

Микрофоссилии планктонных зелёных водорослей в кремнистых породах Палеопротерозоя на острове Гогланд в Финском заливе

Беляев А.М., Юхалин П.В.

действительные члены Палеонтологического общества при РАН

Paleovirusology group, ООО «Сидосе», С.-Петербург

Email: paleovirusology@mail.ru, abel-7-777@yandex.ru,

<http://www.paleovirusology.ru/>

Микрофоссилии зелёных водорослей найдены в кремнистых породах среди базальтов и риолитов с радиологическим возрастом 1640 миллионов лет. Они локализованы в окремненном слизистом веществе планктонных биопленок, в котором сохранились не только морфологические особенности отдельных микроорганизмов, но и биоразнообразие экосистемы в целом. Слизистое вещество биопленок, было насыщено свободным кислородом, за счет фотосинтеза цианобактерий, в значительно большей степени, чем морская вода и атмосфера того времени. Древние планктонные биопленки были своеобразными кислородными оазисам и являлись колыбелью биосферы Земли.

Ключевые слова: планктонные биопленки, микрофоссилии палеопротерозоя, зелёные водоросли, кремнистые породы, окремнение микроорганизмов.

**Microfossils of Planktonic Green Algae in the
Paleoproterozoic Siliceous Rocks of Hogland Island,
Gulf of Finland, Russia**

Anatoly. M. Belyaev, Paul V. Yukhalin

Paleovirusology group, Sidose LLC, St. Petersburg, Russia

Email: paleovirusology@mail.ru, abel-7-777@yandex.ru,
<http://www.paleovirusology.ru/>

Abstract

Microfossils of green algae have been found in siliceous rocks among basalts and rhyolites with a radiological age of 1640 million years. They are localized in the silicified mucous substance of planktonic biofilms, which preserves not only the morphological features of individual microorganisms, but also the biodiversity of the ecosystem as a whole. The mucous substance of biofilms was saturated with free oxygen, due to photosynthesis of cyanobacteria, to a much greater extent than sea water and the atmosphere of that time. Ancient planktonic biofilms were a kind of oxygen oases and were the cradle of the Earth's biosphere.

Key words: planktonic biofilms, Paleoproterozoic microfossils, Green Algae, siliceous rocks, silification of microorganisms.

Введение

Современный фитопланктон, основу которого составляют фотоавтотрофные микроорганизмы, имеет огромное значение для биосферы Земли. Поглощая энергию Солнца, он превращает минеральные питательные вещества в органическую биомассу и вырабатывает молекулярный кислород, необходимый для существования эукариотов. По разным оценкам фитопланктон генерирует от 50 % до 85 % кислорода (<https://fb.ru/article/444998>). В геологическом прошлом Земли, благодаря возрастающей массе зеленых

водорослей, свободный кислород накапливался в морской воде и в атмосфере и способствовал появлению и эволюции многоклеточных эукариотов. При этом фитопланктон мог свободно перемещаться по поверхности океанов и морей под действием ветров и течений, занимая новые обширные пространства. Приливные движения постоянно выбрасывали его вещество на берега и, в конце концов, позволили биоте оккупировать материковые территории. Поэтому древний фитопланктон можно назвать колыбелью биосферы Земли.

1. Эколого-геологические условия захоронения микроорганизмов

Останки зеленых водорослей лучше всего сохраняются в кремнистых породах, образовавшихся из горячих, насыщенных кремнекислотой вод. Такие породы известны около современных термальных источников (Розанов и др., 2002; Westall, et al., 1995; Benning, et al., 2002). Так в термальных источниках кальдеры Узон, Камчатка, происходило полное замещение кремнеземом нитей цианобактерий и, окружающего их слизистого вещества, всего за несколько часов, практически при жизни микроорганизмов (Жегалло и др., 2007). При этом микрофоссилии полностью сохранили свой объем (Розанов, Ушатинская, и др., 2011).

