

УДК 551.72:549.02:550.4.08

## U–Pb (ID-TIMS)-ВОЗРАСТ ГРАНАТА ИЗ АЙЛЛИКИТОВ КОЛЬСКОЙ ЩЕЛОЧНОЙ ПРОВИНЦИИ

© 2023 г. М. В. Стифеева<sup>1,\*</sup>, Е. Б. Сальникова<sup>1</sup>, А. А. Носова<sup>2</sup>,  
член-корреспондент РАН А. Б. Котов<sup>1</sup>, А. А. Возняк<sup>2</sup>, Д. А. Димитрова<sup>3</sup>

Поступило 18.11.2022 г.  
После доработки 15.12.2022 г.  
Принято к публикации 15.12.2022 г.

Проведены U–Pb (ID-TIMS) геохронологические исследования граната из айллицитов Канда-лакшского роя даек (Кольская щелочная провинция). Полученная оценка U–Pb возраста граната ( $374 \pm 3$  млн лет) совпадает с интервалом (373–377 млн лет) главного этапа щелочного магматизма Кольской провинции (LIP). Это позволяет сделать вывод о синхронности формирования пород дайкового комплекса Кандалакшского залива и пород фойдолитовой серии щелочно-ультраосновных массивов этой провинции.

*Ключевые слова:* айллициты, Кольская щелочная провинция, Балтийский щит, гранат, U–Pb (ID-TIMS)-возраст

DOI: 10.31857/S2686739722602782, EDN: NZCYWJ

Кольская щелочная провинция, занимающая северо-восточную часть Фенноскандинавского щита, относится к числу крупнейших магматических провинций мира. В ее состав входят многофазные комплексы Хибин и Ловозера, массивы щелочно-ультраосновных пород с карбонатитами, дайки щелочных и карбонатных пород и, наконец, трубки взрыва кимберлитов [1].

За долгие годы изучения Кольской щелочной провинции накоплен большой массив геологических и геохронологических данных. Преимущественно исследования посвящены ультраосновным комплексам и щелочно-ультраосновным массивам провинции, тогда как данные о возрасте пород дайкового комплекса имеют фрагментарный характер. Это объясняется, во-первых, их геологической позицией – наряду с дайковыми телами, приуроченными к интрузивным

комплексам, также распространены обособленные рои даек, не имеющие секущих контактов с щелочно-ультраосновными массивами. Другой причиной, затрудняющей получение геохронологической информации, является специфический химический состав этих пород и отсутствие в них традиционных минералов-геохронометров. Имеющиеся данные об их возрасте (360–380 млн лет) получены преимущественно K–Ar и Ar–Ar методами по слюдам, плагиоклазу и амфиболу [2–5].

В данной статье обсуждаются результаты U–Pb (ID-TIMS) геохронологических исследований кальций-железистых гранатов из дайки айллицитов Кандалакшского роя (западная части Кандалакшского залива) (рис. 1). Для пород данного роя характерно преобладание даек ультрамафических лампрофиоров, тогда как в других роях преимущественно распространены породы щелочного (мончикиты) и щелочно-ультраосновного состава (нефелиниты, фонолиты) [6].

