

УДК 551.243.6:(268.5)

САРИОЛИЙСКАЯ КРУПНАЯ МАГМАТИЧЕСКАЯ ПРОВИНЦИЯ НА ФЕННОСКАНДИНАВСКОМ ЩИТЕ: СОСТАВ, ЛАТЕРАЛЬНАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ, ИСТОЧНИКИ РАСПЛАВОВ

С. В. Егорова^{1*}, А. В. Степанова¹, К. Г. Ерофеева²

¹ Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *zumlic@mail.ru

² Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (Старомонетный пер., 35, Москва, Россия, 119017)

В работе обсуждается характер распространения базитов с возрастом 2,4 млрд лет в пределах Фенноскандинавского щита. В Кольской провинции установлены дайки оливиновых долеритов и дифференцированные силлы пикродолеритов, в Мурманском и Карельском кратонах – дайки долеритов. Возраст кристаллизации вулканитов Ветреного пояса также оценивается в 2407 млн лет. Базиты с возрастом 2,4 млрд лет надежно датированы в пределах Беломорской провинции и представлены дайками оливиновых габброноритов и дифференцированными массивами. Таким образом, базиты с возрастом 2400 ± 10 млн лет широко распространены на Фенноскандинавском щите и могут рассматриваться в составе обособленной крупной магматической провинции. Оценки потенциальных температур и состава мантийного источника, выполненные для даек и силлов с возрастом 2,4 млрд лет Кольской провинции, предполагают его гарцбургитовый состав и значения $T_p > 1500$ °C, $P > 2,3$ GPa. Полученные оценки предполагают плюмовую природу расплавов крупной магматической провинции с возрастом 2,4 млрд лет на Фенноскандинавском щите.

Ключевые слова: базитовые дайки; палеопротерозой; крупные магматические провинции; Фенноскандинавский щит

Для цитирования: Егорова С. В., Степанова А. В., Ерофеева К. Г. Сариилийская крупная магматическая провинция на Фенноскандинавском щите: состав, латеральная зональность, источники расплавов // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 64–68. doi: 10.17076/geo2156

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Института геологии КарНЦ РАН (FMEN-2023-0009).

S. V. Egorova^{1*}, A. V. Stepanova¹, K. G. Erofeeva². SARIOLA LARGE IGNEOUS PROVINCE IN THE FENNOSCANDIAN SHIELD: COMPOSITION, LATERAL ZONING, MELT SOURCES

¹ Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *zumlic@mail.ru

² Institute of Ore Geology, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences (35 Staromonetnyi Per., 119017 Moscow, Russia)

The paper discusses the distribution of basites aged 2.4 Ga within the Fennoscandian Shield. In the Kola Province, olivine-bearing dolerite dykes and differentiated sills of picritic dolerite have been recognized. Meanwhile, in both the Murmansk and Karelia Cratons there occur doleritic dykes. Additionally, volcanics from the Vetreny Belt show similar ages (2407 Ma). Within the Belomorian Province, olivine gabbro-norite dykes and differentiated intrusive bodies also formed at ~ 2.4 Ga. Hence, basites of 2.4 Ga age are widely distributed across the Fennoscandian Shield. Potential temperature conditions and composition analyses of 2.4 Ga dykes and sills within the Kola Province indicate their formation occurred under $T > 1500$ °C and $P > 2.3$ GPa, implying a possible mantle-plume origin.

Keywords: basic dykes; Paleoproterozoic; large igneous provinces; Fennoscandian Shield

For citation: Egorova S. V., Stepanova A. V., Erofeeva K. G. Sariola large igneous province in the Fennoscandian Shield: composition, lateral zoning, melt sources. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 64–68. doi: 10.17076/geo2156

Funding. The work was funded within state-ordered research theme of the IG KarRC RAS (FMEN-2023-0009).

Крупные магматические провинции (КМП), образование которых связывается с подъемом мантийных плюмов, являются важным источником информации при расшифровке состава и условий плавления мантии. Формирование КМП происходило на протяжении всей геологической истории Земли, поэтому они могут быть использованы для изучения эволюции источников магм начиная с самых ранних этапов развития планеты. Докембрийские КМП, как правило, глубоко эродированы и представлены дайковыми роями, силлами и расслоенными интрузиями, значительно реже сохраняются вулканогенно-осадочные комплексы.

