



# Палеопротерозойские строматолиты восточной части Фенноскандинавского щита: микроструктура и 3D-моделирование

А. В. Лютиков

Институт геологии ФИЦ «Карельский НЦ РАН», Петрозаводск  
andrew-greener@yandex.ru

В статье приведены результаты изучения микроструктуры и 3D-моделирования палеопротерозойских строматолитов *Segosia columnaris* и *Sundusia mira* восточной части Фенноскандинавского щита (Карельский кратон). Используются современные методы, включая сканирующую электронную микроскопию (СЭМ), 3D-моделирование, приведены результаты рамановской спектроскопии. СЭМ-анализ выявил присутствие остатков, возможно, цианобактерий-строматолитостроителей, участвующих в образовании этих построек, что потенциально указывает на биогенное происхождение изученных образцов. Впервые с использованием программного обеспечения для 3D-визуализации получены изображения пространственных форм исследуемых строматолитов, которые могут быть использованы для уточнения классификации строматолитов по морфологическим особенностям. 3D-моделирование строматолитовых построек позволило восстановить их первоначальную форму.

**Ключевые слова:** строматолиты, палеопротерозой, сканирующая электронная микроскопия, 3D-моделирование

## Paleoproterozoic stromatolites *Segosia columnaris* and *Sundusia mira* of the Eastern part of the Fennoscandian Shield: microstructure and 3D modeling

A. V. Lyutikov

Institute of Geology FRC «Karelian RC RAS», Petrozavodsk

The purpose of this study is to study the microstructure and 3D modeling of Paleoproterozoic stromatolites *Segosia columnaris* and *Sundusia mira* in the eastern part of the Fennoscandian shield (Karelian craton). The premise of the study is the extensive paleontological material collected by researchers in the 1950s and 1980s. Modern methods, including SEM analysis, 3D modeling, and the results of Raman spectroscopy are used. As a result of studying the microstructure of stromatolites, possible remnants of cyanobacteria involved in the formation of these structures were identified, which potentially indicated the biogenic origin of the studied samples. The results of Raman spectroscopy obtained by other authors also indicate the biogenic nature of the studied samples.

For the first time, images of the spatial shapes of the studied stromatolites were obtained by 3D visualization software, which could be used to refine the classification of stromatolites by morphological features. 3D modeling of stromatolite buildings allowed restoring their original shape.

**Keywords:** stromatolites, paleoproterozoic, scanning electron microscopy, 3D modeling, carbonaceous matter

### Введение

В 1950–1960-х гг. исследователи В. С. Слодкевич, В. А. Соколов, Р. В. Бутин изучали строматолитовые постройки на территории Карельского кратона. Они собрали обширный палеонтологический материал из ятулийских пород Карелии. В. А. Соколов подчеркивал стратиграфическое значение не только водорослевых остатков, но и биогермов ятулия. В этот период также вышли работы с описаниями различных органических остатков ятулийского возраста, результатом которых стал сборник статей, в котором обобщаются проведенные исследования (Остатки..., 1966).

В 1970–1980-х гг. были обнаружены новые местонахождения строматолитовых построек, переописаны ранние находки, описаны новые виды и роды, что позволило начать работу над установлением закономерности распределения строматолитов в разрезах палеопротерозоя (Тимофеев, 1969; Вологдин, 1970; Сацук,

Кононова, 1971; Макарихин, Сацук, 1973; Крылов, 1975; Макарихин, Кононова, 1983 и др.).

Микробиалиты\* Карельского кратона являются одними из древнейших проявлений жизни на Земле. Из-за метаморфизма и перекристаллизации пород клеточные остатки встречаются редко. Сами строматолитовые постройки также подвержены изменениям, что усложняет их систематизацию. Строматолиты и другие микробиалиты протерозойских биогенных образований Карельского кратона обладают четкими таксономическими критериями. Строматолиты наиболее распространены и имеют первостепенное значение для корреляции, доминируя среди докембрийских фоссилий. Успех корреляции зависит от единых критериев их классификации.

