

УДК 551.71 : 552.3 : 552.5

МАГМАТИЗМ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ НА ГРАНИЦЕ АРХЕЯ-ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЯ. ВЗГЛЯД ИЗ КАРЕЛИИ

С. А. Светов*, З. П. Рыбникова, А. В. Бакаева, М. А. Гоголев

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

В исследовании обобщены результаты изучения геодинамических режимов заложения и развития магматических пород и ассоциирующих с ними терригенных комплексов, формирующих супракrustальную часть Водлозерского террейна (Юго-Восточная часть Карельского кратона) в интервале мезоархей–палеопротерозой. Ранние геодинамические процессы (в мезо-неоархее) реконструированы на основе изучения реперных стратотектонических ассоциаций Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса. Трансформация геодинамических режимов становления кратона в палеопротерозое обоснована на примере образований Онежского бассейна, перекрывающих зеленокаменный комплекс. Установлено, что корообразование в Водлозерском террейне в мезо-неоархее контролировалось субдукционно-коллизийными процессами, сопоставимыми по продолжительности с полным циклом Вильсона. После стадии стабилизации континентальной коры, около 2,5 млрд лет назад, произошла магматическая реактивация территории. Карельский кратон испытал поднятие и интенсивную эрозию, что привело к формированию субаэральных кор выветривания. Смена геодинамических режимов была обусловлена зарождением плюмового события, предвещавшего образование крупной магматической провинции. Развитие территории происходило в условиях континентального рифтогенеза (в интервале 2,5–2,45 млрд лет) с формированием кремнистой высоко-Mg андезибазальтовой ассоциации. Эта ассоциация характеризуется двойственной геохимической природой – плюмовой и субдукционной, что объясняется вовлечением в плавление фрагментов архейского слэба и контаминацией расплавами гранитоидов санукитоидного ряда. Показано, что Водлозерский террейн, компактная территория юго-восточной части Карельского кратона, является уникальным геологическим полигоном, позволяющим проследить эволюцию геодинамических режимов ранней Земли от архея до палеопротерозоя.

Ключевые слова: магматические системы; Ведлозерско-Сегозерский зеленокаменный пояс; Карельский кратон; геодинамика

Для цитирования: Светов С. А., Рыбникова З. П., Бакаева А. В., Гоголев М. А. Магматизм и геодинамические режимы на границе архея-палеопротерозоя. Взгляд из Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 119–123. doi: 10.17076/geo2181

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке темы НИР Института геологии КарНЦ РАН.

S. A. Svetov*, Z. P. Rybnikova, A. V. Bakaeva, M. A. Gogolev.
MAGMATISM AND GEODYNAMIC SCENARIOS AT THE ARCHEAN-PALEOPROTEROZOIC BOUNDARY. A VIEW FROM KARELIA

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

This study synthesizes the findings on the geodynamic regimes of emplacement and development of igneous rocks and associated terrigenous complexes forming the supra-crustal part of the Vodlozero Terrane (southeastern part of the Karelian Craton) during the Mesoarchean – Paleoproterozoic interval. Early geodynamic processes (during the Meso-Neoproterozoic) are reconstructed based on the study of key strato-tectonic associations of the Vodlozero-Segozero Greenstone Belt. The transformation of geodynamic regimes during cratonization in the Paleoproterozoic is substantiated by the example of the Onega Basin's formations, which overlie the greenstone complex. It is established that crustal formation in the Vodlozero Terrane during the Meso-Neoproterozoic was controlled by subduction-collisional processes, comparable in duration to a full Wilson cycle. After the stage of continental crust stabilization, around 2.5 billion years ago, magmatic reactivation of the territory occurred. The Karelian Craton experienced an uplift and intense erosion, which led to the formation of subaerial weathering crusts. The change in geodynamic regimes was triggered by the onset of a plume event, heralding the formation of a large igneous province. The development of the territory occurred under conditions of continental rifting (in the interval 2.5–2.45 billion years) with the formation of a siliceous high-Mg andesite-basalt association. This association is characterized by a dual geochemical nature – plume and subduction-related – which is explained by the involvement of Archean slab fragments in melting and contamination by melts of sanukitoid granitoids.

Keywords: magmatic systems; Vodlozero-Segozero Greenstone Belt; Karelian Craton; geodynamics

For citation: Svetov S. A., Rybnikova Z. P., Bakaeva A. V., Gogolev M. A. Magmatism and geodynamic scenarios at the Archean-Paleoproterozoic boundary. A view from Karelia. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 119–123. doi: 10.17076/geo2181

Funding. The work was carried out within state-funded research theme of the Institute of Geology of KarRC RAS.

