

Палеоархейские протолиты пород зоны сочленения Центрально-Кольского и Мурманского блоков (Фенноскандинавский щит): новые Sm-Nd данные

Серов П.А., Кунаккузин Е.Л., Стешенко Е.Н.

Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, serov@geoksc.apatity.ru

Аннотация. В ходе исследований получены новые изотопные Sm-Nd данные о возрасте протолитов плагиогранитов, тоналитов, гнейсов и амфиболитов Центрально-Кольского и Мурманского блоков. Дополнительно были изучены породы нестратифицированного комплекса, поздние гранитоиды и пегматитовые тела с сульфидной минерализацией, а также тальк-хлорит-биотитовые сланцы и интенсивно рассланцованные амфиболиты. Предыдущие исследования определили верхнюю границу Sm-Nd модельных возрастов для пород Центрально-Кольского и Мурманского блоков не выше 3 млрд. лет. Новые исследования дают основания предполагать более древние, палео- и эоархейские, модельные возрасты протолитов этих пород, которые ранее определялись в диапазоне 3.4–3.6 млрд. лет в основном только на отдельных участках на территории Финляндии и Карелии. Проведенные изотопные Sm-Nd исследования показывают, что модельные возрасты плагиогранитов и тоналитов Центрально-Кольского блока определяются в интервале 2.83–3.43 млрд. лет, гранитоиды Мурманского блока характеризуются значениями 2.82–3.26 млрд. лет. Поздние гранитоиды, представленные турмалиновыми и микроклиновыми гранитами, а также телами поздних пегматитов с сульфидной минерализацией, характеризуются более древними модельными возрастными – 2.96–3.8 Ga. В целом, отмечается тенденция удревнения модельных возрастов от тоналитов и плагиогранитов к поздним турмалиновым гранитам и пегматитовым телам. Полученные данные не исключают наличия в районе Мурманского и Центрально-Кольского блоков и их сочленения материала древней эо- или палеоархейской коры, вероятные аналоги которой известны на примере трех изолированных участков тоналитов с возрастом более 3.3 млрд. лет на территории Финляндии и в Северной Карелии. В совокупности эти древние участки (включая Водлозерский домен) могут быть частями более крупного кратона. С другой стороны, подобные древние фрагменты могут являться «зародышами» древнейшей коры, вокруг которых в архее происходило дальнейшее нарастание континентальной коры.

Ключевые слова: Архей, граниты, гнейсы, протолит, Фенноскандинавский щит, TTG, Sm-Nd.

Paleoarchean protoliths of the Central Kola and Murmansk Blocks (Fennoscandian Shield): new Sm-Nd data

Serov P.A., Kunakkuzin E.L., Steshenko E.N.

Geological Institute of the Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, Apatity, serov@geoksc.apatity.ru

Abstract. Scientific research provided new Sm-Nd isotopic data on the age of protoliths of plagiogranites, tonalites, gneisses and amphibolites of the Central Kola and Murmansk blocks. Additionally, rocks of the unstratified complex, late granitoids and pegmatite bodies with sulfide mineralization, as well as talc-chlorite-biotite schists and intensely sheared amphibolites were studied. Previous studies had determined the upper limit of Sm-Nd model ages for the rocks of the Central Kola and Murmansk blocks no higher than 3 Ga. New studies give grounds to assume older, Palaeo- and Eoarchaeal, model ages of the protoliths of these rocks, which were previously determined in the range of 3.4–3.6 Ga, mainly only at certain sites in Finland and Karelia. The conducted Sm-Nd isotopic studies show that the model ages of plagiogranites and tonalites of the Central Kola block are determined in the range of 2.83–3.43 Ga, while the granitoids of the Murmansk block are characterized by values of 2.82–3.26 Ga. Late granitoids represented by tourmaline and microcline granites, as well as bodies of late pegmatites with sulfide mineralization, are characterized by older model ages, 2.96–3.8 Ga. In general, there is a trend of older model ages from tonalites and plagiogranites to late tourmaline granites and pegmatite bodies. The obtained data do not exclude the presence in the region of the Murmansk and Central Kola blocks and their junction of the material of the ancient Eo- or Palaeoarchean crust, the probable analogues of which are known on the example of three isolated areas of tonalites with an age of more than 3.3 Ga in Finland and North Karelia. Taken together, these ancient sites (including the Vodlozero domain) may be parts of a larger craton. On the other hand, such ancient fragments may be the «embryos» of the most ancient crust, around which further growth of the continental crust took place in the Archaean.

