

**МИКРОФОССИЛИИ КОЛОНИАЛЬНЫХ ОРГАНИЗМОВ С
ВНУТРЕННИМИ ДЕНДРИТОПОДОБНЫМИ СТРУКТУРАМИ В
КРЕМНИСТЫХ ПОРОДАХ ХОГЛАНДСКОЙ ВУЛКАНОГЕННО-
ОСАДОЧНОЙ ФОРМАЦИИ 1580-1640 МЛН. ЛЕТ
(ЗАПАДНЫЕ ОСТРОВА ФИНСКОГО ЗАЛИВА)**

Беляев А.М.¹, Юхалин П.В.¹,

Богданов Ю.Б.², Назарова Т.А.², Юрченко Ю.Ю.²

¹Paleovirusology group, ООО «Сидосе», С.-Петербург, paleovirusology@mail.ru. ²Всероссийский научно-исследовательский геологический институт, С.-Петербург. b_b@inbox.ru; Tatiana_Nazarova@vsegei.ru; YuriYurchenko@vsegei.ru.

**MICROFOSSILS OF COLONIAL ORGANISMS WITH
INTERNAL DENDRITE-LIKE STRUCTURES IN SILICEOUS
ROCKS OF THE HOAGLAND VOLCANIC-SEDIMENTARY
FORMATION 1580-1640 MA. YEARS
(WESTERN ISLANDS OF THE GULF OF FINLAND)**

Belyaev A.M.¹, Yukhalin P.V.¹,

Bogdanov Y.B.², Nazarova T.A.², Yurchenko Yu.Yu.²

¹Full members of the Paleontological Society of the RAS, Paleovirusology group, Sidose LLC, St. Petersburg, Russia, paleovirusology@mail.ru, <http://www.paleovirusology.ru/>

²Russian Geological Research Institute (VSEGEI), St. Petersburg. b_b@inbox.ru; Tatiana_Nazarova@vsegei.ru; Yuri_Yurchenko@vsegei.ru.

Аннотация

В статье приводятся результаты геомикробиологических исследований дендритоподобных структур, обнаруженных в кремнистых породах палеопротерозоя хогландской вулканогенно-осадочной формации с возрастом 1580-1640 миллионов лет, на Западных островах Финского залива. Установлено, что ветвистые дендритоподобные образования локализованы в окремненных и ожелезненных планктонных биопленках, содержащих повышенные концентрации биогенного изотопа углерода на уровне современной биоты. Они ассоциируют с многочисленными микрофоссилиями

бактерий, эукариотов, многоклеточных организмов и вирусоподобных структур. Ветвистые образования не являются кристаллографическими дендритами, а представляют собой окремненные биоморфы – микрофоссилии колониальных микроорганизмов, инкрустированные отложениями позднего лимонита. Древние биоморфы имели внутренний дендритоподобный «скелет», и были окружены жидкими почковидными образованиями, ограниченными снаружи двойными мембранами. Эти организмы с предварительным названием *Dendritella natalii* обитали в планктонных биопленках в течение, по крайней мере, шестидесяти миллионов лет.

Ключевые слова: геомикробиология; микрофоссилии, палеопротерозой, планктонные биопленки, дендриты, биоморфы, изотопы углерода.

Abstract

The article presents the results of geomicrobiological studies of dendrite-like structures found in siliceous rocks of the Paleoproterozoic of the Hoagland volcanic-sedimentary formation with an age of 1580-1640 million years, on the Western Islands of the Gulf of Finland. It has been established that branched dendrite-like formations are localized in silicified and ferruginized planktonic biofilms containing elevated concentrations of the biogenic carbon isotope at the level of modern biota. They are associated with numerous microfossils of bacteria, eukaryotes, multicellular organisms and virus-like structures. Branched formations are not crystallographic dendrites, but are silicified biomorphs – microfossils of colonial microorganisms encrusted with deposits of late limonite. Ancient biomorphs had an internal dendrite-like «skeleton», and were surrounded by liquid kidney-shaped formations bounded externally by double membranes. These organisms, tentatively named *Dendritella natalii*, have been living in planktonic biofilms for at least sixty million years.

Keywords: geomicrobiology; microfossils, paleoproterozoic, planktonic biofilms, dendrites, biomorphs, carbon isotopes.

Породы Хогландской вулканогенно-осадочной формации расположены на южной окраине Балтийского щита. Они сформировались в условиях растяжения кратонизированной

Земной коры в эпоху формирования анарогенной вулканоплутонической рапакивигранитной формации в интервале 1650-1500 миллионов лет. Породы формации обнажаются на западных островах Финского залива: Большой Тютерс, Гогланд и Соммерс. Наиболее полный разрез вскрыт на острове Гогланд. Базальные кварцевые конгломераты субгоризонтально залегают на дислоцированных кристаллических породах Свекофеннского фундамента (Рис.1).