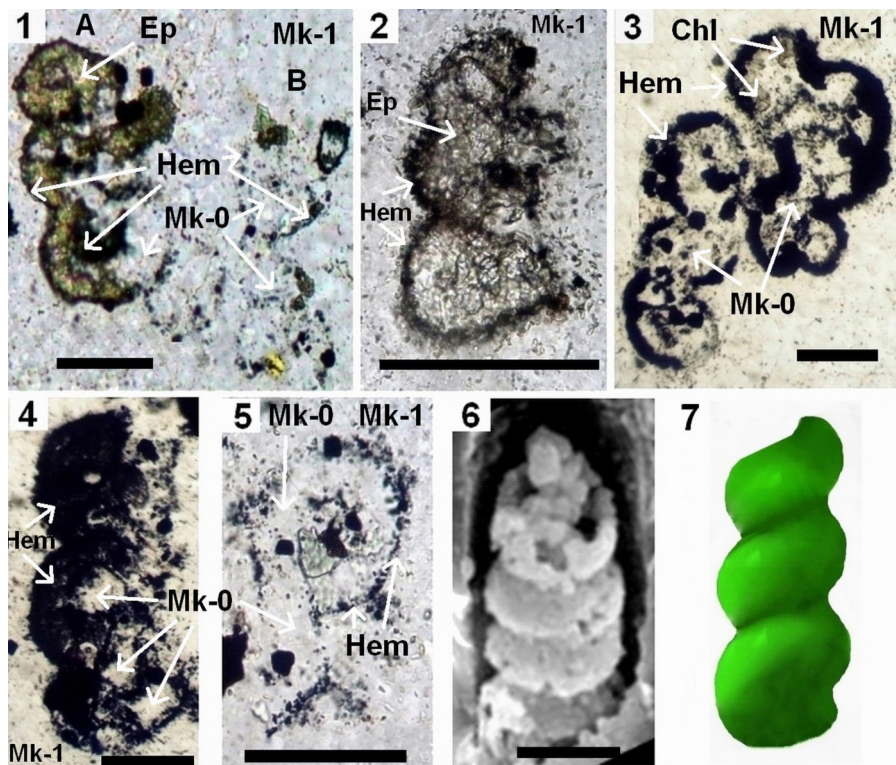
Кремнистые породы также могут образовываться из горячих, насыщенных кремнекислотой вод в процессах подводного вулканизма (Belyaev, 2018; Belyaev, Yukhalin, 2021). Так, в вулканогенно-осадочных толщах с возрастом 1640 миллионов лет на острове Гогланд в Финском заливе кремнистые горные

породы присутствуют в виде прослоев и линз. Они сложены хемогенными кремнистыми осадками, а также окремненным веществом планктонных биопленок, содержащим многочисленные останки микрофоссилий зеленых водорослей. Биогенные субстраты современного фитопланктона, обогащены лёгким изотопом углерода ^{12}C ($\delta^{13}\text{C}$ от -18 , до -25‰) за счет процессов фотосинтеза (Hayes, et al., 2001; Popp, et al., 1998). Графит, выделенный из микрокварцитов, окремненных биопленок Гогланда, обогащен лёгким изотопом углерода ^{12}C ($\delta^{13}\text{C}$ от -28 , до -29.5‰). Это однозначно указывает на присутствие в породах остатков древних органических веществ биологического происхождения (Belyaev, 2018, Belyaev, Yukhalin, 2021).

По морфологии микрофоссилии в микрокварцитах подобны некоторым современным и ископаемым спиральным и коккоидным цианобактериям. Однако микрофоссилии зеленых водорослей, скорее всего, имели лишь внешне сходные формы с известными ископаемыми, и современными организмами. Поэтому, из-за неопределённого положения таксонов, при их описании использованы предварительные не валидные названия близких по морфологии родов.

