

Особенности внутреннего строения граната-стандарта «Ковдор»: результаты рентгеновской компьютерной микротомографии

Плоткина Ю. В.¹, Сальникова Е. Б.¹, Стифеева М. В.¹, Кульков А. М.²

¹ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН (ИГГД РАН), Санкт-Петербург, jplotkina@yandex.ru

² Институт наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург, aguacrystals@yandex.ru

Аннотация. Выполнены исследования внутреннего строения образцов граната «Ковдор» методом рентгеновской компьютерной микротомографии. Са-Fe гранаты сравнительно недавно, но весьма успешно используются в качестве U-Pb минералов-геохронометров. Использование этих гранатов как природного референсного материала для определения возраста пород с помощью локальных U-Th-Pb геохронологических исследований обуславливает необходимость изучения их внутреннего строения с высокой степенью точности. В качестве нового природного стандарта граната для реализации геохронологических исследований был предложен гранат из щелочных пород Ковдорского массива (Кольская щелочная провинция).

Ключевые слова: рентгеновская компьютерная микротомография, гранат «Ковдор», природный эталонный материал, датирование локальными методами.

Internal structure of garnet reference materials «Kovdor»: insights from X-ray computed microtomography

Plotkina Yu. V.¹, Salnikova E. B.¹, Stifeeva M. V.¹, Kulkov A. M.²

¹ IPGG RAS, St. Petersburg, jplotkina@yandex.ru

² Institute of Earth Science (St. Petersburg State University), St. Petersburg, aguacrystals@yandex.ru

Abstract. The internal structure of «Kovdor» garnet samples was investigated using X-ray computed microtomography. Although Ca-Fe garnets have only recently been introduced as U-Pb geochronometers, they have already proven highly successful. Their potential use as a natural reference material for in-situ U-Th-Pb geochronology requires precise characterization of their internal structure. To address this need, garnet from the alkaline rocks of the Kovdor massif (Kola Alkaline Province) has been proposed as a new natural reference standard for geochronological studies.

Keywords: X-ray computed microtomography, «Kovdor» garnet, natural reference material, in-situ dating.

Введение

Ковдорский массив щелочно-ультраосновных пород, наряду с другими многочисленными интрузивными образованиями, входит в состав Кольской щелочной провинции, которая является одной из крупнейших изверженных провинций мира. Открытый в 1933 г. Ковдорский массив детально и разносторонне был описан многими исследователями (Афанасьев, 2011; Римская-Корсакова, Краснова, 2002; и др.), в том числе ряд работ был посвящен оценкам его возраста (Kramm, Kogarko, 1993; Арзамасцев, Фу Ян Ву, 2014).

За последние несколько лет получены оценки U-Pb ID TIMS возраста (373–377 млн лет) Са-Fe граната из щелочно-ультраосновных массивов Кольской провинции (Африканда, Ковдор, Салланлатва, Салмагора, Вуориярви) (Сальникова и др., 2018; Стифеева и др., 2020), которые согласуются между собой и соответствуют главному этапу проявления щелочно-ультраосновного магматизма провинции. При этом гранат из апооливинитовых пород массива Ковдор отличается высоким содержанием урана (12.41–25.43 мкг/г) и низкой долей обыкновенного свинца (Pbc/Pbt 0.06–0.08), что позволило предложить его в качестве природного референсного материала для локальных U-Th-Pb геохронологических исследований (Stifeeva et al., 2026).

Объект исследований

Гранат является одним из породообразующих минералов контактово-реакционных апооливинитовых пород северной части массива Ковдор в контактовой зоне ультраосновных пород и по-