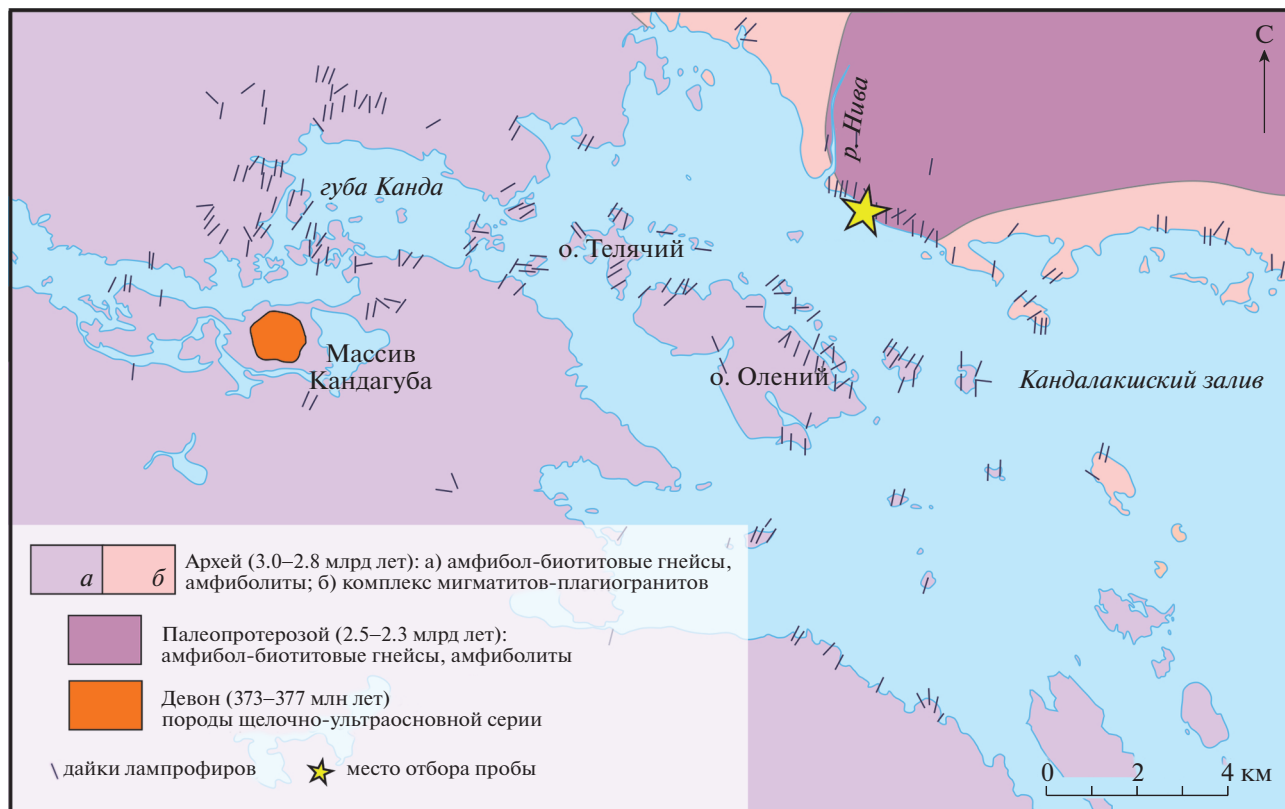
Особенности химического состава айллицитов Кандалакшского роя даек указывают на умеренную степень фракционирования расплава с общим трендом уменьшения содержания SiO<sub>2</sub> [6]. В то же время для остальных щелочно-ультраосновных пород Кольской провинции характерна высокая степень фракционирования с увеличением содержания SiO<sub>2</sub> и отделением карбонати-

<sup>1</sup> Институт геологии и геохронологии докембрия  
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

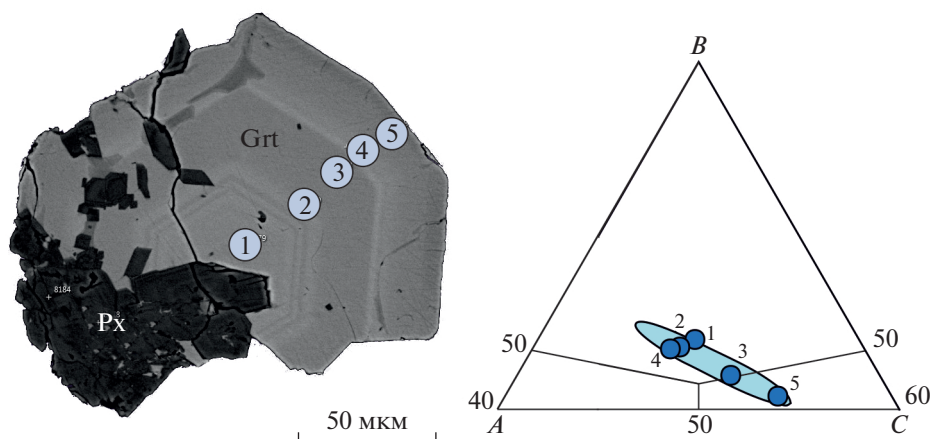
<sup>2</sup> Институт геологии рудных месторождений,  
петрографии, минералогии и геохимии  
Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup> Геологический институт Болгарской Академии Наук,  
София, Болгария

