

УДК 55 (084.3)

ПАЛЕОМАГНЕТИЗМ БЕЛОМОРСКОГО ПОДВИЖНОГО ПОЯСА: КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

**Н. В. Лубнина^{1*}, А. И. Слабунов², А. В. Степанова²,
В. П. Воронцова¹, Н. С. Нестерова²**

¹ Геологический факультет МГУ имени М. В. Ломоносова (Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119234), *lubninanv@my.msu.ru

² Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

Проведены детальные петро-палеомагнитные исследования раннепалеопротерозойских метагабброидов Беломорского подвижного пояса (провинции) в интервале от 67° до 63° с. ш. Выделены две метакронные компоненты намагниченности в среднетемпературном (до 450 °С) и высокотемпературном (450–580 °С) интервалах. Высокотемпературная компонента выделяется практически во всех объектах. В северной части эта компонента имеет запад-юго-западное склонение и умеренное положительное наклонение. В каждом объекте эта компонента имеет «банановое» распределение, характерное для химического типа перемагничивания. Основным минералом-носителем этой компоненты намагниченности является однодоменный магнетит, часто «капсулированный» в кварце. Палеомагнитные полюсы, пересчитанные с направлений высокотемпературной компоненты на координаты точек отбора, для каждого объекта близки к палеомагнитному полюсу 2,10 млрд лет для Кольского блока. В южной части Беломорской провинции склонение высокотемпературной компоненты закономерно меняется с запад-северо-западного на север-северо-восточное. Палеомагнитный полюс, пересчитанный с направления этой компоненты на координаты точек отбора, близок к полюсу 1,98–1,90 млрд лет для Карельского кратона. Высокотемпературная компонента намагниченности приобретена породами Беломорской провинции в ходе континентальной субдукции. Установлен тренд «омоложения» этой компоненты с северо-запада на юго-восток. Различные направления высокотемпературной компоненты в разных частях Беломорской провинции указывают на разное время эксгумации отдельных тектонических пластин. Термовязкая среднетемпературная компонента северо-западного склонения и умеренно положительного наклонения имеет кучное распределение во всех изученных объектах. Среднее направление этой компоненты совпадает с направлением «Свекофеннского перемагничивания» для Карельского кратона. Ее образование произошло на заключительном этапе коллизионной стадии формирования Беломорского подвижного пояса 1,86 млрд лет назад.

Ключевые слова: Беломорский подвижный пояс (провинция); палеопротерозой; габброиды; химическое и термовязкое перемагничивание; тренд перемагничивания; коллизия; континентальная субдукция

Для цитирования: Лубнина Н. В., Слабунов А. И., Степанова А. В., Воронцова В. П., Нестерова Н. С. Палеомагнетизм Беломорского подвижного пояса: комплексные исследования и геодинамические следствия // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 98–103. doi: 10.17076/geo2163

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания ИГ КарНЦ РАН по теме FMEN-2023-0009 и геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова № АААА-А16-116033010119-4. Палеомагнитные измерения выполнены в петромагнитной лаборатории геологического факультета МГУ на приборах, закупленных по Программе развития МГУ.

N. V. Lubnina^{1*}, A. I. Slabunov², A. V. Stepanova², V. P. Vorontsova¹, N. S. Nesterova². PALEOMAGNETISM OF THE BELOMORIAN MOBILE BELT: INTEGRATED STUDIES AND GEODYNAMIC CONSEQUENCES

¹ *Lomonosov Moscow State University, Department of Geology (1 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia), *lubninanv@my.msu.ru*

² *Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)*

Detailed petro-paleomagnetic studies of the Early Paleoproterozoic metagabbroids of the Belomorian Mobile Belt (Province) were carried out between 67° and 63° N. Two metachronous magnetization components were distinguished in the medium-temperature (up to 450 °C) and high-temperature (450–580 °C) intervals. The high-temperature component was identified in almost all objects. In the northern part, this component is pointed to WSW and down. It has a ‘banana’ distribution in every object, indicating chemical remagnetization. The main magnetic-carrier mineral is magnetite, ‘encapsulated’ in quartz. The paleomagnetic poles recalculated from this component are close to the paleomagnetic poles of 2.1 Ga for the Kola block. In the southern part of the Belomorian Province, the WNW declination naturally changes to NNE. The paleomagnetic poles are close to the 1.98–1.90 Ga poles for the Karelian Craton. Thus, rocks of the Belomorian Province acquired the high-temperature component during the continental subduction. We revealed a trend for ‘rejuvenation’ of the high-temperature component from NW to SE. The different directions of the high-temperature component in different parts of the Belomorian Province indicate the time of exhumation of individual tectonic blocks. The thermoviscous medium-temperature component demonstrates a NW direction and downward inclination. It has a clustered distribution for all objects. This component has the same average direction as the ‘Svecofennian remagnetization’ for the Karelian Craton. It was formed at the final collisional stage of the Belomorian Province formation at ca 1.86 Ga.

