

УДК 552.48+551.2 (470.22)

ДВА ЭТАПА НЕОАРХЕЙСКОГО ГРАНУЛИТОВОГО МЕТАМОРФИЗМА В ВОКНАВОЛОКСКОМ КОМПЛЕКСЕ (ФЕННОСКАНДИНАВСКИЙ ЩИТ)

О. А. Максимов*, **А. М. Лезжов**, **А. И. Слабунов**, **О. С. Сибелев**

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

Определение особенностей метаморфической эволюции докембрийских гранулитовых комплексов имеет важное значение для геодинамических реконструкций ранних этапов становления земной коры. В северной части Центрально-Карельского террейна Карельского кратона известен архейский Вокнаволоцкий гранулитовый комплекс (ВГК): здесь реликты неоархейских эндербитов, чарнокитов и двупироксеновых кристаллических сланцев сохранились среди гнейсов, гранитов и амфиболитов. Геологические, петрологические и геохронологические исследования указывают на существование в составе комплекса двух разновозрастных (2,76–2,74 и 2,72–2,70 млрд лет) субкомплексов: южного и северного. Возраст (по цирконам) южного субкомплекса оценивается в 2760–2740, а северного – в 2716–2704 млн лет. В составе северного субкомплекса встречаются крупные массивы гранулитов, тогда как в южном преобладают небольшие тела с реликтами гранулитовых минеральных ассоциаций, сохранившихся в интенсивно диафорированных биотитовых гнейсах. РТ-условия образования гранулитовых парагенезисов для южного и северного субкомплексов близки: $P = 3\text{--}7$ кбар, $T = 750\text{--}810$ °C (то есть от низко- до умереннобарической гранулитовой фации). Ретроградные изменения пород при снижении РТ-условий сопровождаются появлением актинолита, эпидота, карбоната, хлорита и титанита. Возрасты гранулитов коррелируются с проявлениями субдукционных вулканитов в сопряженных зеленокаменных поясах: южный субкомплекс ВГК – с вулканитами гимольской серии Костомукшского зеленокаменного пояса, а северный – с дацитами-андезидацитами Хедозерско-Большозерского. Имеющиеся данные позволяют предполагать, что рассматриваемые гранулиты формировались в надсубдукционных зонах разновозрастных островодужных систем.

Ключевые слова: метаморфизм; гранулит; эндербит; архей; Фенноскандинавский щит

Для цитирования: Максимов О. А., Лезжов А. М., Слабунов А. И., Сибелев О. С. Два этапа неоархейского гранулитового метаморфизма в Вокнаволоцком комплексе (Фенноскандинавский щит) // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 2. С. 124–128. doi: 10.17076/geo2161

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

O. A. Maksimov*, A. M. Lezzhov, A. I. Slabunov, O. S. Sibelev. TWO STAGES OF NEOARCHEAN GRANULITE METAMORPHISM IN THE VOKNAVOLOK COMPLEX (FENNOSCANDIAN SHIELD)

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

Unveiling the distinctive features of the metamorphic evolution of Precambrian granulite complexes is essential for the geodynamic reconstruction of early stages in Earth's crust formation. Located in the northern Central Karelian terrane of the Karelian Craton is the Archean Voknavolok granulite complex (VGC), where relics of Neoproterozoic enderbites, charnockites and biopyroxene crystalline schist are preserved among gneisses, granites and amphibolites. Geological, petrological and geochronological studies show that this complex is split up into two variably aged (2.76–2.74 and 2.72–2.70 Ga) subcomplexes: southern and northern. The zircon age of the southern subcomplex is 2760–2740 Ma and that of the northern subcomplex is 2716–2704 Ma. The northern subcomplex comprises large granulite massifs, while the southern subcomplex is dominated by small bodies with relics of granulitic mineral associations persisting in highly diaphthorated biotite gneisses. The PT-conditions for the formation of granulitic parageneses in the southern and northern subcomplexes are similar: $P = 3–7$ kbar, $T = 750–810$ °C (low- to moderate-pressure granulite facies). As the PT-conditions are relaxed, the retrograde metamorphism of the rocks is accompanied by the formation of actinolite, epidote, carbonate, chlorite, and titanite. The ages of the granulites are correlated with the occurrence of subduction volcanics in the associated greenstone belts: the southern subcomplex of the VGC is correlated with the Gimoly Group volcanics of the Kostomuksha Greenstone Belt and the northern subcomplex with the dacite-andesite-dacite of the Khedozero-Bolshozero Belt. Available data suggest that the granulites were formed in the suprasubduction zones of variably Neoproterozoic island-arc systems.