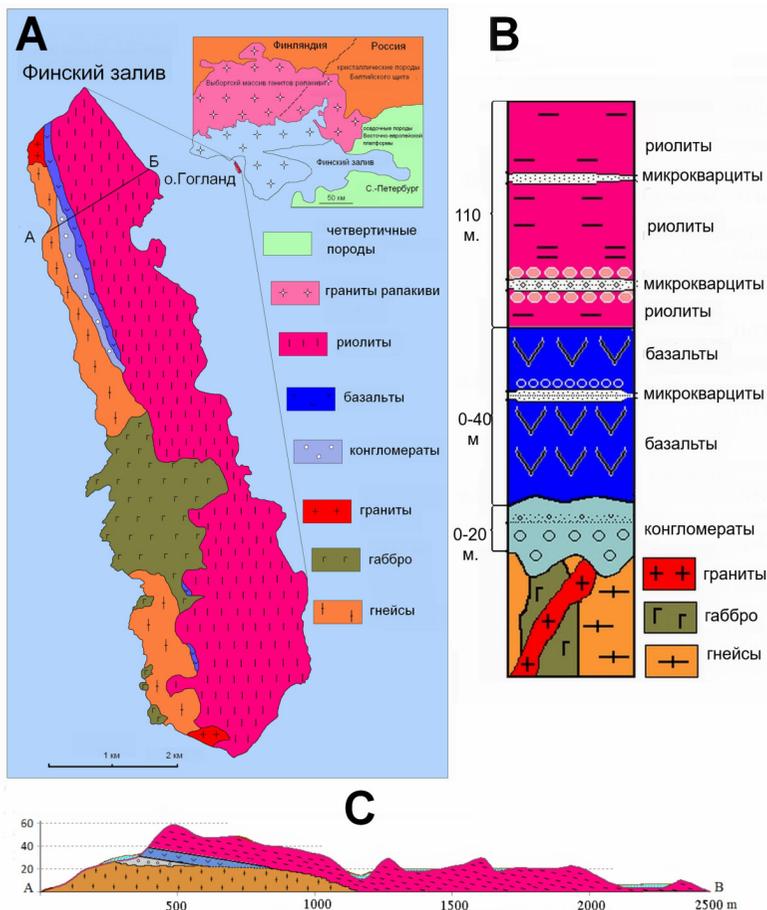


Рис.1. Геологическое строение о. Гогланд: **А.** Схематическая геологическая карта; **В.** Стратиграфическая колонка; **С.** Геологический разрез по линии А-Б, (Belyaev, 2018).

На конгломератах субгоризонтально залегают вулканические толщи базальтов, риолитов и дацитов (Рис.1). Покровы базальтов и риолитов сформировались в условиях подводных извержений в континентальном морском бассейне (Belyaev, 2018; Belyaev, Yukhalin, 2021), о чем свидетельствуют характерные для таких обстановок подушечные структуры в лавах (Belyaev, et al., 1996; Belyaev, 2018; Belyaev, Yukhalin, 2021), (Рис.2).

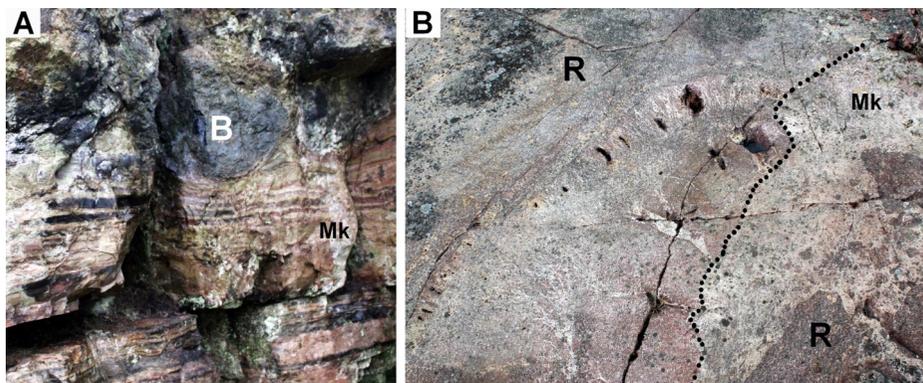


Рис.2. Подушечные структуры в лавах базальтов и риолитов. **А.** Подушки базальтовых лав (В), залегающие на полосчатых микрокварцитах (Mk). **В.** Фрагмент шаровой структуры в риолитах (R), пересекается зоной эруптивной брекчии с обломками риолитов, сцементированной микрокварцитом (Mk). Пунктирной черной линией обозначена граница контакта.

U-Pb изохронное датирование цирконов из риолитов составило 1638 ± 4 и 1640 ± 11 миллионов лет (Belyaev, et al., 1998), что совпадает с возрастом 1640 миллионов лет гранитов Выборгского комплекса рапакиви (Ларин, 2011).

Базальты и риолиты также обнажаются на острове Соммерс в сорока километрах к востоку от острова Гогланд. Циркон из риолитов, проанализированный на ионном микрозонде SHRIMP-II (ВСЕГЕИ) показал конкордантный возраст 1583 ± 8 млн. лет (Беляев и др., 2024). Это более чем на 50 млн. лет моложе, чем возраст риолитов Гогланда.

В базальтах и риолитах Соммерса и Гогланда присутствуют кремнистые породы, которые слагают линзовидные прослои и цемент эруптивных брекчий среди покровов вулканитов (Рис.2,3).

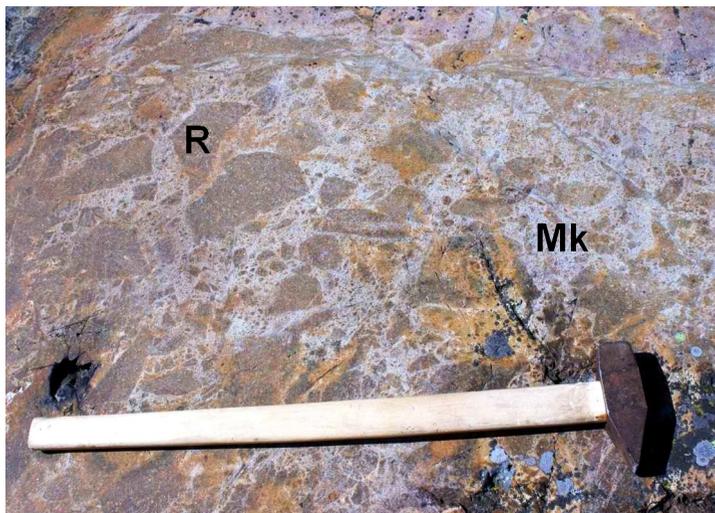


Рис.3. Кремнистые породы микрокварцита – Mk (серое), цементирующие эруптивные брекчии в риолитах– R (о.Соммерс).

