных отношений ${}^{17}\text{O}/{}^{16}\text{O}$ и ${}^{18}\text{O}/{}^{16}\text{O}$ было показано, что Кейвские породы отражают древний гидротермальный обмен с метеорными осадками, которые были уже достаточно низки в неоархейское время (Zakharov et al., 2023).

Таким образом, изучение изотопного состава кислорода в минералах и породах Кейвских редкометалльных проявлений и вмещающих пород показывает, что их формирование происходило в близповерхностных условиях (первые сотни метров) и под воздействием гетерогенных (метеогенных и магматогенных) гидротермальных растворов/флюидов как на магматическом этапе (2650–2670 Ma), так и на поздних стадиях Свектофенского регионального метаморфизма (1770–1790 Ma).

Закключение

Полученные данные уточняют ранее полученный позднеархейский (в интервале 2660–2670 млн лет) возраст Кейвского щелочногранитного магматизма (2673.5 ± 0.3 млн лет) и указывают на формирование редкометалльной минерализации на двух основных этапах: 1) поздне-, пост-магматический – 2660–2670 млн лет для минерализованных жил, метасоматитов, кварц-полевошпатовых пегматитов, кварцолитов; и 2) метаморфический (перекристаллизация в гидротермальных условиях) – 1770–1790 млн лет – для кварцолитов. Наиболее поздние возрасты (1670–1690 млн лет), полученные для цирконов и монацитов из амазонитовых пегматитов и кварцолитов, вероятно, связаны с ремобилизацией вещества и/или перекристаллизацией минералов во время флюидо-термальной активизации Феноскандинавского щита в это время. Таким образом, длительность формирования редкометалльной минерализации в Кейвской щелочногранитной магмато-гидротермальной системе можно оценить в 1000 млн лет. По данным изотопного состава кислорода метеорная вода является существенным контаминантом, как на магматическом, так и метаморфическом этапах формирования редкометалльной минерализации Кейвского комплекса.

Работа выполнена в рамках темы НИР № 0226-2019-0053 и гранта Российского научного фонда № 22-17-20002, <https://rscf.ru/project/22-17-20002/>. Аналитические работы выполнялись в исследовательском центре CASA Swiss Facility, Университет Лозанны.

Литература

1. Баянова Т.Б. Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма. М.: Наука, 2004. 172 с.
2. Ветрин В.Р., Родионов Н.В. Геология и геохронология неогархейского анорогенного магматизма Кейвской структуры, Кольский полуостров // Петрология. 2009. Т. 17. № 6. С. 578–600.
3. Волошин А.В. Пахомовский Я.А. Минералы и эволюция минералообразования в амазонитовых пегматитах Кольского полуострова. Л.: Наука, 1986. 168 с.
4. Лялина Л.М., Зозуля Д.Р., Баянова Т.Б., Селиванова Е.А., Савченко Е.Э. Генетические особенности циркона из пегматитов неогархейской щелочногранитовой формации Кольского региона // Записки РМО. 2012. № 5. С. 35–51.
5. Лялина Л.М., Зозуля Д.Р., Савченко Е.Э., Тарасов М., Селиванова Е.А., Тарасова Е. Фторбритолит-(Y) и иттриалит-(Y) из силекситов Кейвских щелочных гранитов Кольского полуострова // Записки РМО. 2013. № 4. С. 72–89.
6. Митрофанов Ф.П., Зозуля Д.Р., Баянова Т.Б., Левкович Н.В. Древнейший в мире анорогенный щелочногранитный магматизм в Кейвской структуре Балтийского щита // Доклады РАН. 2000. Т. 374. № 2. С. 238–241.
7. Bagiński B., Zozulya D., Macdonald R., Kartashov P.M., Dzierżanowski P. Low-temperature hydrothermal alteration of a rare-metal rich quartz-epidote metasomatite from the El'ozero deposit, Kola Peninsula, Russia // European Journal of Mineralogy. 2016. V. 28 (4). P. 789–810. DOI: 10.1127/ejm/2016/0028-2552.
8. Bergh S.G., Corfu F., Priyatkina N., Kullerud K., Myhre P.I. Multiple post-Svecofennian 1750–1560 Ma pegmatite dykes in Archaean-Palaeoproterozoic rocks of the West Troms Basement Complex, North Norway: Geological significance and regional implications // Precambrian Research. 2015. 266. P. 425–439. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2015.05.035>.
9. Černý P., Ercit T.S. The classification of granitic pegmatites revisited // Canadian Mineralogist. 2005. V. 43. P. 2005–2026.
10. Macdonald R., Bagiński B., Zozulya D. Differing responses of zircon, chevkinite-(Ce), monazite-(Ce) and fergusonite-(Y) to hydrothermal alteration: Evidence from the Keivy alkaline province, Kola Peninsula, Russia // Mineralogy and Petrology. 2017. V. 111 (4). P. 523–545. <https://doi.org/10.1007/s00710-017-0506-2>.
11. Rämö O.T., Haapala I.J. One hundred years of Rapakivi Granite // Mineralogy and petrology. 1995. V. 52. P. 129–185.
12. Taylor H.P., Sheppard S.M.F. Igneous rocks: I. Processes of isotopic fractionation and isotope systematics // Stable Isotopes in High Temperature Geological Processes, edited by J.W. Valley, H.P. Taylor and J.R. O'Neil. Berlin-Boston: De Gruyter. 1986. P. 227–272. <https://doi.org/10.1515/9781501508936-013>.
13. Valley J.W., Lackey J.S., Cavosie A.J., Clechenko C.C., Spicuzza M.J., Basei M.A.S., Bindeman I.N., Ferreira V.P., Sial A.N., King E.M., Peck W.H. // 4.4 billion years of crustal maturation: oxygen isotope ratios of magmatic zircon. Contributions to Mineralogy and Petrology. 2005. V. 150. P. 561–580.
14. Zakharov D.O., Zozulya D.R., Colón D.P. Quantitative record of the Neoproterozoic water cycle from a 2.67 Ga magmatic-hydrothermal system, Fennoscandian Shield // Geology. 2023. 51 (2). P. 215–219. <https://doi.org/10.1130/G50702.1>.
15. Zakharov D.O., Zozulya D.R., Rubatto D. Low- $\delta^{18}\text{O}$ Neoproterozoic precipitation recorded in a 2.67 Ga magmatic-hydrothermal system of the Keivy granitic complex, Russia // Earth and Planetary Science Letters. 2022. V. 578. 117322. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.117322>.
16. Zozulya D.R., Bayanova T.B., Eby G.N. Geology and Age of the Late Archean Keivy Alkaline Province, Northeastern Baltic Shield // The Journal of Geology. 2005. 113 (5). P. 601–608. <https://doi.org/10.1086/431912>.
17. Zozulya D., Lyalina L., Macdonald R., Bagiński B., Savchenko Y., Jokubauskas P. Britholite Group Minerals from REE-Rich Lithologies of Keivy Alkali Granite—Nepheline Syenite Complex, Kola Peninsula, NW Russia // Minerals. 2019. V. 9(12). P. 732. <https://doi.org/10.1086/431912>.
18. Zozulya D., Macdonald R., Bagiński B., Jokubauskas P. Nb/Ta, Zr/Hf and REE fractionation in exotic pegmatite from the Keivy province, NW Russia, with implications for rare-metal mineralization in alkali feldspar granite systems // Ore Geology Reviews. 2022. V. 143. C. 104779. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104779>.