Реликты КМП с возрастом 2400 млн лет к настоящему времени установлены на многих кратонах мира: на кратонах Сьюпериор, Зимбабве и Илгарн, в Льюисском комплексе (Шотландия) [Ciborowski et al., 2014; Davies, Heaman, 2014]. В пределах Фенноскандинавского щита рои базитовых даек, силлы и вулканы с возрастом 2400 ± 10 млн лет, отвечающие в региональной стратиграфической шкале сариолийскому надгоризонту, установлены в центральной части Карельского кратона, где они представлены дайками долеритов [Vuollo, Nuhma, 2005; Stepanova et al., 2017], и в восточной части кратона, где к этапу магматизма 2400 млн лет

относятся вулканы и интрузии кряжа Ветренный пояс [Puchtel et al., 2016]. В Беломорской провинции событие 2400 млн лет связано с формированием даек оливиновых габброноритов, датированных в районе с. Гридино, и дифференцированных интрузивов [Stepanova et al., 2017 и ссылки в этой работе; Salnikova et al., 2022]. В Кольской провинции компоненты КМП представлены дайками и силлами пикродолеритов [Salnikova et al., 2020], а в Мурманском кратоне дайками долеритов. Прецизионные геохронологические данные свидетельствуют в пользу обособленного от эпизода 2450 млн лет события, а значительный объем и площадь распространения базитов с возрастом 2400 млн лет на Фенноскандинавском щите определяет его как крупную магматическую провинцию.

По составу базиты с возрастом 2400 млн лет на Фенноскандинавском щите широко варьируют: в дайках долеритов Карельского и Мурманского кратонов содержание MgO не превышает 7 мас. % (в среднем составляя 3–5 мас. %), а в дайках Кольской и Беломорской провинций содержания MgO укладываются в диапазон от 14 до 18 мас. %. В вулканах Ветренного пояса, дифференцированных силлах и интрузивах Кольской и Беломорской провинций MgO варьирует от 6 до 26 мас. %.

Характерно дифференцированное распределение РЗЭ, обеднение Nb и обогащение LILE. Предполагается, что высокомагнезиальные и низкомагнезиальные компоненты сариолийской КМП с возрастом 2400 млн лет связаны не только сочетанием процессов дифференциации и коровой контаминации, но и могут быть производными разных мантийных источников [Kullerud et al., 2006; Stepanova et al., 2017]. Широкие вариации состава пород ставят вопрос о составе первичных расплавов и их природе. Высоко-Mg состав базитов свидетельствует в пользу плюмовой природы расплавов, однако в большинстве случаев обусловлен их кумулятивной природой, а первичные оливины часто изменены или переуравновешены в результате диффузии. Наличие сохранных даек и силлов с оливином в зонах закалки и включениями в них позволяет оценить состав первичных расплавов и условия их кристаллизации.

Одна из хорошо сохранившихся даек расположена в центральной части Кольской провинции в районе ст. Лапландия. Породы дайки характеризуются высоким содержанием MgO (18,7 мас. % в зоне закалки) и сопоставимы с пикродолеритами силлов Кольской провинции и габброноритами интрузивов Беломорской провинции [Salnikova et al., 2020, 2022]. Породы дайки характеризуются отличной сохранностью как в центре тела, так и в зоне закалки, что делает данный объект благоприятным для оценки состава первичных расплавов и истории их эволюции.

Минералого-петрографическое изучение пород и оценка РТ-условий формирования (с использованием геотермометра [Coogan et al., 2014] и S_{rx} геотермобарометра [Wang et al., 2021]) позволили выделить в истории кристаллизации расплавов следующие этапы: 1) кристаллизация в магматической камере *in situ* маркируется формированием пироксенов основной массы и краевых частей микрофенокристов пироксенов при $T_{CPx3-4} = 1150-1200$ °C и $P_{CPx3-4} = 2-6$ кбар; 2) в промежуточной камере происходила кристаллизация высоко-Mg ядер фенокристов пироксена при $T_{CPx1-2} = 1270-1290$ °C и $P_{CPx1-2} = 7-10$ кбар. Особенности строения и состава ядер пироксенов предполагают поступление в промежуточную камеру новых порций расплава; 3) кристаллизация наиболее высокотемпературных фаз – оливина и хромшпинели происходила при $T_{Ol-Spl} > 1400$ °C. Расчет потенциальных температур мантийного источника с использованием полученной температуры кристаллизации оливина [Putirka, 2008] показал, что значения T_p составляли

около 1500 °C. А особенности состава фенокристаллов оливина (высокие концентрации Ni и низкие содержания Mn) могут являться свидетельством в участии процессов магмообразования пироксенитового источника [Sobolev et al., 2007].