\* Термин используется некоторыми стратиграфами

В данной работе предпринята попытка нового подхода в изучении строматолитов, такого как 3D-моделирование, который, возможно, поспособствует систематизации существующих объектов. На примере строматолитов *Segosia columnaris* Butin и *Sundosia mira* (Butin) (Остатки..., 1966; Макарихин, Кононова, 1983), которые являются одними из древнейших строматолитов на территории Евразии, показан результат проделанной работы.

Существует некая путаница с родовым названием строматолитов *Sundosia*. Р. В. Бутин (Остатки..., 1966) не только описал род *Sundia* как водоросль, но и при описании типового вида *Sundia mirus* (водорослевые колонии) включил в него разные по морфологии строматолиты, один из которых в этом же сборнике статей А. Г. Вологдин описывает как другой морфологический тип. Позже В. В. Макарихин выделил данные строматолиты как отдельные роды: *Sundosia* (столбчатые активноветвящиеся постройки) и *Parallelophyton* (брусковые вытянутые в плане постройки). По причине переописания построек в названии вида *Sundosia mira* (Butin) фамилия автора первого описания приводится в скобках (Макарихин, Кононова, 1983). В данной работе в отношении изучаемого объекта используется название рода *Sundosia*, но некоторые авторы предпочитают использовать *Sundia* (Литвинова, 2018).

Традиционный метод изучения строматолитов базируется на морфологическом описании построек,

стратиграфической привязке образцов, сравнении построек на региональном и межрегиональном уровнях, фотографировании, а также графической реконструкции (Крылов, 1963; Маслов, 1960; Макарихин, Кононова, 1983; Макарихин, Медведев, 2000). Современные методы расширяют и дополняют традиционный подход. Они позволяют получить данные об особенностях морфологии построек на микроструктурном уровне.

Целью исследования является изучение микроструктуры и 3D-моделирование палеопротерозойских строматолитов *Segosia columnaris* и *Sundosia mira* Карелии.

### Материалы и методы исследования

Исследования проведены в центре коллективного пользования Института КарНЦ РАН Петрозаводска. Обширный палеонтологический материал был собран исследователями в 1950–1980-х годах. Материалом для настоящего исследования послужили образцы строматолитов из коллекции Р. В. Бутина и В. В. Макарихина, отобранные из отложений онежского горизонта ятулия в районе озер Сегозеро (Центрально-Карельская строматолитовая провинция) и Сундозеро (Южно-Карельская строматолитовая провинция) (рис. 1). Верхний и нижний подгоризонты разделяет толща, состоящая из основных пород. Выходы пород ятулийского надгоризонта соответствуют по возрасту концу гло-

