

УДК 552.543 : 551.72 (470.21-22)

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКОГО ВОЗРАСТА ВОСТОЧНОЙ ФЕННОСКАНДИИ

П. В. Медведев*, Н. И. Кондрашова, А. В. Лютиков

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

Представлены результаты литологического, геохимического и палеонтологического изучения палеопротерозойских карбонатных пород восточной части Фенноскандинавского щита на примере двух крупных палеобассейнов Карельского кратона: Онежского на юго-востоке и Пана-Куолаярвинского на северо-западе. Максимум карбонатонакопления на востоке Фенноскандинавского щита в палеопротерозое приходится на интервал 2,1–2,0 млрд лет назад. Подавляющее большинство карбонатных пород приурочено к онежскому (ятулийский надгоризонт) и низам заонежского (людиковийский надгоризонт) горизонта региональной стратиграфической шкалы. Характерными особенностями ятулийских осадочных карбонатов являются их красноцветность, сохранившиеся сульфаты и хлориды, а также различные псевдоморфозы по ним, обилие разнообразных микробиалитов и обогащение тяжелым изотопом углерода ^{13}C . Для людиковийских карбонатных пород характерны сероцветность, отсутствие эвапоритовых минералов, немногочисленные микробиалиты и незначительное отклонение изотопного состава углерода от среднеморских значений. На спектрах распределения редкоземельных элементов в карбонатных породах ятулийского возраста из Онежского палеобассейна отчетливо проявлена отрицательная аномалия Се разной интенсивности, что указывает на окислительную среду с переменным содержанием кислорода. В Пана-Куолаярвинском палеобассейне содержание кислорода было стабильным, но более низким. При этом и в Онежском, и в Пана-Куолаярвинском палеобассейнах содержание кислорода держалось у границы перехода от дизиоксидных к окислительным условиям. Положительная европиевая аномалия в породах обоих бассейнов свидетельствует о привносе гидротермального материала в область седиментации, не исключено и поступление пирокластического материала основного состава. Результаты мультидисциплинарных геологических исследований не противоречат, а дополняют друг друга. На основании комплекса данных, включая и изотопно-геохимические, сделаны выводы о фациальных условиях карбонатонакопления, происходившего на данной территории около 2,0 млрд лет назад. Показана эволюция карбонатонакопления в интракратонных бассейнах от эвапоритовых мелководных условий в ятулийское время к относительно глубоководным открытому морским с усилением вулканической активности в людиковии.

Ключевые слова: Фенноскандинавский щит; палеопротерозой; карбонатные породы; литология; геохимия; условия седиментации; микробиалиты

Для цитирования: Медведев П. В., Кондрашова Н. И., Лютиков А. В. Результаты комплексного исследования карбонатных пород палеопротерозойского возраста Восточной Фенноскандии // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 5. С. 104–108. doi: 10.17076/geo2180

Финансирование. Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (Петрозаводск) по теме НИР FMEN-2023-0009.

P. V. Medvedev*, N. I. Kondrashova, A. V. Lyutikov. RESULTS OF A COMPREHENSIVE STUDY OF PALEOPROTEROZOIC CARBONATE ROCKS IN EASTERN FENNOSCANDIA

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

We present the main results of the lithological, geochemical, and paleontological study of Paleoproterozoic carbonate rocks of the eastern part of the Fennoscandian Shield. The maximum carbonate accumulation in the east of the Fennoscandian Shield during the Paleoproterozoic occurred in the range of 2.1–2.0 billion years ago. The vast majority of carbonate rocks are confined to the Onegian (Jatulian superhorizon) and low part of the Zaonezhsky (Ludikuvian superhorizon) horizons of the regional stratigraphic scale. A case study of two large paleobasins on the Karelian Craton, the Onegian in the south-east and the Pana-Kuolajarvian in the northwest, reveals that the results of the multidisciplinary geological approach do not contradict, but complement each other. The characteristic features of the Jatulian sedimentary carbonates are their redness, preserved sulfates and chlorides, as well as various pseudomorphoses after them, an abundance of various microbialites and enrichment with the heavy carbon isotope ^{13}C . The Ludikuvian carbonate rocks have gray color, contain no evaporite minerals, few microbialites, and slightly deviate in the carbon isotopic composition from the sea-average values. The distribution spectra of rare earth elements in carbonate rocks of Jatulian age from the Onegian paleobasin clearly show a negative Ce anomaly of varying intensity, indicating an oxidizing environment with variable oxygen content. The oxygen content in the Pana-Kuolajarvian paleobasin was stable, but lower. At the same time, in both the Onegian and Pana-Kuolajarvian paleobasins, the oxygen content remained transitional from dysoxic to oxic conditions. The positive Eu anomaly in rocks of both basins indicates hydrothermal material input to the sedimentation area, and entry of basic pyroclastic material is possible. Based on the whole dataset, including isotopic and geochemical data, we draw conclusions regarding the carbonate deposition environments that occurred in this area in the time range of 2.1–2.0 billion years ago. Carbonate accumulation in intracratonic basins evolved from evaporitic shallow-water conditions in the Jatulian time to a relatively deep, open marine environment with increased volcanic activity in the Ludikuvian.