Территория Карельского кратона предоставляет уникальную возможность для разработки геодинамических моделей формирования ранней земной коры. В юго-восточном сегменте кратона детально изучены магматические ассоциации древнего палеоархейского прото-континентального Водлозерского блока [Лобач-Жученко и др., 2000; Арестова и др., 2015; Чекулаев и др., 2022], вулканогенно-осадочные комплексы зеленокаменных структур его северо-западного обрамления [Puchtel et al., 1998; Кожевников, 2000; Светов, 2005; Гоголев, 2018; Вакаева et al., 2024] и перекрывающий палеопротерозойский вулканогенно-осадочный комплекс Онежской структуры (ОС) [Онежская..., 2011; Melezhik et al., 2013]. Высокая степень изученности магматических систем Водлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса (ВСЗП) и ассоциирующихся с ними терригенных комплексов позволяет последовательно реконструировать эволюцию геодинамических режимов во

временном интервале мезо-неоархей-палеопротерозой [Кожевников, 2000; Лобач-Жученко и др., 2000; Светов, 2005].

Новый импульс геодинамическим реконструкциям и уточнению временных интервалов развития магматических систем в пределах ВСЗП задан исследованиями детритовых цирконов во внутриформационных терригенных комплексах ВСЗП и перекрывающих его поздних молассоидных толщах, проведенными в 2024–2025 гг.

К настоящему времени установлено, что магматические системы Водлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса формировались в течение 420 млн лет в результате развития долгоживущей конвергентной системы, приуроченной к западной части Водлозерского блока, в период с ~ 3,05 до 2,65 млрд лет назад. Сценарий ее развития включал следующие реконструированные к настоящему времени геодинамические обстановки:

– заложение инициальной субдукционной системы с формированием раннего островодужного комплекса (3,05–2,95 млрд лет), представленного БАДР-сериями адакитового и известково-щелочного ряда;

– развитие задугового бассейна (3,02–2,905 млрд лет) со следующей последовательностью образования ассоциаций: 1) на протоокеаническом этапе – Al-недеплетированных неконтаминированных коматиитов, коматиитовых и толеитовых базальтов; 2) на конвергентном этапе – контаминированных коматиитов; 3) на этапе закрытия задугового бассейна – островодужных толеитов. При этом установлена латеральная асинхронность магматизма в пределах ВСЗП, с этапами 3,02–2,96 млрд лет в Паласельгинском домене, 3,0–2,92 млрд лет в Койкарском домене и 2,92–2,905 млрд лет в Хаутаваарском;

– развитие обдукционных систем, формирующихся на аккреционно-коллизиионном этапе развития ВСЗП (2,95–2,905 млрд лет), маркируемых образованием надвигов океанических аллохтонов на континентальное основание, с последующим субаэральным выветриванием [Вакаева et al., 2024];

– образование аккреционной призмы в интервале 2,95–2,92 млрд лет;

– формирование субдукционной системы поздней вулканической дуги, представленной ассоциацией адакитов – Nb-обогащенных андезитов, высоко-Mg андезитов и толщами терригенных отложений (2,86–2,84 млрд лет);

– завершающий коллизиионный этап развития конвергентной системы в интервале 2,79–2,72 млрд лет (маркируемый образованием АДР-серий и санукитоидных интрузий) ознаменовал завершение формирования консолидированной континентальной коры, объединяющей в себе реликты мезо-неоархейских стратотектонических ассоциаций – террейнов;

– постколлизиионный этап (2,7–2,65 млрд лет) сопровождался заложением pull-apart бассейнов в транспрессионно-транстенсионном режиме, с образованием осадочных парагенезов низкой зрелости (тип тимискаминг) и незначительной степенью выветривания субстрата. Магматизм в этом интервале был проявлен формированием дайковых роев (2,68–2,65 млрд лет) и интрузивных тел субщелочного и известково-щелочного состава.

Развитие территории ВСЗП Карельского кратона укладывается в полный цикл Вильсона и фактически отражает все глобальные эволюционные тренды корообразования в мезо-неоархее ранней Земли. 2,6 млрд лет назад

развитие Карельского кратона завершается амальгамацией с кратонами Сьюпириор, Пилбара, Бунделкханд, Каапвааль и др. в протоконтинент Кенорленд.

К границе архея-протерозоя окончательно сформирована континентальная кора в регионе, при этом магматическая реактивизация территории возобновляется лишь с 2,5 млрд лет. В это время Карельский кратон испытывал поднятие и интенсивную эрозию, с формированием субаэральных кор выветривания [Коросов, 1991]. Причиной сводового поднятия явилось зарождение нового плюмового события, предвещающего образование крупной магматической провинции сумийского возраста [Онежская..., 2011]. Дальнейшее развитие территории происходит в условиях континентального рифтогенеза (в интервале 2,5–2,45 млрд лет). В результате формируется кремнистая высоко-Mg андезибазальтовая ассоциация (SHMS), имеющая двойственную геохимическую природу – плюмовую и субдукционную [Светов и др., 2004; Melezhik et al., 2013; Vogina et al., 2018], что может объясняться вовлечением в плавление фрагментов архейского субдуцированного слэба и контаминацией расплавами поздних гранитоидных фаз санукитоидного ряда. Данная модель позволяет объяснить как геохимическую двойственность вулканитов, так и наличие в палеопротерозойских вулканитах доминирующих популяций захваченных цирконов с возрастом от 2,8–2,7 млрд лет [Богданов и др., 2025].