Keywords: Belomorian Mobile Belt (Province); Paleoproterozoic; gabbroids; chemical and thermoviscous remagnetization; trend of remagnetization; collision; continental subduction

For citation: Lubnina N. V., Slabunov A. I., Stepanova A. V., Vorontsova V. P., Nesterova N. S. Paleomagnetism of the Belomorian Mobile Belt: integrated studies and geodynamic consequences. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 98–103. doi: 10.17076/geo2163

Funding. This study was funded from the Russian federal budget through state assignment to the Institute of Geology KarRC RAS (FMEN-2023-0009) and Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University (АААА-А16-116033010119-4). Paleomagnetic measurements were carried out at MSU Petromagnetic Laboratory using equipment purchased under MSU Development Program.

Беломорская провинция (БП), или Беломорский подвижный пояс Фенноскандинавского щита является одним из важнейших в мире полигонов для исследования ранней истории Земли (рис.), поскольку в его строении принимают участие как типичные для раннего докембрия комплексы (глубокометаморфизованные архейские ТТГ, вулканиты и осадки, протерозойские габбро и граниты), так и уникальные (архейские и палеопротерозойские эклогиты, фрагменты архейских офиолитов) [Слабунов, 2008, 2022]. Весьма ценную информацию для понимания палеопротерозойской истории формирования БП несут палеомагнитные данные [Лубнина и др., 2022]. В частности, рассматриваемые в статье новые материалы важны для тестирования существующих [Балаганский и др., 2016; Lahtinen, Nuhma, 2019; Слабунов и др., 2021; Li et al., 2025] геодинамических моделей эволюции БП.

Эволюция земной коры БП в палеопротерозое (2,50–1,80 млрд лет) включала следующие события [Балаганский и др., 2016; Слабунов и др., 2021 и ссылки в ней]:

1) около 2,50–2,10 млрд лет: воздействие мантийных плюмов на континентальную кору восточной части Фенноскандинавского щита, в результате чего сформировались рифтогенные структуры и многочисленные интрузии габброидов, в том числе в БП;

2) в среднем палеопротерозое в результате континентального рифтогенеза и спрединга образовался Лапландско-Кольский океан;

3) 1,98–1,91 млрд лет: субдукция коры Лапландско-Кольского океана с формированием островодужных комплексов (слагают Лапландский гранулитовый пояс, Умбинский и Терский террейны и частично террейны Инари и Стрельнинский), на заключительных стадиях, вероятно, проходит в режиме континентальной субдукции, в которую вовлечена литосфера БП;

4) 1,94–1,88 млрд лет: Лапландско-Кольская орогения как результат коллизии Мурманского и Карельского кратонов и совокупность тектоно-термальных процессов в Беломорской и Кольской провинциях;

5) 1,89–1,75 млрд лет: постколлизийные процессы, коллапс Лапландско-Кольского коллизийного орогена, завершение эксгумации.

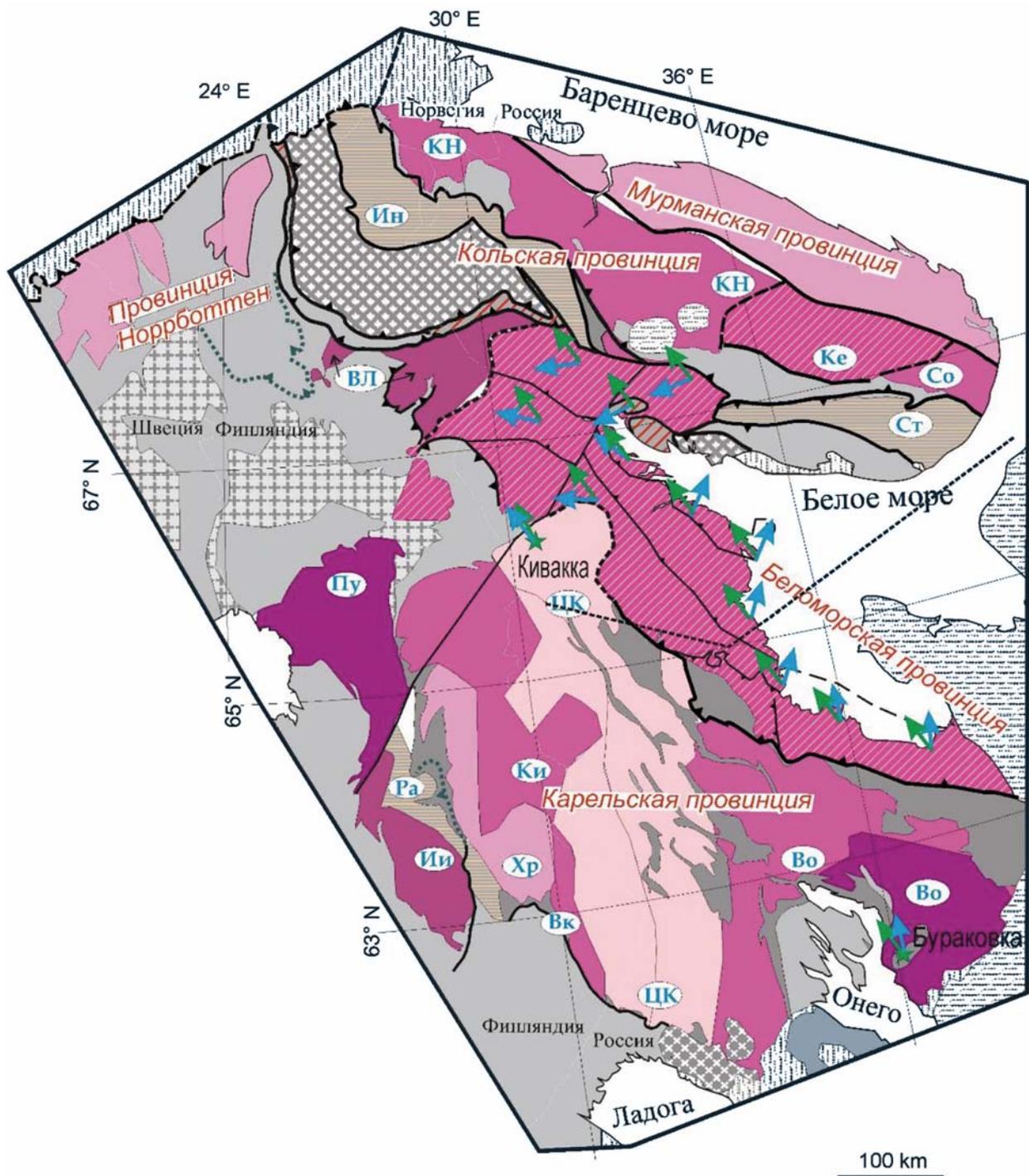
Для определения пространственного распределения вторичных (перемагничивающих) компонент намагниченности были детально изучены палеопротерозойские (2,40–2,45 млрд лет) габброиды [Stepanova et al., 2022] вдоль траверса Апатиты – Петрозаводск,

который пересекает БП с северо-востока на юго-запад под острым углом, и в южном Беломорье на островах Онежской губы Белого моря между г. Беломорском на севере и г. Онега на юге (рис.). Полученные палеомагнитные направления сопоставлялись с таковыми для Кивакской и Бураковской расслоенных интрузий (2,45 млрд лет) и с Шальской дайкой (2,50 млрд лет) Карельского кратона [Mertanen et al., 2006; Shcherbakova et al., 2017; Lubnina et al., 2025]. Также для анализа использованы палеомагнитные данные, полученные ранее для объектов Кольской провинции [Fedotova et al., 1999].

Петро- и палеомагнитные исследования проводились в петромагнитной лаборатории геологического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова по стандартной методике [Храмов и др., 1982].

Во всех изученных палеопротерозойских габброидах БП установлены две метакронные компоненты намагниченности (рис.). Высокотемпературная компонента выделяется практически во всех объектах. В северной части эта компонента имеет запад-юго-западное склонение и умеренное положительное наклонение (рис.). Палеомагнитные полюсы, пересчитанные с направлений высокотемпературной компоненты на координаты точек отбора, для каждого объекта близки к палеомагнитному полюсу 2,10 млрд лет для Кольского блока [Fedotova et al., 1999; Lubnina et al., 2016]. В южной части БП склонение высокотемпературной компоненты меняется с запад-северо-западного на север-северо-восточное (рис.). Палеомагнитный полюс, пересчитанный с направления этой компоненты на координаты точек отбора, близок к полюсу 1,98–1,90 млрд лет для Карельского кратона [Lubnina et al., 2016; Лубнина и др., 2022].

Среднетемпературная компонента намагниченности имеет северо-западное склонение и умеренное положительное наклонение (рис.). Компонента монополярна. Для каждого объекта среднее направление имеет кучное распределение (α_{95} не превышает 5–7°), что свидетельствует о термовязкой природе этой компоненты намагниченности (образование происходит при быстром выводе пород на поверхность без изменения состава магнитной фракции). Палеомагнитный полюс, пересчитанный с направления среднетемпературной компоненты намагниченности, близок к полюсу «Свекофеннского перемагничивания» 1,86 млрд лет [Mertanen et al., 2006; Lubnina et al., 2025].



Направления выделенных компонент намагниченности на схеме геологического строения архея Фенноскандинавского щита [по: Слабунов и др., 2011].

Стрелками показаны склонения метакронных компонент намагниченности: голубая – высокотемпературной (1,98–1,95 млрд лет), зеленая – среднетемпературной (1,88 млрд лет). Буквами на схеме обозначены террейны: Вк – Вибеки, ВЛ – Восточно-Лапландский, Во – Водлозерский, Ии – Иисалми, Ин – Инари, Ке – Кейвский, Ки – Кианта, КН – Кольско-Норвежский, Пу – Пудасъярвинский, Ра – Раутаваара, Со – Сосновский, Ст – Стрельнинский, Хр – Хиринсалми, ЦК – Центральнo-Карельский

Directions of the separated magnetization components on the diagram of the geological structure of the Archean of the Fennoscandian Shield after [Slabunov et al., 2011].

Arrows show the declinations of the metachronous components of magnetization: blue – high-temperature (1.98–1.95 Ga), green – middle-temperature (1.88 Ga). The letters on the diagram indicate the terrains: Вк – Vieki, ВЛ – East-Lapladian, Во – Vodlozero, Ии – Iisalmi, Ин – Inari, Ке – Keiva, Ки – Kianta, КН – Kola-Norwegian, Пу – Pudasjarvi, Ра – Rautavaara, Со – Sosnovsky, Ст – Strel'na, Хр – Khirinsalmi, ЦК – Central Karelian

Таким образом, высокотемпературная компонента намагниченности формировалась, как можно полагать, в ходе палеопротерозойской континентальной субдукции пород БП. Различные ее направления в разных частях БП указывают на разное время эксгумации отдельных тектонических пластин. Образование средне-температурной компоненты намагниченности произошло на завершающей коллизионной стадии формирования БП 1,86 млрд лет.

Литература

Балаганский В. В., Горбунов И. А., Мудрук С. В. Палеопротерозойские Лапландско-Кольский и Свекофеннский орогены (Балтийский щит) // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. № 3. С. 5–11.

Гончаров Г. И., Комиссарова Р. А., Писаревский С. А., Погарская И. А., Ржевский Ю. С., Родионов В. П., Слауцитайс И. П., Храмов А. Н. Палеомагнитология. Л.: Недра, 1982. 312 с.

Лубнина Н. В., Слабунов А. И., Степанова А. В., Нестерова Н. С. Беломорский подвижный пояс в составе суперконтинента Нуна/Колумбия: новые палеомагнитные и геологические данные // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 5. С. 85–90. doi: 10.17076/geo1663

Слабунов А. И. Геология и геодинамика архейских подвижных поясов (на примере Беломорской провинции Фенноскандинавского щита). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2008. 298 с.

Слабунов А. И. Геология и геодинамика ранней Земли: основные проблемы и пути решения // Современные проблемы наук о Земле: Тезисы докл. все-рос. науч. конф. М.: РАН, 2022. С. 62–63.

Слабунов А. И., Балаганский В. В., Щипанский А. А. Мезоархей-палеопротерозойская эволюция земной коры Беломорской провинции Фенноскандинавского щита и тектоническая позиция эклогитов // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 5. С. 648–675. doi: 10.15372/GiG2021116

Слабунов А. И., Хелтта П., Шаров Н. В., Нестерова Н. С. 4-D модель формирования земной коры Фенноскандинавского щита в архее как синтез современных геологических данных // Геология Карелии: от архея до наших дней: Мат-лы конф., посвященной 50-летию ИГ КарНЦ РАН. Петрозаводск, 2011. С. 13–21.

Fedotova M. A., Khramov A. N., Pisakin B. N., Priyatkin A. A. Early Proterozoic palaeomagnetism: new results from the intrusives and related rocks of the Karelian, Belomorian and Kola provinces, eastern Fennoscandian Shield // *Geop. J. Int.* 1999. Vol. 137. P. 691–712. doi: 10.1046/j.1365-246x.1999.00817.x

Lahtinen R., Huhma H. A revised geodynamic model for the Lapland-Kola Orogen // *Precamb. Res.* 2019. Vol. 330. P. 1–19. doi: 10.1016/j.precamres.2019.04.022

Li X., Zhang L., Wei C., Zhang G. Orosirian cold eclogite from Baltica marks the onset of modern plate tectonics // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2025. Vol. 663. Art. 119417. doi: 10.1016/j.epsl.2025.119417

Lubnina N. V., Bychkov A. Yu., Tarasov N. A., Osadchii V. O., Miklyaeva E. P. Stages of the Paleoproterozoic chemical remagnetization of the Kivakka layered intrusion and its geodynamic setting during the breakup of the Precambrian supercontinents // *Moscow Univ. Geol. Bull.* 2025. Vol. 80, no. 1. P. 17–27. doi: 10.3103/S0145875225700127

Lubnina N. V., Slabunov A. I., Stepanova A. V., Bubnov A. Yu., Kosevich N. I., Novikova M. A., Tarasov N. A. The Paleoproterozoic remagnetization trend in rocks of the Belomorian Mobile Belt: paleomagnetic and geologic evidence // *Moscow Univ. Geol. Bull.* 2016. Vol. 71, no. 5. P. 311–322. doi: 10.3103/S0145875216050082

Mertanen S., Vuollo J. I., Huhma H., Arestova N. A., Kovalenko A. Early Paleoproterozoic–Archean dykes and gneisses in Russian Karelia of the Fennoscandian Shield – new paleomagnetic, isotope age and geochemical investigations // *Precamb. Res.* 2006. Vol. 144. P. 239–260.

Shcherbakova V. V., Lubnina N. V., Shcherbakov V. P., Zhidkov G. V., Tsel'movich V. A. Paleointensity determination on Paleoarchean dikes within the Vodlozerskii Terrane of the Karelian Craton // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth.* 2017. Vol. 53, no. 5. P. 714–732. doi: 10.1134/S1069351317050111

Stepanova A. V., Stepanov V. S., Larionov A. N., Salnikova E. B., Samsonov A. V., Azimov P., Egorova S. V., Babarina I. I., Larionova Yu. O., Sukhanova M. A., Kervinen A. V., Maksimov O. A. Relicts of Palaeoproterozoic LIPs in the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield: barcode reconstruction for a deeply eroded collisional orogen // *Geological Society, London, Special Publications. Large Igneous Provinces and their Plumbing Systems* / Srivastava R. K., Ernst R. E., Buchan K. L., De Kock M. (eds). 2022. Vol. 518(1). P. 101–128. doi: 10.1144/SP518-2021-30

References

Balagansky V. V., Gorbunov I. A., Mudruk S. V. Paleoproterozoic Lapland-Kola and Svecofennian orogens (Baltic Shield). *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Bulletin of the Kola Scientific Center of RAS.* 2016;3:5–11. (In Russ.)

Fedotova M. A., Khramov A. N., Pisakin B. N., Priyatkin A. A. Early Proterozoic palaeomagnetism: new results from the intrusives and related rocks of the Karelian, Belomorian and Kola provinces, eastern Fennoscandian Shield. *Geop. J. Int.* 1999;137:691–712. doi: 10.1046/j.1365-246x.1999.00817.x

Goncharov G. I., Komissarova R. A., Pisarevskii S. A., Pogarskaya I. A., Rzhavskii Yu. S., Rodionov V. P., Slautsitaits I. P., Khramov A. N. Paleomagnetology. Leningrad: Nedra; 1982. 312 p. (In Russ.)

Lahtinen R., Huhma H. A revised geodynamic model for the Lapland-Kola Orogen. *Precamb. Res.* 2019;330:1–19. doi: 10.1016/j.precamres.2019.04.022

Li X., Zhang L., Wei C., Zhang G. Orosirian cold eclogite from Baltica marks the onset of modern plate tectonics. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2025;663:119417. doi: 10.1016/j.epsl.2025.119417

Lubnina N. V., Bychkov A. Yu., Tarasov N. A., Osadchii V. O., Miklyaeva E. P. Stages of the Paleoproterozoic chemical remagnetization of the Kivakka layered intrusion and its geodynamic setting during the breakup of the Precambrian supercontinents. *Moscow Univ. Geol. Bull.* 2025;80(1):17–27. doi: 10.3103/S0145875225700127

Lubnina N. V., Slabunov A. I., Stepanova A. V., Bubnov A. Yu., Kosevich N. I., Novikova M. A., Tarasov N. A. The Paleoproterozoic remagnetization trend in rocks of the Belomorian Mobile Belt: paleomagnetic and geologic evidence. *Moscow Univ. Geol. Bull.* 2016;71(5):311–322. doi: 10.3103/S0145875216050082

Lubnina N. V., Slabunov A. I., Stepanova A. V., Nesterova N. S. Belomorian Mobile Belt as a part of supercontinent Nuna/Columbia: new paleomagnetic and geological data. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2022;5:85–90. (In Russ.). doi: 10.17076/geo1663

Mertanen S., Vuollo J. I., Huhma H., Arestova N. A., Kovalenko A. Early Paleoproterozoic–Archean dykes and gneisses in Russian Karelia of the Fennoscandian Shield – new paleomagnetic, isotope age and geochemical investigations. *Precamb. Res.* 2006;144:239–260.

Shcherbakova V. V., Lubnina N. V., Shcherbakov V. P., Zhidkov G. V., Tsel'movich V. A. Paleointensity determination on Paleoproterozoic dikes within the Vodlozerskii Terrane of the Karelian Craton. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth.* 2017;53(5):714–732. doi: 10.1134/S1069351317050111

Slabunov A. I. Geology and geodynamics of the Archean mobile belts (on the example of the Belomorian

Province of the Fennoscandian Shield). Petrozavodsk: KarRC RAS; 2008. 298 p. (In Russ.)

Slabunov A. I. Geology and geodynamics of the Early Earth: main problems and solutions. *Sovremennye problemy nauk o Zemle: Tezisy dokl. vseros. nauch. konf. = Modern problems of Earth Sciences: Proceedings of the All-Russian conf.* Moscow: RAN; 2022. P. 62–63. (In Russ.)

Slabunov A. I., Balagansky V. V., Schipansky A. A. MesoArchean–Paleoproterozoic evolution of the Earth crust of the Belomorian Province of the Fennoscandian Shield and tectonic position of the eclogites. *Russian Geology and Geophysics.* 2021;62(5):525–546. doi: 10.2113/RGG20204266

Slabunov A. I., Höltta P., Sharov N. V., Nesterova N. S. 4-D model of formation of the Earth's crust of the Fennoscandian Shield in the Archean as a synthesis of modern geological data. *Geologiya Karelii: ot arkheya do nashikh dnei: Mat-ly konf., posvyashch. 50-letiyu IG KarNTs RAN = Geology of Karelia: from the Archean to the present day: Proceedings of the conf., dedicated to the 50th anniversary of the Institute of Geology KarRC RAS.* Petrozavodsk; 2011. P. 13–21. (In Russ.)

Stepanova A. V., Stepanov V. S., Larionov A. N., Salnikova E. B., Samsonov A. V., Azimov P., Egorova S. V., Babarina I. I., Larionova Yu. O., Sukhanova M. A., Kervinen A. V., Maksimov O. A. Relicts of Palaeoproterozoic LIPs in the Belomorian Province, eastern Fennoscandian Shield: barcode reconstruction for a deeply eroded collisional orogeny. *Geological Society, London, Special Publications. Large Igneous Provinces and their Plumbing Systems.* 2022;518(1):101–128. doi: 10.1144/SP518-2021-30

Поступила в редакцию / received: 28.07.2025; принята к публикации / accepted: 08.08.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Лубнина Наталия Валерьевна

д-р геол.-мин. наук, профессор

e-mail: lubninanv@my.msu.ru

Слабунув Александр Иванович

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

e-mail: slabunov@krc.karelia.ru

Степанова Александра Владимировна

канд. геол.-мин. наук, заместитель директора по НИР, ведущий научный сотрудник

e-mail: stepanov@krc.karelia.ru

Воронцова Валентина Павловна

аспирант

e-mail: val_nett@mail.ru

Нестерова Наталья Сергеевна

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

e-mail: nest345@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Lubnina Natalia

Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor

Slabunov, Alexander

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

Stepanova, Alexandra

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

Vorontsova, Valentina

Doctoral Student

Nesterova, Natalya

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