\*E-mail: stifeeva.maria@yandex.ru



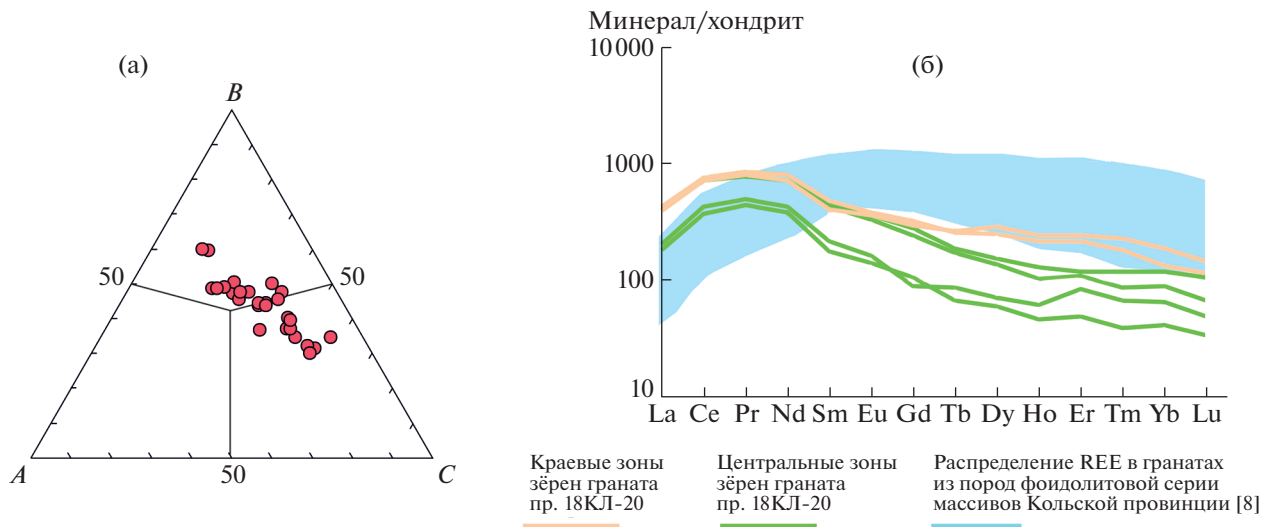
**Рис. 1.** Схематическая геологическая карта западной части Кандакшского залива, показаны выходы даек лампрофиров (по [1]) и место отбора пробы 18KL-20 для геохронологических исследований.



**Рис. 2.** Изображение граната (пр. 18KL-20) в обратно-отраженных электронах; Px – пироксен, Grt – гранат. На диаграмме представлен состав проанализированных участков зерна граната. *A* – шорломит ( $\text{Ca}_3\text{Ti}_2(\text{Fe}^{3+}\text{Si})_3\text{O}_{12}$ ), хатчеонит ( $\text{Ca}_3\text{Ti}_2(\text{Al}_2\text{Si})_3\text{O}_{12}$ ); *B* – моримотит ( $\text{Ca}_3(\text{TiFe}^{2+})_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ), Mg-моримотит ( $\text{Ca}_3(\text{TiMg})_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ); *C* – андрадит ( $\text{Ca}_3\text{Fe}_2^{3+}\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ).

товой составляющей [1]. Понимание того, является ли этап генерации примитивных расплавов, которые достигли поверхности, не испытав существенного фракционирования, предшествую-

щим, синхронным или последующим по отношению к становлению крупных массивов, позволит сделать важный шаг в реконструкции магматической эволюции Кольской щелочной провинции.



**Рис. 3.** а – состав граната из айлликита Кандалакшского роя даек (проба 18КЛ-20); А – шорломит ( $\text{Ca}_3\text{Ti}_2(\text{Fe}_2^{3+}\text{Si})_3\text{O}_{12}$ ), хатчеонит ( $\text{Ca}_3\text{Ti}_2(\text{Al}_2\text{Si})_3\text{O}_{12}$ ); В – моримотоит ( $\text{Ca}_3(\text{TiFe}^{2+})_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ), Mg-моримотоит ( $\text{Ca}_3(\text{TiMg})_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ); С – андрадит ( $\text{Ca}_3\text{Fe}_2^{3+}\text{Si}_3\text{O}_{12}$ ). б – график распределения редкоземельных элементов в гранате из айлликита Кандалакшского роя даек (проба 18КЛ-20) и гранатах из пород фойдолитовой серии массивов Кольской провинции (по данным в [8]). Нормализовано по [9].