Резюмируя, следует отметить, что компактная территория юго-восточной части Карельского кратона – Водлозерский террейн является уникальным геологическим полигоном, позволяющим не только проследить эволюцию геодинамических режимов ранней Земли от архея до палеопротерозоя, но и оценить скорость и латеральный масштаб событий, а также реконструировать положение Карельского кратона в архитектуре протоконтинента Кенорленд от стадии сборки до момента распада.

Литература

Арестова Н. А., Чекулаев В. П., Лобач-Жученко С. Б., Кучеровский Г. А. Корреляция процессов формирования архейской коры древнего Водлозерского домена (Балтийский щит) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2015. Т. 23, № 2. С. 1–13.

Богданов Ю. Б., Бережная Н. Г., Анисимова С. А., Никонова А. С., Родионов Н. В. Проблемы стратиграфии образований гимольского надгоризонта (верхний лопий) Карельского региона // Региональная геология и металлогения. 2025. Т. 32, № 1. С. 28–50. doi: 10.52349/0869-7892_2025_101_28-50

Гоголев М. А. Геохимическая типизация дацит-риолитового магматизма центральной части Ведлозерско-Сегозерского зеленокаменного пояса (Карельский кратон) // Труды Карельского научно-геоцентра РАН. 2018. № 11. С. 82–95. doi: 10.17076/geo757

Кожевников В. Н. Архейские зеленокаменные пояса Карельского кратона как аккреционные орогены. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2000. 223 с.

Коросов В. И. Геология доятулийского протерозоя восточной части Балтийского щита (сумий, сариолий). Петрозаводск: КНЦ АН СССР, 1991. 118 с.

Лобач-Жученко С. Б., Чекулаев В. П., Арестова Н. А., Левский Л. К., Коваленко А. В. Архейские террейны Карелии: их геологическое и изотопно-геохимическое обоснование // Геотектоника. 2000. № 6. С. 26–42.

Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения) / Ред. Л. В. Глушанин, Н. В. Шаров, В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 431 с.

Светов С. А. Магматические системы зоны перехода океан-континент в архее восточной части Фенноскандинавского щита. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005. 230 с.

Светов С. А., Голубев А. И., Светова А. И. Геохимия сумийских андезибазальтов центральной Карелии // Геохимия. 2004. № 7. С. 729–739.

Чекулаев В. П., Арестова Н. А., Егорова Ю. С. Архейская тоналит-трондjemит-гранодиоритовая ассоциация Карельской провинции: геология, геохимия, этапы и условия образования // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2022. Т. 30, № 4. С. 3–21. doi: 10.31857/S0869592X22040020

Bakaeva A. V., Chazhengina S. J., Svetov S. A. Neoproterozoic paleosols in the Eastern Fennoscandian Shield of Central Karelia, Russia, and their paleoatmospheric implication // *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 2024. Vol. 649. Art. 112319. doi: 10.1016/j.palaeo.2024.112319

Bogina M., Zlobin V., Svetov S., Sharkov E., Chistyakov A. Petrogenesis of siliceous high-Mg series: evidence from the Early Paleoproterozoic mafic volcanic rocks of the Vodlozero Domain, Fennoscandian Shield // *Geosci. Front.* 2018. Vol. 9. P. 207–221. doi: 10.1016/j.gsf.2017.02.009

Melezhik V. A., Medvedev P. V., Svetov S. A. The Onega basin // *Reading the Archive of Earth's Oxygenation. Vol. 1: The Palaeoproterozoic of Fennoscandia as Context for the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Series: Frontiers in Earth Sciences* / V. Melezhik, A. R. Prave, A. E. Fallick, L. R. Kump, H. Strauss, A. Lepland, E. J. Hanski (eds.). Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. 387–490 p.

Puchtel I. S., Arndt N. T., Hofmann A. W., Haase K. M., Kröner A., Kulikov V. S., Kulikova V. V., Garbe-Schönberg C. D., Nemchin A. A. Petrology of mafic lavas within the Onega plateau, central Karelia: evidence for 2.0 Ga plume-related continental crustal growth in the Baltic Shield // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1998. Vol. 130. P. 134–153.