Хемогенно-осадочные кремнистые породы сформировались в процессах взаимодействия магматических расплавов с морской водой. Излившиеся раскаленные магмы нагревали придонные воды до высоких температур, и на поверхности потоков происходило интенсивное растворение оксидов кремния. При подъеме нагретой воды с пониженной плотностью в верхние горизонты морского бассейна и ее охлаждения, образовывался гель кремнекислоты. Он осаждался и накапливался в трещинах на поверхности потоков застывших вулканических пород, и в углублениях палеорельефа, часто окаймляя подушечные структуры (Рис.2). Темные прослои в микрокварцитах среди базальтов, обогащенные эпидотом, образовались при метаморфизме частичек вулканического стекла пеплового материала. Под воздействием тепла перекрывающих лавовых потоков кремнистые осадки

претерпели контактовый метаморфизм, превратившись в тонкозернистые микрокварциты, сложенные кристаллами кварца, хлорита и эпидота. Глинистые осадки превратились в серицитовые сланцы, состоящие из мелкозернистой калиевой слюды серицита (Belyaev, 2018; Беляев, 2018; Belyaev, Yukhalin, 2021).

В микрокварцитах, которые цементируют эруптивные брекчии в риолитах, найдены фрагменты окремненных планктонных биопленок. Они образовались, когда нагретые лавами придонные воды, насыщенные оксидами кремния, и ионами железа, поднимались в поверхностные горизонты бассейна. Там они приводили к быстрой фоссилизации (окремнению и ожелезнению) планктонного сообщества микроорганизмов вместе со слизистой субстанцией, в которой они существовали. Оксиды кремния из минерализованного раствора проникали внутрь микроорганизмов, и замещали цитоплазму и органеллы коллоидным гелем кремнекислоты, а гидроокислы железа, осаждались на стенках мембран и перегородок, или образовывали коллоидный гель, замещающий цитоплазму. Фрагменты минерализованных бактериальных пленок, содержащие отдельные микрофоссилии окремненных и ожелезненных микроорганизмов оседали на дно, и погружались в кремнистые и глинистые осадки, вместе с которыми претерпели контактовый метаморфизм. В планктонных биопленках хорошо сохранились морфологические особенности древних микроорганизмов. Благодаря вязкой среде, которая представляла собой слизистое вещество, и быстро протекавшим процессам фоссилизации, были зафиксированы взаимоотношения между микроорганизмами. Красновато-бурый цвет придают микрокварцитам мельчайшие чешуйки гематита. Слизистое вещество биопленок, очевидно, содержало свободный кислород, образовавшийся за счет фотосинтеза цианобактерий, в значительно большей степени, чем морская вода и атмосфера того времени. Об этом свидетельствуют процессы ожелезнения микроорганизмов, для которых был необходим свободный кислород. Древние планктонные биопленки могли представлять собой своеобразные кислородные оазисы (Belyaev, Yukhalin, 2022).

Окремненные планктонные биопленки в микрокварцитах, содержат целый мир разнообразных микрофоссилий: спиральных цианобактерий, зелёных водорослей, диатомей, фораминифер, амёб, жгутиковых и многоклеточные организмов, а также вирусоподобных структур (Belyaev, 2018; Беляев, 2019; Belyaev, Yukhalin, 2021) (Рис.4).

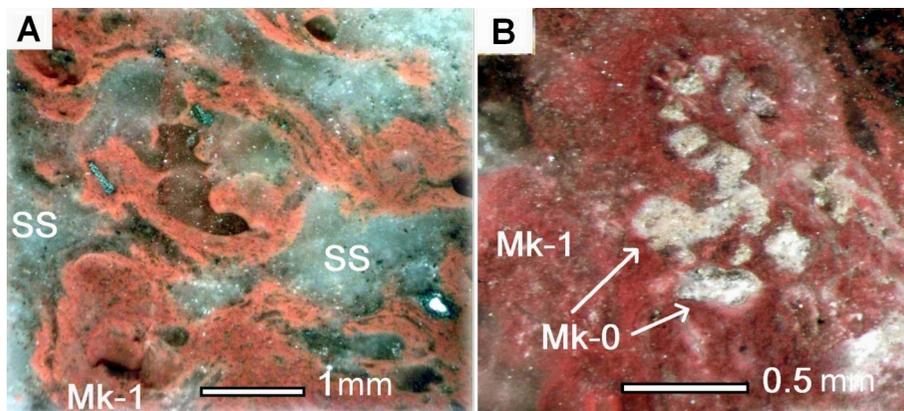


Рис.4. Фрагменты окремненных планктонных биопленок в микрокварцитах из брекчий в риолитах: А. Микрокварцит (Mk-1) с волнисто-струйчатой текстурой в ассоциации м серицитовыми сланцами (SS). Аншлиф. В. Фрагмент микрокварцита (Mk-1) включает окремненную структуру (Mk-0), похожую на трихому цианобактерии,. Аншлиф.

Наряду с микрофоссилиями в окремненном веществе биопленок впервые обнаружены ветвистые дендритоподобные образования. Они локализованы в микрокварцитах, цементирующих брекчии в риолитах, на островах Гогланд и Соммерс. На острове Гогланд микрокварциты, содержащие дендритоподобные структуры, образуют сплошные массы, и выполняют стенки небольших пустот (Рис.5).