Keywords: Archaean, granites, gneisses, protolith, Fennoscandian Shield, TTG, Sm-Nd.

Введение

На протяжении многих десятков лет группами ученых ведутся активные исследования, направленные на получение новых знаний о закономерностях эволюции вещества на самых ранних этапах развития Земли (Bleeker, 2003; Bogdanova et al., 2008, 2010; Ge et al., 2020; Halla, 2020; Hölttä, 2012; Huhma et al., 2012; Kröner et al., 2016; Moyen and Martin, 2012; Nutman et al., 1996; Polat, Hofmann, 2003; Reimink et al., 2016; Savko et al., 2021; Timmerman and Daly, 1995; Upadhyay et al., 2019). До сих пор одной из важнейших задач современной докембрийской геологии остается вопрос поиска и познания фундаментальных основ развития наиболее древних участков земной коры. Фенноскандинавский щит является частью Восточно-Европейского кратона (Bogdanova et al., 2008) и представляет собой один из наиболее интересных в плане докембрийских исследований полигон. Имеющиеся на данный момент возрастны определения для самых ранних пород в составе Фенноскандинавского щита относятся к интервалу 3.5–3.1 млрд. лет – это тронджемитовые гнейсы Сиу-руа возрастом 3.5 млрд. лет в составе гранулитового пояса Пудасьярви в Финляндии, TTG-гнейсы Иисалми (3.2 млрд. лет) и гнейсы Тойоттаманселька (3.1 млрд. лет) в Северной Финляндии (Hölttä et al., 2008; Jahn et al., 1984; Mutanen and Huhma, 2000). В течение последних двух десятилетий были получены новые данные по TTG-комплексам Кольского региона и накоплен существенный объем геохронологических, изотопно-геохимических, петрологических и геофизических результатов (Bogdanova et al., 2008; Bridgwater et al., 2001; Dokukina and Mints, 2018; Halla, 2020; Hölttä, 2012; Hölttä et al., 2008; Huhma et al., 2009; Kozhevnikov et al., 2010; Kõykkä et al., 2019; Li et al., 2017; Mikkola et al., 2012; Mints et al., 2020; Myskova et al., 2005; Nitkina et al., 2019; Смолькин и др., 2020).

Для пород Центрально-Кольского и Мурманского блоков первые определения Sm-Nd модельных возрастов соответствуют интервалу 2.46–2.96 млрд. лет (Timmerman and Daly, 1995). Однако, наши новые исследования дают основания предполагать гораздо более древние, палеоархейские, модельные возрасты протолитов этих пород, которые ранее определялись в диапазоне 3.4–3.6 млрд. лет в основном только для пород юго-западной части Фенноскандинавского щита (Jahn et al., 1984; Huhma et al., 1995, 2012; Hanski et al., 2001). Наличие древней коры в Палеоархее также подтверждается исследованиями цирконов с помощью ионного зонда (Claesson et al., 1993) и на основе анализа Sm-Nd модельных возрастов, определенных в интервале 3.4–3.6 млрд. лет (Hanski et al., 2001). Более того, находки детритовых цирконов хадейско-архейского возраста, подтвержденного SHRIMP-анализом единичных зерен (Kozhevnikov et al., 2010; Myskova et al., 2005; Смолькин и др., 2020), позволяют еще глубже заглянуть в историю Фенноскандинавского щита, оставляя тем не менее дискуссионным вопрос об источнике этих древнейших цирконов.