Оценки потенциальных температур и состава мантийного источника, выполненные для даек и силлов Кольской провинции с использованием PRIMELT3 P [Herzberg et al., 2023], предполагают значения $T_p > 1500$ °C, $P = 3,6$ GPa. Близкие значения T_p были получены с использованием Fractionate-PT [Lee et al., 2009]: $T_p = 1500-1570$ °C и $P = 2,3-3,1$ GPa. Полученные оценки потенциальных температур мантийного источника превышают температуры «нормальной» мантии для раннего палеопротерозоя [Herzberg et al., 2010] и предполагают плюмовую природу расплавов. Модельный состав расплавов, сформировавших наиболее магнезиальные дайки Кольской провинции, вероятно, близок к первичным расплавам сариолийской КМП.

Таким образом, полученные данные позволяют предполагать, что сариолийская КМП с возрастом 2400 млн лет была сформирована в результате подъема мантийного плюма. В характере пространственного распространения базитов сариолийской КМП в пределах Фенноскандинавского щита отчетливо проявлена зональность: внедрение наиболее магнезиальных (более высокотемпературных) расплавов происходило вдоль траверса Лиинахамари – Ветренный пояс, а менее магнезиальные внедрялись на флангах – к юго-западу и северо-востоку.

Литература

- Ciborowski T. J. R., Kerr A. C., McDonald I., Ernst R. E., Hughes H. S., Minifie M. The geochemistry and petrogenesis of the Paleoproterozoic du Chef dyke swarm, Québec, Canada // *Precamb. Res.* 2014. Vol. 250. P. 151–166. doi: 10.1016/j.precamres.2014.05.008
- Coogan L. A., Saunders A. D., Wilson R. N. Aluminum-in-olivine thermometry of primitive basalts: evidence of an anomalously hot mantle source for large igneous provinces // *Chem. Geol.* 2014. Vol. 368. P. 1–10. doi: 10.1016/j.chemgeo.2014.01.004
- Davies J. H. F. L., Heaman L. M. New U-Pb baddeleyite and zircon ages for the Scourie dyke swarm: a long-lived large igneous province with implications for the Paleoproterozoic evolution of NW Scotland // *Precamb. Res.* 2014. Vol. 249. P. 180–198. doi: 10.1016/j.precamres.2014.05.007
- Herzberg C. T., Asimow P. D., Hernández-Montenegro J. D. The meaning of pressure for primary magmas: new insights from PRIMELT3-P // *Geochem.*

Geophys. Geosyst. 2023. No. 1(24). e2022GC010657. doi: 10.1029/2022GC010657

Herzberg C., Condie K., Korenaga J. Thermal history of the Earth and its petrological expression // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2010. No. 1–2(292). P. 79–88. doi: 10.1016/j.epsl.2010.01.022

Kullerud K., Skjerlie K. P., Corfu F., de la Rosa J. D. The 2.40 Ga Ringvassøy mafic dykes, West Troms Basement Complex, Norway: the concluding act of early Paleoproterozoic continental breakup // *Precamb. Res.* 2006. Vol. 150. P. 183–200. doi: 10.1016/j.precamres.2006.08.003

Lee C. T. A., Luffi P., Plank T., Dalton H., Leeman W. P. Constraints on the depths and temperatures of basaltic magma generation on Earth and other terrestrial planets using new thermobarometers for mafic magmas // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2009. No. 1–2(279). P. 20–33. doi: 10.1016/j.epsl.2008.12.020

Puchtel I. S., Touboul M., Blichert-Toft J., Walker R. J., Brandon A. D., Nicklas R. W., Kulikov V. S., Samsonov A. V. Lithophile and siderophile element systematics of Earth's mantle at the Archean-Proterozoic boundary: evidence from 2.4 Ga komatiites // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2016. Vol. 180. P. 227–255. doi: 10.1016/j.gca.2016.02.027