Главные минералы айлликитов представлены оливином, клинопироксеном и флогопитом. Гранат является второстепенным минералом (7–10%), он образует идиоморфные и субидиоморфные кристаллы (не более 200 мкм) в основной массе (рис. 2) [7].

Состав граната соответствует ряду андрадит (5.83–61.0%)-моримотоит (20.0–48.0%)-шорломит (3.50–36.5%), присутствуют примеси Nb ( $\text{Nb}_2\text{O}_3$  до 3.5 вес. %) и Zr ( $\text{ZrO}_2$  до 1.12 вес. %) (рис. 3 а). Зерна граната имеют зональное строение – центральные участки зерен обогащены Ti и Zr, а краевые части отличаются более высоким содержанием Fe. Отмечается присутствие твердофазных включений, представленных пироксеном диопсид-геденбергит-эгиринового состава, перовскитом и флогопитом (рис. 2). Содержание REE в гранате изменяется в пределах 2128–5345 мкг/г. Отмечается зональное распределение элементов данной группы в пределах отдельных зерен (рис. 3 б). Характерно накопление MREE ( $[\text{La}/\text{Sm}]_N = 0.86\text{--}1.01$ ) с максимумом содержания на Pr и обеднение HREE ( $[\text{Gd}/\text{Yb}]_N = 1.66\text{--}3.30$ ) (рис. 3 б). Наблюдается положительная корреляция содержаний U, REE и Ti.

Гранат из айлликитов Кандалакшского роя даек характеризуется значительно более высоким уровнем содержания редкоземельных элементов и более высокой степенью их фракционирования по сравнению с гранатами из пород фойдолито-

вой серии щелочных массивов Кольской провинции [8] (рис. 3 б).

U–Pb (ID-TIMS) геохронологические исследования граната проведены в лаборатории изотопной геологии ИГГД РАН (Санкт-Петербург) по методике, описанной в [8]. Определения изотопного состава Pb и U выполнены на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI в статическом или динамическом (при помощи счетчика ионов) режимах. Точность определения U/Pb-отношений и содержаний U и Pb составила 0.5%. Холостое загрязнение не превышало 15 пг для Pb и 1 пг для U. Обработка экспериментальных данных осуществлялась в программах “PbDat” [10] и “ISOPLOT” [11]. При расчете возрастов использованы общепринятые значения констант распада U [12]. Поправки на обычный Pb введены в соответствии с модельными величинами [13]. Все ошибки приведены на уровне 2σ.

Для U–Pb (ID-TIMS) геохронологических исследований использованы две навески граната. Содержание урана в них достигает 44.89 мкг/г (табл. 1). Доля обыкновенного свинца невысокая ( $\text{Pb}_c/\text{Pb}_t = 0.19\text{--}0.45$ ). Как видно на рис. 4, для изученного граната получена конкордантная ( $374 \pm 3$  млн лет, СКВО = 0.0013) оценка возраста.

Результаты U–Pb (ID-TIMS) геохронологических исследований граната из айлликитов в пределах погрешности согласуются с K–Ar возрастом щелочных лампрофиров ( $360 \pm 16$  млн лет и  $368 \pm 15$  млн лет; [2]), U–Pb возрастом циркона из