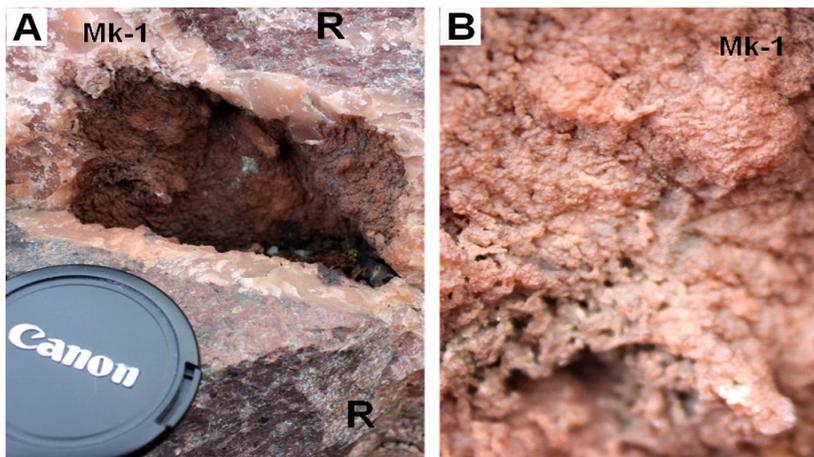


Рис.5. Розовые микрокварциты из цемента в брекчиях риолитов. А. Стенки полости в риолитах (R), выполненные микрокварцитами (Mk-1). В. Фрагмент микрокварцитов (Mk-1) на стенке полости.

В полированных образцах хорошо видны коричневато-бурые скопления ветвистых структур в прозрачной массе тонкозернистых микрокварцитов. Они образуют изолированные «висячие» объемные островки и полосовидные агрегаты в микрокварцитах, а также нарастают на краях трещин брекчированных риолитов и на обломках кварцитов ранних генераций (Рис.6. А, В).

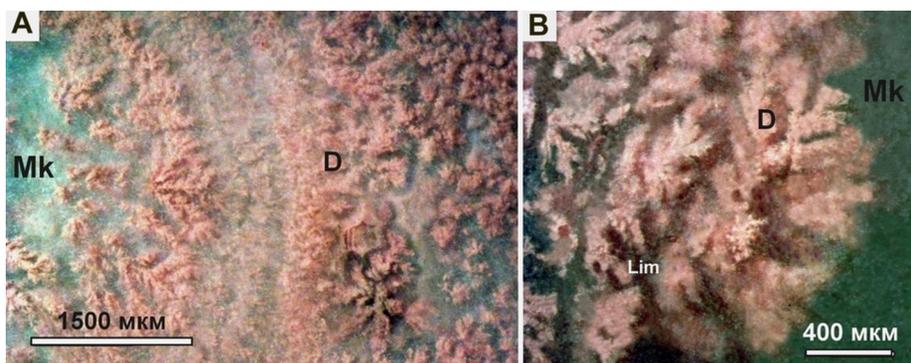


Рис.6. А, В. Ветвистые структуры в прозрачной массе тонкозернистых микрокварцитов: D – дендритоподобные структуры, Mk – микрокварцит, Lim – лимонит. Полированный образец.

Дендритоподобные структуры из микрокварцитов по морфологии подобны, структурам в некоторых моховых агатах, которые рассматриваются как кристаллографические дендриты гётита (Годовиков и др., 1987), (Рис.7).



Рис.7. А. Моховый агат с дендритами гётита. Бразилия (Слётов, 2012. <http://mindraw.web.ru>). В. Моховый агат с дендритами гётита. Монголия. <http://www.mindraw.web.ru>.

Инструментальное изучение ветвистых дендритоподобных структур из микрокварцитов показало, что в магнитной и электромагнитной фракции раздробленных ветвистых структур в микрокварцитах гётит не обнаружен. Рентгенофазовый анализ так же не выявил в микрокварцитах минеральную фазу гетита. Микроскопическими исследованиями было установлено, что ветвистые структуры окружены двойными почковидными оболочками, и видны только, когда они инкрустированы отложениями коричневатого-бурого изотропного лимонита (Рис.8).

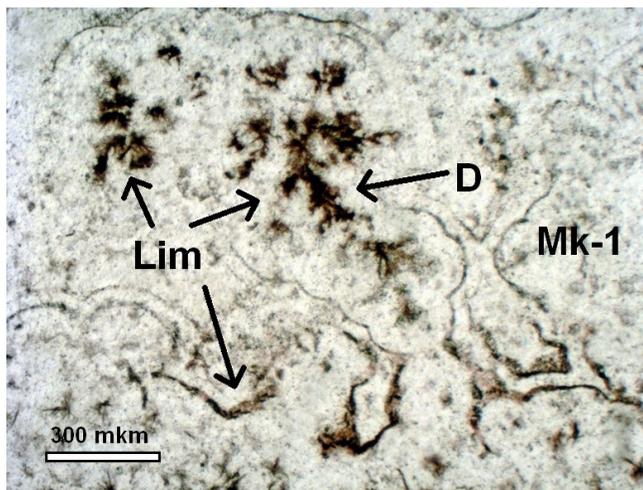


Рис.8. Дендритоподобные структуры (D) в микрокварцитах (Mk-1) инкрустированы агрегатами коричневатого-бурого изотропного лимонита (Lim). Шлиф. Без анализатора.

Пространство между почковидными структурами, иногда заполнено отложениями лимонита (Рис.9).

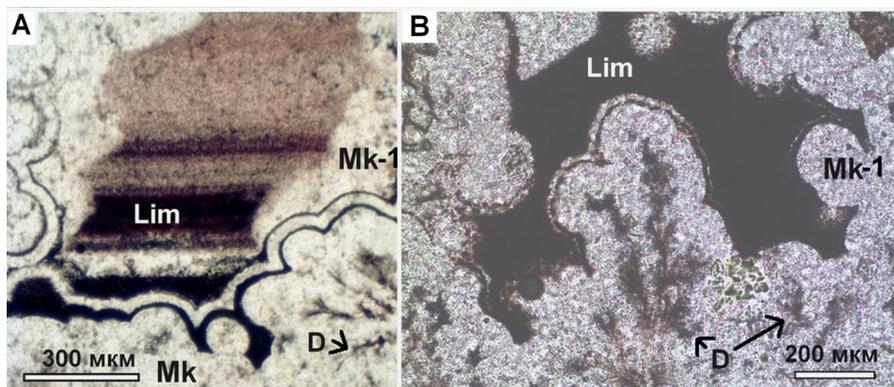


Рис.9. А; В. Дендритоподобные структуры (D) в микрокварцитах (Mk), окруженные двойными почковидными оболочками, инкрустированы отложениями более позднего изотропного лимонита (Lim). Шлиф, без анализатора.

