

ФОСФАТНЫЕ ОСТАНКИ НУКЛЕОТИДОВ В МИКРОФОССИЛИЯХ ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ ЭУКАРИОТ

Беляев А.М.¹, Юхалин П.В.²

¹СПбГУ, С.-Петербург; ²ООО «Сидосе», С.-Петербург

Впервые представлены расчеты возможного содержания нуклеотидов в клетках древнейших протофлагеллат с возрастом 1640 млн лет.

Ключевые слова: кремнистые породы, микрофоссилии палеопротерозоя, эукариоты, изотопы углерода.

PHOSPHATE RESIDUES OF NUCLEOTIDES IN THE MICROFOSSILS FROM THE PALEOPROTEROZOIC EUKARYOTES

Anatoly M. Belyaev¹, Paul V. Yukhalin²

¹St. Petersburg State University, SPb, ²Sidose LLC, SPb

Calculations are presented for the first time of the possible content of nucleotides in cells of the oldest protoplanet age of 1,640 million years.

Keyword: siliceous rocks, Paleoproterozoic microfossils, eukaryotes, carbon isotopes.

В палеопротерозое развитие жизни происходило в водной среде, и геологические процессы напрямую определяли условия обитания и эволюции микроорганизмов. В те времена наибольшее влияние на состояние водных экосистем оказывали магматические расплавы при подводных извержениях. Они приводили к интенсивному движению косного вещества и циркуляции нагретых вод, а также к изменению ресурса биофильных элементов природного и биогенного происхождения. Для жизнедеятельности морских планктонных микроорганизмов совершенно необходим фосфор, способный благоприятно влиять как на индивидуальный рост (онтогенез) организмов, так и на скорость их эволюционного развития в филогенезе.

Единство биологического мира определяются обязательным наличием у всех живых организмов органических соединений – нуклеозидфосфатов или нуклеотидов. Они являются сложными эфирами нуклеозидов и фосфорных кислот. Нуклеотиды играют важную роль в информационных внутриклеточных процессах обеспечения хранения, реализации и передачи наследственной информации, являясь составляющими частями нуклеиновых кислот и многих коферментов. Свободные нуклеотиды, в частности АТФ, цАМФ, АДФ, обеспечивают энергетические процессы в живых организмах.

Каждый нуклеотид состоит из трех компонентов: азотистого основания, углевода и остатка фосфорной кислоты. Количество фосфора в нуклеиновых кислотах составляет 8-10% (Laura; et al., 2008), а в молекуле АТФ содержится 18.5% фосфора. Если «кирпичики жизни» углерод, азот и водород достаточно широко распространены в биосфере и гидросфере, то фосфор – стержень всей жизни и является дефицитным элементом, который лимитирует существование и развитие живых организмов. Так концентрации фосфора и биомасса фитопланктона в океанах имеет линейную зависимость: от содержания фосфат-иона в морской воде зависит плотность фитопланктона (Мокиевская В.В.; Diaz, et al., 2008).

Единство биологического мира подразумевает наличие нуклеотидов у всех древнейших организмов – одноклеточных прокариотов и эукариотов, живших в архее и палеопротерозое, но вещественных свидетельств этому не обнаружено. Это связано с тем, что после смерти одноклеточных организмов, составляющие их сложные органические соединения, расщепляются вплоть до диоксида углерода и воды, а нуклеиновые кислоты распадаются с образованием фосфорной кислоты. Поэтому для оценки содержания нуклеотидов у древнейших эукариот очень важны эколого-геологические условия, при которых быстрая фоссилизация (минерализация) произошла до начала деградации тел микроорганизмов с сохранением деталей их внутреннего строения и особенностей химического состава. Быстрая минерализация микроорганизмов с сохранением объема и некоторых деталей их внутреннего строения имела место в процессах термального окремнения микроорганизмов при формировании хемогенно-осадочных кремнистых пород около древних и современных термальных источников. Экспериментальные исследования показали, что эти процессы происходят в интервале нескольких часов, практически при жизни микроорганизмов (Розанов, Ушатинская, 2011). Хемогенно-осадочные кремнистые породы с возрастом 1640 ± 11 млн. лет (Беляев, 2013), также известны в вулканогенно-осадочных толщах Хогландской свиты (на острове Гогланд в Финском заливе). Среди вулканитов присутствуют как линзовидные прослои, так и эруптивные брекчии, сложенные кремнистыми породами, которые сформировались в процессе растворения в морской воде оксидов кремния на поверхности горячих лавовых потоков и выпадения хемогенных кремнийсодержащих и глинистых осадков. В результате последующего контактового метаморфизма под воздействием вышележащих лавовых толщ, кремнистые осадки превратились в микрокварциты, а глинистые осадки в сланцеватый серицитовый агрегат (Беляев, 2017).