Keywords: Fennoscandian shield; Paleoproterozoic; carbonate rocks; lithology; geochemistry; sedimentation conditions; microbialites

For citation: Medvedev P. V., Kondrashova N. I., Lyutikov A. V. Results of a comprehensive study of Paleoproterozoic carbonate rocks in Eastern Fennoscandia. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2025. No. 5. P. 104–108. doi: 10.17076/geo2180

Funding. Financial support for the research was provided from the federal budget to fulfill state assignment to KarRC RAS (Petrozavodsk) within the theme FMEN-2023-0009.

Максимум карбонатонакопления на востоке Фенноскандинавского щита в палеопротерозое приходится на интервал 2,1–2,0 млрд лет назад. Подавляющее большинство карбонатных пород приурочено к онежскому (ятулийский надгоризонт) и низам заонежского (людиковийский надгоризонт) горизонта регио-

нальной стратиграфической шкалы [Общая..., 2002].

Наиболее крупные фрагменты палеобассейнов карбонатной седиментации сохранились на юго-востоке и северо-западе Карельского кратона. Это соответственно Северо-Онежский и Пана-Куоляярвинский синклинии.

Северо-Онежский синклиний охватывает северо-западную часть Онежского озера и прилегающие территории, являясь самой крупной палеопротерозойской структурой Восточной Фенноскандии [Онежская..., 2011]. Мощность карбонатных пород (преимущественно доломитов) здесь составляет около 800 м. Их изотопный возраст, определенный Pb-Pb-методом, равен 2090 ± 70 млн лет [Овчинникова и др., 2007]. Пана-Куолаярвинский синклиний, общей площадью около 7,5 тыс. км², занимает северо-западную часть Карельского кратона, расположен на стыке Беломорского подвижного пояса (с востока и северо-востока), Карельского кратона (на юге) и выступа Свекофеннского складчатого пояса (на западе) [Куликов, Куликова, 2014].

Карбонатные породы онежского горизонта ятулия формировались в мелководных условиях, часто с расчлененной топографией морского дна и существованием эвапоритовых обстановок осадконакопления [Melezhik et al., 2005, 2015]. Указанием на высокую скорость испарения в Онежском палеобассейне являются находки доломитовых и кварцевых псевдоморфоз по соли и гипсу – ангидриту, находки ангидрита и галита в ятулийских осадочных породах. Псевдоморфозы замещения по гипсу и ангидриту с реликтами первичных минералов описаны в палеопротерозойских карбонатных породах Печенги (куэтсьярвинская и коласйокская свиты) и Имандра-Варзуги (умбинская свита) на Кольском полуострове, а также в Финляндии (свита Рантамаа в сланцевом поясе Перепохья [Strauss et al., 2013].

Множество и разнообразие микробиалитов (строматолитов, онколитов и др.) в верхнеятулийских и нижнелюдиковийских карбонатных породах послужило основой для выявления закономерностей в их стратиграфическом и латеральном распределении. В результате выделены как стратиграфические единицы в разрезе онежского горизонта ятулия в ранге слоев с Lithophyta, так и строматолитовые провинции на территории Карельского кратона [Макарихин и др., 2007].