Изотопные составы неодима гранитоидов и TTG-гнейсов Кольского региона характеризуются широким спектром вариаций, от самых низких значений $\epsilon Nd(T)$ около -11 (Mutanen and Huhma, 2000; Timmerman and Daly, 1995) до +5.3 – +8.2 для TTG-комплекса Ингозерского массива в пересчете на полученный возраст в 3.15 млрд. лет (Nitkina et al., 2019) Широкие вариации изотопных составов неодима традиционно объясняются нарушением изотопных систем в результате метаморфических событий и различной степенью контаминации коровым веществом, что типично не только для древних пород Балтийского щита, но и для других древнейших кратонов Мира (Akame et al., 2020; Bruno et al., 2020; Neto, Lafon, 2020; Upadhyay et al., 2019).

Результаты и обсуждение

Изотопный Sm-Nd анализ был выполнен для образцов плагиогранитов, тоналитов, гнейсов и амфиболитов Центрально-Кольского и Мурманского блоков. Опробование производилось из обнажений в дорожных выемках в районе г. Мурманск и его окрестностях (рис. 1). Дополнительно были изучены породы нестратифицированного комплекса, обнажающегося южнее г. Мурманска, поздние гранитоиды и пегматитовые тела с сульфидной минерализацией, а также интенсивно измененные разновидности пород – тальк-хлорит-биотитовые сланцы и интенсивно рассланцованные амфиболиты, фиксируемые на многих участках района работ.

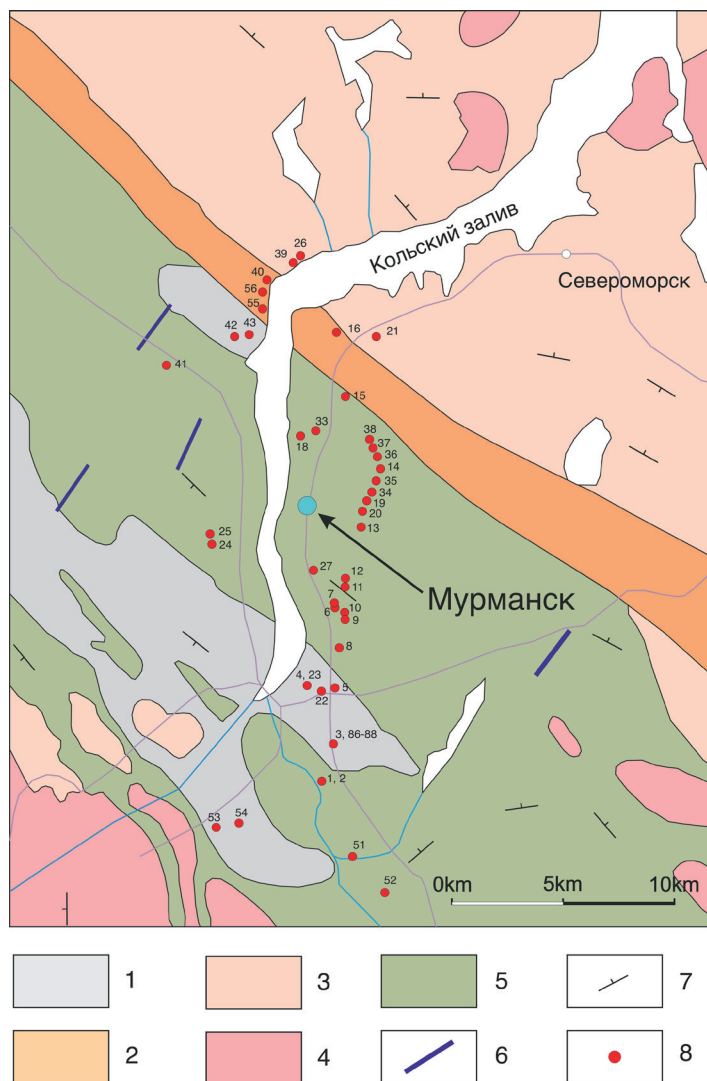


Рис. 1. Схематическая геологическая карта района работ.

1 – Биотитовые, амфиболовые гнейсы, мигматиты, амфиболиты (в том числе рассланцованные, с признаками интенсивного изменения); 2 – основные вулканиты, кварциты; 3 – гранодиориты, плагиограниты, тоналиты; 4 – лейкограниты, гранодиориты; 5 – гранат-биотитовые гнейсы с кианитом и силлиманитом; 6 – долериты (дайки); 7 – элементы залегания; 8 – точки отробования.

