

УДК 551.71:552.311:550.93

ФРАГМЕНТЫ ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ КРУПНЫХ МАГМАТИЧЕСКИХ ПРОВИНЦИЙ В СЕВЕРНОЙ ФЕННОСКАНДИИ: U–Pb-ДАТИРОВАНИЕ БАДДЕЛЕИТА ИЗ МАФИЧЕСКИХ ДАЕК И СИЛЛОВ

© 2020 г. Е. Б. Сальникова^{1,*}, член-корреспондент РАН А. В. Самсонов², А. В. Степанова³, Р. В. Веселовский^{4,5}, С. В. Егорова³, А. А. Арзамасцев^{1,6}, К. Г. Ерофеева²

Поступило 07.02.2020 г.

После доработки 10.02.2020 г.

Принято к публикации 12.02.2020 г.

Представлены новые данные о возрасте даек долеритов северо-восточной части Кольской провинции Фенноскандинавского щита и прорывающих их силлов пикродолеритов. Результаты геохронологических U–Pb ID–TIMS-исследований бадделеита свидетельствуют о том, что долериты были образованы 2508 ± 6 – 2513 ± 16 млн лет назад синхронно с внедрением дифференцированных интрузивов Мончегорской группы. Сопоставление состава изученных долеритов с одновозрастными дайками на других архейских кратонах мира показывает их существенное сходство и позволяет предполагать формирование в составе единой крупной магматической провинции. Возраст бадделеита из силлов пикродолеритов составляет 2403 ± 12 млн лет и указывает на проявление ранее не установленного в этой части Фенноскандинавского щита этапа базитового магматизма. Не исключено, что наряду с долеритовыми дайками с возрастом 2405 млн лет и коматиитами Ветреного пояса Карельского кратона, силлы Кольской провинции являются компонентом единого крупного магматического события.

Ключевые слова: Фенноскандия, мафические дайки, бадделеит, U–Pb-датирование

DOI: 10.31857/S2686739720040143

Рои раннедокембрийских мафических даек служат важным источником информации при реконструкциях геометрии питающих систем древних крупных магматических провинций, а также маркерами для палеоконтинентальных корреляций в ранней истории Земли [1]. Необходимое условие разработки этих фундаментальных проблем – надежное определение возраста мафических даек, что является нетривиальной задачей. Даже слабые метаморфические преобразования

ограничивают возможность применения K–Ar-, Rb–Sr- и Sm–Nd-методов изотопного датирования по пороодообразующим минералам [2]. Благодаря контаминации базитовых расплавов коровым материалом, циркон, присутствующий в мафических дайках, часто представляет собой ксеногенную фазу и не может служить надежным геохронометром. Главной циркониевой фазой при кристаллизации базальтового расплава в дайках и силлах является бадделеит [3], что определяет выбор этого минерала для геохронологических U–Pb-исследований.

Работы последних десятилетий, основанные на результатах геохронологических U–Pb (ID–TIMS)-исследований единичных зерен бадделеита, выделенных при помощи “водной” методики [4] из мелкозернистых базитов, обеспечили новый уровень знаний о процессах раннедокембрийского внутриплитного базитового магматизма во многих архейских кратонах, таких как СьюперIOR, Каапвааль, Карельский, которые служат основой для реконструкций архейских континентов. В то же время, в Кольской провинции Фенноскандинавского щита, являющейся областью широкого проявления палеопротерозойского дайкового магматизма, до недавнего времени бы-

¹ Институт геологии и геохронологии докембрия Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

² Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

³ Институт геологии Карельского научного центра Российской академии наук, Петрозаводск, Россия

⁴ МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, Россия

⁵ Институт Физики Земли им. О.Ю. Шмидта, Российской академии наук, Москва, Россия

⁶ Институт наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: katesalnikova@yandex.ru