В центральных частях агрегатов ветвистых структур встречаются участки, выполненные объемными лапчатыми структурами, инкрустированными отложениями изотропного лимонита (Рис. 10).

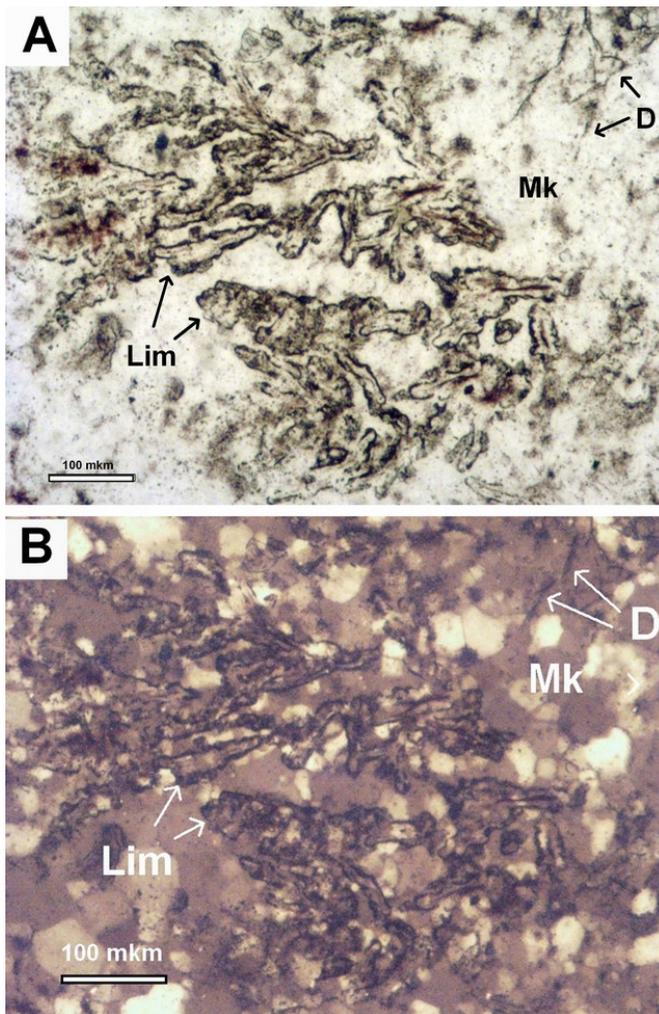


Рис. 10. Лапчатые структуры в микрокварцитах (Mk), содержащих дендритоподобные структуры (D), инкрустированные отложениями изотропного лимонита (Lim). А. Шлиф. Без анализатора. В. то же фото, с анализатором.

Внутри и снаружи лапчатых структур локализовано кремнистое вещество, превращенное в микрокварцит. (Рис. 10.В).

Таким образом, рост ветвистых структур должен был проходить в слое жидкого вещества, которое синхронно с ними увеличивалось в объеме. При этом, двойные оболочки всегда находились на некотором расстоянии от ветвистых структур, выполняли роль мембран, пропускающих внутрь вещество, необходимое для их совместного роста. Ветвистые структуры в виде «висячих» островков могли быть зафиксированы в пространстве, если они, в момент фоссилизации, находились во взвешенном состоянии в слое силикатного геля, заместившего органическое слизистое вещество биопленки.

Мембраны характерны для клеток всех живых организмов на Земле. Поэтому, можно предположить, что ветвистые образования и, окружающие их двойные оболочки, могут представлять собой окремненные биоморфы – микрофоссилии древнейших колониальных микроорганизмов. Эти организмы были сложены внутренними ветвистыми структурами, окружены жидкими почковидными образованиями, и ограничены двойными биологическими мембранами. Предварительное невалидное название для нового рода и вида микрофоссилий древнейших колониальных микроорганизмов – *Dendritella natalii*.

Мембраны являются характерной особенностью клеток всех живых организмов на Земле. Для надежного определения следов древней жизни в осадочных горных породах используют соотношение в них стабильных изотопов углерода ^{12}C и ^{13}C . В поверхностной части биосферы, благодаря процессам фотосинтеза, происходит обогащение легким изотопом ^{12}C органического вещества растительного и животного происхождения. Изотопный состав углерода выражается отношением $\delta^{13}\text{C} = \frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}} (\text{‰})$. Знак «минус» показывает, что образец содержит меньше ^{13}C , чем стандарт (Фор, 1989). Известным изотопно-геохимическим свидетельством существования древнейшей жизни на Земле является изотопный состав углерода в глубоко метаморфизованных графитовых сланцах Гренландии с возрастом

3.7 миллиарда лет, графит в которых имеет $\delta^{13}\text{C}$ от -12% до -24% (Ohtomo, et al. 2013).

