———— ПЕТРОЛОГИЯ ———

УДК 551.71:552.311:550.93

# ИНТРУЗИВНЫЕ БАЗИТЫ КРУПНОЙ МАГМАТИЧЕСКОЙ ПРОВИНЦИИ 2400 МЛН ЛЕТ В БЕЛОМОРСКОМ ПОДВИЖНОМ ПОЯСЕ: ПЕРВЫЕ U-Pb ID-TIMS ДАННЫЕ ПО БАДДЕЛЕИТУ

© 2020 г. А. В. Степанова<sup>1,\*</sup>, Е. Б. Сальникова<sup>2</sup>, член-корреспондент РАН А. В. Самсонов<sup>3</sup>, С. В. Егорова<sup>1</sup>, В. С. Степанов<sup>1</sup>

> Поступило 05.05.2020 г. После доработки 12.05.2020 г. Принято к публикации 14.05.2020 г.

Впервые проведено U–Pb ID–TIMS-датирование магматического бадделеита из метаморфизованных коронитовых габброноритов в центральной части Беломорского подвижного пояса на Фенноскандинавском щите. Полученный возраст 2404 ± 11 млн лет надежно определяет принадлежность датированных габброноритов к крупной магматической провинции с возрастом 2400 млн лет и расширяет ее ареал на Фенноскандинавском щите. Кроме того, полученные данные подтверждают гипотезу кратковременности процессов формирования крупных магматических провинций в палеопротерозое.

*Ключевые слова:* бадделеит, U–Pb ID–TIMS, Фенноскандинавский щит, палеопротерозой, коронитовые габброиды

DOI: 10.31857/S2686739720080216

Точное определение возраста базитов является ключевой проблемой при оценке длительности формирования раннедокембрийских крупных магматических провинций. Согласно модели У. Бликера и Р. Эрнста продолжительность формирования крупных магматических провинций (КМП) в раннем докембрии также, как и в фанерозое, составляла первые миллионы лет [1]. Альтернативная гипотеза предполагает длительную (до 200 млн лет и более) историю формирования раннедокембрийских КМП [2–4].

Одним из регионов, для которых обсуждается значительная длительность раннедокембрийского плюмового магматизма, является восточная часть Фенноскандинавского щита. Это область широкого распространения базитов раннего палеопротерозоя — расслоенных интрузий, роев мафических даек и вулканитов, которые объединены исследователями в Балтийскую [4] или Восточно-Скандинавскую [3] крупную магматическую провинцию с возрастом 2.50–2.35 млрд лет. Формирование этой КМП большинство исследователей связывают с подъемом крупного и долгоживущего мантийного плюма [3–5]. Вместе с тем, полученные в последние годы геохронологические данные (бадделеит, U–Pb, ID–TIMS) о возрасте кристаллизации роев мафических даек и силлов в Карельском и Мурманском кратонах и в Кольской провинции Фенноскандинавского щита показывают, что они образовались в ходе дискретных эпизодов, датируемых возрастами 2.51, 2.45 и 2.40 млрд лет [6–8].

Для Беломорского подвижного пояса, крупной структуры, расположенной между Карельским кратоном и Кольской провинцией (рис. 1), такие данные до настоящего времени отсутствовали. В первую очередь это связано со сложностью точного определения возраста базитов, большая часть которых подверглась метаморфическим преобразованиям. В палеопротерозое Беломорский подвижный пояс (БПП) являлся частью Лапландско-Кольского коллизионного орогена [9], что обусловило интенсивную переработку базитов в ходе метаморфизма, условия которого достигали высокобарической амфиболитовой и гранулитовой фации. Имеющиеся данные о возрасте базитов БПП основаны на результатах U-Pb датирования цирконов классическим [10] и SIMS [11] методами, что обусловило большие ошибки отдельных определений возраста (до 20-30 млн лет)

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Институт геологии Карельского научного центра Российской академии наук, Петрозаводск, Россия

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Институт геологии и геохронологии докембрия

Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>\*</sup>*E-mail: stepanov@krc.karelia.ru* 