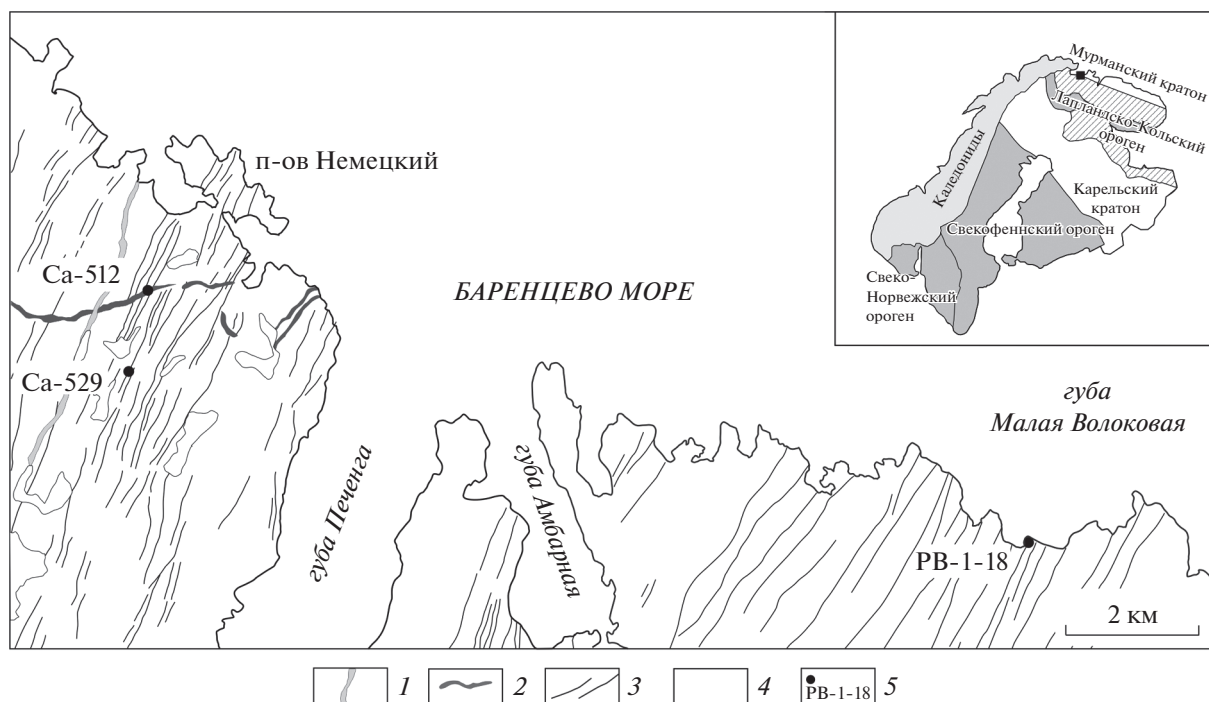


Рис. 1. Схема распределения мафических даек в районе губы Печенга. Составлена с использованием данных Терехов и др. (2019), с упрощениями. На врезке — схема тектонического районирования Фенноскандинавского щита и положение объекта исследований. Условные обозначения: 1 — дайка базитов, девон; 2 — силлы пикродолеритов; 3 — дайки долеритов; 4 — вмещающие архейские комплексы; 5 — точки отбора геохронологических проб.

ли надежно датированы лишь несколько объектов [5]. Корреляции с другими докембрийскими областями мира, в том числе с Карельским кратоном, проводились на основании сходства состава и последовательности формирования базитов, и, в редких случаях, сопровождались изотопно-геохронологическими Sm–Nd-данными [5]. В настоящей статье представлены результаты геохронологических U–Pb (ID–TIMS)-исследований бадделита из даек и силлов базитов Кольской провинции.

Район пос. Лиинахамари, расположенный в западной части Кольского полуострова (рис. 1), является одним из наиболее изученных в северо-восточной части Фенноскандинавского щита [6–8]. Здесь архейские гранитоиды и гранат-биотитовые гнейсы прорываются дайками и силлами базитов. Рой даек простирания СВ 35° (рис. 1) объединяет дайки (ортопироксен)–клинопироксен–плагиоклазовых-долеритов, характерной особенностью которых является наличие кварц-полевошпатовых гранофиров. Большая часть даек сохранила первичную минералогию, несколько тел преобразованы в условиях зеленосланцевой фации метаморфизма. Полученные ранее данные [6, 8] и результаты наших исследований демонстрируют сходство составов даек в западной (район пос. Лиинахамари–п-ов Немецкий наволок) и восточной (губа Амбарная–губа Воло-

ковая) частях роя. Для них характерны низкие содержания MgO (4.5–7.6 мас. %), Cr (<90 ppm), Ni (<165 ppm), высокие концентрации SiO₂ (до 55.7 мас. %).

