

УДК 551.24:551.71

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОДИНАМИКА РАННЕЙ ЗЕМЛИ: ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗУЧЕНИЯ

А. И. Слабунов

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

Древнейшие минералы и породы хадейского возраста, известные в настоящее время, – это несколько тысяч кристаллов циркона с возрастом до 4,4–4,0 млрд лет, метагаббро зеленокаменного пояса Нуввуагиттук (провинция Сьюпириор, Канада) с возрастом 4,16 млрд лет и гранитоиды Акаста (провинция Слейв, Канада), сформировавшиеся 4,02 млрд лет назад. Эти данные позволяют считать, что у Земли уже в хадее существовало ядро, континентальная и океаническая литосфера, гидросфера, бескислородная атмосфера и магнитное поле. Однако горных пород, сформировавшихся на этом самом раннем этапе, известно слишком мало для того, чтобы делать объективные заключения о геодинамических процессах, обеспечивающих развитие литосферы в этот период. Полученные в последние десятилетия данные о геологии мезо- и неогархея позволяют с большой долей уверенности считать, что в этот период уже действовали механизмы тектоники литосферных плит и существовали все известные сегодня геодинамические обстановки. Структуры, сложенные мезо-неогархейскими комплексами, в силу относительно широкого распространения и возможности их детального геологического изучения могут быть хорошими полигонами для тестирования численных моделей геодинамических процессов ранней Земли. Палеогеодинамические реконструкции палео-эогархея возможны только при ведущей роли численного моделирования, так как геологические методы в силу ограниченности распространения этих образований на планете Земля также весьма ограничены. Дальнейший прогресс в изучении хадея будет во многом определяться расширением находок образований этого возраста. Кроме того, следует пристальное внимание уделить изучению гранитоидов ТТГ-ассоциации.

Ключевые слова: хадей; архей; ранняя Земля; зеленокаменный пояс Нуввуагиттук; гнейсы Акаста; геодинамика

Для цитирования: Слабунов А. И. Геология и геодинамика ранней Земли: достижения и перспективы изучения // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 2. С. 149–153. doi: 10.17076/geo2158

Финансирование. Работа является вкладом в исследования ИГ КарНЦ РАН по теме FMEN-2023-0009.

A. I. Slabunov. GEOLOGY AND GEODYNAMICS OF THE EARLY EARTH: ACHIEVEMENTS AND RESEARCH POTENTIAL

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

The oldest (Hadean) known minerals and rocks are a few thousands of zircon crystals aged up to 4.4–4.0 Ga, metagabbro of 4.16 Ga age from the Nuvvuagittuq greenstone belt in the Superior Province, Canada, and 4.02 Ga old Acasta granitoids in the Slave Province, Canada. These data suggest that the Earth already had a core, continental and oceanic lithosphere, hydrosphere, anoxic atmosphere and magnetic field as early as in the Hadean. However, the rocks that formed at this earliest stage are too scarce to draw objective conclusions about the geodynamic processes responsible for lithospheric evolution in that period. Evidence for Meso- and Neoproterozoic geological evolution obtained in the past few decades suggests that plate tectonics mechanisms were already at work during those periods and that all the geodynamic settings known today already existed. Structures composed of Meso- and Neoproterozoic complexes are valuable for testing numerical models of early-Earth geodynamic processes because they are relatively abundant and can thus be studied geologically in detail. Paleogeodynamic reconstructions of the Paleo- and Neoproterozoic can only be performed through numerical simulation because geological methods are of limited applicability due to the scarcity of these structures on the Earth. Further progress in the study of the Hadean could be achieved if more matter (rocks and minerals) of this age is found. Furthermore, close attention should be given to the study of TTG-granitoids.

Keywords: Hadean; Archean; early Earth; Nuvvuagittuq Greenstone Belt; Acasta gneisses; geodynamics

For citation: Slabunov A. I. Geology and geodynamics of the early Earth: achievements and research potential. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 2. P. 149–153. doi: 10.17076/geo2158

Funding. The study is a contribution to the research conducted by the Institute of Geology KarRC RAS under state-ordered theme FMEN-2023-0009.

Для решения вопросов о силах и процессах, которые действуют на планете, геодинамика использует практически весь арсенал современных наук о Земле: геофизику, петрологию, геохимию, структурную геологию, физическое и численное моделирование. Благодаря этому за последние десятилетия удалось создать стройную геодинамическую модель современной Земли (тектонику литосферных плит и мантийных плюмов), исследовать взаимосвязь геосфер и заложить тем самым основу для реконструкций прошлого.