Keywords: metamorphism; granulite; enderbite; Archean; Fennoscandian Shield

For citation: Maksimov O. A., Lezzhov A. M., Slabunov A. I., Sibelev O. S. Two stages of Neoproterozoic granulite metamorphism in the Voknavolok complex (Fennoscandian Shield). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 2. P. 124–128. doi: 10.17076/geo2161

Funding. The study was funded within state assignment to the Karelian Research Centre RAS (FMEN-2023-0009).

В восточной части Фенноскандинавского щита широко распространены архейские гранулитовые комплексы, пять из которых установлены в пределах Карельского кратона: Вокнаволоцкий, Тулосский, Онежский, Варпаисъярвинский и Пудасъярвинский [Ранний..., 2005; Король, 2011; Слабунов и др., 2015]. Породы, слагающие перечисленные комплексы, преимущественно представлены неархейскими эндербитами, чарнокитами и кристаллическими сланцами (двупироксен-амфиболовых гранулитов основного и среднего состава), которые, однако, претерпели значительные вторичные изменения (диафторез).

Вокнаволоцкий гранулитовый комплекс (ВГК) располагается в северной части Центрально-Карельского террейна Карельского кратона [Куликов и др., 2017] и слагает структуру, известную как Вокнаволоцкий блок [Костомукшский..., 2015]. ВГК в юго-восточной

части сочленяется по системе разломов с Костомукшским зеленокаменным поясом (КЗП), а в восточной – с продолжением Хедозерско-Большозерского зеленокаменного пояса (ХБЗП). В составе обоих поясов установлены неархейские кислые вулканиты субдукционной природы: в КЗП это 2760–2740 млн лет геллефлинта гимольской серии [Слабунов и др., 2021], а в ХБЗП – 2712–2704 млн лет дациты-андезидациты [Мыскова и др., 2020].

В восточной части Вокнаволоцкого комплекса распространены биотитовые и амфиболовые гнейсы по гранулитам, а также плагиограниты и граниты, амфиболиты. Все породы характеризуются интенсивно проявленными процессами диафтореза, в результате чего гранулитовые минеральные ассоциации сохранились в локальных участках. Преимущественно это безгранатовые двупироксен-амфиболовые, клинопироксен-амфиболовые или

ортопироксен-амфиболовые минеральные ассоциации. Во многих исследованных образцах гранулитов отмечается равновесность пироксена и роговой обманки. В диафторированных гранулитах поздний амфибол замещает первичные минералы. В редких случаях отмечается противоположный процесс амфиболизации, выраженный в образовании пироксеновых ассоциаций по высокотемпературным амфиболам.