К югу от п-ва Немецкий наволок дайки долеритов прорываются силлом пикродолеритов мощностью 20 м. Он дифференцирован от высоко-Mg оливиновых габброноритов (MgO до 25 мас. %, Cr до 3100 ppm, Ni до 1150 ppm) в подошве до умеренно-Mg долеритов (MgO < 7 мас. %, Cr < 40 ppm, Ni < 110 ppm) в кровле и является аналогом силлов пикродолеритов провинции Сор-Варангер, Норвегия [9]. На основании изотопных Sm–Nd-данных (2218 ± 230 млн лет) ранее предполагалось, что кристаллизация пикродолеритов происходила около 2.2 млрд лет назад, а сами силлы являются аналогами силлов карьялитов с возрастом 2.2 млрд лет на Карельском кратоне [5].

Нами был датирован бадделит, выделенный при помощи “водной” методики из трех тел в районе Лиинахамари: (1) дайки долеритов губы Малая Волоковая, (обр. PB-1-18), (2) дайки гранофировых долеритов в 3 км к югу от п-ва Немецкий наволок (обр. Ca-529-1) и (3) силла пикродолеритов (обр. Ca-512-17/9) вблизи секущего контакта с дайкой гранофировых долеритов. U–Pb-геохронологические исследования выполнены в

Таблица 1. Результаты U–Pb-изотопных исследований бадделеита

№ п/п	Размерная фракция (мкм) и характеристика (цвет и габитус)	U/Pb*	Pbc/Pbt	Изотопные отношения					R _{ho}	Возраст, млн лет		
				²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ^a	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb ^a	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb
Проба РВ-1-18												
1	<30, 20 зер., св.-кор., пр.	2.1	0.008	1008	0.1637 ± 2	0.0046 ± 2	10.3960 ± 312	0.4606 ± 12	0.93	2471 ± 6	2442 ± 6	2494 ± 2
2	<45, 12 зер., св.-кор., иг.	2.1	0.031	543	0.1642 ± 3	0.0096 ± 1	10.4833 ± 345	0.4631 ± 13	0.87	2478 ± 6	2453 ± 6	2499 ± 3
3	<45, 10 зер., кор., пр.	2.0	0.047	392	0.1647 ± 3	0.0132 ± 1	10.6795 ± 321	0.4702 ± 12	0.77	2496 ± 6	2484 ± 6	2505 ± 3
Проба Са-529-1												
4	<45, 22 зер., св.-кор., иг.	2.2	0.002	2065	0.1634 ± 2	0.0361 ± 1	10.1799 ± 305	0.4518 ± 13	0.88	2451 ± 6	2403 ± 6	2492 ± 2
5	<45, 12 зер., кор., иг., пласт.	2.0	0.001	2412	0.1645 ± 1	0.0303 ± 1	10.6346 ± 210	0.4688 ± 10	0.87	2492 ± 4	2478 ± 4	2503 ± 1
6	<35, 25 зер., св.-кор., иг.	1.9	0.08	387	0.1649 ± 3	0.0352 ± 1	10.7045 ± 321	0.4708 ± 11	0.76	2498 ± 6	2487 ± 6	2507 ± 3
Проба Са-512-17/9												
7	<45, 19 зер., кор., иг.	2.2	0.012	555	0.1535 ± 1	0.0815 ± 1	9.1366 ± 183	0.4317 ± 8	0.90	2352 ± 4	2313 ± 4	2385 ± 2
8	<45, 8 зер., кор., пласт.	2.2	0.001	626	0.1531 ± 2	0.0876 ± 2	9.1492 ± 301	0.4333 ± 13	0.83	2353 ± 8	2321 ± 7	2381 ± 3
9	<45, 6 зер., кор., призм.	2.2	0.006	314	0.1542 ± 2	0.0751 ± 2	9.3588 ± 370	0.4402 ± 15	0.88	2374 ± 9	2353 ± 6	2393 ± 3
10	<45, 7 зер., кор., иг., призм.	1.5	0.450	70	0.1550 ± 12	0.1128 ± 3	9.6689 ± 998	0.4523 ± 42	0.78	2404 ± 28	2406 ± 23	2402 ± 14