Fig. 1. Schematic geological map of the study area. 1 – Biotite, amphibole gneisses, migmatites, amphibolites (including rocks with intense alteration); 2 – metavolcanites, quartzites; 3 – granodiorites, plagiogranites, tonalites; 4 – leucogranites, granodiorites; 5 – garnet-biotite gneisses with kyanite and sillimanite; 6 – dolerites (dykes); 7 – foliation; 8 – sampling points.

Предварительно, с целью оценки степени нарушенности Sm-Nd изотопной системы всех изученных пород, была построена генеральная эррохрона по всей совокупности Sm-Nd данных для гранитоидов и гнейсов (рис. 2). В случае значимого нарушения изотопной системы мы получили бы одну из трех возможных картин: а) облако фигуративных точек, не обладающих корреляционными связями; б) омоложенный наклон линии эррохроны, соответствующий возрасту метаморфических событий; в) эррохрона, не соответствующая никаким геологическим событиям, известным в регионе. Итоговая Sm-Nd эррохрона, построенная на основе 50 анализов, соответствует возрасту 2.81 млрд. лет и согласуется с U-Pb возрастом циркона из тоналитов Воче-Ламбины – 2807±9 млн. лет (Mitrofanov et al., 1991; Timmerman and Daly, 1995). Это указывает на слабое или незначительное нарушение изотопной системы на уровне породы в целом (WR) во время последнего метаморфизма на рубеже 2.81 млрд. лет. Таким образом, можно констатировать, что изотопные составы неодима гранитоидов и гнейсов района являются значимыми и в достаточной мере отражают характеристики их источника.

Модельные возрасты плагиогранитов и тоналитов Центрально-Кольского блока определены в интервале 2.83–3.43 млрд. лет, в то время как гранитоиды Мурманского блока характеризуются значениями 2.82–3.26 млрд. лет. Поздние гранитоиды, представленные турмалиновыми и микроклиновыми гранитами, а также телами поздних пегматитов с сульфидной минерализацией, характеризуются древними модельными возрастными – 2.96–3.8 млрд. лет. Примечательно, что для Центрально-Кольского блока наиболее древние (3.3–3.6 млрд. лет) модельные возрасты и низкие значения $\epsilon_{Nd}(T)$ от -6.4 до -11.8 получены для турмалиновых гранитов и поздних жильных гра-

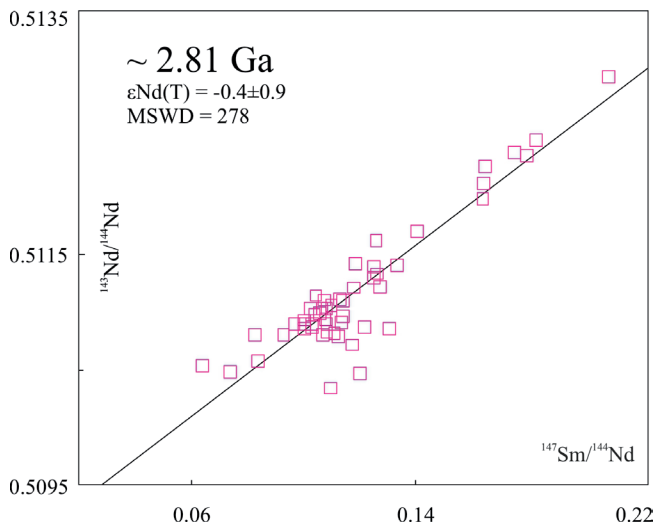


Рис. 2. Sm-Nd эрохрона для архейских пород Центрально-Кольского и Мурманского блоков.

Fig. 2. Sm-Nd errochron for the Archaean rocks of the Central Kola and Murmansk blocks.

Nd-Hf) для пород многих древних регионов Мира можно выделить их общую черту, присущую практически всем древнейшим кратонам – наличие существенной дисперсии изотопных составов от высокорациогенных до коровых меток и значительный временной интервал между временем кристаллизации пород ТТ-ассоциаций и их Sm-Nd модельным возрастом. Это может указывать на наличие нескольких источников – ювенильного и корового – смешение которых приводит к наблюдаемому разнообразию изотопных составов (Upadhyay et al., 2019).