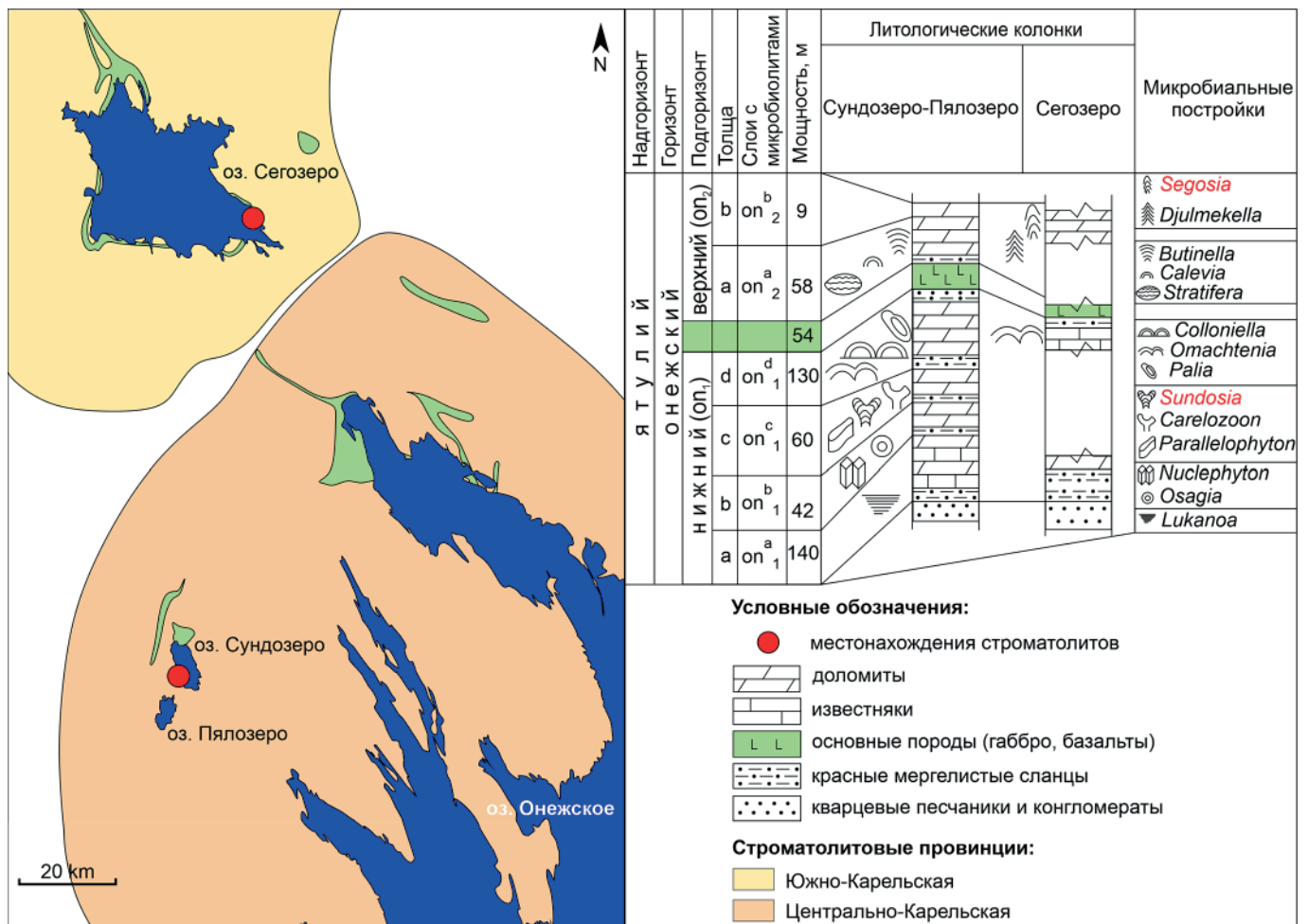


Рис. 1. Карта-схема с местонахождениями изучаемых строматолитов и разрез ятулия

Fig. 1. Schematic map with the locations of the studied stromatolites and the geological section of Jatuliya



бального Гуронского оледенения (2.1 млрд лет). Образцы хранятся в музее геологии, а также лаборатории геологии и геодинамики докембрия ИГ КарНЦ РАН.

Для исследования на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) строматолитовых построек были подготовлены аншлифы, а также срезы строматолитовых построек в виде тонких пластинок (толщина 5–7 мм) для проведения 3D-моделирования.

Для детального исследования строматолитов на микроструктурном уровне использовался сканирующий электронный микроскоп VEGA II LSH (Tescan) с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350 (Oxford instruments). Изучалась морфология микрослоев, исследовался химический состав вмещающей породы, а также проводился поиск возможно сохранившихся остатков цианобактерий. Образцы представляли собой аншлифы с напыленными бериллием фрагментами строматолитовых построек с *Segosia columnaris* и *Sundosia mira* (рис. 2). Для реконструкции прижизненных форм и морфологических особенностей строматолитовых построек были подготовлены срезы пород в виде тонких пластинок (толщина

5–7 мм) и использована программа 3D-визуализации Blender.

### Результаты и обсуждения

Исследование образцов со строматолитами *Segosia columnaris* (Sc) и *Sundosia mira* (Sm) с помощью СЭМ показало присутствие в них микроструктур, представляющих, возможно, остатки строматолитостроителей.