Примечание. * – навеска бадделеита не определялась; Pbc – обычный свинец; Pbt – общий свинец; ^a – измеренные изотопные отношения; ^b – изотопные отношения, скорректированные на бланк и обычный свинец; Rho – коэффициент корреляции ошибок отношений ²⁰⁷Pb/²³⁵U–²⁰⁶Pb/²³⁸U. Величины ошибок (2σ) соответствуют последним значащим цифрам. кор., призм., иг., пласт. – морфологические особенности изученных кристаллов бадделеита.

Института геологии и геохронологии докембрия РАН по методике, приведенной в [14].

Из пробы долеритов РВ-1-18 весом около 2 кг, отобранной из наиболее зернистых пород в центральной части дайки в районе губы Малая Волоковая (69°, 66661°с.ш., 31°, 66635°в.д.), выделено более 150 зерен бадделеита размером <45 мкм. Бадделеит представлен прозрачными, редко полупрозрачными псевдопризматическими, игольчатыми и пластинчатыми кристаллами преимущественно светло-коричневого цвета с однородным внутренним строением. U–Pb-изотопные исследования были выполнены для трех микронавесок (10–20 кристаллов) бадделеита размером <30 и <45 мкм (№ 1–3, табл. 1). Изученный бадделеит характеризуется незначительной возрастной дискордантностью (0.8–2.0%), а точки его

изотопного состава аппроксимируются дискордией (рис. 2а), верхнее пересечение которой с конкордией соответствует возрасту 2513 ± 16 (СКВО = 0.48), нижнее пересечение составляет 1011 ± 570 млн лет.

Следует отметить, что ранее для двух единичных зерен циркона, выделенных из той же дайки кварцевых долеритов в районе губы Малая Волоковая, было получено значение U–Pb-возраста 2304 ± 1 млн лет [8]. Одно из проанализированных зерен циркона характеризуется конкордантным возрастом, а возрастная дискордантность второго зерна составляет 2%. Погрешность определения изотопных отношений при этом достаточно велика (>1%) и существенно превышает стандартную погрешность метода ID–TIMS, принятую в том числе и в лаборатории геохроно-