Таким образом, полученные нами данные не исключают наличия в районе Мурманского и Центрально-Кольского блоков и их сочленения древнего палеоархейского ядра, вероятные аналоги которого известны на примере трех изолированных участков тоналитов с возрастом более 3.3 млрд. лет на территории Финляндии и Северной Карелии. В совокупности эти древние участки (включая Водлозерский домен) могут быть частями более крупного кратона (Vrevsky et al., 2019). В свете недавних исследований короткоживущих изотопов ^{82}W , ^{142}Nd и ^{129}Xe и Re-Os системы древние мантийные резервуары, по-видимому, могли сохраняться в течение длительного геологического времени, а мантийные области могли быть конвективно изолированы в течение более 1 млрд. лет и сохранять внутри себя остатки древнего материала, затянутого в эти области на ранних этапах эволюции земного вещества (Tusch et al., 2021; Van de Löcht et al., 2018). Последующая геодинамическая активизация могла приводить к созданию условий, при которых часть этого древнего вещества участвовала в образовании поздних выплавок с формированием гранитоидов, несущих изотопную информацию о ранних этапах эволюции региона. С другой стороны, подобные древние фрагменты могут

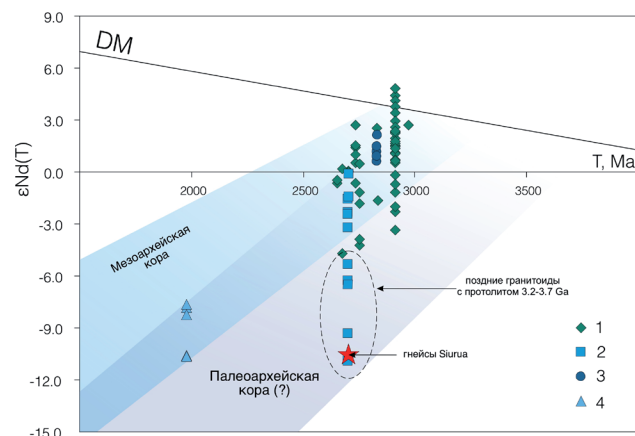
нитных и пегматитовых тел с сульфидной минерализацией (рис. 3). В целом, отмечается тенденция «удревнения» модельных возрастов от тоналитов и плагиогранитов к поздним турмалиновым гранитам и пегматитовым телам. Старейшими известными породами в пределах Фенноскандии являются гнейсы Сиуруа (Пудасъярви, Финляндия) с модельными Sm-Nd возрастaми до 3.7 млрд. лет (Mutanen and Huhma, 2000). Указания на такой же древний возраст были получены и для нижнекоровых гранулитовых ксенолитов Карельского кратона (Peltonen et al. 2006).

Изотопные составы неодима пород ТТГ-комплекса в целом обнаруживают широкую дисперсию; значения $\epsilon\text{Nd}(T)$ варьируют от -5 до +5.

Анализируя данные по различным изотопным систематикам (главным образом

Рис. 3. Диаграмма $\epsilon\text{Nd}(T)$ – T для пород Центрально-Кольского и Мурманского доменов: 1 – тоналиты, гнейсы, амфиболиты, граниты; 2 – поздние гранитоиды, пегматитовые тела и турмалиновые граниты; 3 – гнейсы по вулканитам (Колмозеро-Воронья); 4 – интенсивно измененные породы, тальк-хлорит-биотитовые сланцы.

Fig. 3. $\epsilon\text{Nd}(T)$ – T diagram for rocks of the Central Kola and Murmansk blocks: 1 – tonalites, gneisses, amphibolites, granites; 2 – late granitoids, pegmatite bodies and tourmaline granites; 3 – metavolcanics (Kolmozero-Voronya); 4 – intensely altered rocks, talc-chlorite-biotite schists.



являться «зародышами» древнейшей коры, вокруг которых происходило дальнейшее нарастание континентальной коры в архее (Bleeker et al., 2003; Reimink et al., 2016a).