Putirka K. Thermometers and barometers for volcanic systems // *Rev. Mineral. Geochem.* 2008. Vol. 69. P. 61–120. doi: 10.2138/rmg.2008.69.3

Salnikova E. B., Samsonov A. V., Stepanova A. V., Veselovskiy R. V., Egorova S. V., Arzamastsev A. A., Erofeeva K. G. Fragments of Paleoproterozoic large igneous provinces in Northern Fennoscandia: baddeleyite U–Pb age data for mafic dykes and sills // *Doklady Earth Sciences.* 2020. Vol. 491. P. 227–230. doi: 10.1134/S1028334X20040145

Salnikova E. B., Stepanova A. V., Azimov P. Y., Sukhanova M. A., Kotov A. B., Egorova S. V., Plotkina Yu. V., Tolmacheva E. V., Kervinen A. V., Rodionov N. V., Stepanov V. S. A history of coronitic metagabbro-norites in the Belomorian Province, Fennoscandian Shield: U–Pb (CA-ID-TIMS) dating of zircon–baddeleyite aggregates // *Petrology.* 2022. Vol. 30 P. 567–590. doi: 10.1134/S0869591122060066

Sobolev A. V., Hofmann A. W., Kuzmin D. V., Yaxley G. M., Arndt N. T., Chung S.-L., Danyushevsky L. V., Elliott T., Frey F. A., Garcia M. O., Gurenko A. A., Kamenetsky V. S., Kerr A. C., Krivolutskaya N. A., Matvienkov V. V., Nikogosian I. K., Rocholl A., Sigurdsson I. A., Sushchevskaya N. M., Teklay M. The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts // *Science.* 2007. Vol. 316, no. 5823. P. 412–417. doi: 10.1126/science.1138113

Stepanova A. V., Sal'nikova E. B., Samsonov A. V., Larionova Yu. O., Egorova S. V., Savatenkov V. M. The 2405 Ma doleritic dykes in the Karelian Craton: a fragment of a Paleoproterozoic large igneous province // *Doklady Earth Sciences.* 2017. Vol. 472, iss. 2. P. 72–77. doi: 10.1134/S1028334X17010196

Vuollo J., Huhma H. Paleoproterozoic mafic dikes in NE Finland / Eds. M. Lehtinen, P. A. Nurm, O. T. Ramo. The Precambrian geology of Finland – key to the evolution of the Fennoscandian Shield. Developments

in Precambrian geology 14. Amsterdam: Elsevier, 2005. P. 195–236.

Wang X., Hou T., Wang M., Zhang C., Zhang Z., Pan R., Marxer F., Zhang H. A new clinopyroxene thermobarometer for mafic to intermediate magmatic systems // *Eur. J. Mineral.* 2021. Vol. 33(5). P. 621–637. doi: 10.5194/ejm-33-621-2021

References

Ciborowski T. J. R., Kerr A. C., McDonald I., Ernst R. E., Hughes H. S., Miniñie M. The geochemistry and petrogenesis of the Paleoproterozoic du Chef dyke swarm, Québec, Canada. *Precamb. Res.* 2014;250: 151–166. doi: 10.1016/j.precamres.2014.05.008

Coogan L. A., Saunders A. D., Wilson R. N. Aluminum-in-olivine thermometry of primitive basalts: evidence of an anomalously hot mantle source for large igneous provinces. *Chem. Geol.* 2014;368:1–10. doi: 10.1016/j.chemgeo.2014.01.004

Davies J. H. F. L., Heaman L. M. New U–Pb baddeleyite and zircon ages for the Scourie dyke swarm: a long-lived large igneous province with implications for the Paleoproterozoic evolution of NW Scotland. *Precamb. Res.* 2014;249:180–198. doi: 10.1016/j.precamres.2014.05.007

Herzberg C. T., Asimow P. D., Hernández-Montenegro J. D. The meaning of pressure for primary magmas: new insights from PRIMELT3-P. *Geochim. Geophys. Geosyst.* 2023;1(24):e2022GC010657. doi: 10.1029/2022GC010657

Herzberg C., Condie K., Korenaga J. Thermal history of the Earth and its petrological expression. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2010;1–2(292):79–88. doi: 10.1016/j.epsl.2010.01.022