Обнаруженные биогенные структуры не имеют признаков, которые могли бы указать на контаминантный характер этих форм (сдвиг, прожигание при анализе и пр.). Ранее в изучаемых строматолитах подобные образования отмечались Т. В. Литвиновой (Литвинова, 2014).

Рассматриваемые здесь строматолиты *Segosia* и *Sundosia* исследовались при помощи рамановской спектроскопии (Джамансартова, 2022). В результате этого исследования было выявлено углеродистое вещество (УВ), а также установлено, что темные сгустки в рассматриваемых строматолитах представляют собой матрицу из доломита и УВ, что свидетельствует о биогенной

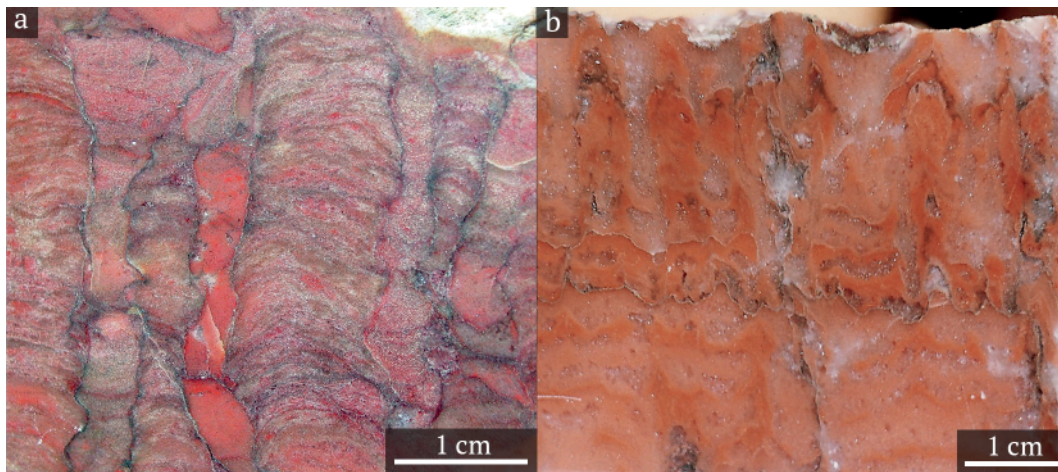


Рис. 2. Фотографии пришлифовок строматолитов: а — *Sundosia mira*, б — *Segosia columnaris*

Fig. 2. Images of stromatolite samples: a — *Sundosia mira*, b — *Segosia columnaris*