2. Спиралевидные микрофоссилии, подобные по морфологии современным и ископаемым цианобактериям *Spirulina*, обнаружены в микрокварцитах из базальтов (Belyaev, 2018; Беляев, 2019). Они имеют формы трехвитковых спиралей, и внешние контуры, сложенные цепочками мелких зерен гематита (Hem), агрегатами зерен эпидота (Ep),

или хлорита (Chl). Снаружи и внутри контуров микрокварцит (Фото 1.1-1.5.). Размеры микрофоссилий от 50х150 до 100х300 мкм. Спиралевидные микрофоссилии условно названы *Spirulina yubogdanovi* (SY).



Фототаблица 1. Структуры спиральных микрофоссилий в микрокварцитах из базальтов 1.1.-1.5. Фоссилии спиральных структур *Spirulina yubogdanovi* (SY). Шлиф, без анализатора. Масштабная линейка 100 мкм.

1.A. Спиральная структура SY с внешними контурами, сложенными цепочками мелких зерен гематита (Hem). Внутри контура – агрегат зерен эпидота (Ep). **1.B.** Внешние контуры сложены цепочками мелких зерен

гематита (Hem). Внутри контуров микрокварцит (Mk-0). 1.2. Спиральная структура (SY). Внешние контуры сложены цепочками мелких зерен гематита (Hem). Внутри контура – агрегат зерен эпидота (Ep). 1.3. Спиральная структура (SY). Внешние контуры сложены цепочками мелких зерен гематита (Hem). Внутри контура микрокварцит (Mk-0), и зерна хлорита (Chl). 1.4. Спиральная структура (SY), сложенная агрегатом зерен гематита (Hem). 1.5. Поперечное сечение спиралевидной структуры (SY). Контуры завитка сложены цепочками мелких зерен гематита. Внутри контура микрокварцит (Mk-0). 1.6. Современная окремненная спиральная цианобактерия *Spirulina* внутри окремненного слизистого чехла. Термальные источники кальдеры Узон, Кроноцкий заповедник, Камчатка. (Розанов, Ушатинская, и др. 2011). Масштабная линейка 10 мкм. 1.7. Модель цианобактерии *Spirulina yubogdanovi*.