**Таблица 1.** Результаты U–Pb (ID-TIMS)-геохронологических исследований граната из айллицитов Кандалакшского роя даек (проба 18КЛ-20)

| Номер п/п | Навеска, мг | Pb, мкг/г | U, мкг/г | Pbc/Pbt | Изотопные отношения               |                                     |                                     |                                  |                                  | Rho  | Возраст, млн. лет                |                                  |                                   |
|-----------|-------------|-----------|----------|---------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
|           |             |           |          |         | $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}^a$ | $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}^a$ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ |      | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ |
| 1         | 0.18        | 3.49      | 25.68    | 0.45    | 69.5                              | $0.0549 \pm 5$                      | $0.4005 \pm 1$                      | $0.4525 \pm 45$                  | $0.0598 \pm 1$                   | 0.37 | $379 \pm 4$                      | $374 \pm 1$                      | $408 \pm 23$                      |
| 2         | 0.33        | 3.89      | 44.89    | 0.19    | 226                               | $0.0539 \pm 1$                      | $0.3393 \pm 1$                      | $0.4459 \pm 13$                  | $0.0599 \pm 1$                   | 0.64 | $374 \pm 1$                      | $375 \pm 1$                      | $368 \pm 5$                       |

Примечание. <sup>a</sup> изотопные отношения, скорректированные на бланк и обычный Pb; Rho – коэффициент корреляции ошибок  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} - ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ . Величины ошибок (2σ) соответствуют последним значащим цифрам. Pbc – обычный Pb, Pbt – общий Pb.

даек карбонатитов ( $380 \pm 15$  млн лет; [14]) и Ar–Ar возрастом флогопита  $375 \pm 4 - 381 \pm 4$  млн лет [15] из даек Кандалакшского района.

Интервал проявления главного этапа щелочно-ультраосновного магматизма Кольской провинции, выделенный на основании результатов U–Pb геохронологических исследований гранатов из различных пород пяти щелочно-ультраосновных массивов провинции, составляет 373–377 млн лет [8, 16]. С этим этапом, согласно полученным данным, также связано образование пород дайкового комплекса Кандалакшского района. Таким образом, умеренно дифференцированные породы Кандалакшского роя даек образовались одновременно с высоко дифференцированными щелочно-ультраосновными массивами Кольской провинции. По-видимому, специфика химиче-

ского состава айллицитов связана с быстрым подъемом расплава в пределах Кандалакшско-Двинской рифтовой зоны, что препятствовало его фракционированию.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

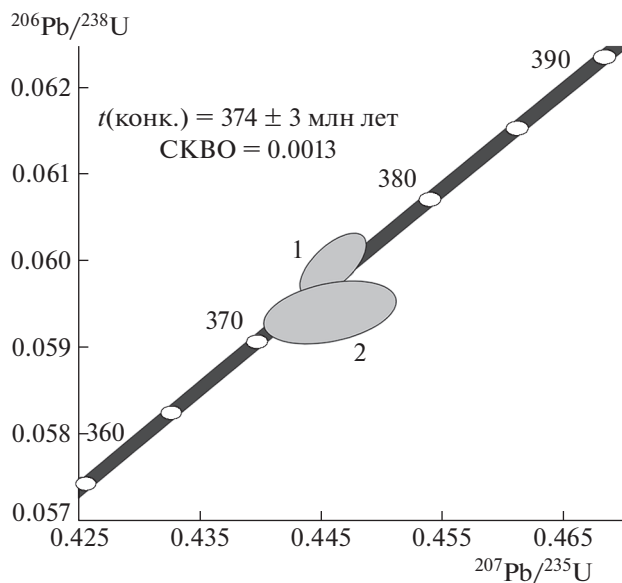
Авторы выражают благодарности А.В. Каргину и М.Г. Копыловой за участие в полевых работах.

#### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Геологические исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-17-00024), а геохронологические исследования при финансовой поддержке РФФИ (проект № 22-17-00211).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арзамасцев А.А., Арзамасцева Л.В. Геохимические индикаторы эволюции щелочно-ультраосновных серий палеозойских массивов Фенноскандинавского щита // Петрология. 2013. Т. 21. № 3. С. 277–308.
2. Beard A.D., Downes H., Hegner E., Sablukov S.M., Vertin V.R., Balogh K. Mineralogy and geochemistry of Devonian ultramafic minor intrusions of the southern Kola Peninsula, Russia: implications for the petrogenesis of kimberlites and melilitites // Contrib. Mineral. Petrol. 1998. V. 130. P. 288–303.
3. Рухлов А.С. Дайки и трубки взрыва Кандалакшского грабена (Кольская щелочная провинция): модели магматических процессов и эволюции субконтинентальной мантии / Автореф. канд. дис. СПб. 1999.
4. Арзамасцев А.А., Митрофанов Ф.П. Палеозойские плюм-литосферные процессы в Северо-Восточной Фенноскандии: оценка состава первичных мантийных расплавов и условий магмогенерации // Петрология. 2009. Т. 17. № 3. С. 324–336.
5. Веселовский Р.В., Арзамасцев А.А., Демина Л.И., Травин А.В., Боцюн С.Б. Палеомагнетизм, геохронология и магнитная минералогия даек Кольской девонской магматической провинции // Физика Земли. 2013. № 4. С. 82–104.