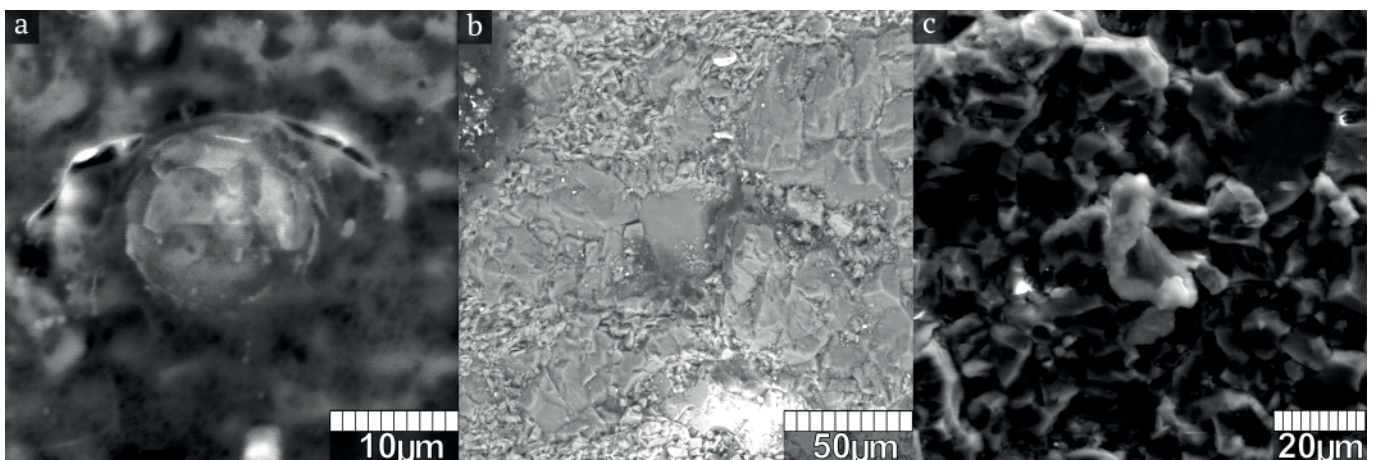


Рис. 3. Микроструктуры в палеопротерозойских строматолитах: а, с — сферические углеродистые структуры в *Segosia columnaris*; б — изогнутая структура в *Sundosia mira* (детекторы обратноотражённых и вторичных электронов)

Fig. 3. Microstructures in Paleoproterozoic stromatolites: а, с — spherical carbonaceous structures in *Segosia columnaris*; б — curved carbonaceous structure in *Sundosia mira* (scanning electron microscope, detectors of back-scattered and secondary electrons)

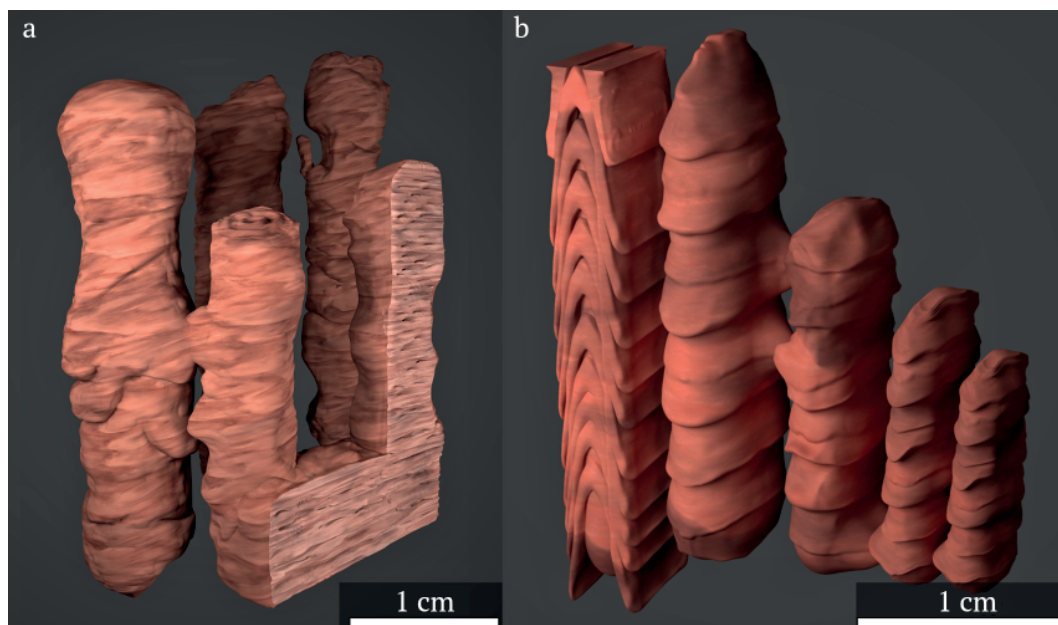


Рис. 4. 3D-модели палеопротерозойских строматолитов со срезом, созданные с помощью программы Blender: а — *Sundosia mira*, б — *Segosia columnaris*

Fig. 4. 3D models of Paleoproterozoic stromatolites with a section, created using the Blender software: а — *Sundosia mira*, б — *Segosia columnaris*

природе фоссилизированных остатков микроорганизмов, существовавших внутри строматолитовой постройки (Medvedev et al., 2016; Джамансартова, 2022).