Работа выполнена в рамках темы НИР ГИ КНЦ РАН № 0226-2019-0053 и при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-05-70082_ресурсы Арктики).

Литература

1. Смолькин В.Ф., Межеловская С.В., Межеловский А.Д. Источники обломочного материала терригенных толщ палеобассейнов неархейского и палеопротерозойского возраста восточной части Фенноскандинавского щита по данным изотопного анализа детритового циркона (SIMS, LA-ICP-MS). Стратиграфия 2020. № 28. С. 3–36. <https://doi.org/10.31857/S0869592X20060095>.
2. Akame J.M., Oliveira E.P., Poujol M., Hublet G., Debaille V. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, Lu-Hf, Sm-Nd geochronology and tectonic setting of the Mesoarchean mafic and felsic magmatic rocks in the Sangmelima granite-greenstone terrane, Ntem Complex (South Cameroon). 2020. *Lithos* 372–372. 105702. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105702>.
3. Bleeker W., 2003. The late Archean record: A puzzle in ca. 35 pieces. *Lithos* 71. P. 99–134. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2003.07.003>.
4. Bogdanova S.V., Bingen B., Gorbatshev R., Kheraskova T.N., Kozlov V.I., Puchkov V.N., Volozh Y.A. 2008. The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia. *Precambrian Res.* V. 160. P. 23–45. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2007.04.024>
5. Bogdanova S.V., De Waele B., Bibikova E.V., Belousova E.A., Postnikov A.V., Fedotova A.A., Popova L.P. 2010. Volgo-Uralia: The first U-Pb, Lu-Hf and Sm-Nd isotopic evidence of preserved paleoarchean crust. *Am. J. Sci.* 310, 1345–1383. <https://doi.org/10.2475/10.2010.06>.
6. Bridgewater D., Scott D.J., Balagansky V.V., Timmerman M.J., Marker M., Bushmin S.A., Alexeyev J.S., Daly N.L. 2001. Age and provenance of early Precambrian metasedimentary rocks in the Lapland-Kola Belt, Russia: Evidence from Pb and Nd isotopic data. *Terra Nov.* V. 13. P. 32–37. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2001.00307.x>.
7. Bruno H., Elizeu V., Heilbron M., Morisson C. De, Strachan R., Fowler M., Bersan S., Moreira H., Dussin I., Almeida J., Neto C., Guilherme L., Tupinamb M., Storey C. 2020. Geoscience Frontiers Neoproterozoic and Rhyacian TTG-Sanukitoid suites in the southern Sao Francisco Paleocoast, Brazil: Evidence for diachronous change towards modern tectonics. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.01.015>.
8. Claesson S., Huhma H., Kinny P.D., Williams I.S. 1993. Svecofennian detrital zircon ages-implications for the Precambrian evolution of the Baltic Shield. *Precambrian Res.* V. 64. P. 109–130. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(93\)90071-9](https://doi.org/10.1016/0301-9268(93)90071-9).
9. Dokukina K., Mints M. 2018. Subduction of the Mesoarchean spreading ridge and related metamorphism, magmatism and deformation by the example of the Gridino eclogitized mafic dyke swarm, the Belomorian Eclogite Province, eastern Fennoscandian Shield. *J. Geodyn.* <https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.11.003>.
10. Ge R., Zhu W., Wilde S.A., Hailin W.U. 2020. Remnants of Earth's Oldest Continental Crust Formed by Subduction. *Acta Geol. Sin.* V. 94. P. 14. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14434>.
11. Halla J. 2020. The TTG-Amphibolite Terrains of Arctic Fennoscandia: Infinite Networks of Amphibolite Metatexite-Diatexite Transitions. *Front. Earth Sci.* V. 8. P. 1–14. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00252>.
12. Hanski E., Huhma H., Vaasjoki M. 2001. Geochronology of northern Finland: A summary and discussion. *Spec. Pap. Geol. Surv. Finl.* P. 255–279.
13. Hölttä P. 2012. The Archaean of the Karelia Province in Finland. *Geological Survey of Finland* 54.
14. Hölttä P., Balagansky V., Garde A.A., Mertanen S., Peltonen P., Slabunov A., Sorjonen-Ward, P., Whitehouse, M. 2008. Archaean of Greenland and Fennoscandia. *Episodes.* V. 31. P. 13–19. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2008/v31i1/003>.
15. Huhma H., Kontinen A., Mikkola P., Halkoaho T., Hokkanen T., Hölttä P., Juopperi H., Konnunaho J., Luukkonen E., Mutanen T., Peltonen P., Pietikäinen K., Pulkkinen A. 2012. Nd isotopic evidence for Archaean crustal growth in Finland. *Spec. Pap. Geol. Surv. Finl.* 2012. P. 176–213.
16. Huhma H., Mutanen T., Whitehouse M. 2004 Oldest rocks of the Fennoscandian Shield: The 3.5 Ga Siurua trondhjemite gneiss in the Archaean Pudasjärvi Granulite Belt, Finland. *GFF* 126. 10. <https://doi.org/10.1080/11035890401261Sn1>.
17. Jahn B., Vidal P., Kröner A. 1984. Multi-chronometric ages and origin of Archaean tonalitic gneisses in Finnish Lapland: A case for long crustal residence time. *Contrib. to Mineral. Petrol.* V. 86. P. 398–408. <https://doi.org/10.1007/BF01187143>.
18. Kozhevnikov V.N., Medvedev P.V., Skublov S.G., Marin Y.B., Systra Y., Valencia V. 2010. Hadean-Archaean detrital zircons from Jatulian quartzites and conglomerates of the Karelian craton. *Doklady Earth Sciences.* V. 431. P. 318–323.
19. Köykkä J., Lahtinen R., Huhma H. 2019. Provenance evolution of the Paleoproterozoic metasedimentary cover sequences in northern Fennoscandia: age distribution, geochemistry, and zircon morphology. *Precambrian Res.* 331. 105364. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105364>.