Вещество почковидных и ветвистых структур из микрокварцитов о. Гогланд было проанализировано в центре изотопных исследований ВСЕГЕИ. Соотношение стабильных изотопов углерода было определено по методике, охарактеризованной ранее (Belyaev, 2018). Для разрушения силикатов, удаления тяжелого карбонатного углерода и исключения возможного загрязнения проб современной биогенной органикой производилась длительная обработка растертых до пыли образцов в кислотах HCl и HF при температурах $100 - 180^\circ\text{C}$. Установлено значительное обогащение графита, химически выделенного из микрокварцитов, легким изотопом ^{12}C , который образуется в процессах фотосинтеза. При этом, дельта изменяется в узких пределах $\delta^{13}\text{C}$ от -26.5% , до -26.8% . Ошибка измерения составляет $\sim 0,2\%$.

Следует отметить, что характерные значения величины дельта $\delta^{13}\text{C}$ для углей и нефти составляют от -23% до -27% , а современный биогенный углерод имеет значения дельта $\delta^{13}\text{C}$ от -25 до -30% (Фор, 1989).

Дендритоподобные структуры обнаружены также в линзовидных прослоях и в вертикальных трещинах, выполненных микрокварцитами в покровах риолитовых лав. В них также присутствуют фрагменты кремненных планктонных биопленок с микрофоссилиями кремненных коккоидных водорослей *Entophysalis sidose* (Беляев, Юхалин, 2022а) (Рис.11).

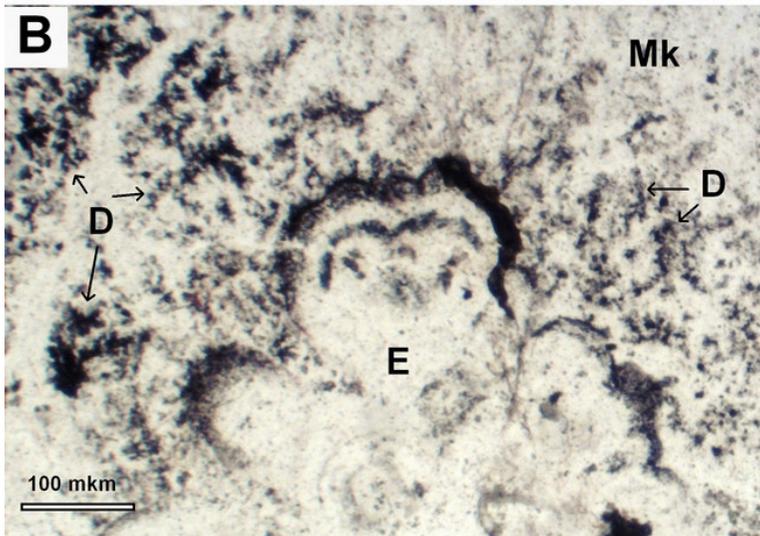
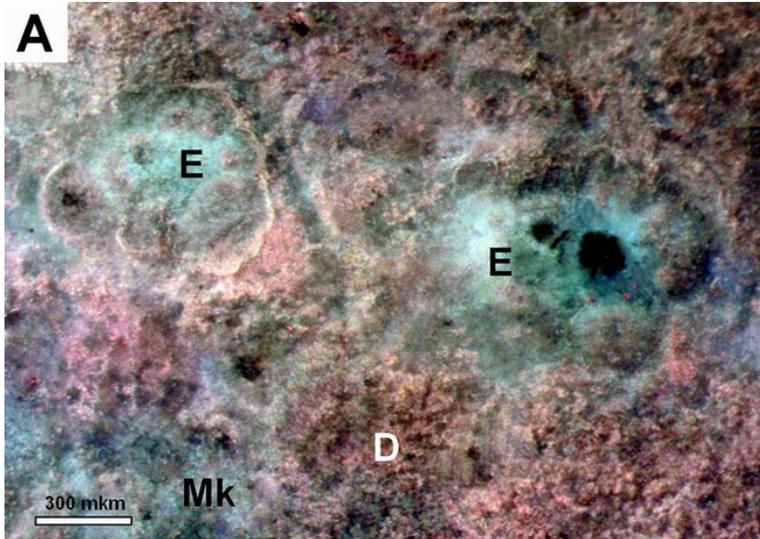


Рис. 11. Дендритоподобные структуры *Dendritella natalii* (D) в микрокварцитах (Mk). А. Обрастающие микрофоссилии кремненных коккоидных водорослей *Entophysalis sidose* (E) (Беляев, Юхалин, 2022а). Аншлиф. В. Шлиф, без анализатора.

Для фрагментов окремненных биопленок в линзовидных прослоях также установлено значительное обогащение легким изотопом ^{12}C (дельта $\delta^{13}\text{C}$ от 27.2‰, до – 27.3‰).

В риолитах острова Соммерс циркон имеет конкордантный возраст 1583 ± 8 млн. лет (Беляев и др., 2024). В зонах брекчий в риолитах, сцементированных хомогенными микрокварцитами, также найдены окремненные фрагменты биопленок, в которых присутствуют дендритные структуры в ассоциации с микрофоссилиями цианобактерий, эукариотов и вирусоподобных структур. Дендритные структуры образуют изолированные «висячие» объемные островки в микрокварцитах, а также нарастают на обломках риолитов и микрокварцитов ранних генераций (Рис. 12), и вокруг микрофоссилий, замещенных гематитом (Рис. 13).