Воссоздание формы столбиков строматолитов и их взаимного расположения в породе проводилось на основе метода «графического препарирования» (Крылов, 1963, Макарихин, Медведев, 2000) и метода 3D-моделирования. Образец разрезался алмазным диском на параллельные пластины толщиной 5–7 мм. Толщина пластин зависит от диаметра строматолитового столбика, сложности постройки, а также хрупкости породы. Затем контуры строматолитовой колонки с поверхностей распилов фотографировались. Фотографии обрабатывались и накладывались одна на другую в соответствующем порядке. Так восстанавливалась форма столбика внутри породы и строматолитовые столбики графически освобождались от вмещающей породы. При 3D-моделировании строматолитовых построек ввиду отсутствия некоторых деталей было распилено и отснято несколько образцов каждого вида строматолитов. В результате получилась обобщенная объемная модель, которая дает возможность выявить сходство и различие строматолитовых построек с гораздо большей точностью, чем при сравнении отдельных пришлифовок (рис. 4).

Проведенное трехмерное моделирование позволяет получить изображения пространственных форм исследуемых строматолитов и различать мельчайшие детали и особенности строения строматолитовых построек, которые вносят соответствующие дополнения при описании видов.

Полученные результаты могут быть использованы для уточнения существующей, но пока не утвержденной классификации строматолитов по морфологическим особенностям. Компьютерное моделирование позволяет проще и нагляднее воспринимать различия в морфологии строматолитов, передать более тонкие детали строения, которые не удается обнару-

жить визуально при изучении строматолитов, и может способствовать более точному их определению и расширению возможности систематизации.

#### Заключение

В представленном исследовании были изучены два морфотипа палеопротерозойских строматолитов из ятулийских отложений в восточной части Фенноскандинавского щита — *Segosia columnaris* и *Sundosia mira*. С помощью СЭМ была изучена микроструктура рассматриваемых строматолитов, а также обнаружены включения, возможно, органического вещества. С помощью метода 3D-моделирования впервые были созданы пространственные прижизненные формы рассматриваемых строматолитовых построек. Полученные результаты послужат уточнению классификации и пониманию морфологии палеопротерозойских строматолитов и природы их образования.

Автор выражает благодарность научному руководителю к. г.-м. н. П. В. Медведеву (ИГ КарНЦ РАН, Петрозаводск) за консультации и рекомендации при написании работы, а также анонимным рецензентам за конструктивные замечания по содержанию статьи.

Работа выполнена в рамках государственного бюджетного финансирования темы № 215 НИР Института геологии КарНЦ РАН.

#### Литература / Reference

- Вологдин А. Г. Остатки организмов из шунгитов докембрия Карелии // ДАН СССР. 1970. Т.193. № 5. С. 1163–1166.  
Vologdin A. G. Remains of organisms from shungites of Precambrian Karelia, Doklady Earth Sciences, 1970, V. 193, No. 5, pp. 1163–1166. (in Russian)  
Джамансартова О. М. Углеродистое вещество палеопротерозойских мини-строматолитов Карелии // Литология и полезные ископаемые. 2022. Т. 57. № 3. С. 304–312. DOI:10.31857/S0024497X2203003X