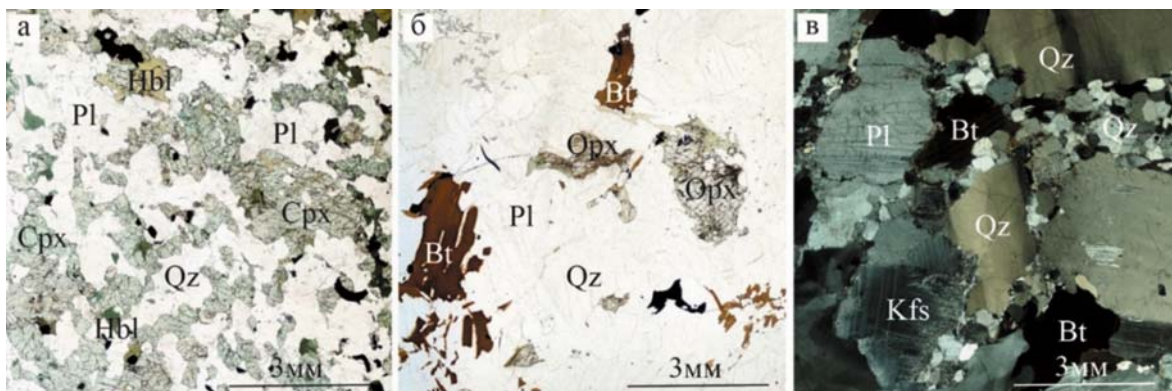
В ходе настоящего исследования на основе петрологических и геохронологических данных выделены южная и северная группы гранулитов Вокнаволоцкого комплекса, среди которых установлены участки развития основных гранулитов $Орх-Срх-Hbl-Pl-Qz-Bt \pm Ttn \pm Ilm \pm Crb \pm Mgt$ (сокращения минералов по [Warr, 2021]), эндербитов $Орх-Pl-Qz-Bt \pm Kfs \pm Ep \pm Chl$ и чарнокитов $Bt-Pl-Qz-Kfs \pm Орх \pm Crb \pm Ep \pm Chl$ (рис.). Ранними минералами в перечисленных ассоциациях являются клино- и ортопироксен, полевой шпат, кварц, роговая обманка, биотит. На ретроградном этапе образуются актинолит, эпидот, карбонат, хлорит и титанит. Гиперстен встречается в виде ксеноморфных зерен, часто с амфиболовыми и хлоритовыми каймами обрастания на границе зерен. Диопсид обнаружен в срастаниях с ортопироксеном и амфиболом, чаще обрастает более поздним амфиболом, но в некоторых случаях замещает амфибол и содержит его включения. Среди амфиболов выделяются первичная ассоциация, представленная крупными зернами магнезиальной, железистой роговой обманки, паргаситом, и поздняя – актинолитом в каймах вокруг роговой обманки. Плагиоклаз распространен в виде крупных гипидиоморфных зерен и по составу варьирует от альбита до андезина.

Термобарометрия. Для определения РТ-параметров метаморфизма использовались $Орх-Срх$ [Wood, Banno, 1973], $Hbl-Pl$ [Holland, Blundy, 1994] термометры и $Hbl-Pl$ барометр [Bhadra, Bhattacharya, 2007], встроенные в программном комплексе РТ_Quick [Симаков, Доливо-Добровольский, 2009].

В южных гранулитах образование раннего $Bt+Hbl+Pl+Qz(\pm Срх, Орх)$ минерального парагенезиса происходило при $P = 3-5$ кбар и $T = 750-810$ °С. Предыдущие РТ-оценки для гранулитов южной части отличаются более низкими значениями $P = 1,8-4$ кбар и $T = 665-692$ °С [Самсонов и др., 2001].

Для амфиболсодержащих ассоциаций эндербитов северного субкомплекса установлены низкobarические РТ-условия образования в области гранулитовой фации при $P = 4-5,5$ кбар и $T = 750$ °С. Однако образование дупироксен-амфиболовых гранулитов происходило при умеренных $P = 6-7$ кбар и $T = 750$ °С гранулитовой-амфиболитовой фации. Используемые в расчетах минеральные парагенезисы пород, вероятно, не фиксируют пиковые значения гранулитового метаморфизма в Вокнаволоцком комплексе, а отражают ранние стадии ретроградных изменений пород в условиях гранулитовой фации.

Геохронология. По результатам U-Th-Pb-датирования цирконов возраст южных эндербитов и гранулитов оценивается в 2761 ± 15 (SHRIMP-II) и 2736 ± 18 (LA-ICP-MS) млн лет соответственно [Слабунов и др., 2015, 2024]. Следует также отметить, что в основных гранулитах установлены мезоархейские (2880 млн лет) цирконы протолита и неоархейские (2680 млн лет) цирконы поздней фазы метаморфизма [Слабунов и др., 2024].



Породы южного субкомплекса Вокнаволоцкого комплекса: а – основной гранулит, б – эндербит, в – чарнокит (а, б – изображения в проходящем свете с одним поляризатором, в – с анализатором)

Rocks of the southern part of the Voknavolok complex: а – mafic granulites, б – enderbites, в – charnockites (а, б – images in transmitted light, в – with an analyzer)

При этом для северных эндербитов и основных гранулитов установлены более молодые возрасты: 2716 ± 9 и 2704 ± 9 (SHRIMP-II) млн лет соответственно [Костомукшский..., 2015; Слабунов и др., 2015].