В настоящее время существуют и развиваются два взаимосвязанных и дополняющих друг друга направления геодинамических реконструкций (или палеогеодинамики): 1) геологическое, 2) численное моделирование [Perchuk et al., 2020 и ссылки в ней].

Первый подход базируется на детальном геологическом описании структурно-вещественных комплексов, связанных с установленными геодинамическими обстановками [Слабунов, 2008]. Вся совокупность этих данных (пространственное распространение, взаи-

моотношение, особенности минерального и химического состава, палеомагнитные характеристики) позволяет создать комплекс индикаторов геодинамических обстановок, которые и используются для палеогеодинамических реконструкций, в том числе и архейских. Для реализации данного подхода необходима информация о крупных фрагментах земной коры, причем значимость выводов зависит от сохранности, обнаженности и геологической изученности объекта.

Хадейский (4,6–4,0 млрд лет) этап. Формирование (аккреция протопланетного вещества) планет Солнечной системы началось 4567 млн лет назад, и уже через 2–4 млн лет на них происходила дифференциация этого вещества [Van Kranendonk et al., 2019]. Самое древнее земное вещество, известное в настоящее время, – это несколько тысяч кристаллов циркона с возрастом до 4,4–4,0 млрд лет, найденных в архейских кварцитах кратона Йилгарн (Австралия). Геохимия этих цирконов и минеральные включения в них свидетельствуют о том, что они были равновесны с гранитным

расплавом, т. е. 4,4 млрд лет назад появилась первая континентальная кора [Van Kranendonk et al., 2019]. Это произошло примерно через 160 млн лет после начала формирования планеты Солнечной системы, в том числе Земли.

Изотопия кислорода древнейших цирконов указывает на то, что на Земле начиная с 4,3 млрд лет существует жидкая вода, океаны и идут процессы выветривания. Изучение напряженности магнитного поля по включениям в этих цирконах позволяет установить, что 4,1 млрд лет назад произошел его резкий всплеск, свидетельствующий о становлении ядра планеты и начале действия земного динамо [Van Kranendonk et al., 2019].

Сформированные 4,16 млрд лет назад метагаббро зеленокаменного пояса Нуввуагиттук (провинция Сьюпириор, Канада) [Van Kranendonk et al., 2019; Sole et al., 2025] и 4,02 млрд лет назад гнейсы Акаста (провинция Слейв, Канада) [Van Kranendonk et al., 2019] подтверждают, что уже в хадее существовала океаническая и континентальная кора. В составе первой установлены осадочные породы – полосчатые железистые кварциты (BIF), указывающие на существование воды и бескислородной атмосферы [Van Kranendonk et al., 2019].

Перечисленные скудные данные позволяют считать, что у Земли уже в хадее существовало ядро, континентальная и океаническая литосфера, гидросфера, бескислородная атмосфера и магнитное поле. Однако горных пород, сформировавшихся на самом раннем этапе развития планеты, известно слишком мало для того, чтобы делать объективные заключения о геодинамических процессах, обеспечивающих развитие литосферы в этот период. Геодинамику этого этапа эволюции Земли можно изучать только с использованием численного моделирования.

Крайне загадочными остаются события на Земле в период 4,1–3,8 млрд лет, когда планеты Солнечной системы испытывали мощную метеоритную бомбардировку. Однако ее следы пока не установлены на Земле. В древнейших цирконах также не найдены следы импактного воздействия [Van Kranendonk et al., 2019].

Палео-эоархейский (4,0–3,2 млрд лет) этап. Сформированный в интервале 3,8–3,7 млрд лет зеленокаменный комплекс Исуа (Североамериканский кратон) содержит средне-кислые вулканиты, сопоставимые по составу с островодужными, бониниты, шаровые лавы базальтов, осадки, в том числе BIF и первые строматолиты. Несколько позднее, в палеоархее (3,5–3,3 млрд лет) формировался мощный плюм-генерированный фельзит-базальт-

коматиитовый комплекс (группы Варравуна и Келли) кратона Пилбара [Van Kranendonk et al., 2019]. Эти данные могут подтверждать существование в эоархее-палеоархее процессов субдукции и генерации мантийных плюмов. Однако уникальность и локальное распространение объектов не позволяет понять, насколько широко эти процессы были проявлены.