- Dzhamansartova O. M. Carbonaceous matter of Paleoproterozoic Ministromatolites in Karelia. Lithology and Mineral Resources, 2022, V. 57, No. 3, pp. 264–271. DOI: 10.1134/S0024490222030038. (in Russian)
- Крылов И. Н. Столбчатые ветвящиеся строматолиты рифейских отложений Южного Урала и их значение для стратиграфии верхнего докембрия // Труды ГИН АН СССР. 1963. № 69. 175 с.
- Krylov I. N. Columnar branching stromatolites of the Riphean deposits of the Southern Urals and their significance for the stratigraphy of the Upper Precambrian. Proceedings of GIN of USSR AS, 1963, No. 69, 175 p. (in Russian)
- Крылов И. Н. Строматолиты рифея и фанерозоя СССР // Труды ГИН АН СССР. 1975. № 274. 243 с.
- Krylov I. N. Stromatolites of the Riphean and Phanerozoic of the USSR. Proceedings of GIN of USSR AS, 1975, No. 274, 243 p. (in Russian)
- Литвинова Т. В. Взаимодействие биотических и абиотических событий в процессе формирования строматолитовых рифов // Развитие жизни в процессе абиотических изменений на земле: Материалы III Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 2014. Т. 3. С. 154–160.
- Litvinova T. V. Interaction of biotic and abiotic events during the formation of stromatolite reefs. The development of life in process of abiotic changes on the Earth: proceedings of the 3rd All-Russian scientific and practical conference. Irkutsk, 2014, V. 3, pp. 154–160. (in Russian)
- Литвинова Т. В. К вопросу о роли микроорганизмов в формировании структурно-текстурных особенностей строматолитов // Lethaea rossica. 2018. Т. 16. С. 1–11.
- Litvinova T. V. Possible role of microorganisms in the formation of structural and textural features of stromatolites. Lethaea rossica, 2018, V. 16, pp. 1–11. (in Russian)
- Макарихин В. В., Кононова Г. М. Фитолиты нижнего протерозоя Карелии. Л.: Наука, 1983. 180 с.
- Makarikhin V. V., Kononova G. M. Lower Proterozoic phytolites of Karelia. Leningrad: Nauka, 1983, 180 p. (in Russian)
- Макарихин В. В., Медведев П. В. Строматолиты. Методы исследования // Научные on-line-проекты Института геологии КарНЦ РАН, 2000. URL: [http://old.igkrc.ru/rus/html\\_files/projects/str/str.htm](http://old.igkrc.ru/rus/html_files/projects/str/str.htm) (дата обращения: 26.05.2023).
- Makarikhin V. V., Medvedev P. V. Stromatolites. Research methods // Scientific on-line projects of the Institute of Geology KarRC RAS, 2000. [http://old.igkrc.ru/rus/html\\_files/projects/str/str.htm](http://old.igkrc.ru/rus/html_files/projects/str/str.htm) (accessed: 26.05.2023). (in Russian)
- Макарихин В. В., Сацук Ю. И. Органические образования среднепротерозойских пород Карелии как палеогеографический критерий // Литология и осадочная литология докембрия: Тезисы докладов X Всесоюзного литологического совещания. М.: 1973. С. 296–298.
- Makarikhin V. V., Satsuk Yu. I. Organic formations of the Middle Proterozoic rocks of Karelia as a paleogeographic criterion. Lithology and sedimentary geology of the Precambrian. Abstracts of the X All-Union Lithological Meeting. Moscow, 1973, pp. 296–298. (in Russian)
- Маслов В. П. Строматолиты (их генезис, метод изучения, связь с фациями и геологическое значение на примере ордовика Сибирской платформы) // Труды ГИН АН СССР. 1960. № 41. 233 с.
- Maslov V. P. Stromatolites (their genesis, method of study, connection with facies and geological significance on the example of the Ordovician of the Siberian platform). Proceedings of GIN of USSR AS, 1960, No 41, 233 p. (in Russian)
- Сацук Ю. И., Кононова Г. М. Верхний водорослевый горизонт ятулия Онежской мульды // Тез. докл. геолог. межобл. конф. по проблеме «Геология и полезные ископаемые Карелии». Петрозаводск, 1971. С. 32–37.
- Satsuk Yu. I., Kononova G. M. The upper algal horizon of the Yatulia of the Onega mulda. Abstracts of the geological interregional conference on the problem of «Geology and minerals of Karelia». Petrozavodsk, 1971, pp. 32–37. (in Russian)
- Тимофеев Б. В. Сфероморфиды протерозоя. Л.: Наука, 1969. 146 с.
- Timofeev B. V. Spheromorphides of the Proterozoic, Leningrad: Nauka, 1969, 146 p. (in Russian)
- Остатки организмов и проблематика протерозойских образований Карелии. Петрозаводск: Карельское книж. изд-во, 1966. 114 с.
- Remains of organisms and problems of Proterozoic formations of Karelia, Petrozavodsk: Karelian Publishing House, 1966, 114 p. (in Russian)
- Medvedev P. V., Chazhengina S. Yu., Svetov S. A. Application of Raman Spectroscopy and High-Precision Geochemistry for Study of Stromatolites. Switzerland: Springer, 2016, pp. 329–341.

Поступила в редакцию / Received 29.02.2024