20. Kröner A., Anhaeusser C.R., Hoffmann J.E., Wong J., Geng H., Hegner E., Xie H., Yang J., Liu D. 2016. Chronology of the oldest supracrustal sequences in the Palaeoarchean Barberton Greenstone Belt, South Africa and Swaziland. *Precambrian Res.* V. 279. P. 123–143. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.04.007>.
21. Li X., Zhang L., Wei C., Slabunov A.I., Bader T. 2017. Neoproterozoic granulite-facies metamorphism in Uzkaya Salma eclogite-bearing mélange, Belomorian Province (Russia). *Precambrian Res.* V. 294. P. 257–283. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.03.031>.
22. Mikkola P., Lauri L.S., Käpyaho A. 2012. Neoproterozoic leucogranitoids of the Kianta Complex, Karelian Province, Finland: Source characteristics and processes responsible for the observed heterogeneity. *Precambrian Res.* 206–207, 72–86. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.02.010>.
23. Mints M. V., Glaznev V.N., Muravina O.M., Sokolova E.Y. 2020. 3D model of Svecofennian Accretionary Orogen and Karelia Craton based on geology, reflection seismics, magnetotellurics and density modelling: Geodynamic speculations. *Geosci. Front.* 11, 999–1023. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.10.003>.
24. Mitrofanov F.P., Balashov Yu.A., Balagansky V.V. 1991. New geochronological data on Lower Precambrian complexes of the Kola Peninsula. In: V.V. Balagansky, F.P. Mitrofanov (Eds), *Correlation of Lower Precambrian Formations of the Karelian-Kola Region, USSR and Finland*. USSR Academy of Sciences, Apatity, pp. 12–16.
25. Moyen, J.F., Martin, H., 2012. Forty years of TTG research. *Lithos* 148. P. 312–336. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.06.010>.
26. Mutanen T., Huhma H. 2000. The 3.5 Ga Siurua trondhjemite gneiss in the Archaean Pudasjärvi Granulite Belt, Northern Finland. *Bull. Geol. Soc. Finl.* V. 75. P. 51–68.
27. Myskova T.A., Glebovitsky V.A., Mil'kevich R.I., Shuleshko I.K., Berezhnaya N.G., Lepekhina E.N., Matukov D.I., Antonov A.V., Sergeev S.A. 2005. Findings of the oldest (3600Ma) zircons in gneisses of the Kola Group, Central Kola Block, Baltic Shield: evidence from U-Pb (SHRIMP-II) data. *Doklady Earth Sciences*. V. 402, P. 547–550.
28. Neto J.M.M., Lafon J.M. 2020. Crustal growth and reworking of Archean crust within the Rhyacian domains of the southeastern Guiana Shield, Brazil: Evidence from zircon U–Pb–Hf and whole-rock Sm–Nd geochronology. *J. South Am. Earth Sci.* V. 103. P. 102740. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102740>
29. Nitkina, E., Kozlov, N., Kozlova, N., Kaulina, T., 2019. Geochemical features and geological processes timescale of the Achaean TTG complexes of the Ingozero massif and the Pechenga frame (NE Baltic Shield). *Minerals*. V. 9. P. 6–9. <https://doi.org/10.3390/min9120767>.