3. Структуры коккоидных микрофоссилий в кремнистых породах из риолитов

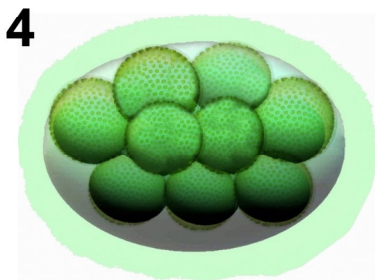
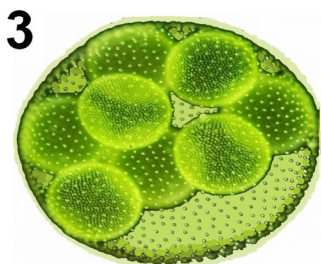
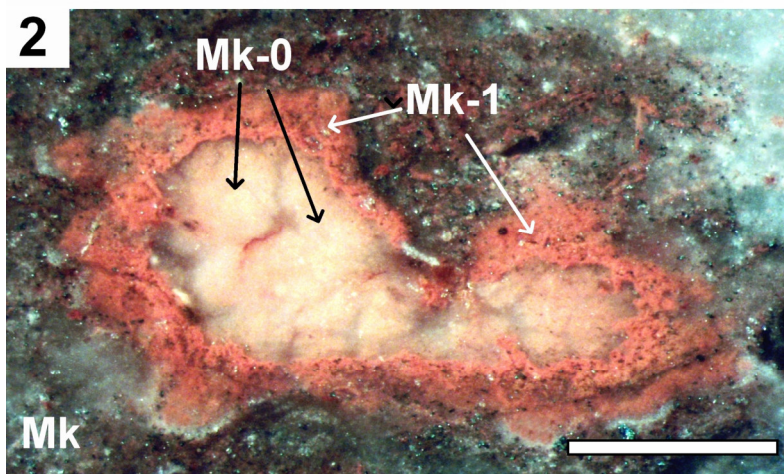
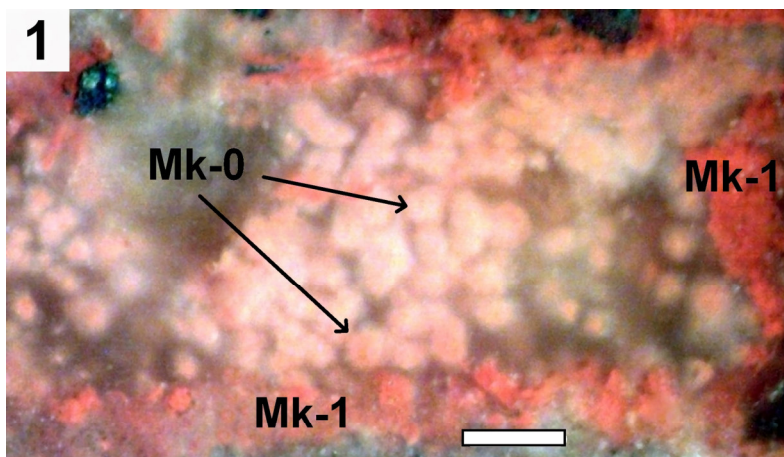
Микрофоссилии зелёных водорослей найдены в двух разновидностях кремнистых порода из риолитов: 1) В микрокварцитах, цементирующих эруптивные брекчии; 2) В микрокварцитах, слагающих маломощные линзы (до 25 сантиметров) среди потоков риолитовых лав.

Псевдоморфозы кремнезема по органическим структурам коккоидных зелёных водорослей в шлифах и аншлифах выглядят как сохранившие объем клетки и их агрегаты.

3.1. В микрокварцитах из цемента брекчий в риолитах найдены сложные структуры (от 3 до 10 см в

поперечнике), сложенные агрегатами розовых тесно сближенных кремнистых глобул (от 0.3 до 0.5 мм в поперечнике), погруженные в светло-серый микрокварцит, и окруженные красно-бурым микрокварцитом. Эти структуры локализованы в бурых микрокварцитах (Мк) которые, образовались, по нашему мнению, в результате окремнения слизистого вещества планктонных биопленок. Сами кремнистые глобулы, возможно, представляют собой микрофоссилии клеток окремненных колониальных водорослей (Мк-0). Красно-бурый микрокварцит (Мк-1), сформировался в результате окремнения внешней слизистой оболочки, окружавшей колонию. Он окрашен в красновато-бурые цвета мельчайшими частичками гематита. Это может свидетельствовать о присутствии во внешней слизистой оболочке, окружавшей колонию, свободного кислорода, произведенного колониальными водорослями. Рыхлая губчатая структура, окружающего колонию микрокварцита, позволяет предположить, что при фоссилизации окремнению подвергалось не только слизистое органическое вещество, но и находящиеся в нем мельчайшие одноклеточные или колониальные фотоавтотрофные микроорганизмы.