Мезо-неоархейский (3,2–2,7 млрд лет) этап. В зеленокаменных и сланцевых поясах многих кратонов (например, Карельского, Сьюпириор, Каапваальского, Зимбабве, Западного и Восточного Драхваара, Йилгарн, Бунделкхандского) установлены породные ассоциации (вулканиты с геохимическими характеристиками субдукционных пород, осадочные комплексы, сопоставимые с осадками преддуговых и задуговых бассейнов, реже эклогитсодержащие комплексы), уверенно маркирующие субдукционные обстановки. Коллизионные процессы также установлены в неоархее – их индикаторами являются проявления надвиговой тектоники, умереннобарического (кианитовая субфация) метаморфизма амфиболитовой фации и гранитного магматизма S-типа [Слабунов, 2008]. Установлены фрагменты офиолитовых комплексов, указывающие на проявление спрединга. Беломорский подвижный пояс Фенноскандинавского щита является примером структуры, в которой сохранились мезо-неоархейские комплексы – индикаторы спрединга, субдукции и коллизии [Слабунов и др., 2021]. В этом временном интервале под воздействием мантийных плюмов формируются комплексы типа океанических плато (например, Контокский комплекс Костомукшского зеленокаменного пояса), а также внутриплитные осадочные бассейны (например, комплекс Понгола Каапваальского кратона). Таким образом, в мезоархее «запускается» механизм действия тектоники литосферных плит и мантийных плюмов, весьма близкий к современному. Он не являлся полным аналогом современного, но был близок к нему по сути [Copley, Weller, 2014; Windley et al., 2021; Perchuk et al., 2025]. Логическим следствием геодинамических процессов, начавшихся на Земле в мезоархее, является становление в неоархее около 2,7 млрд лет первого суперконтинента Кенорленд [Lubnina, Slabunov, 2017 и ссылки в ней].

Таким образом, полученные в последние десятилетия данные о геологии мезо- и неоархее позволяют с большой долей уверенности считать, что в этот период на Земле уже действовали механизмы тектоники литосферных плит и существовали все известные

сегодня геодинамические обстановки, однако при этом особенности их реализации могли видоизменяться [Perchuk et al., 2025]. Структуры, сложенные мезо-неоархейскими комплексами, в силу относительно широкого распространения и возможности их детального геологического изучения могут быть хорошими полигонами для тестирования численных моделей геодинамических процессов ранней Земли. Палеогеодинамические реконструкции палео-эоархея возможны только при ведущей роли численного моделирования, так как геологические методы в силу ограниченности распространения этих образований на планете Земля также весьма ограничены. Дальнейший прогресс в изучении архея будет во многом определяться расширением находок образований этого возраста.

Кроме того, большие перспективы для изучения ранней земной коры открывает изучение гранитоидов тоналит-трондьемит-гранодиоритовой (ТТГ) ассоциации [Мойен, 2020] и связанных с ними пород (амфиболитов, ультрамафитов, гнейсов). Эти породы наиболее широко развиты в хадее-архее, их формирование связывается с плавлением основных пород [Туркина, 2000 и ссылки в ней].

Главные выводы

1. Имеющиеся данные о минералах и породах хадея позволяют считать, что у Земли уже в этот период существовало ядро, континентальная и океаническая литосфера, гидросфера, бескислородная атмосфера и магнитное поле.

2. Крайне актуальным является продолжение поиска и изучения древнейших пород и минералов. В настоящее время мы располагаем лишь единичными фрагментами вещества, позволяющего объективно изучать их состав и свойства ограниченным набором геологических методов.

3. Опыт изучения породных комплексов архея показывает, что геодинамические процессы, контролирующие формирование субдукционных, коллизионных, спрединговых, рифтогенных, плюмгенерированных систем, уверенно фиксируются начиная с мезоархея (3,2–3,0 млрд лет назад). Закономерным следствием существования данных процессов является образование в неоархее (2,7 млрд лет назад) первого суперконтинента Кенорленд.

4. Изучение мезо-неоархейских комплексов является ключом для понимания ранней истории Земли, особенно ТТГ-комплексов, наиболее перспективных для этой цели.

Литература

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

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

Туркина О. М. Модельные геохимические типы тоналит-трондьемитовых расплавов и их природные эквиваленты // Геохимия. 2000. № 7. С. 704–717.