Таким образом, в составе ВГК выделены два разновозрастных (2,76–2,74 и 2,72–2,70 млрд лет) субкомплекса гранулитов. Обе группы пород имеют схожие минералого-петрографические характеристики и формировались в области низко- и умереннобарической гранулитовой фации. Предполагается [Слабунов и др., 2023], что оба субкомплекса гранулитов образовались в надсубдукционной обстановке, но в различных неоархейских субдукционных системах.

Литература

Костомукшский рудный район (геология, глубинное строение и минерагения) / Отв. ред. В. Я. Горьковец, Н. В. Шаров. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. 322 с.

Король Н. Е. Процессы поздней изофациальной перекристаллизации в гранулит-эндербит-чарнокитовых комплексах Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 14. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 8–32.

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

Мыскова Т. А., Милькевич Р. И., Львов П. А., Житникова И. А. Неоархейские вулканы Хедозеро-Большозерской зеленокаменной структуры Центральной Карелии: состав, возраст и тектоническая обстановка // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2020. Т. 28, № 2. С. 3–32. doi: 10.31857/S0869592X20020040

Ранний докембрий Балтийского щита / Под ред. В. А. Глебовицкого. СПб.: Наука, 2005. 711 с.

Самсонов А. В., Берзин Р. Г., Заможняя Н. Г., Щипанский А. А., Бибикина Е. В., Кирилова Т. И., Конилов А. Н. Процессы формирования раннедокембрийской коры Северо-Западной Карелии, Балтийский щит: результаты геологических, петрологических и глубинных сейсмических (профиль 4В) исследований. Глубинное строение и эволюция земной коры восточной части Фенноскандинавского щита: профиль Кемь – Калевала. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. С. 109–143.

Симаков С. К., Доливо-Добровольский Д. В. Компьютерная программа PTQuick. Версия 1.4. 2009. URL: <http://www.dimadd.ru/ru/Programs/ptquick> (дата обращения: 07.07.2025).

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., Медведев П. В., Нестерова Н. С., Мудрук С. В., Максимов О. А., Кервинен А. В., Исаченко А. А. Отчет Российского научного фонда «Геодинамические обстановки ранней Земли и архейские полосчатые железистые кварциты» (итоговый) № 22-17-00026. Петрозаводск, 2024.

Слабунов А. И., Володичев О. И., Король Н. Е., Сибелев О. С., Бережная Н. Г., Ларионов А. Н. Архейские гранулитовые комплексы Карельского кратона: петрология, геохронология, геодинамика // Петрография магматических и метаморфических горных пород: Мат-лы XII Всерос. петрограф. совещания. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. С. 503–506.

Слабунов А. И., Максимов О. А., Сибелев О. С. Неоархейская надсубдукционная система (на примере Костомукшской и Вокнаволоксской структур Карельского кратона) // В кильватере большого корабля: современные проблемы магматизма, метаморфизма и геодинамики: Мат-лы IV конф., посв. 90-летию со дня рождения заслуж. проф. МГУ Л. Л. Перчука. Черноголовка, 2023. С. 45.

Bhadra S., Bhattacharya A. The barometer tremolite + tschermakite + 2 albite = 2 pargasite + 8 quartz: constraints from experimental data at unit silica activity, with application to garnet-free natural assemblages // *Am. Mineral.* 2007. Vol. 92(4). P. 491–502. doi: 10.2138/am.2007.2067

Holland T., Blundy J. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1994. Vol. 116(4). P. 433–447. doi: 10.1007/BF00310910

Warr L. N. IMA-CNMNC approved mineral symbols // *Mineral. Mag.* 2021. Vol. 85. P. 291–320. doi: 10.1180/mgm.2021.43

Wood B. J., Banno S. Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1973. Vol. 42(2). P. 109–124.

References

Bhadra S., Bhattacharya A. The barometer tremolite + tschermakite + 2 albite = 2 pargasite + 8 quartz: constraints from experimental data at unit silica activity, with application to garnet-free natural assemblages. *Am. Mineral.* 2007;92(4):491–502. doi: 10.2138/am.2007.2067

Glebovitsky V. A. (ed.). Early Precambrian of the Baltic Shield. St. Petersburg: Nauka; 2005. 711 p. (In Russ.)

Gor'kovets V. Ya., Sharov N. V. (eds). Kostomuksha ore district: geology, deep structure, and metallogeny. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015; 322 p. (In Russ.)

Holland T., Blundy J. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1994;116(4):433–447. doi: 10.1007/BF00310910

Korol' N. E. Late isofacies recrystallization processes in granulite-enderbite-charnockite complexes in Karelia. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii = Geology and*

Useful Minerals of Karelia. Iss. 14. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2011. P. 8–32. (In Russ.)

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;2:3–41. (In Russ.). doi: 10.17076/geo444

Myskova T. A., Milkevich R. I., Lvov P. A., Zhitnikova I. A. Neoarchean volcanites of the Khedozero-Bolshozero greenstone structure (Central Karelia): composition, age, and tectonic setting. *Stratigraphy and Geological Correlation*. 2020;28(2):107–134. doi: 10.1134/S0869593820020045

Samsonov A. V., Berzin R. G., Zamozhnyaya N. G., Shchipanskii A. A., Bibikova E. V., Kirnozova T. I., Konilov A. N. Formation of the Early Precambrian crust of North-Western Karelia, the Baltic Shield: results of geological, petrological, and deep seismic (profile 4B) studies. The deep structure and evolution of the Earth's crust of the eastern part of the Fennoscandian Shield: the Kem – Kalevala profile. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2001. P. 109–143. (In Russ.)

Simakov S. K., Dolivo-Dobrovolskiy D. V. The PTQuick computer program. Version 1.4. 2009. URL: <http://www.dimadd.ru/ru/Programs/ptquick> (accessed: 07.07.2025).

Slabunov A. I., Maksimov O. A., Sibelev O. S. The Neoarchean suprasubduction system (on the example of the Kostomuksha and Voknavolok structures of the Karelian Craton). *V kil'vatere bol'shogo korablya: sovremennye problemy magmatizma, metamorfizma i geodinamiki: Materialy IV konf., posv. 90-letiyu so dnya*

rozheniya zaslužennogo prof. MGU L. L. Perchuka = In the wake of a large ship: modern problems of magmatism, metamorphism and geodynamics: Proceedings of the IV conf. dedicated to the 90th anniversary of the birth of L. L. Perchuk, Professor Emeritus of Moscow State University. Chernogolovka; 2023. P. 45. (In Russ.)

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. *Geochemistry International*. 2021;59(4):341–356. doi: 10.1134/S0016702921040066

Slabunov A. I., Medvedev P. V., Nesterova N. S., Mudruk S. V., Maksimov O. A., Kervinen A. V., Isachenko A. A. Report of the Russian Science Foundation 'Geodynamic settings of the Early Earth and Archean banded ferruginous quartzites' (final) no. 22-17-00026. Petrozavodsk; 2024. (In Russ.)

Slabunov A. I., Volodichev O. I., Korol' N. E., Sibelev O. S., Berezhnaya N. G., Larionov A. N. Archean granulite complexes of the Karelian Craton: petrology, geochronology, geodynamics. *Petrografiya magmaticheskikh i metamorficheskikh gornyx porod: Materialy XII Vserossiiskogo petrograficheskogo soveshchaniya = Petrography of igneous and metamorphic rocks: Proceedings of the XII All-Russian petrographic conf.* Petrozavodsk: KarRC RAS; 2015. P. 503–506. (In Russ.)

Warr L. N. IMA-CNMNC approved mineral symbols. *Mineral. Mag.* 2021;85:291–320. doi: 10.1180/mgm.2021.43

Wood B. J., Banno S. Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1973; 42(2):109–124.

Поступила в редакцию / received: 28.07.2025; принята к публикации / accepted: 23.12.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Максимов Олег Александрович

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник лаборатории геологии и геодинамики докембрия

e-mail: olemaximov@mail.ru

Лезжов Арсений Михайлович

аспирант, старший лаборант лаборатории геологии и геодинамики докембрия

e-mail: olemaximov@mail.ru

Слабунов Александр Иванович

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

e-mail: slabunov@krc.karelia.ru

Сибелев Олег Станиславович

канд. геол.-мин. наук, научный сотрудник лаборатории геологии и геодинамики докембрия

e-mail: sibelev@krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Maksimov, Oleg

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

Lezzhov, Arseniy

Doctoral Student, Senior Laboratory Technician

Slabunov, Alexander

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

Sibelev, Oleg

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