References

Arestova N. A., Chekulaev V. P., Lobach-Zhuchenko S. B., Kucherovskii G. A. Correlation of the processes of the Archean crust formation of the ancient Vodlozero Domain (Baltic Shield). *Stratigrafiya. Geol. korrelyatsiya = Stratigraphy. Geological Correlation.* 2015;23(2):1–13. (In Russ.)

Bakaeva A. V., Chazhengina S. J., Svetov S. A. Neoproterozoic paleosols in the Eastern Fennoscandian Shield of Central Karelia, Russia, and their paleoatmospheric implication. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 2024;649:112319. doi: 10.1016/j.palaeo.2024.112319

Bogdanov Yu. B., Berezhnaya N. G., Anisimova S. A., Nikonova A. S., Rodionov N. V. Stratigraphy problems of the Gimoly Superhorizon formations (Upper Lopian) in the Karelian region. *Regional'naya geologiya i metallogeniya = Regional Geology and Metallogeny.* 2025;32(1):28–50. (In Russ.). doi: 10.52349/0869-7892_2025_101_28-50

Bogina M., Zlobin V., Svetov S., Sharkov E., Chistyakov A. Petrogenesis of siliceous high-Mg series: evidence from the Early Paleoproterozoic mafic volcanic rocks of the Vodlozero Domain, Fennoscandian Shield. *Geosci. Front.* 2018;9:207–221. doi: 10.1016/j.gsf.2017.02.009

Chekulaev V. P., Arestova N. A., Egorova Yu. S. Archean tonalite-trondjemite-granodiorite association of the Karelian province: geology, geochemistry, stages and conditions of formation. *Stratigrafiya. Geol. korrelyatsiya = Stratigraphy. Geological Correlation.* 2022;30(4):3–21. (In Russ.). doi: 10.31857/S0869592X22040020

Glushanin L. V., Sharov N. V., Shchiptsov V. V. (eds.). The Paleoproterozoic Onega structure: geology, tectonics and mineralogy. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2011. 431 p. (In Russ.)

Gogolev M. A. Geochemical types of subvolcanic dacite-rhyolite complexes from the central part of the Vedlozero-Segozero Greenstone Belt (Karelian Craton). *Tруды Карельского научно-геоцентра РАН = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2018;11:82–95. (In Russ.). doi: 10.17076/geo757

Korosov V. I. Geology of the Pre-Jatulian Proterozoic of the eastern part of the Baltic Shield (Sumy, Sariol). Petrozavodsk: KNTs AN SSSR; 1991. 118 p. (In Russ.)

Kozhevnikov V. N. Archean greenstone belts of the Karelian Craton as accretionary orogens. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2000. 223 p. (In Russ.)

Lobach-Zhuchenko S. B., Chekulaev V. P., Arestova N. A., Levsky L. K., Kovalenko A. V. Archean terranes of Karelia: their geological and isotope-geochemical justification. *Geotektonika = Geotectonics.* 2000;6:26–42. (In Russ.)

Melezhik V. A., Medvedev P. V., Svetov S. A. The Onega basin. *Reading the archive of Earth's oxygenation. Vol. 1: The Palaeoproterozoic of Fennoscandia as context for the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Series: Frontiers in Earth Sciences.* Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag; 2013. 387–490 p.

Puchtel I. S., Arndt N. T., Hofmann A. W., Haase K. M., Kröner A., Kulikov V. S., Kulikova V. V., Garbe-Schönberg C. D., Nemchin A. A. Petrology of mafic lavas within the Onega plateau, central Karelia: evidence for 2.0 Ga plume-related continental crustal growth in the Baltic Shield. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1998;130: 134–153.

Svetov S. A., Golubev A. I., Svetova A. I. Geochemistry of the Sumy andesibasalts of central Karelia. *Geokhimiya = Geochemistry.* 2004;7:729–739. (In Russ.)

Svetov S. A. Magmatic systems of the ocean-continent transition zone in the Archean of the eastern part of the Fennoscandian Shield. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2005. 230 p. (In Russ.)

*Поступила в редакцию / received: 08.08.2025; принята к публикации / accepted: 18.08.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.*

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Светов Сергей Анатольевич

д-р геол.-мин. наук, директор,
руководитель лаборатории

e-mail: ssvetov@krc.karelia.ru

Рыбникова Зоя Павловна

младший научный сотрудник

e-mail: zoya_rybnikova@mail.ru

Бакаева Александра Владимировна

младший научный сотрудник

e-mail: sashe-ku@yandex.ru

Гоголев Максим Александрович

старший геолог

e-mail: mag-333@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Svetov, Sergei

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

Rybnikova, Zoya

Junior Researcher

Bakaeva, Alexandra

Junior Researcher

Gogolev, Maxim

Senior Geologist