**Рис. 1.** Геологическое положение и петрографические особенности оливиновых габброноритов (а) – схема геологического строения района оз. Северное Каменное (на основе государственной геологической карты 1 : 200 000). Условные обозначения: *1* – палеопротерозойские интрузивные базиты, *2* – амфиболиты, в том числе, гранатовые, *3* – микроклиновые граниты, *4* – тоналитовые гнейсы, в том числе, интенсивно мигматизированные, *5* – элементы залегания, *6* – точки опробования. На врезке – схема тектонического районирования Фенноскандинавского щита. ЛКО – Лапландско-Кольский ороген, БПП – Беломорский подвижный пояс. (б–в) – микрофотографии шлифов. Условные обозначения: Ol – оливин, Орх – ортопироксен, Срх – клинопироксен, Атр – амфибол, Pl – плагиоклаз, Fsp – калиевый полевой шпат, Zr – циркон, Bd – бадделеит. (б) – фотография шлифа среднезернистого оливинового габбронорита (обр. Са-738-3, николи скрещены). Плагиоклаз сохранил первичную магматическую зональность, оливин окружен Орх-Срх-Атр реакционной каймой; (в) бадделеит с цирконовой оторочкой в оливиновом габбронорите (обр. Са-738-1).

и не позволяло разделять дискретные события с интервалом в 50 млн лет. Именно поэтому находка бадделеита в интрузивных базитах БПП и его U–Pb (ID–TIMS) датирование позволяют по-новому подойти к проблеме возраста и продолжительности формирования базитов в БПП.

Изученный объект расположен в центральной части БПП в пределах Гридинско-Амбарнинского домена [12], который характеризуется наименьшим проявлением поздних деформаций и синхронного с ними метаморфизма амфиболитовой фации. В районе оз. Северное Каменное в центральной части Гридинско-Амбарнинского домена оливиновые габбронориты образуют тела неправильной формы, которые в большинстве случаев имеют субсогласные с гнейсовидностью вмещающих тоналитовых гнейсов контакты, вдоль которых базиты интенсивно амфиболизированы. Вместе с тем, базиты сохраняют фрагменты первичных магматических контактов с вмещающими породами. В таких случаях в приконтактовой части тел хорошо выражена зона закалки, сложенная тонкозернистыми массивными породами порфировидной структуры. Вкрапленники в породах зоны закалки представлены оливином (Fo<sub>75</sub>), основная масса сложена оливином (Fo<sub>60</sub>), плагиоклазом (An<sub>35</sub>), ортопироксеном (XMg = 67) и клинопироксеном (XMg = 77). Центральные части тел сложены среднезернистыми массивными оливиновыми габброноритами (рис. 16). Породы сохранили реликты первичных магматических минералов, которые представлены оливином (Fo<sub>62</sub>), плагиоклазом (An<sub>35-46</sub>), часто с осциляторной зональностью (рис. 1б), авгитом (XMg = 80-89), ортопироксеном (XMg = 65), флогопитом, алюмохромитом и ильменитом. В интерстициях крупных зерен плагиоклаза кристаллизовались кварц, калиевый полевой шпат, биотит. Акцессорные минералы представлены апатитом, цирконом, бадделеитом (рис. 1в). Ме-

### СТЕПАНОВА и др.

№ п/п	Размерная фракция (мкм) и характеристика бадделеита	U/Pb*	Pbc/Pbt	Изотопные отношения						Возраст, млн лет		
				$^{206}Pb/^{204}Pb^{a}$	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb <sup>6</sup>	<sup>208</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb <sup>6</sup>	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	Rho	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb
1	40—50, 3з., корич., призм.	2.2	0.02	227	$0.1535 \pm 2$	$0.0093 \pm 2$	9.3447 ± 366	0.4416±19	0.86	2372 ± 11	2358 ± 10	$2385 \pm 5$
2	40—50, 1 зер., корич., призм.	2.2	0.02	872	$0.1534\pm2$	$0.0054 \pm 1$	9.3344±467	$0.4414 \pm 8$	0.84	$2371\pm4$	$2357\pm4$	$2384\pm2$
3	40—50, 1 зер. темно-кор, призм.	1.2	0.42	88	$0.1560 \pm 10$	$0.0011 \pm 2$	$9.7722 \pm 880$	$0.4555 \pm 32$	0.75	2414 ± 24	2420 ± 17	2409 ± 10