Kullerud K., Skjerlie K. P., Corfu F., de la Rosa J. D. The 2.40 Ga Ringvassøy mafic dykes, West Troms Basement Complex, Norway: the concluding act of early Paleoproterozoic continental breakup. *Precamb. Res.* 2006;150:183–200. doi: 10.1016/j.precamres.2006.08.003

Lee C. T. A., Luffi P., Plank T., Dalton H., Leeman W. P. Constraints on the depths and temperatures of basaltic magma generation on Earth and other terrestrial planets using new thermobarometers for mafic magmas. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2009;1–2(279):20–33. doi: 10.1016/j.epsl.2008.12.020

Puchtel I. S., Touboul M., Blichert-Toft J., Walker R. J., Brandon A. D., Nicklas R. W., Kulikov V. S., Samsonov A. V. Lithophile and siderophile element systematics of Earth's mantle at the Archean-Proterozoic boundary: evidence from 2.4 Ga komatiites. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2016;180:227–255. doi: 10.1016/j.gca.2016.02.027

Putirka K. Thermometers and barometers for volcanic systems. *Rev. Mineral. Geochem.* 2008;69:61–120. doi: 10.2138/rmg.2008.69.3

Salnikova E. B., Samsonov A. V., Stepanova A. V., Veselovskiy R. V., Egorova S. V., Arzamastsev A. A., Erofeeva K. G. Fragments of Paleoproterozoic large igneous provinces in Northern Fennoscandia: baddeleyite U–Pb age data for mafic dykes and sills. *Dokl. Earth Sci.* 2020;491:227–230. doi: 10.1134/S1028334X20040145

Salnikova E. B., Stepanova A. V., Azimov P. Y., Sukhanova M. A., Kotov A. B., Egorova S. V., Plotkina Yu. V., Tolmacheva E. V., Kervinen A. V., Rodionov N. V., Stepanov V. S. A history of coronitic metagabbro-norites in the Belomorian Province, Fennoscandian Shield: U-Pb (CA-ID-TIMS) dating of zircon-baddeleyite aggregates. *Petrology*. 2022;30: 567–590. doi: 10.1134/S0869591122060066

Sobolev A. V., Hofmann A. W., Kuzmin D. V., Yaxley G. M., Arndt N. T., Chung S.-L., Danyushevsky L. V., Elliott T., Frey F. A., Garcia M. O., Gurenko A. A., Kamenetsky V. S., Kerr A. C., Krivolutskaya N. A., Matvienkov V. V., Nikogosian I. K., Rocholl A., Sigurdsson I. A., Sushchevskaya N. M., Teklay M. The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts. *Science*. 2007;316(5823):412–417. doi: 10.1126/science.1138113

Stepanova A. V., Sal'nikova E. B., Samsonov A. V., Larionova Yu. O., Egorova S. V., Savatenkov V. M. The 2405 Ma doleritic dykes in the Karelian Craton: a fragment of a Paleoproterozoic large igneous province. *Doklady Earth Sciences*. 2017;472(2):72–77. doi: 10.1134/S1028334X17010196

Vuollo J., Huhma H. Paleoproterozoic mafic dikes in NE Finland. *The Precambrian geology of Finland – key to the evolution of the Fennoscandian Shield. Developments in Precambrian geology 14*. Amsterdam: Elsevier; 2005. P. 195–236.

Wang X., Hou T., Wang M., Zhang C., Zhang Z., Pan R., Marxer F., Zhang H. A new clinopyroxene thermometer for mafic to intermediate magmatic systems. *Eur. J. Mineral.* 2021;33(5):621–637. doi: 10.5194/ejm-33-621-2021

Поступила в редакцию / received: 28.07.2025; принята к публикации / accepted: 02.09.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Егорова Светлана Валерьевна

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник
e-mail: zumlic@mail.ru

Степанова Александра Владимировна

канд. геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: stepanov@krc.karelia.ru

Ерофеева Ксения Геннадьевна

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник
e-mail: xenin.erofeeva@ya.ru

CONTRIBUTORS:

Egorova, Svetlana

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher

Stepanova, Alexandra

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Leading Researcher

Erofeeva, Kseniya

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher