

УДК 550.93 : 551.71 (470.22)

НОВОЕ МЕЗОПРОТЕРОЗОЙСКОЕ (1546 МЛН ЛЕТ) ТЕРМАЛЬНОЕ СОБЫТИЕ В ЦЕНТРАЛЬНО-КАРЕЛЬСКОМ ТЕРРЕЙНЕ КАРЕЛЬСКОГО КРАТОНА: ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДАТИРОВАНИЯ ЦИРКОНОВ ИЗ НЕОАРХЕЙСКИХ КИСЛЫХ ВУЛКАНИТОВ КОСТОМУКШСКОГО ЗЕЛЕНОКАМЕННОГО ПОЯСА

А. И. Слабунов^{1*}, А. В. Кервинен¹, Е. Б. Сальникова²,
К. Г. Ерофеева³, А. С. Дубенский³

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

² Институт геологии и геохронологии докембрия РАН (наб. Макарова, 2,
Санкт-Петербург, Россия, 190034)

³ Геологический институт РАН (Пыжевский пер., 7, Москва, Россия, 119017)

В породах Костомукшского зеленокаменного пояса впервые установлены цирконы мезопротерозойского ($1545,9 \pm 3,5$ млн лет) возраста. Цирконы для датирования были выделены из южной части силла метариолитов (геллефлинты), залегающего среди сланцев и полосчатых железистых кварцитов костомукшской свиты гимольской серии. Цирконы представлены прозрачными бледно-розовыми удлинёнными и, реже, короткопризматическими кристаллами, размер которых варьирует от 60 до 400 мкм. Датирование цирконов проведено двумя методами: 1) лазерной абляции (LA-ICP-MS) и 2) U-Pb CA-ID-TIMS-методом с использованием «химической абразии». По результатам первого получены значения возраста 1538 ± 9 и 1535 ± 9 млн лет, а второго – 1546 ± 4 млн лет. Эти результаты в пределах ошибки сопоставимы. При датировании методом лазерной абляции среди цирконов установлены единичные мезоархейские (2949 ± 7 , 2885 ± 8 и 2830 ± 8 млн лет) зерна. Проведено (методом лазерной абляции) исследование геохимических особенностей мезопротерозойских цирконов. Они, относительно неоархейских, обеднены легкими РЗЭ, характеризуются наличием отрицательной Eu-аномалии и положительной Ce. Таким образом, в изученных породах силла метариолитов установлено проявление мезопротерозойского термального процесса, приведшего к кристаллизации новой генерации циркона. При этом имеющиеся петрографические и геохимические данные по породам силла не указывают на наличие какой-либо дополнительной переработки этих пород. Полученные новые геохронологические данные о мезопротерозойском термальном событии в породах Костомукшского зеленокаменного пояса хорошо коррелируются по возрасту с поздними фазами анортозит-рапакиви-гранитного магматизма (1547–1530 млн лет), который широко проявлен в южной части кратона вдоль его границы со Свеккофенским орогеном.

Ключевые слова: мезопротерозой; неоархей; циркон; ID-TIMS; LA-ICP-MS; Костомукшский зеленокаменный пояс

Для цитирования: Слабунов А. И., Кервинен А. В., Сальникова Е. Б., Ерофеева К. Г., Дубенский А. С. Новое мезопротерозойское (1546 млн лет) термальное событие в центрально-карельском террейне Карельского кратона: по результатам датирования цирконов из неоархейских кислых вулканитов Костомукшского зеленокаменного пояса // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 124–129. doi: 10.17076/geo2150

Финансирование. Работа является вкладом в исследования ИГ КарНЦ РАН по теме FMEN-2023-0009 и ИГГД РАН по теме FMUW-2025-0002.

A. I. Slabunov^{1*}, A. V. Kervinen¹, E. B. Salnikova², K. G. Erofeeva³, A. S. Dubenskiy³. A NEW MESOPROTEROZOIC (1546 MA) THERMAL EVENT IN THE CENTRAL KARELIAN TERRANE OF THE KARELIAN CRATON: RESULTS OF DATING ZIRCON FROM NEOARCHEAN FELSIC ROCK OF THE KOSTOMUKSHA GREENSTONE BELT

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

² Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences (2 Nab. Makarova, 199034 St. Petersburg, Russia)

³ Geological Institute, Russian Academy of Science (7 Pyzhevsky Per., 109017 Moscow, Russia)

It is for the first time that rocks of the Kostomuksha Greenstone Belt have been found to contain zircons of Mesoproterozoic (1545.9 ± 3.5 Ma) age. Zircons to be dated were separated from the southern portion of a metarhyolite (hallelinta) sill occurring among the schists and banded iron formation in the Kostomuksha suite of the Gimoly series. The zircons occur as transparent, pale-pink elongated and lesser short-prismatic crystals varying in size from 60 to 400 μm . The zircons were dated by two methods: 1) laser ablation (LA-ICP-MS) and 2) isotopic dilution U-Pb CA-ID-TIMS). The former method yielded ages of 1538 ± 9 and 1535 ± 9 Ma and the latter 1546 ± 4 Ma. The results were comparable within the error limits. Dating by laser ablation revealed Mesoarchean (2949 ± 7 , 2885 ± 8 and 2830 ± 8 Ma) grains among the zircons. Laser ablation was used to analyze the geochemical features of Mesoproterozoic zircons. They are poorer in light REE than Neoarchean zircons and display negative Eu and positive Ce anomalies. Thus, rocks of the metarhyolite sill exhibit a Mesoproterozoic thermal process, which triggered the crystallization of a new zircon generation. It should be noted that available petrographic and geochemical data on sill rocks indicate no additional reworking of these rocks. New geochronological data on the Mesoproterozoic thermal event in rocks of the Kostomuksha Greenstone Belt are comparable in age with the late phases of anorthositic rapakivi granite magmatism (1547–1530 Ma), which is widespread in the southern portion of the craton along its boundary with the Svecofennian orogen.

Keywords: Mesoproterozoic; Neoarchean; zircon; ID-TIMS; LA-ICP-MS; Kostomuksha Greenstone Belt

For citation: Slabunov A. I., Kervinen A. V., Salnikova E. B., Erofeeva K. G., Dubenskiy A. S. A new Mesoproterozoic (1546 MA) thermal event in the Central Karelian Terrane of the Karelian Craton: results of dating zircon from Neoarchean felsic rock of the Kostomuksha Greenstone Belt. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 124–129. doi: 10.17076/geo2150

Funding. This work is a contribution to research by IG KarRC RAS within the theme FMEN-2023-0009 and by IPGG RAS within the theme FMUW-2025-0002.

Архейские кратоны, в том числе Карельский, относятся к числу стабильных структур континентов, однако и они подвержены воздействию разнообразных тектоно-термальных процессов. Последние могут быть связаны

с развивающимися вблизи кратонов орогенами, с влиянием мантийных плюмов, с внедрением интрузий. Тектоно-термальные процессы проявляются в Карельском кратоне в виде наложенных деформаций, метаморфизма,

кристаллизации различных генераций цирконов и других минералов-геохронометров (апатита, монацита, сфена, рутила) [Слабунов и др., 2025а и ссылки в ней]. Так, недавнее изучение цирконов из полосчатых железистых кварцитов (BIF) Костомукшского зеленокаменного пояса позволило установить следующие события, сопровождающиеся образованием новых генераций циркона: 2,74–2,72; 2,65; 2,45–2,41 и 1,89–1,83 млрд лет [Slabunov et al., 2024; Слабунов и др., 2025а]. События $2,46 \pm 0,11$ и $1,87\text{--}1,85$ млрд лет также зафиксированы и U-Pb- и Pb-Pb-изотопными системами апатита из этих пород [Слабунов и др., 2025б].

Для геохронологического доизучения метариолитов (геллефлинты) костомукшской свиты гимольской серии были выделены цирконы из силла (пробы K22-133), залегающего среди сланцев и BIF в карьере «Южный». Именно из этого силла, но из другой его части (карьер «Центральный»), были ранее выделены и изучены цирконы, которые позволили оценить возраст этих субвулканических пород в 2759 ± 9 млн лет [Слабунов и др., 2021].

Цирконы из проб K22-133 представлены прозрачными бледно-розовыми удлинёнными и, реже, короткопризматическими кристаллами с Ку 1:2, 1:3, реже 1:1, размер которых варьирует от 60 до 400 мкм (рис. 1, а, б).

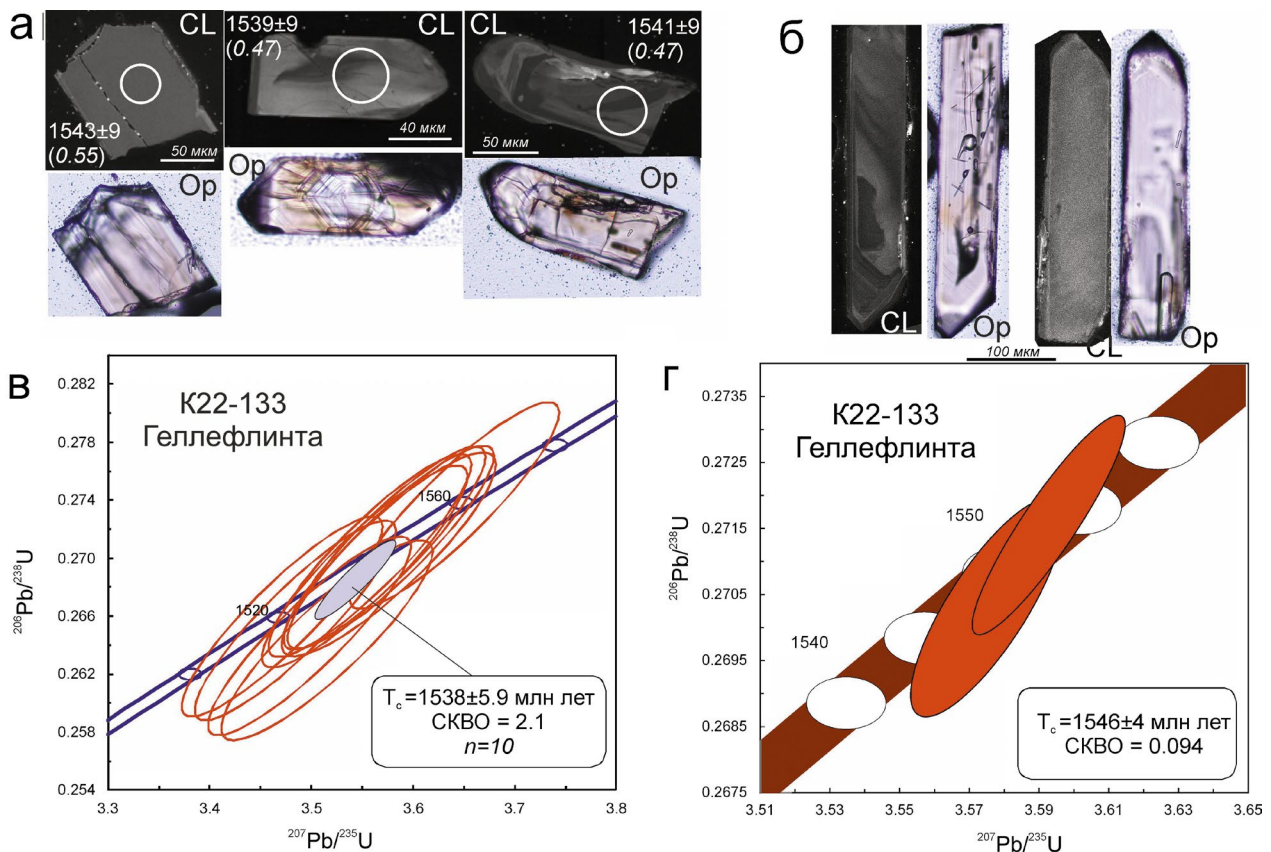


Рис. 1. Микрофотографии кристаллов циркона из силла геллефлинты и результаты геохронологических исследований: а, б – изображение циркона в катодолуминесценции (CL) и проходящем свете (Op) с положением аналитических точек и значениями возраста ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$), млн лет, в скобках – Th/U-отношение: кристаллы циркона, использованные для U-Th-Pb LA-ICP-MS геохронологических исследований (а), U-Pb CA-ID-TIMS геохронологических исследований (б); в, г – диаграммы с конкордией для циркона: U-Th-Pb LA-ICP-MS исследования (в), U-Pb CA-ID-TIMS исследования (г). Tc – конкордантный U-Pb-возраст

Fig. 1. Microphotos of zircon crystals from sill of halleflinta and the results of geochronological studies: а, б – image of zircon in cathodoluminescence (CL) and translucent light (Op), the position of analytical points and $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ age values (Ma), Th/U ratio is shown in parentheses: zircon crystals used for U-Th-Pb LA-ICP-MS geochronological study (а), U-Pb CA-ID-TIMS geochronological study (б); в, г – Concordia diagram for zircon: U-Th-Pb LA-ICP-MS study (в), U-Pb CA-ID-TIMS study (г). Tc – concordant U-Pb age

Степень трещиноватости средняя. Характерно большое количество крупных (до 45 мкм) включений, локализованных как в центральной, так и в краевых частях зерен, некоторые из них имеют вытянутую форму. Включения представлены преимущественно апатитом, калиевым полевым шпатом и кварцем. На CL-изображениях большая часть кристаллов характеризуется однородной структурой, но некоторые имеют слабовыраженную осцилляторную зональность (рис. 1, а).

U-Pb-датирование цирконов проведено методом лазерной абляции LA-ICP-MS в лаборатории Геологического института РАН [Sheshukov et al., 2018]. По результатам датирования в 10 аналитических точках получен конкордантный возраст 1538 ± 9 млн лет (рис. 1, в). В ранее изученной пробе цирконов, отобранных из пробы геллефлинты в северной части этого силла [Слабунов и др., 2021], мезопротерозойские цирконы не отмечены. Поэтому для оценки особенностей распределения в пределах силла этой молодой генерации были выделены и изучены цирконы из еще одной пробы, отобранной примерно в 10 м от первой. По зернам из этой выборки получено 13 аналитических точек. U-Pb-возраст по 10 из них показал конкордантное значение 1535 ± 9 млн лет. Кроме того, в этой партии цирконов установлены единичные мезоархейские (2949 ± 7 , 2885 ± 8 и 2830 ± 8 млн лет) зерна. Такое же по возрасту зерно отмечено в пробе геллефлин-

ты и ранее [Слабунов и др., 2021], но оно было весьма дискордантным ($-5,09\%$).

Крайне важно, что два зерна циркона из пробы K22-133 были датированы U-Pb-методом по единичным зернам (CA-ID-TIMS) в лаборатории Института геологии и геохронологии докембрия РАН [Иванова др., 2021]. По результатам получено конкордантное значение возраста 1546 ± 4 млн лет (СКВО = 0,094, вероятность = 0,76) (рис. 1, г).

Таким образом, в неоархейской геллефлинте, слагающей силл, установлены цирконы с мезопротерозойским возрастом (1546–1535 млн лет). Значение возраста, полученное по единичным зернам с использованием предварительной «химической абразии» (1546 ± 4 млн лет), безусловно, обладает большей точностью, но все оценки, полученные с помощью U-Th-Pb LA-ICP-MS и U-Pb CA-ID-TIMS исследований, в пределах погрешности согласуются. Это означает, что в изученных породах силла в мезопротерозое проявлены термальные процессы, приведшие к кристаллизации цирконов. При этом имеющиеся петрографические (существенная перекристаллизация или изменение минерального состава) и геохимические (аномальные содержания подвижных элементов K, Rb) данные не указывают на наличие такой переработки.

Вместе с тем, проведенные исследования геохимии мезопротерозойских цирконов (рис. 2) показали, что они отличаются от неоархейских. Прежде всего эти отличия заключаются в том,

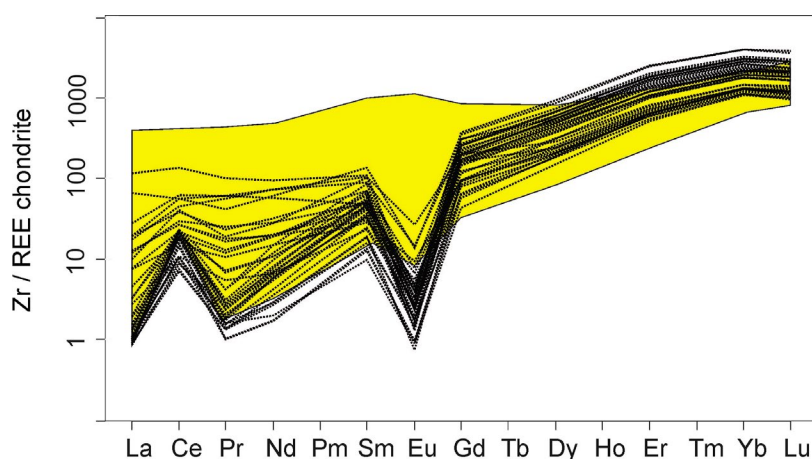


Рис. 2. Спайдерграмма нормированных по хондриту [Nakamura, 1974] содержаний РЗЭ в мезопротерозойских (черные пунктирные линии) и неоархейских (желтое поле [Слабунов и др., 2021]) цирконах из кислых вулканитов (геллефлинты) костомукшской свиты гимольской серии Костомукшского зеленокаменного пояса