Изотопные данные по углероду и кислороду онежских карбонатных пород не противоречат выводам, сделанным на основе литологических данных. Самый значительный в истории Земли положительный экскурс $\delta^{13}\text{C}$, зафиксированный в осадочных карбонатах, известен как Ломагунди-Ятулийское изотопное событие. В настоящее время нет консенсуса о причинах этого события [Hodgskiss et al., 2023]. Возможна существенная роль таких локальных факторов, как бурное развитие микробиальных

сообществ, формирующих строматолиты в частично замкнутых мелководных водоемах при эвапоритовых условиях, высокая биопродуктивность, повышенное поглощение легкого изотопа углерода ^{12}C и одновременная переработка органического вещества в цианобактериальных матах в 2–3-кратном усилении глобального сигнала [Melezhik et al., 1999]. Понимание причинно-следственных связей Ломагунди-ятулийского события с другими глобальными палеоэкологическими изменениями в палеопротерозое остается неполным. На востоке Фенноскандинавского щита карбонатные породы, обогащенные ^{13}C , известны в разрезах умбинской свиты (Имандра-Варзуга, $\delta^{13}\text{C} = 3,2 \pm 2,1$ ‰), куэтсьярвинской свиты (Печенга, $\delta^{13}\text{C} = 7,4 \pm 0,7$ ‰), а также в мощных карбонатных отложениях туломозерской свиты (Онежский палеобассейн, $\delta^{13}\text{C} = \text{ca. } 10$ ‰) [Melezhik et al., 2013]. Наиболее высокие значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ приурочены к эвапоритовым прибрежно-морским фациям с обилием цианобактериальных построек (строматолитов и онколитов) [Prave et al., 2022]. Это характерно для бассейнов центральной и южной частей Карельского кратона, в то время как на северо-западе карбонатонакопление происходило в открытоморских условиях. При этом в верхах карбонатных разрезов величина $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ составляет в среднем 4 ‰ [Melezhik, Fallick, 1996]. Смена мелководных эвапоритовых фаций более глубоководными открытоморскими при переходе от ятулия к людиковию подтверждается и значениями Sr/Sr-отношений [Горохов и др., 1998].

Полученные нами геохимические характеристики карбонатных пород приводят к таким же выводам об условиях осадконакопления [Kondrashova et al., 2025]. На спектрах распределения редкоземельных элементов в карбонатных породах ятулийского возраста из Онежского палеобассейна отчетливо проявлена отрицательная аномалия Се разной интенсивности, что указывает на окислительную среду с переменным содержанием кислорода. В Пана-Куолаярвинском палеобассейне содержание кислорода было стабильным, но более низким. При этом и в Онежском, и в Пана-Куолаярвинском палеобассейнах содержание кислорода держалось у границы перехода от дизоксидных к окислительным условиям. Европиевая аномалия положительна в породах обоих палеобассейнов. Традиционно ее объясняют привнесом гидротермального материала в область седиментации, не исключено и поступление пирокластического материала основного состава.

На востоке Фенноскандинавского щита в палеопротерозое (от ятулия к людиковию) происходило увеличение площади и углубление бассейнов карбонатакопления, что отражается в постепенной смене вверх по разрезу песчаных доломитов глинистыми разностями вплоть до появления мергелей. Одновременно увеличивалось поступление эндогенного, возможно туфогенного, материала, что указывает на возрастание магматической активности к людиковию.

Литература

Горохов И. М., Кузнецов А. Б., Мележик В. А., Константинова Г. В., Мельников Н. Н. Изотопный состав стронция в верхнеятулийских доломитах туломозерской свиты, Юго-Восточная Карелия // ДАН. 1998. Т. 360, № 4. С. 533–536.

Куликов В. С., Куликова В. В. Куолярвинский синклиорий: новый взгляд на геологическое строение и сводный разрез // Труды Карельского научного центра РАН. 2014. № 1. С. 28–38.

Макарихин В. В., Медведев П. В., Рычанчик Д. В. Роль биотического фактора в ятулийском седиментогенезе // Геодинамика, магматизм, седиментогенез и минерагения Северо-Запада России: Мат-лы Всерос. конференции (Петрозаводск, 12–15 ноября 2007 г.). Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2007. С. 241–245.

Общая стратиграфическая шкала нижнего докембрия России. Объяснительная записка / Науч. ред. Ф. П. Митрофанов, В. З. Негруца. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 13 с.

Овчинникова Г. В., Кузнецов А. Б., Мележик В. А., Горохов И. М., Васильева И. М., Гороховский Б. М. Pb-Pb возраст ятулийских карбонатных пород: туломозерская свита юго-восточной Карелии // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2007. Т. 15. № 4. С. 20–33.

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

Hodgskiss M. S. W., Crockford P. W., Turchyn A. V. Deconstructing the Lomagundi-Jatuli carbon isotope excursion // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2023. Vol. 51, no. 1. P. 301–330. doi: 10.1146/annurev-earth-031621-071250

Kondrashova N. I., Medvedev P. V., Lyutikov A. V. Assessment of the conditions of carbonate rock formation on the Karelian Craton in the Paleoproterozoic based on geochemical data // *Lithology and Mineral Resources*. 2025. Vol. 60, no. 1. P. 90–113. doi: 10.1134/S0024490224700792

Melezhik V. A., Fallick A. E. A widespread positive $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ anomaly at around 2.33–2.06 Ga on the Fennoscandian Shield: a paradox? // *Terra Nova*. 1996. No. 8. P. 141–157. doi: 10.1111/j.1365-3121.1996.tb00738.x

Melezhik V. A., Fallick A. E., Brasier A. T., Lepland A. Carbonate deposition in the Palaeoproterozoic Onega basin from Fennoscandia: a spotlight on the transition

from the Lomagundi-Jatuli to Shunga events // *Earth-Sci. Rev.* 2015. Vol. 147. P. 65–98. doi: 10.1016/j.earscirev.2015.05.005

Melezhik V. A., Fallick A. E., Martin A. P., Condon D. J., Kump L. R., Brasier A. T., Salminen P. E. The Palaeoproterozoic perturbation of the global carbon cycle: the Lomagundi-Jatuli isotopic event // *Reading the archive of Earth's oxygenation. Global Events and the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Series: Frontiers in Earth Sciences. Vol. 3. Heidelberg: Springer, 2013. P. 1111–1150.*

Melezhik V. A., Fallick A. E., Medvedev P. V., Makarikhin V. V. Extreme $^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ enrichment in ca. 2.0 Ga magnesite-stromatolite-dolomite – “red beds” association in a global context: a case for the worldwide signal enhanced by a local environment // *Earth-Sci. Rev.* 1999. Vol. 48. P. 71–120. doi: 10.1016/S0012-8252(99)00044-6

Melezhik V. A., Fallick A. E., Rychanchik D. V., Kuznetsov A. B. Palaeoproterozoic evaporites in Fennoscandia: implications for seawater sulphate, the rise of atmospheric oxygen and local amplification of the $\delta^{13}\text{C}$ excursion // *Terra Nova*. 2005. Vol. 17(2). P. 141–148. doi: 10.1111/j.1365-3121.2005.00600.x

Prave A. R., Kirsimae K., Lepland A., Fallick A. E., Kreitsmann T., Deines Y. E., Romashkin A. E., Rychanchik D. V., Medvedev P. V., Moussavou M., Bakakas K., Hodgskiss M. S. W. The grandest of them all: the Lomagundi-Jatuli Event and Earth's oxygenation // *J. Geol. Soc.* 2022. Vol. 179. doi: 10.1144/jgs2021-036

Strauss H., Melezhik V. A., Reuschel M., Fallick A. E., Lepland A., Rychanchik D. V. Abundant marine calcium sulphates: radical change of seawater sulphate reservoir and sulphur cycle // *Reading the archive of Earth's oxygenation. Global Events and the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Series: Frontiers in Earth Sciences. Vol. 3. Heidelberg: Springer, 2013. P. 1169–1194.*

References

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

Gorokhov I. M., Kuznetsov A. B., Melezhik V. A., Konstantinova G. V., Mel'nikov N. N. Sr isotopic composition in the Upper Jatulian (Early Paleoproterozoic) dolomites of the Tulomozero formation, southeastern Karelia. *Doklady Earth Sciences*. 1998;360(4):533–536. (In Russ.)

Hodgskiss M. S. W., Crockford P. W., Turchyn A. V. Deconstructing the Lomagundi-Jatuli carbon isotope excursion. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2023;51(1): 301–330. doi: 10.1146/annurev-earth-031621-071250

Kondrashova N. I., Medvedev P. V., Lyutikov A. V. Assessment of the conditions of carbonate rock formation on the Karelian Craton in the Paleoproterozoic based on geochemical data. *Lithology and Mineral Resources*. 2025;60(1):90–113. doi: 10.1134/S0024490224700792

Kulikov V. S., Kulikova V. V. Kuolarjarvi synclinorium: a new concept of geological structure and composite section. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN*

= *Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2014;1:28–38. (In Russ.)

Makarikhin V. V., Medvedev P. V., Rychanchik D. V. Role of the biotic factor in the Jatulian sedimentogenesis. *Geodinamika, magmatizm, sedimentogenez i minerageniya Severo-Zapada Rossii: Materialy Vseros. konf. (Petrozavodsk, 12-15 noyabr. 2007 g.) = Geodynamics, magmatism, sedimentogenesis, and mineralogy in NW Russia: Proceedings of all-Russian conf. (Petrozavodsk, Nov. 12-15, 2007)*. Petrozavodsk; 2007. P. 241–245. (In Russ.)

Melezhik V. A., Fallick A. E. A widespread positive $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ anomaly at around 2.33–2.06 Ga on the Fennoscandian Shield: a paradox? *Terra Nova*. 1996;8: 141–157. doi: 10.1111/j.1365-3121.1996.tb00738.x

Melezhik V. A., Fallick A. E., Brasier A. T., Lepland A. Carbonate deposition in the Palaeoproterozoic Onega basin from Fennoscandia: a spotlight on the transition from the Lomagundi-Jatuli to Shunga events. *Earth-Sci. Rev.* 2015;147:65–98. doi: 10.1016/j.earscirev.2015.05.005

Melezhik V. A., Fallick A. E., Martin A. P., Condon D. J., Kump L. R., Brasier A. T., Salminen P. E. The Palaeoproterozoic perturbation of the global carbon cycle: the Lomagundi-Jatuli isotopic event. *Reading the archive of Earth's oxygenation. Global Events and the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Series: Frontiers in Earth Sciences*. Vol. 3. Heidelberg: Springer; 2013. P. 1111–1150.

Melezhik V. A., Fallick A. E., Medvedev P. V., Makarikhin V. V. Extreme $^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ enrichment in ca. 2.0 Ga magnesite-stromatolite-dolomite – “red beds”

association in a global context: a case for the worldwide signal enhanced by a local environment. *Earth-Sci. Rev.* 1999;48:71–120. doi: 10.1016/s0012-8252(99)00044-6

Melezhik V. A., Fallick A. E., Rychanchik D. V., Kuznetsov A. B. Palaeoproterozoic evaporites in Fennoscandia: implications for seawater sulphate, $\delta^{13}\text{C}$ excursions and the rise of atmospheric oxygen. *Terra Nova*. 2005; 17:141–148. doi: 10.1111/j.1365-3121.2005.00600.x

Mitrofanov F. P., Negrutsa V. Z. (eds.) General stratigraphic scale of the Lower Precambrian in Russia: an explanatory note. Apatity: KNTs RAN; 2002. 13 p. (In Russ.)

Ovchinnikova G. V., Kuznetsov A. B., Melezhik V. A., Gorokhov I. M., Vasil'eva I. M., Gorokhovskiy B. M. Pb–Pb age of Jatulian carbonate rocks: the Tulomozero formation of Southeast Karelia. *Stratigr. Geol. Correl.* 2007;15(4):359–372. doi: 10.1134/S0869593807040028

Prave A. R., Kirsimäe K., Lepland A., Fallick A. E., Kreitsmann T., Deines Y. E., Romashkin A. E., Rychanchik D. V., Medvedev P. V., Moussavou M., Bakakas K., Hodgskiss M. S. W. The grandest of them all: the Lomagundi-Jatuli Event and Earth's oxygenation. *J. Geol. Soc.* 2022;179(1). doi: 10.1144/jgs2021-036

Strauss H., Melezhik V. A., Reuschel M., Fallick A. E., Lepland A., Rychanchik D. V. Abundant marine calcium sulphates: radical change of seawater sulphate reservoir and sulphur cycle. *Reading the archive of Earth's oxygenation. Global Events and the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Series: Frontiers in Earth Sciences*. Vol. 3. Heidelberg: Springer; 2013. P. 1169–1194.

Поступила в редакцию / received: 01.08.2025; принята к публикации / accepted: 18.08.2025.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Медведев Павел Владимирович

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

e-mail: pmedved@krc.karelia.ru

Кондрашова Наталья Ивановна

канд. геол.-мин. наук, научный сотрудник

e-mail: kondr@krc.karelia.ru

Лютиков Андрей Викторович

младший научный сотрудник

e-mail: andrew-greener@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Medvedev, Pavel

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

Kondrashova, Natalya

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

Lyutikov, Andrey

Junior Researcher