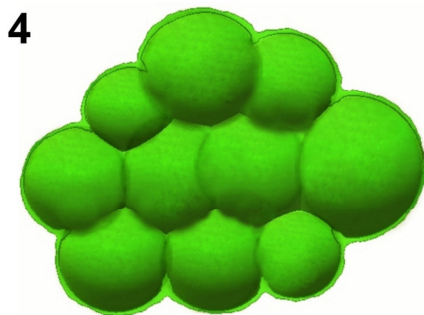
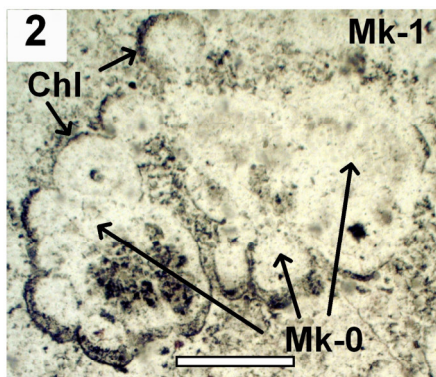
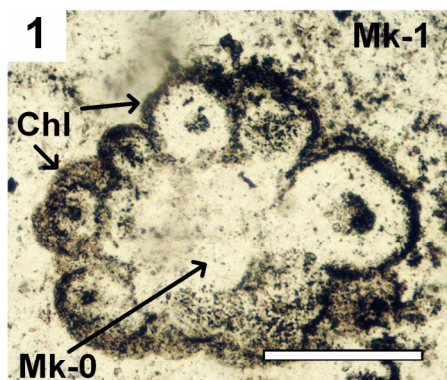
Окремненные микрофоссилии похожи на колонии современных зеленых водорослей рода Вольвокс (*Volvox*), которые образуют сферические или яйцевидные структуры, зеленого цвета, размером от 0,5 до 1 мм (Рис. 2.3), внутри которых находятся круглые или яйцевидные клетки. Из-за внешнего сходства со структурами коккоидных зелёных водорослей рода *Volvox*, микрофоссилии получили предварительное название *Protovolvox abarinov (PA)*.



Фототаблица 2. Структуры микрофоссилий коккоидных водорослей в микрокварцитах из брекчий в риолитах.

2.1.-2.2. Фоссилии кремнистых колониальных водорослей *Protovolvox abarinov* (Mk-0), окруженные розовым микрокварцитом (Mk-1), сформировавшимся при кремнении органического вещества слизистой оболочки колонии. (Mk) – микрокварцит, сформировавшийся по кремнистому органическому веществу биопленки. Масштабная линейка 1мм. **2.3.** Современная зеленая водоросль *Volvox*. **2.4.** Модель ископаемой зеленой водоросли *Protovolvox abarinov*

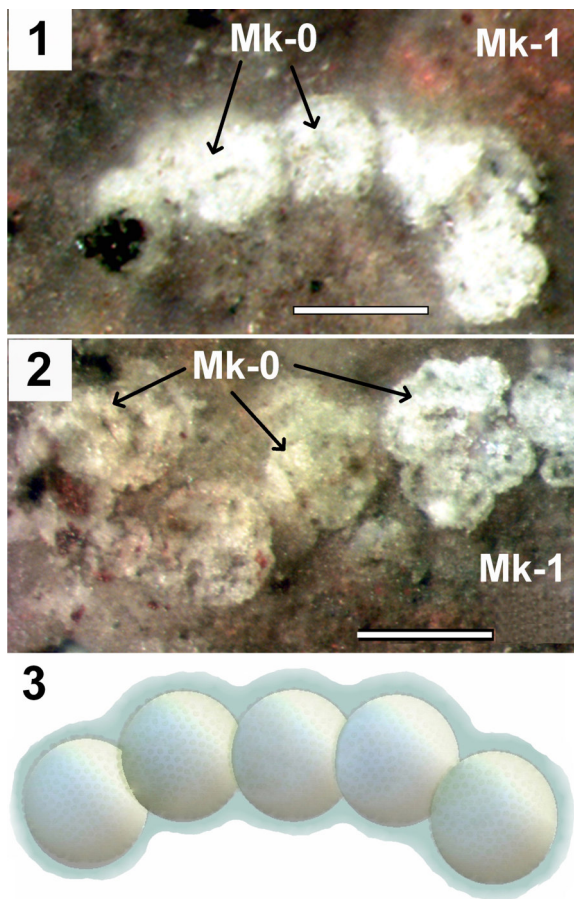
3.2 Микрофоссилии кремнистых коккоидных водорослей близкие по морфологии к ископаемым и современным микроорганизмам рода *Entophysalis* в микрокварцитах (Mk-1) из риолитов (Фото 3.1-3.2). Почковидные контуры кремнистых сферических клеток сложены хлоритом (Chl), а внутреннее пространство микрокварцитом (Mk-0). Из-за внешнего сходства со структурами коккоидных зеленых водорослей рода *Entophysalis*, микрофоссилии получили предварительное название *Entophysalis sidose* (Беляев, Юхалин, 2021). На срезах в шлифах видны отчетливые зоны оболочек сферических клеток. В центрах некоторых сферических структур присутствуют темные округлые образования, которые, возможно, представляли собой fossilized ядра клеток. Однако, при экспериментальном силицировании живых клеток прокариот этилсиликатом, хорошо сохранялся слизистый чехол клетки, имитируя ее оболочку, тогда как цитоплазма клетки коллапсировала и становилась похожа на ископаемые клетки с «пятнами», которые ранее интерпретировали как ядра (Francis et al. 1978).