Таблица 1. Результаты U-Pb изотопных исследований бадделеита (проба Ca-738-1)

Примечания: \* – навеска бадделеита не определялась; Рbс – обычный свинец; Pbt – общий свинец; <sup>a</sup> – измеренные изотопные отношения; <sup>б</sup> – изотопные отношения, скорректированные на бланк и обычный свинец; Rho – коэффициент корреляции ошибок отношений <sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U – <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U;. 3з., корич., призм – характеристика изученных зерен бадделеита. Величины ошибок (2σ) соответствуют последним значащим цифрам.

таморфические преобразования в габброноритах выражены в формировании реакционных коронарных структур на границе темноцветных минералов и плагиоклаза. Вокруг оливина формируются многослойные (друзитовые) каймы (рис. 1б), сложенные ортопироксеном, диопсидом, паргаситом, гранатом.

По петрографическим характеристикам изученные габбронориты являются типичными для БПП палеопротерозойскими базитами, описанными в составе комплекса лерцолитов-габброноритов [13]. Породы характеризуются высокими содержаниями MgO (до 14 мас. %). Для них характерны также обогащение LREE и обеднение HREE ( $[La/Sm]_n = 2.0-2.5, [Gd/Yb]_n = = 2.3-2.6$ ).

Баллелеит в габброноритах локализован в квари-полевошпатовых интерстициях крупных зерен плагиоклаза и пироксенов. Для большей части изученных в шлифах зерен бадделеита характерно обрастание каймой, представляющей собой агрегат мелких зерен циркона (рис. 1в). Выделение бадделеита из пробы среднезернистых коронитовых габброноритов проводилось с применением водной методики [14] в лаборатории анализа минерального вещества Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН. Бадделеит формирует таблитчатые и удлиненные псевдо-призматические кристаллы размером до 80 мкм. В выборке присутствуют три типа зерен: бадделеит в цирконовой оболочке (85%), циркон, псевдоморфно заместивший бадделеит (5%), бадделеит хорошей сохранности (10% объема выборки).

U-Рb геохронологические исследования бадделеита выполнены в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН по методике, приведенной в [6]. Для геохронологических исследований были использованы наиболее сохранные единичные прозрачные темно-коричневые зерна бадделеита размером 30-80 мкм, сохранившие блеск и штриховку на гранях. Изученный бадделеит (№ 1-3, табл. 1) характеризуется незначительной возрастной дискордантностью (0.5–1%). Точки изотопного состава двух единичных зерен и микронавески из трех зерен бадделеита аппроксимируются дискордией (рис. 2), верхнее пересечение которой с конкордией соответствует возрасту  $2404 \pm 11$  млн лет (СКВО = 0.03, нижнее пересечение =  $1375 \pm 370$  млн лет). Оценка возраста бадделеита из оливиновых габброноритов района оз. Северное Каменное  $2404 \pm 11$  млн лет соответствуют возрасту магматической кристаллизации пород. Следует отметить, что подобные находки единичных зерен магматического бадделеита хорошей сохранности в интенсивно метаморфизованных базитах, являются уникальными не только для БПП, но и для других раннедокембрийских подвижных поясов.

Полученные данные позволяют выделить в БПП надежно геохронологически обоснованный эпизод формирования базитов – 2404 млн лет. Этот результат наряду с данными по габброноритам в северной части БПП [11], на Карельском кратоне [7, 15] и в Кольской провинции [5, 8] предполагают, что площадь распространения базитов с возрастом 2400 млн лет на Фенноскандинавском щите составляла около 0.2 млн км<sup>2</sup>.

Высокомагнезиальный характер расплавов, вплоть до коматиитов [15], указывает на плюмовую природу этой провинции, а имеющиеся гео-



Рис. 2. Диаграмма с конкордией для бадделеита из коронитовых габброноритов, обр. Са-738-1.