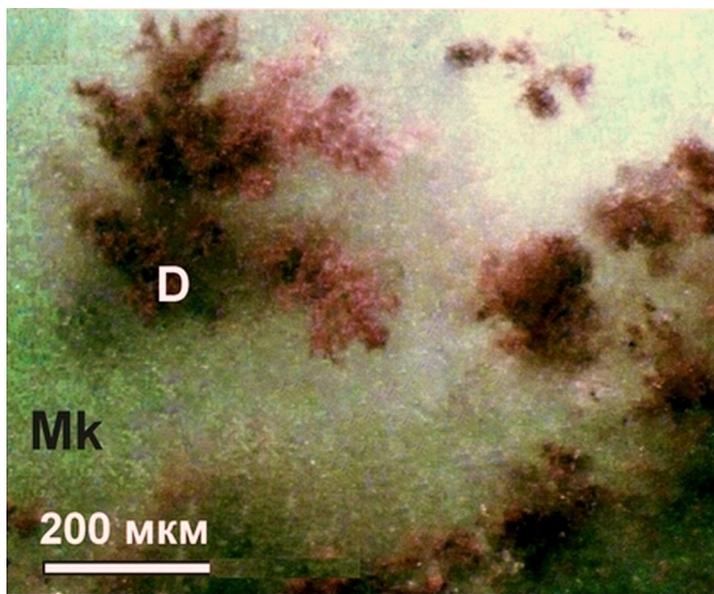


Рис. 12. Дендритоподобные структуры *Dendritella natalii* (D) в микрокварцитах (Mk) о. Соммерс. Аншлиф.

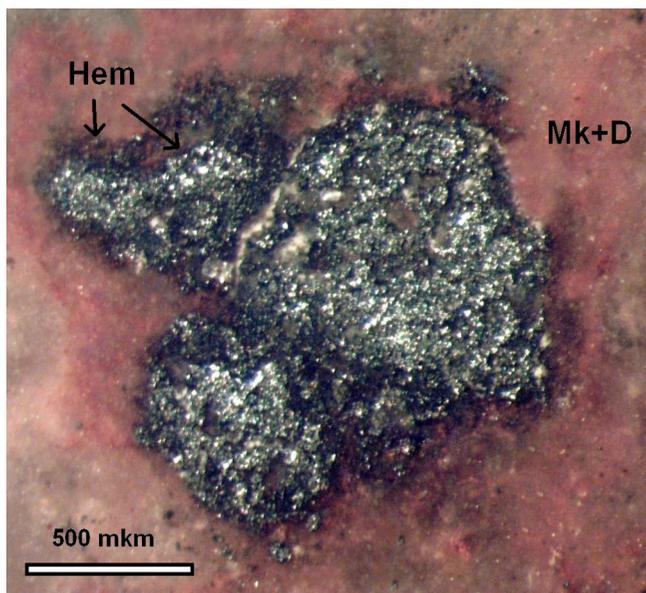


Рис. 13. Микрокварциты, содержащие дендритоподобные структуры *Dendritella natalii* (розовое) Mk+D, вокруг микрофоссилии амебообразной структуры, замещенной гематитом (Hem). О. Соммерс. Аншлиф.

Для кремненных биопленок из микрокварцитов, цементирующих брекчии в риолитах острова Соммерс, также установлено значительное обогащение легким изотопом ^{12}C ($\delta^{13}\text{C}$ от 27.2‰, до -27.3‰). Это указывает на присутствие в них вещества биогенной природы.

Дискуссия

Дендритоподобные структуры *Dendritella natalii*, по морфологии похожи на остатки жизнедеятельности микроорганизмов родов *Metallogenium*, известных в палеопротерозойских кремниевых отложениях Gunflint Formation с возрастом 1,88 млрд. лет (Barghorn and Tyler, 1965; Lepot, et al., 2017), а также в некоторых палеогеновых формациях. Микроорганизмы *Металлогениум* концентрировали в значительных количествах оксиды марганца и железа. Известны

современные бактерии рода *Metallogenium*, которые принадлежат к семи различным родам. Однако род *Metallogenium* пока не отнесен ни к одной таксономической группе. Клетки *Metallogenium* образуют гибкие сужающиеся нити, из которых, вероятно, возникали новые клетки. При этом, предполагается, что бактерии покрыты оксидами железа и/или марганца, и могут сохраняться внутри минеральных агрегатов, которые они образуют (Reitner, 2011). Однако, ветвистые структуры *Dendritella natalii* и окружающие их двойные почковидные оболочки, инкрустированы более поздними вторичными метасоматическими отложениями коричневатого-бурого лимонита (Рис.8). Поэтому признаку их вряд ли можно сопоставлять с микроорганизмами родов *Metallogenium*.

По морфологии дендритоподобные образования из микрокварцитов также похожи на ветвистые структуры в некоторых моховых агатах (Рис.7). Многие ученые высказывали представления об их органическом происхождении, однако, современные исследователи рассматривают ветвистые структуры в моховиках как кристаллографические дендриты гётита (Годовиков и др., 1987). При этом, наличие минеральной фазы гётита в моховых агатах не подтверждается минералогическими и химическими анализами, и ограничивается ссылками на исследования, проведенные в XVIII веке М. Коллини. Он установил, что некоторая часть включений раздробленного моховика сложена железистым веществом, которое притягивалась магнитом (Collini, 1776!). До сих пор результаты этого опыта считаются достаточным доказательством абиогенной природы дендритов гётита во всех моховых агатах, которые формировались в условия вязкой силикатной среды. Вместе с тем, ранее было показано, что ветвистые дендритоподобные структуры в агатовых камерах могли быть сформированы в результате биогенных процессов, и представлять собой фоссилизированные биоморфы – останки жизнедеятельности глубинных колониальных организмов, впоследствии замещенные кремнистым веществом, и инкрустированные гидроокислами железа и марганца (Беляев и др., 2022b; 2023a; 2023b; 2023c; 2024c).

Выводы:

Дендритоподобные образования локализованы в кремненных планктонных биопленках из кремнистых пород.

Рост ветвистых структур проходил в слое жидкого вещества, которое синхронно с ними увеличивалось в объеме. При этом, двойные оболочки выполняли роль мембран, пропускавших внутрь вещество, необходимое для их совместного роста.

Дендритоподобные образования не являются кристаллографическими дендритами, а представляют собой кремненные биоморфы, поверхности которых инкрустированы отложениями более позднего лимонита. Эти микрофоссилии представляют собой останки древнейших колониальных микроорганизмов с предварительным названием *Dendritella natalii*. Они были образованы внутренним дендритоподобным «скелетом», и окружены жидкими почковидными образованиями, ограниченными двойными мембранами.