род фойдолитовой серии. Кристаллы граната темно-коричневого (до черного) цвета хорошо огранены и имеют размер до 1.5 см. Состав граната отвечает ряду андрадит (41.47–46.36 %) – моримотоит (29.37–33.74 %) – шорломит (13.10–14.47 %). Проявленная зональность обусловлена чередованием зон с вариациями содержания главных элементов. Гранат характеризуется высоким содержанием REE (977–1953 мкг/г) с незначительным обеднением группой LREE ($[La/Sm]N = 0.07–0.17$) и максимумом содержания для MREE ($[Gd/Yb]N = 1.44–3.55$). Контроль состава исследуемых фрагментов методом EDS показал высокий уровень однородности материала. Ранее международной группой исследователей (Horstwood et al., 2016) был предложен подход к выбору стандартов (референсного материала) для локальных методов датирования. В частности, обязательными требованиями к стандартам являются: гомогенность распределения основных и микроэлементов (однородное внутреннее строение по составу); воспроизводимость U/Pb отношений; низкая доля обыкновенного Pb; доступность материала и его достаточное количество, а также отсутствие включений, влияющих на результат. Гранат «Ковдор», предложенный в качестве референсного материала, соответствует большинству этих требований. Для определения степени однородности кристаллического материала и выявления включений в объеме кристаллов было проведено рентгеновское микротомографическое исследование.

Методика

Отличительной особенностью и несомненным преимуществом рентгеновской компьютерной микротомографии является полная сохранность материала (Sasov, Van Dyck, 1998), который в дальнейшем может использоваться для исследования другими методами. В ходе изучения образцов граната «Ковдор» были отобраны под биноклем единичное зерно (600 мкм) и фрагменты крупного (15000 мкм) кристалла размером 600–800 мкм. Исследования проводились с помощью микротомографа NEOSCAN-80 (Бельгия). Условия сканирования были унифицированы для всех образцов: ускоряющее напряжение 75 kV, сила тока 200 μ A, Al-фильтр 0.25–0.5 мм или Cu-фильтр 0.1–0.25 мм, пространственное разрешение 0.7 μ m, вращение на 180° с шагом 0.3°, усреднение по 5 кадрам. Реконструкция полученного массива данных (теневых изображений) производилась с помощью программного обеспечения Neoscan. Построение 3D моделей производилось с помощью пакета программ Bruker (CTAn, CTVOx, CTViewer).

Результаты

В ходе томографического исследования были отсканированы три образца граната «Ковдор»: единичное зерно и несколько фрагментов крупного кристалла. На основе полученного массива теневых изображений была проведена реконструкция и построены трехмерные модели образцов. Согласно построенным моделям в единичном зерне наряду с газовыми включениями наблюдаются единичные твердофазные (минеральные) включения (рис. 1). Единичные твердофазные включения

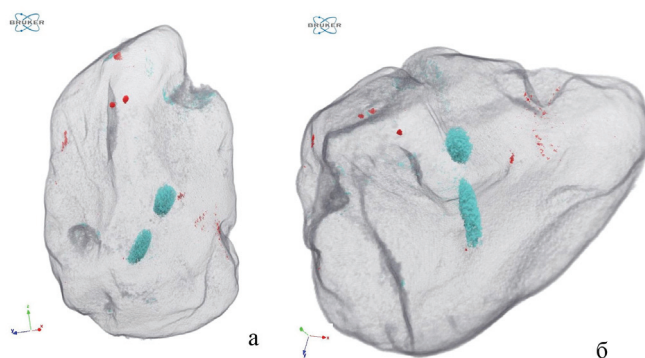


Рис. 1. Трехмерная модель (3D-модель) единичного зерна граната, построенная на основании массива изображений, полученных при микротомографическом сканировании: а и б – разные положения 3D модели. Голубым цветом обозначены газовые включения, красным цветом – твердофазные включения

Fig. 1. Three-dimensional (3D) model of a single garnet grain reconstructed from micro-CT imaging data: (a, b) different views of the 3D model. Gas inclusions are highlighted in blue, and mineral inclusions in red