хронологические данные свидетельствуют о краткой (первые млн лет) продолжительности события. Это поддерживает гипотезу дискретности плюмовых эндогенных событий в раннем палеопротерозое на Фенноскандинавском щите и свидетельствует о значительно большем, чем предполагалось ранее, сходстве плюмовых мантийных событий в раннем докембрии и фанерозое.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны рецензентам, чьи конструктивные замечания позволили существенно улучшить рукопись.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках реализации государственного задания Института геологии Карельского научного центра РАН (АААА–А18–118020290085–4).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Bleeker W., Ernst R.R.E.* // Dyke Swarms Time Markers of Crustal Evolution. 2006. P. 3–26.
- Halls H.C., Davis D.W., Stott G.M., Ernst R., Hamilton M.A. // Precambrian Res. 2008. V. 162. № 3–4. P. 327–353.
- Митрофанов Ф.П., Баянова Т.Б., Корчагин А.У., Грошев Н.Ю., Малич К.Н., Жиров Д.В., Митрофанов А.Ф. // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55. № 5. С. 357–373.
- Шарков Е.В., Евсеева К.А., Красивская И.С., Чистяков А.В. // Геология и геофизика. 2005. Т. 46. № 9. С. 968–980.

- 5. *Kullerud K., Skjerlie K.P., Corfu F., de la Rosa J.D. //* Precambrian Res. 2006. V. 150. № 3–4. P. 183–200.
- Stepanova A.V., Salnikova E.B., Samsonov A.V., Egorova S.V., Larionova Y.O., Stepanov V.S. // Precambrian Res. 2015. V. 259. P. 43–57.
- 7. 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.
- Сальникова Е.Б., Самсонов А.В., Степанова А.В., Веселовский Р.В., Егорова С.В., Арзамасцев А.А., Ерофеева К.Г. // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 491. № 2. С. 46–50.
- 9. Daly J.S., Balagansky V.V, Timmerman M.J., Whitehouse M.J. // Geol. Soc. London, Mem. 2006. T. 32. № 1. C. 579–598.
- Bogdanova S.V., Bibikova E.V. // Precambrian Res. 1993. V. 64. P. 131–152.
- Криволуцкая Н.А., Беляцкий Б.В., Смолькин В.Ф., Мамонтов В.П., Фаныгин А.С., Свирская Н.М. // Геохимия. 2010. № 11. С. 1132–1153.
- 12. Бабарина И.И., Степанова А.В., Азимов П.Я., Серебряков Н.С. // Геотектоника. 2017. № 5. С. 3–19.
- Степанов В.С. Основной магматизм докембрия западного Беломорья // Ленинград: Наука, 1981. 216 с.
- Söderlund U., Johansson L. // Geochemistry, Geophys. Geosystems. 2002. V. 3. № 2. P. 1–7.
- Puchtel I.S., Touboul M., Blichert-Toft J., Walker R.J., Brandon A.D., Nicklas R.W., Kulikov V., Samsonov A.V. // Geochemica Cosmochim. Acta. 2016. V. 180. P. 227– 255.

## MAFIC INTRUSIONS OF CA. 2400 MA LARGE IGNEOUS PROVINCE IN THE BELOMORIAN MOBILE BELT: FIRST BADDELEYITE U-Pb ID-TIMS DATA

A. V. Stepanova<sup>*a*</sup>, E. B. Salnikova<sup>*b*,<sup>#</sup></sup>, Corresponding Member of the RAS A. V. Samsonov<sup>*c*</sup>, S. V. Egorova<sup>*a*</sup>, and V. S. Stepanov<sup>*a*</sup>

 <sup>a</sup> Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk, Russian Federation
<sup>b</sup> Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation
<sup>c</sup> Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

#E-mail: sa07sa@mail.ru

U-Pb ID-TIMS dating of igneous baddeleyite from metamorphosed coronitic gabbronorites in the central part of the Belomorian mobile belt, Fennoscandian shield was performed for the first time. The obtained age of  $2404 \pm 11$  Ma indicates that studied gabbronorites belong to the ca. 2400 Ma large igneous province and thereby allows to extend its area on the Fennoscandian Shield. The obtained data also confirms the hypothesis of short duration of large mafic igneous events in the Paleoproterozoic.

Keywords: baddeleyite, U-Pb ID-TIMS, Fennoscandian Shield, Paleoproterozoic, coronitic gabbro