Высокие содержания биогенного углерода в микрокварцитах, содержащих ветвистые структуры, могут указывать на то, что древние организмы использовали для своего роста вещество поверхностной биосферы, обогащенное легким изотопом углерода.

Колониальные организмы *Dendritella natalii* существовали, как в планктонных биопленках, так и в глубинных брекчиях, возможно, в течение, по крайней мере, шестидесяти миллионов лет.

Авторы выражают благодарность сотрудникам СПбГУ Платоновой Н.В., Кобылково С.В. и Смирновой Т.П. за техническую помощь в исследовании.

Литература

1. 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.
2. Беляев А. М., Юхалин П. В. 2021а. Фосфатные останки нуклеотидов и размеры геномов микрофоссилий эукариотов из микрокварцитов Палеопротерозоя (остров Гогланд, Финский залив). PREPRINTS.RU. <https://doi.org/10.24108/preprints-3112213>.

3. Беляев А.М., Юхалин П.В. **2021b**. О происхождении и эволюции вирусов по результатам исследований вирусоподобных микрофоссилий в кремнистых породах Палеопротерозоя, остров Гогланд, Финский залив PREPRINTS.RU. <https://doi.org/10.24108/preprints-3112242>.
4. Беляев А.М., Юхалин П.В. **2022a**. Микрофоссилии планктонных зелёных водорослей в кремнистых породах Палеопротерозоя на острове Гогланд в Финском заливе. PREPRINTS.RU. <https://doi.org/10.24108/preprints-3112434/>.
5. Беляев А.М., Юхалин П.В. **2022b**. Глубинная биосфера Земли, современная и древняя PREPRINTS.RU. <https://doi.org/10.24108/preprints-3112589>.
6. Беляев А.М., Юхалин П.В. Древняя глубинная биосфера Земли //Материалы LXXIX сессии Палеонтологического общества, **2023a**, с.14-16.
7. Беляев А.М. Литосфера и глубинная биосфера //Материалы Восьмой международной научно-практической конференции «Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы», Воронеж, **2023b**, с. 19-23.
8. Беляев А.М., Юхалин П.В. Древняя глубинная биосфера Земли. Онлайн трансляция доклада на LXXIX сессии Палеонтологического общества при РАН, **2023c**, Санкт-Петербург, ФГБУ «ВСЕГЕИ»: <https://disk.yandex.ru/d/EvoJl-QEuSGAgg>.
9. Беляев А.М., Юхалин П.В., Богданов Ю.Б., Назарова Т.А., Юрченко Ю.Ю. Микрофоссилии колониальных организмов с внутренними дендритными структурами в кремнистых породах Хогландской вулканогенно-осадочной формации (нижний рифей, западные острова Финского залива) //Материалы LXX сессии Палеонтологического общества, **2024a**, с.19-21.
10. Беляев А.М., Юхалин П.В., Богданов Ю.Б., Назарова Т.А., Юрченко Ю.Ю. Микрофоссилии колониальных организмов с внутренними дендритными структурами в кремнистых породах Хогландской вулканогенно-осадочной формации (нижний рифей, западные острова Финского залива). **2024b**. Онлайн трансляция доклада на LXX сессии Палеонтологического общества при РАН,

2024, Санкт-Петербург, ФГБУ «ВСЕГЕИ»,
<https://disk.yandex.ru/i/3efHxVXpp28kaA>.

11. Беляев А. М., Юхалин П. В., Назарова Т. А., Юрченко Ю. Ю. **2024c**. Биосфера в литосфере. Preprints.ru. <https://doi.org/10.24108/preprints-3113002>.
12. Годовиков А. А., Рипинен О. И., Моторин С. Г. Агаты.— М.: Недра, 1987, 368 с.
13. Ларин А.М. Ларин А.М. Граниты рапакиви и ассоциирующие породы, М., Наука, **2011**, 403 с.
14. Фор Г. Основы изотопной геологии. М., Мир, **1989**, 589с.
15. Belyaev A.M., Bogdanov Y.B., Levchenkov O.A., Shebanov A.D. Bimodal volcanic formation of Wiborg batholith on the island of Hogland (Suursaari), Russia// In: Rapakivi Granites and Related Rocks: Correlation on a Global Scale (Abstr. Vol. IGCP-315 Symp.), Helsinki, Finland, **1996**, p.5.
16. 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, p. 1431–1442, doi.org/10.1007/s12583-018-0883-4
17. Belyaev A.M., Yukhalin P.V. Sizes of Genomes of Paleoproterozoic Microfossil Eukaryotes. Int. J. Paleobiol&Paleontol **2021a**, 4(1): 000121. <https://doi.org/10.23880/2Fijpbp-16000121>.
18. Belyaev A.M., Yukhalin P.V. Virus-Like Microfossils in the 1.64 Ga Siliceous Rocks from Hogland Island, Russia. PaleorXiv, **2021b**; DOI:10.31233/osf.io/n8zbu.
19. Lepot, K., Addad, A., Knoll, A. et al. Iron minerals within specific microfossil morphospecies of the 1.88 Ga Gunflint Formation. Nat Commun 8, 14890 (**2017**). <https://doi.org/10.1038/ncomms14890>
20. Ohtomo Y, Kakegawa T, Ishida A, et al. Evidence for biogenic graphite in early Archaean Isua metasedimentary rocks // Nature Geoscience, **2013**, doi:10.1038/ngeo2025.
21. Reitner, J.. Metallogenium. In: Reitner, J., Thiel, V. (eds) Encyclopedia of Geobiology. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Dordrecht. **2011**. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9212-1_220.