**Рис. 4.** Диаграмма с конкордией для граната из айлликота Кандалакшского роя даек (проба 18КЛ-20). Номера точек на диаграмме соответствуют порядковым номерам в табл. 1.

6. *Nosova A.A., Kopylova M.G., Sazonova L.V., Vozniak A.A., Kargin A.V., Lebedeva N.M., Volkova G.D., Peresetskaya E.V.*, Petrology of lamprophyre dykes in the Kola Alkaline Carbonatite Province (N Europe) // *Lithos*. 2021. V. 398–399. № 3. P. 106277.
7. *Vozniak A.A., Kopylova M.G., Nosova A.A., Sazonova L.V., Lebedeva N.M., Stifeeva M.V.* Compositional evolution of igneous garnets: Calcic garnets from alkaline rocks of the Kola Alkaline Carbonatite Province // *Mineral. and Petrol.* 2022. in press.
8. *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.
9. *Anders E., Grevesse N.* Abundances of the elements: meteoritic and solar // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1989. V. 53. P. 197–214.
10. *Ludwig K.R.* PbDat for MS-DOS, version 1.21 U.S. Geological Survey Open-File Report 88-542. 1991. 35 p.
11. *Ludwig K.R.* Isoplot 3.70. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel // Berkeley Geochronology Center Special Publications. 2003. V. 4. 70 p.
12. *Steiger R.H., Jäger E.*, Subcommittee on geochronology: 865 convention of the use of decay constants in geo- and cosmochronology // *Earth and Planetary Science Letters*. 1977. V. 36. P. 359–362.
13. *Stacey J.S., Kramers J.D.* Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // *Earth and Planetary Science Letters*. 1975. V. 26. P. 207–221.
14. *Баянова Т.Б.* Возраст реперных геологических комплексов Кольского региона и длительность процессов магматизма. М.: Наука. 2004. 172 с.
15. *Арзамасцев А.А., Федотов Ж.А., Арзамасцева Л.В.* Дайковый магматизм северо-восточной части Балтийского щита. СПб.: Наука. 2009. 383 с.
16. *Сальникова Е.Б., Стифеева М.В., Шахмурадян А.Р., Глебовицкий В.А., Редур Е.П.* U–Pb-систематика шорломита из кальцит-амфибол-пироксеновых пегматитов массива Африканда // *ДАН*. 2018. Т. 478. № 4. С. 443–446.

## U–PB (ID-TIMS) AGE OF GARNET FROM AILLIKITES OF KOLA ALKALINE PROVINCE

**M. V. Stifeeva<sup>a,#</sup>, E. B. Salnikova<sup>a</sup>, A. A. Nosova<sup>b</sup>,**

**Corresponding Member of the RAS A. B. Kotov<sup>a</sup>, A. A. Vozniak<sup>b</sup>, and D. A. Dimitrova<sup>c</sup>**

<sup>a</sup> *Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation*

<sup>b</sup> *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>c</sup> *Geological Institute, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria*

<sup>#</sup> *E-mail: stifeeva.maria@yandex.ru*

U–Pb (ID-TIMS) geochronological studies of garnet from aillikites of the Kandalaksha dyke swarm (Kola alkaline province) were carried out. The obtained estimate of the U–Pb age of the garnet ( $374 \pm 3$  MA) coincides with the interval (373–377 MA) of the main stage of alkaline magmatism of the Kola province (LIP). This allows us to conclude that the formation of rocks of the dike complex of the Kandalaksha Bay and rocks of the phoidolite series of alkaline-ultrabasic massifs of this province is synchronous.

**Keywords:** aillikites, Kola alkaline Province, Baltic Shield, garnet, U–Pb (ID-TIMS)