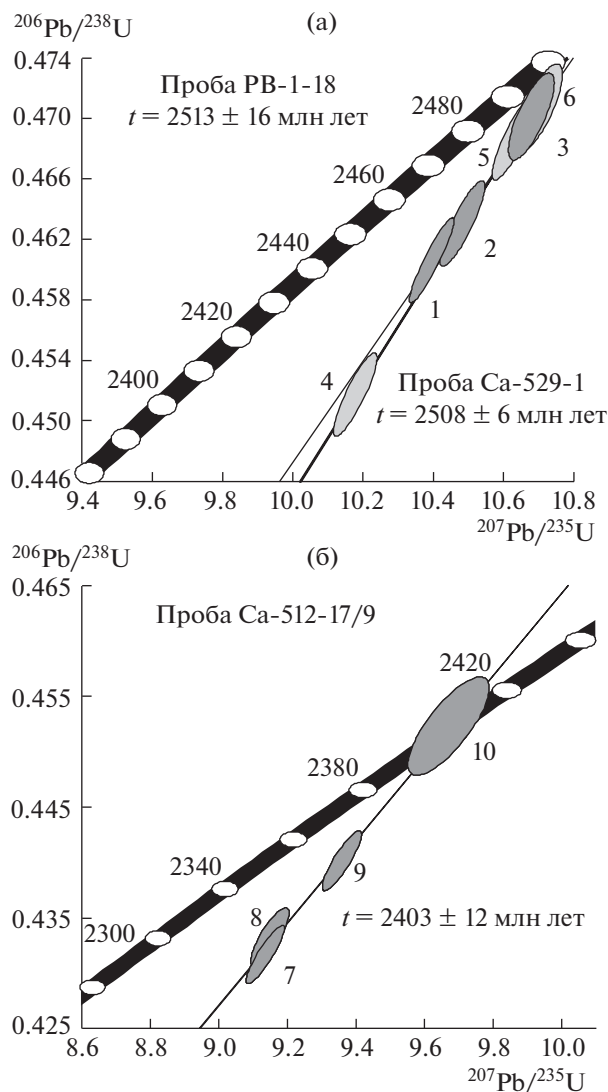


Рис. 2. Диаграмма с конкордией для бадделеита: (а) кварцевые долериты RB-1-18 и кварцевые долериты Ca-529-1, (б) силл Ca-512-17/9.

логии и изотопной геохимии ГИ КНЦ РАН [10]. Кроме того, приведенные авторами в таблице погрешности рассчитанных возрастов явно не согласуются с ошибками определения изотопных отношений и очевидно ошибочно занижены, что выразилось в переоценке точности полученного возрастного значения.

Из пробы долеритов Ca-529-1 (69°, 67945°с.ш., 31°, 37707°в.д.) весом около 1.5 кг, было выделено более 200 зерен бадделеита, размер которых не превышает 45 мкм. Среди них преобладают прозрачные иголчатые кристаллы коричневого цвета с однородным строением. В подчиненном количестве присутствуют прозрачные и полупрозрачные таблитчатые кристаллы коричневого и светло-коричневого цвета. Для U–Pb-геохроно-

логических исследований использованы три микронавески (12–25 зерен) бадделеита (№ 4–6, табл. 1). Точки изотопного состава образуют дискордию, верхнее пересечение которой с конкордией отвечает возрасту 2508 ± 6 млн лет (нижнее пересечение 681 ± 270 млн лет, СКВО = 0.44) (рис. 2а). При этом дискордантность изученного бадделеита составляет 0.9–3.5% (табл. 1).

Из центральной части силла пикродолеритов была отобрана проба Ca-512-17/9 (69°, 69367°с.ш., 31°, 38102°в.д.) средnezернистых оливинсодержащих габбро-долеритов, из которой было выделено более 150 зерен бадделеита. Кристаллы бадделеита имеют коричневый цвет, прозрачны, характеризуются иголчатым, пластинчатым, реже псевдопризматическим обликом однородным строением, их размер не превышает 45 мкм. U–Pb-геохронологические исследования выполнены для четырех микронавесок (6–19 наиболее чистых зерен) бадделеита. Точки изотопного состава бадделеита образуют дискордию, верхнее пересечение которой с конкордией соответствует возрасту 2403 ± 12 млн лет (СКВО = 1.1, нижнее пересечение 857 ± 370 млн лет) (рис. 2б).

Результаты проведенных геохронологических исследований указывают на принадлежность роя даек долеритов в районе пос. Лиинахамари к палеопротерозойской крупной магматической провинции с возрастом 2505 млн лет в северо-восточной части Фенноскандинавского щита, т.е. их образование происходило синхронно с внедрением дифференцированных интрузивов Мончегорской группы [11]. Образование силлов пикродолеритов с возрастом 2403 ± 12 млн лет, прорывающих дайки долеритов, происходило синхронно с дайками и силлами пикродолеритов с возрастом 2405 млн лет в провинциях Western Troms [12] и Sor-Waranger [13] на территории Норвегии, дайками долеритов 2405 млн лет [14] и коматиитами Ветреного пояса [15] на Карельском кратоне Фенноскандинавского щита. По всей вероятности, они являются компонентом единой крупной магматической провинции, проявления которой установлены в пределах кратонов северного полушария, а также на кратонах Зимбабве и Йилгарн [14].

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены за счет средств Российского научного фонда, проект № 16–17–10260-П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ernst R.E., Bleeker W., Söderlund U., Kerr A.C. // Lithos. 2013. V. 174. P. 1–14.
2. Dikin A. Radiogenic isotope geology. Cambridge University Press, 2005. 492 p.