Fig. 2. Spidergram for chondrite-normalized [Nakamura, 1974] REE concentrations in the Mesoproterozoic (black broken lines) and Neoarchean (yellow field [Slabunov et al., 2021]) zircons from the felsic volcanics (halleflinta) of the Kostomuksha suite (Gimoly series), Kostomuksha Greenstone Belt

что первые обеднены ЛРЗЭ, характеризуются ярко выраженной положительной аномалией Се и отрицательной Eu. Такие геохимические отличия указывают на то, что мезопротерозойские флюиды существенно отличались от неоархейских. Они, вероятно, обладали большей фугитивностью кислорода [Hoskin, Schaltegger, 2003].

Главные выводы. В центральной части Карельского кратона впервые установлено проявление мезопротерозойского термального события. Оно хорошо коррелируется по возрасту с поздними фазами анортозит-рапакиви-гранитного магматизма (1547–1530 млн лет), который широко проявлен в южной части кратона вдоль его границы со Свекофеннским орогеном [Куликов и др., 2017 и ссылки в ней]. Возможно, именно его влияние локально проявлено в породах центральной части Центрально-Карельского террейна и установлено в силле геллефлинты Костомукшского зеленокаменного пояса.

Авторы благодарят Т. В. Каулину и С. А. Светова за замечания и конструктивную критику в ходе подготовки рукописи, что позволило существенно ее улучшить.

Литература

Иванова А. А., Сальникова Е. Б., Котов А. Б., Плоткина Ю. В., Толмачева Е. В., Сырицо Л. Ф., Бочаров В. Н. U-Pb (ID-TIMS) датирование высокоуранивых метамиктизированных цирконов: новые возможности известных подходов // Петрология. 2021. Т. 29, № 6. С. 656–667. doi: 10.31857/S0869590321060042

Куликов В. С., Светов С. А., Слабунов А. И., Куликова В. В., Полин А. К., Голубев А. И., Горьковец В. Я., Иващенко В. И., Гоголев М. А. Геологическая карта Юго-Восточной Фенноскандии масштаба 1:750 000: новые подходы к составлению // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 2. С. 3–41. doi: 10.17076/geo444

Слабунов А. И., Васильева И. М., Ризванова Н. Г., Кервинен А. В. Геохронология апатита из полосчатых железистых кварцитов Костомукшского зеленокаменного комплекса (первые результаты) // Соотношение времени образования магматических формаций и рудных месторождений в металлогенических провинциях Евразии: Мат-лы IX Рос. конф. по изотопной геохронологии. М., 2025а. С. 194–196.

Слабунов А. И., Нестерова Н. С., Егоров А. В., Кулешевич Л. В., Кевлич В. И. Геохимия, геохронология цирконов и возраст архейской железорудной толщи Костомукшского зеленокаменного пояса Карельского кратона Фенноскандинавского щита // Геохимия. 2021. Т. 66, № 4. С. 291–307. doi: 10.31857/S0016752521040063

Слабунов А. И., Нестерова Н. С., Мудрук С. В., Максимов О. А., Кервинен А. В. Находка неоархейских (2.71 млрд лет) конгломератов в Костомукшском железорудном районе: к вопросу о самой молодой стратотектонической ассоциации архея Карельского кратона // Доклады РАН. Науки о Земле. 2025б. Т. 520, № 1. С. 33–46. doi: 10.31857/S2686739725010041

Hoskin P. W. O., Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis // *Rev. Mineral. Geochem.* 2003. Vol. 53. P. 27–62. doi: 10.2113/0530027

Nakamura N. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1974. Vol. 38. P. 757–775. doi: 10.1016/0016-7037(74)90149-5

Sheshukov V. S., Kuzmichev A. B., Dubenskiy A. S., Okina O. I., Degtyarev K. E., Kanygina N. A., Kuznetsov N. B., Romanjuk T. V., Lyapunov S. M. U-Pb zircon dating by LA-SF-ICPMS at Geological Institute GIN RAS (Moscow) // Book of Abstracts, 10th Int. Conference of the Analysis of Geological and Environmental Materials: Macquarie University, Sydney. 2018. P. 63.