30. Nutman A.P., McGregor V.R., Friend C.R.L., Bennett V.C., Kinny P.D. 1996. The Itsaq gneiss complex of southern West Greenland; the world's most extensive record of early crustal evolution (3900–3600 Ma). *Precambrian Res.* V. 78. P. 1–39.
31. Peltonen P., Mänttari I., Huhma H., Whitehouse M. J. 2006. Multi-stage origin of the lower crust of the Karelian craton from 3.5 to 1.7 Ga based on isotopic ages of kimberlite-derived mafic granulite xenoliths. *Precambrian Research*. V. 147. P. 107–123.
32. Polat A., Hofmann A.W. 2003. Alteration and geochemical patterns in the 3.7–3.8 Ga Isua greenstone belt, West Greenland. *Precambrian Research*. V. 126. P. 197–218.
33. Reimink J.R., Chacko T., Stern R.A., Heaman L.M. 2016 a. The birth of a cratonic nucleus: Lithochemical evolution of the 4.02–2.94 Ga Acasta Gneiss Complex. *Precambrian Res.* V. 281. P. 453–472. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2016.06.007>.
34. Savko K.A., Samsonov A.V., Larionov A.N., Chervyakovskaya M.V., Korish E.H., Larionova Y.O., Bazikov N.S., Tsybulyaev S.V. 2021. A buried Paleoproterozoic core of the Eastern Sarmatia, Kursk block: U-Pb, Lu-Hf and Sm-Nd isotope mapping and paleotectonic application. *Precambrian Res.* 353, 106021. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.106021>.
35. Timmerman M.J., Daly J.S. 1995. Sm-Nd evidence for late Archaean crust formation in the Lapland-Kola Mobile Belt, Kola Peninsula, Russia and Norway. *Precambrian Res.* V. 72. P. 97–107. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(94\)00045-S](https://doi.org/10.1016/0301-9268(94)00045-S)
36. Tusch J., Münker C., Hasenstab E., Jansen M., Marien C.S., Kurzweil F., Van Kranendonk M.J., Smithies H., Maier W., Garbe-Schönberg D. 2021. Convective isolation of Hadean mantle reservoirs through Archean time. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 118, e2012626118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2012626118>.
37. Upadhyay D., Chattopadhyay S., Mezger K., 2019. Formation of Paleoproterozoic-Mesoproterozoic Na-rich (TTG) and K-rich granitoid crust of the Singhbhum craton, Eastern India: Constraints from major and trace element geochemistry and Sr-Nd-Hf isotope composition. *Precambrian Res.* V. 327. P. 255–272. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.04.009>.
38. Van de Löcht J., Hoffmann J.E., Li C., Wang Z., Becker H., Rosing M.T., Kleinschrodt R., Münker C. 2018. Earth's oldest mantle peridotites show entire record of late accretion. *Geology*. V. 46. P. 199–202. <https://doi.org/10.1130/G39709.1>
39. Vrevsky A.B. 2019. Non-Subduction Petrological Mechanisms for the Growth of the Neoproterozoic Continental Crust of the Kola–Norwegian Terrane, Fennoscandian Shield: Geological and Isotope-Geochemical Evidence. *Petrology*. V. 27. P. 146–170. <https://doi.org/10.1134/S0869591119020073>.