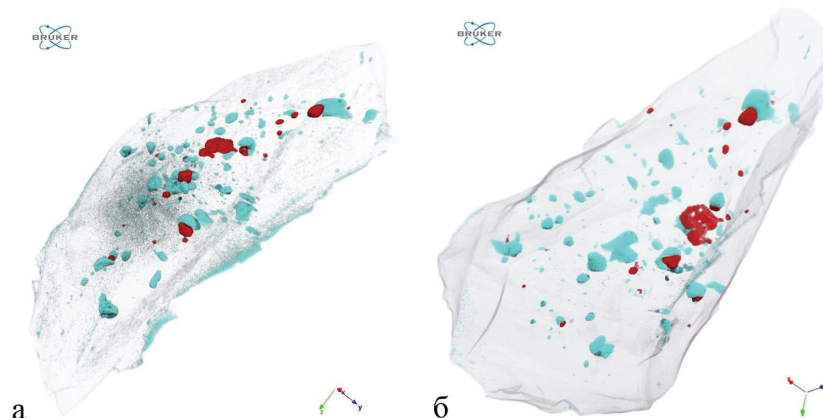


Рис. 2. Трехмерное изображение (3D модель) фрагмента граната, построенное на основании массива изображений, полученных в результате микротомографического сканирования: а и б – разные положения 3D модели. Голубым цветом обозначены газовые включения, красным цветом – твердофазные включения

Fig. 2. Three-dimensional (3D) model of a garnet fragment reconstructed from micro-CT imaging data: (a, b) different views of the 3D model. Gas inclusions are highlighted in blue, and mineral inclusions in red

размером порядка 15–20 мкм, визуально хорошо различимы и не могут повлиять на выбор положения точки при датировании локальными методами с использованием зерна граната в качестве референсного материала. Микротомографическое исследование фрагментов кристалла граната выявило аналогичную картину в расположении газовых и твердофазных включений (рис. 2, 3). Анализ изображений единичных сечений кристаллического фрагмента, полученных в ходе реконструкции исходного массива, показал, что фрагменты имеют однородное внутреннее строение и содержат, наряду с газовыми, единичные твердофазные включения (рис. 3 а, в).

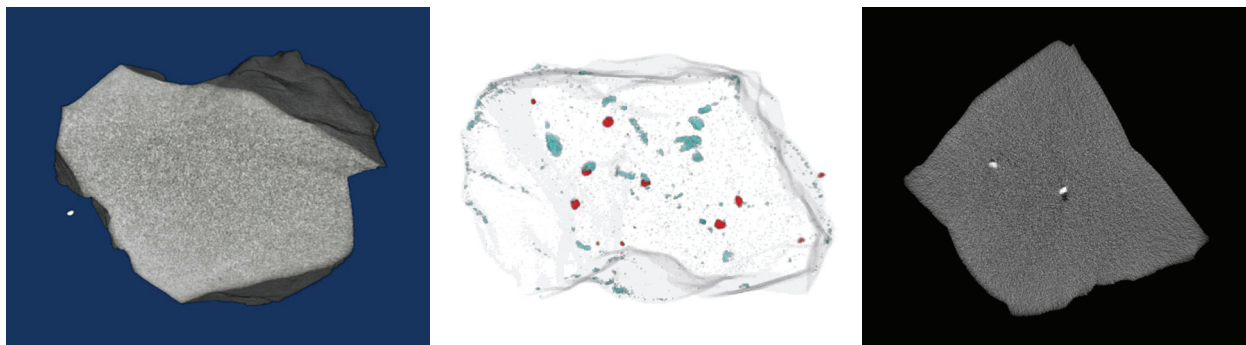


Рис. 3. Трехмерное изображение (3D модель) фрагмента граната, построенное на основании массива изображений, полученных в результате микротомографического сканирования: а – сечение плоскостью 3D модели; б – расположение включений в объеме фрагмента (голубым цветом обозначены газовые включения, красным цветом – твердофазные включения); в – единичное сечение фрагмента граната, полученное в ходе реконструкции исходного массива теневых проекций. Белым цветом выделены твердофазные (минеральные) включения

Fig. 3 Three-dimensional (3D) model of a garnet fragment reconstructed from a set of images obtained by microtomographic scanning: а – cross-section through the 3D model; б – distribution of inclusions within the fragment volume (gas inclusions are shown in blue, solid inclusions in red); в – a single cross-section of the garnet fragment obtained during reconstruction of the original set of shadow projections. Solid (mineral) inclusions are highlighted in white

Выводы

Использование метода рентгеновской микротомографии подтвердило однородность внутреннего строения граната «Ковдор». Присутствие обособленных твердофазных включений не является препятствием для использования этого граната в качестве референсного материала для локальных U-Th-Pb геохронологических исследований. Следует отметить, что метод mCT рекомендован

для использования на начальных этапах исследования образцов, так как позволяет экспрессно и наглядно получить трехмерную картину внутреннего строения кристалла с высокой степенью точности.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 22-17-00211П).