3. *Heaman L.M., Lecheminant A.N.* // Chem. Geol. Geol. 1993. V. 110. P. 95–126.
4. *Söderlund U., Johansson L.* // Geochemistry, Geophys. Geosystems. 2002. V. 3. № 2. P. 1–7.
5. *Федотов Ж.А., Баянова Т.Б., Серов П.А.* // Геотектоника. 2012. № 6. С. 29–45.
6. *Арзамасцев А.А., Федотов Ж.А., Арзамасцева Л.В.* Дайковый магматизм северо-восточной части Балтийского щита. СПб.: Наука, 2009. 383 с.
7. *Морозов Ю.А., Галыбин А.Н., Мухамедиев Ш.А., Смольская А.И.* // Геотектоника. 2017. № 3. С. 28–60.
8. *Терехов Е.Н., Морозов Ю.А., Смолькин В.Ф., Баянова Т.Б., Серов П.А., Щербакова Т.Ф., Смольская А.И.* // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22. № 1. С. 48–63.
9. *Ерофеева К.Г., Степанова А.В., Самсонов А.В., Ларионова Ю.О., Егорова С.В., Арзамасцев А.А., Ковальчук Е.В.* // Петрология. 2019. Т. 27. № 1. С. 19–46.
10. *Saikia, A., Gogoi B., Kaulina T., Lialina L., Bayanova T., Ahmad M.* // Geological Society, London, Special Publications. 2017. V. 457. P. 233–252.
11. *Amelin Yu.V., Heaman L.M., Semenov V.S.* // Precambrian Research. 1995. V. 75. №1–2. P. 31–46.
12. *Kullerud K., Skjerlie K.-P., Corfu F., de la Rosa J.* // Precambrian Res. 2006. V. 150. № 3–4. P. 183–200.
13. *Stepanova A.V., Samsonov A.V., Salnikova E.B., Arzamastsev A. A., Egorova S. V., Larionova Yu.O., Larionov A.N., Erofeeva K.G., Stifeeva M.V.* // Proc. 33rd Nordic Geological Winter Meet. Lyngby, Denmark, 2018. P. 56.
14. *Степанова А.В., Сальникова Е.Б., Самсонов А.В., Ларионова Ю.О., Егорова С.В., Саватенков В.М.* // ДАН. 2017. Т. 472. № 2. С. 185–191.
15. *Puchtel I.S., Touboul M., Blichert-Toft J., Walker R.J., Brandon A.D., Nicklas R.W., Kulikov V.S., Samsonov A.V.* // Geochemica Cosmochim. Acta. 2016. V. 180. P. 227–255.

FRAGMENTS OF THE PALEOPROTEROZOIC LARGE IGNEOUS PROVINCES IN THE NORTHERN FENNOSCANDIA: BADDELEYITE U-Pb AGE DATA FOR MAFIC DYKES AND SILLS

**E. B. Salnikova^{a, #}, Coresponding Member of the RAS A. V. Samsonov^b, A. V. Stepanova^c, R. V. Veselovskiy^{d, e},
S. V. Egorova^c, A. A. Arzamastsev^{a, e}, and K. G. Erofeeva^b**

^a *Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation*

^b *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^c *Institute of Geology, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russian Federation*

^d *Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

^e *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^f *Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russian Federation*

[#] *E-mail: katesalnikova@yandex.ru*

Paper presents new data on the age of dolerite dikes in the northeastern part of the Kola province of the Fennoscandinavian shield and picrodolerite sills which cut the dikes. The results of U-Pb ID-TIMS baddeleyite studies indicate that dolerites were formed 2508 ± 6 – 2513 ± 16 Ma ago, simultaneously with the intrusives of the Monchegorsk group. A comparison of the composition of the studied dolerites with dykes of the same age on other Archean cratons shows their significant similarity and suggests their formation at the same large magmatic province. The age of baddeleyite from the picrodolerites sills at 2403 ± 12 Ma ago indicates the event of basic magmatism that was not previously established in this part of the Fennoscandinavian shield. It is possible that along with dolerite dykes with an age of 2405 Ma and komatiites of the Vetreny belt of the Karelian craton, sills of the Kola province are a component of a unified large magmatic event.

Keywords: Fennoscandia, mafic dykes, baddeleyite, U-Pb dating