Фототаблица 3. Структуры кокоидных микрофоссилий в микрокварцитах Mk-1 из риолитов. 3.1.–3.2. Фоссилии кокоидных водорослей *Entophysalis sidose*. Контуры сложены цепочками мелких зерен хлорита (Chl). Внутри контура микрокварцит (Mk-0). Масштабная линейка 0.2 мм. Шлиф, без анализатора. **3.3.** Современная цианобактерия *Entophysalis major* (Голубич, Гофман, 1976). **3.4.** Модель ископаемой зеленой водоросли *Entophysalis sidose*.

3.3. Микрофоссилии шарообразных кремненных структур, напоминающие рыхлые светло-серые снежки, предварительно названные

Snowball alice, найдены в микрокварцитах Mk-1 из линз в риолитах (Беляев, Юхалин, 2021). По типу взаимного расположения кокков они образуют цепочки, или тетракокки, сложенные микрокварцитом (Mk-0).



Фототаблица 4. Структуры кокоидных микрофоссилий *Snowball alice* в микрокварцитах из риолитов.

4.1.–4.2. Фоссилии кокоидных водорослей *Snowball alice*, сложенные микрокварцитом Mk-0, в микрокварцитах Mk-1. Масштабная линейка 0.2 мм.

Аншлиф, без анализатора. 4.3. Модель ископаемой зеленой водоросли *Snowball alice*.

Обсуждение результатов

Окремненные планктонные биопленки содержат не только микрофоссилии зелёных водорослей, но и одноклеточных эукариотов, многоклеточных организмов и вирусоподобных структур (Belyaev, 2018; Belyaev, Yukhalin, 2021), которые на порядок превосходят по размерам современные и ископаемые микроорганизмы.

Фоссилизация планктонных микроорганизмов и, окружающей их слизистой субстанции, происходила в результате воздействия горячих минерализованных растворов, приводивших к окремнению цитоплазмы и ожелезнению клеточных мембран. Последующие процессы контактового метаморфизма привели к раскристаллизации кремнистого вещества и превращении его в микрокварциты, а гидроокислы железа, сорбированные на клеточных мембранах, сформировали агрегаты гематита. Скопление фотосинтезирующего фитопланктона привело к значительному обогащению свободным кислородом слизистого вещества биопленок. Это косвенно подтверждается тем, что микрокварциты (Mk-1), сформировавшиеся при окремнении слизистого вещества биопленок, имеют характерный красновато-бурый цвет, за счет мельчайших примесей окислов железа. Обогащение слизистого вещества биопленок свободным кислородом, способствовало эволюционному развитию планктонных одноклеточных и многоклеточных эукариотов.

Планктонные биопленки, были насыщены свободным кислородом, за счет фотосинтеза цианобактерий, в значительно большей степени, чем морская вода и атмосфера в Палеопротерозое, и являлись своеобразными кислородными оазисами. При этом окремненные морские биопленки фиксируют не только строение отдельных планктонных микроорганизмов, но и биоразнообразие экосистемы в целом.