Литература

1. Арзамасцев А. А., Фу Ян Ву U-Pb геохронология и изотопная (Sr, Nd) систематика минералов щелочно-ультраосновных массивов Кольской провинции // *Петрология*. 2014. Т. 22, № 5. С. 496–515. <https://doi.org/10.7868/S0869590314050021>.
2. Афанасьев Б. В. Минеральные ресурсы щелочно-ультраосновных массивов Кольского полуострова. СПб. Изд-во: «Роза ветров», 2011. 224 с.
3. Римская-Корсакова О. М., Краснова Н. И. Геология месторождений Ковдорского массива. Санкт-Петербург. Изд-во: Санкт-Петербургский государственный университет, 2002. 146 с.
4. Сальникова Е. Б., Стифеева М. В., Шахмурадян А. Р., Глебовицкий В. А., Регир Е. П. U-Pb-систематика шорломита из кальцит-амфибол-пироксеновых пегматитов массива Африканда (Кольский полуостров) // *Доклады АН*. 2018. Т. 478, № 4. С. 443–446. <https://doi.org/10.7868/S086956521804014x>.
5. Стифеева М. В., Сальникова Е. Б., Арзамасцев А. А., Котов А. Б., Гроздев В. Ю. Кальциевые гранаты как источник информации о возрасте щелочно-ультраосновных интрузий Кольской магматической провинции // *Петрология*. 2020. Т. 28, № 1. С. 72–84. <https://doi.org/10.31857/S0869590320010069>.
6. Стифеева М. В., Сальникова Е. Б., Адамская Е. В., Котов А. Б., Иванов А. В., Millonig J. L., Gerdes A., Гриценко Ю. Д. Новый природный стандарт граната «Ковдор» для U-Th-Pb локальных геохронологических исследований // *Щелочной и кимберлитовый магматизм Земли и связанные с ним месторождения стратегических металлов и алмазов*. 2023. <https://doi.org/10.37614/978-5-91137-500-3.079>.
7. Kramm U., Kogarko L. N., Kononova V. A., Vartiainen H. The Kola Alkaline Province of the CIS and Finland: Precise Rb-Sr ages define 380–360 age range for all magmatism // *Lithos*. 1993. V. 30. P. 33–44. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(93\)90004-V](https://doi.org/10.1016/0024-4937(93)90004-V).
8. Matthew S. A. Horstwood, Jan Kosler, George Gehrels, Simon E. Jackson, Noah M. McLean, Chad Paton, Norman J. Pearson, Keith Sircombe, Paul Sylvester, Pieter Vermeesch, James F. Bowring, Daniel J. Condon and Blair Schoene Community-Derived Standards for LA-ICP-MS U-(Th)-Pb Geochronology – Uncertainty Propagation, Age Interpretation and Data Reporting // *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2016. V. 40, No. 3. P. 311–332. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2016.00379.x>.
9. Sasov A., Van Dyck D. Desktop X-ray Microscopy and Microtomography // *Journal of Microscopy*. 1998. V. 191, No. 2. P. 151–158. <https://doi.org/10.1046/J.1365-2818.1998.00367.X>.
10. Stifeeva M., Salnikova E., Adamskaya E., Millonig L. J., Ivanov A., Mottram C., Kovach V., Kotov A., Bryanskiy N., Karimov A., Gladkochub E., Peytcheva I., Gerdes A., Bowie S., Gritsenko J. Kovdor-GRT – A New Natural Reference Material for Garnet U-Pb Dating // *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2026. V. 50, No. 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.1111/ggr.70040>.