Slabunov A. I., Kervinen A. V., Nesterova N. S., Maksimov O. A., Medvedev P. V. Zircon from banded iron formation as a sensitive indicator of its polychronous background: a case study on the Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton, Fennoscandian Shield // *Int. Geol. Rev.* 2024. Vol. 66, no. 6. P. 1321–1333. doi: 10.1080/00206814.2023.2248501

References

Ivanova A. A., Salnikova E. B., Kotov A. B., Plotkina Yu. V., Tolmacheva E. V., Syritso L. F., Bocharov V. N. U-Pb (ID-TIMS) geochronological studies of high-uranium metamict zircons: new opportunities of familiar approaches. *Petrology*. 2021;29(6):676–685. doi: 10.1134/S0869591121060047

Hoskin P. W. O., Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Rev. Mineral. Geochem.* 2003;53:27–62. doi: 10.2113/0530027

Kulikov V. S., Svetov S. A., Slabunov A. I., Kulikova V. V., Polin A. K., Golubev A. I., Gor'kovets V. Ya., Ivashchenko V. I., Gogolev M. A. Geological map of Southeastern Fennoscandia (scale 1:750 000): a new approach to map compilation. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2017. № 2. P. 3–41. (In Russ.). doi: 10.17076/geo444

Nakamura N. Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1974;38:757–775. doi: 10.1016/0016-7037(74)90149-5

Sheshukov V. S., Kuzmichev A. B., Dubenskiy A. S., Okina O. I., Degtyarev K. E., Kanygina N. A., Kuznetsov N. B., Romanjuk T. V., Lyapunov S. M. U-Pb zircon dating by LA-SF-ICPMS at Geological Institute GIN RAS (Moscow). *Book of Abstracts. 10th Int. Conference of the Analysis of Geological and Environmental Materials: Macquarie University, Sydney*. 2018. P. 63.

Slabunov A. I., Kervinen A. V., Nesterova N. S., Maksimov O. A., Medvedev P. V. Zircon from banded iron formation as a sensitive indicator of its polychronous background: a case study on the Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton, Fennoscandian Shield. *Int. Geol. Rev.* 2024;66 (6):1321–1333. doi: 10.1080/00206814.2023.2248501

Slabunov A. I., Nesterova N. S., Egorov A. V., Kuleshevich L. V., Kevlich V. I. Age of the Archean strata with banded iron formation in the Kostomuksha Greenstone Belt, Karelian Craton, Fennoscandian Shield: constraints on the geochemistry and geochronology of zircons. *Geochem. Int.* 2021;59(4):341–356. doi: 10.1134/S0016702921040066

Slabunov A. I., Nesterova N. S., Mudruk S. V., Maksimov O. A., Kervinen A. V. Finding of Neoarchean

(2.71 Ga) conglomerates in the Kostomuksha Iron Province, Karelian Craton: on the youngest Archean stratotectonic association in the Karelian Craton. *Doklady Earth Sciences.* 2025;520(1):29–42. doi: 10.31857/S26867397250104e9

Slabunov A. I., Vasil'eva I. M., Rizvanova N. G., Kervinen A. V. Apatite geochronology from banded iron formation, Kostomuksha greenstone complex (first results). *Sootnoshenie vremeni obrazovaniya magmaticheskikh formatsii i rudnykh mestorozhdenii v metallogenicheskikh provintsiyakh Evrazii: Mat-ly IX Ros. konf. po izotopnoi geokhronologii = Correlation of forming time of magmatic complexes and ore deposits in the Eurasian metallogenic provinces. Proceedings of the IX Russian conference on isotope geochronology.* Moscow; 2025. P. 194–196. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 25.07.2025; принята к публикации / accepted: 06.08.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Слабунов Александр Иванович

д-р геол.-мин. наук, главный научный сотрудник,
руководитель лаборатории геологии и геодинамики
декабря

e-mail: slabunov@krc.karelia.ru

Кервинен Анна Валерьевна

научный сотрудник

e-mail: kervinen@mail.ru

Сальникова Екатерина Борисовна

канд. геол.-мин. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: katesalnikova@yandex.ru

Ерофеева Ксения Геннадьевна

канд. геол.-мин. наук, научный сотрудник

e-mail: xenin.erofeeva@ya.ru

Дубенский Александр Сергеевич

канд. хим. наук, заведующий лабораторией,
ведущий научный сотрудник

e-mail: alexchem206@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Slabunov, Alexander

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Head of Laboratory,
Chief Researcher

Kervinen, Anna

Researcher

Salnikova, Ekaterina

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

Erofeeva, Ksenia

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

Dubenskiy, Alexander

Cand. Sci. (Chem.), Head of Laboratory,
Leading Researcher