Благодарности.

Авторы выражают благодарность за техническую поддержку исследований: Кобылкову С. В. и его коллегам.

Литература

1. Бактериальная палеонтология. Под ред. Розанова А.Ю. Москва, ПИН РАН, 2002, 188 с.
2. Беляев А.М. Перспективы изучения микрофоссилий в вулканогенно-осадочных кремнистых породах Палеопротерозоя //Материалы LXIV сессии Палеонтологического общества, Изд. ПИН РАН, Москва, 2019, т.2. с. 28-43.
3. Беляев А.М., Юхалин П.В. Находки микрофоссилий колониальных прокариотов в кремнистых породах Хогландской вулканогенно-осадочной формации (1640 млн лет) //Материалы LXVII сессии Палеонтологического общества, Санкт-Петербург, 2021с. 12-14.
4. Golubic S. and Hofmann H.J. Сравнение голоценовых и среднедокембрийских entophysalidaceae (Cyanophyta) в строматолитовых матах водорослей: клеточное деление и деградация. Журнал палеонтология 1976, 50 (6): с. 1074-1082.

5. Жегалло Е.А., и др. Цианophyta в гейзеритовых постройках Камчатки // Альгология. Т. 17. № 1. 2007. с. 88–92.
6. Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах. Под ред. А.Ю. Розанова. М.: ПИН РАН, 2011. 171 с.
7. Микробные сообщества в эволюции биосферы с древнейших времен до наших дней Москва ПИН РАН 2017, 194 с.
8. Belyaev A.M. Paleoproterozoic underwater Volcanism and Microfossil-Like Structures in the Metasedimentary Siliceous Rocks (Hogland Island, Russia) // Journal of Earth Science, 2018; Vol. 29, No. 6, pp. 1431–1442, doi.org/10.1007/s12583-018-0883-4.
9. Belyaev A.M., Yukhalin P.V. Sizes of Genomes of Paleoproterozoic Microfossil Eukaryotes. Int. J. Paleobiol&Paleontol 2021, 4(1): 000121. <https://doi.org/10.23880%2Fijpbp-16000121>.
10. Belyaev A.M., Yukhalin P.V. Virus-Like Microfossils in the 1.64 Ga Siliceous Rocks From Hogland Island, Russia. PaleorXiv, 2021 DOI:[10.31233/osf.io/n8zbu](https://doi.org/10.31233/osf.io/n8zbu).
11. Benning L.G., et al., Molecular characterization of cyanobacterial cells during silicification: A synchrotronbased infrared study // Geochem. Earth Surf. 2002. V. 6. P. 259–263.
12. Francis, S., E.S. Barghoorn and L. Margulis 1978. Об экспериментальном силицировании микроорганизмов. III. Значение сохранения зеленой прокариотической водоросли Prochloron и других коккоидов для интерпретации микробной летописи окаменелостей. Докембрийские исследования 7: 377-383.

13. Hayes, J. M. Fractionation of Carbon and Hydrogen Isotopes in Biosynthetic Processes // Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2001. vol. 43, issue 1, pp. 225-277, DOI: [10.2138/gsrmg.43.1.225](https://doi.org/10.2138/gsrmg.43.1.225).

14. Popp, Brian N.; Laws, Edward A.; Bidigare, Robert R.; et al. Effect of Phytoplankton Cell Geometry on Carbon Isotopic Fractionation, //Geochimica et Cosmochimica Acta, Volume 62, Issue 1, 1998, Pages 69-77; doi:10.1016/S0016-7037(97)00333-5.

15. Westall F., Boni L., Guerzoni E., 1995. The experimental silicification of microorganisms //J. Paleontol. V. 38(3), p. 495–528.

16. <https://fb.ru/article/444998/chto-takoe-fitoplankton-ponyatie-vidyi-rasprostranenie-i-sreda-obitaniya>