Copley A., Weller O. M. Modern-style continental tectonics since the early Archean // Precambrian Res. 2024. Vol. 403. Art. 107324. doi: 10.1016/j.precamres.2024.107324

Lubnina N. V., Slabunov A. I. The Karelian Craton in the structure of the Kenorland Supercontinent in the Neoarchean: New paleomagnetic and isotope geochronology data on granulites of the Onega complex // Moscow University Geology Bulletin. 2017. Vol. 72. P. 377–390. doi: 10.3103/S0145875217060072

Moyen J.-F. Archean granitoids: classification, petrology, geochemistry and origin // Archean Granitoids of India: Windows into Early Earth Tectonics / S. Dey, J.-F. Moyen (eds.). Geological Society, London, Special Publications. 2020. Vol. 489. P. 15–49. doi: 10.1144/SP489-2018-34

Perchuk A. L., Gerya T. V., Zakharov V. S., Griffin W. L. Building cratonic keels in Precambrian plate tectonics // Nature. 2020. Vol. 586. P. 395–401. doi: 10.1038/s41586-020-2806-7

Perchuk A. L., Zakharov V. S., Gerya T. V., Stern R. J. Shallow vs. Deep subduction in Earth history: contrasting regimes of water recycling into the mantle // Precambrian Res. 2025. Vol. 418. Art. 107690. doi: 10.1016/j.precamres.2025.107690

Sole C., O'Neil J., Rizo H., Paquette J.-L., Benn D., Plakholm J. Evidence for Hadean mafic intrusions in the Nuvvuagittuq Greenstone Belt, Canada // Science. 2025. Vol. 388(6754). P. 1431–1435. doi: 10.1126/science.ads8461

Van Kranendonk M. J., Bennett V. C., Hoffmann J. E. (eds.). Earth's oldest rocks. Second Edition. Elsevier, 2019. 1078 p.

Windley B., Kusky T., Polat A. Onset of plate tectonics by the Eoarchean // Precambrian Res. 2021. Vol. 352. Art. 105980. doi: 10.1016/j.precamres.2020.105980

References

Copley A., Weller O. M. Modern-style continental tectonics since the early Archean. *Precambrian Res.* 2024;403:107324. doi: 10.1016/j.precamres.2024.107324

Lubnina N. V., Slabunov A. I. The Karelian Craton in the structure of the Kenorland Supercontinent in the Neoarchean: New paleomagnetic and isotope geochronology data on granulites of the Onega complex. *Moscow University Geology Bulletin.* 2017;72:377–390. doi: 10.3103/S0145875217060072

Moyen J.-F. Archean granitoids: classification, petrology, geochemistry and origin. *Archean Granitoids of India: Windows into Early Earth Tectonics. Geological Society, London, Special Publications.* 2020;489:15–49. doi: 10.1144/SP489-2018-34

Perchuk A. L., Gerya T. V., Zakharov V. S., Griffin W. L. Building cratonic keels in Precambrian plate tectonics. *Nature.* 2020;586:395–401. doi: 10.1038/s41586-020-2806-7

Perchuk A. L., Zakharov V. S., Gerya T. V., Stern R. J. Shallow vs. Deep subduction in Earth history: contrasting regimes of water recycling into the mantle. *Precambrian Res.* 2025;418:107690. doi: 10.1016/j.precamres.2025.107690

Sole C., O'Neil J., Rizo H., Paquette J.-L., Benn D., Plakholm J. Evidence for Hadean mafic intrusions in the Nuvvuagittuq Greenstone Belt, Canada. *Science.* 2025;388(6754):1431–1435. doi: 10.1126/science.ads8461

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., Balagansky V. V., Shchipansky 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

Turkina O. M. Modeling geochemical types of tonalite-trondhjemite melts and their natural equivalents. *Geochemistry International.* 2000;38(7):640–651.

Van Kranendonk M. J., Bennett V. C., Hoffmann J. E. (eds.). Earth's oldest rocks. Second Edition. Elsevier; 2019. 1078 p.

Windley B., Kusky T., Polat A. Onset of plate tectonics by the Eoarchean. *Precamb. Res.* 2021;352:105980. doi: 10.1016/j.precamres.2020.105980

Поступила в редакцию / received: 28.07.2025; принята к публикации / accepted: 11.09.2025.
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Слабунов Александр Иванович

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

e-mail: slabunov@krc.karelia.ru

CONTRIBUTOR:

Slabunov, Alexander

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