В микрокварцитах среди базальтов и риолитов впервые обнаружены структуры микрофоссилий, внешние и внутренние контуры которых сложены гематитом, микрокварцитом, эпидотом, хлоритом и кварцем. По

внешней и внутренней морфологии эти структуры похожи на современные или окаменевшие морские микроорганизмы: спиральные и коккоидные цианобактерии и эукариоты: амёбы, диатомовые водоросли, фораминиферы, жгутиковые и многоклеточные организмы (Беляев, 2017; Беляев, 2018; Belyaev, 2018). Останки микрофоссилий таких эукариотов ранее были известны лишь в отложениях палеозоя или неопротерозоя. Кроме того, в тесной ассоциации с амёбообразными структурами присутствуют псевдоморфозы зональных шестиугольных образований, по морфологии подобных нуклеокапсидам современных гигантских вирусов. Однако до сих пор ископаемые останки вирусов не были найдены даже в современных отложениях. Предполагается, что все эти структуры являются микрофоссилиями кремнистых и железистых сообществ палеопротерозойских планктонных микроорганизмов. С их присутствием связано обогащение кремнистых пород лёгким изотопом углерода ^{13}C ($\delta^{13}\text{C} = -27.1 - -29.5\text{‰}$), характерное для осадочных горных пород, сформировавшихся с участием живого вещества. (Беляев, 2017; Беляев, 2018; Belyaev, 2018).

Наиболее отчетливо контуры и детали внутреннего строения микрофоссилий видны в псевдоморфозах флагеллат, впервые найденных в микрокварцитах и серицитовом агрегате цемента брекчий риолитов. В первом приближении флагеллаты имеют форму сплюснутого эллипсоида вращения 500-1000 мкм в поперечнике; (1 мкм = 10^{-3} миллиметра) и одно или несколько ответвлений подобных жгутикам (Рис.1). Внутри контуров флагеллатоподобные структуры сложены микрокварцитом, окрашенным в бурый цвет окислами железа (Рис.1.1), или кварц-гематитовым агрегатом, содержащим от 5 до 40% зерен гематита (Рис.1.2;1.3). Кварц-гематитовый агрегат имеет специфическую симплектитовую структуру срастания двух минеральных фаз, сформированных в результате кристаллизации кремнистого геля и гидратов железа (Рис.1.3а). Флагеллатоподобные структуры, находящиеся в серицитовом агрегате, вместе со жгутиками окружены кремнистой оболочкой, образовавшейся на месте внешней слизистой оболочки клетки.

В центральных частях микрофоссилии *Protoflagellates yukhalina* наблюдаются округлые образования подобные ядру и вакуолям, замещенные гематитом (Рис. 1.3), и округлое зерно апатита (Ap), состав которого установлен на сканирующем электронном микроскопе JSM-6510LA с энергодисперсионным спектрометром JED-2200 (JEOL) в Институте геологии и геохронологии Докембрия РАН. Апатит мог образоваться из остатков фосфорной кислоты распавшихся нуклеотидов. Таким образом, зная содержание фосфора в апатите, можно приблизительно рассчитать массу нуклеотидов, содержащихся в цитоплазме и ядре клетки древнейшей флагеллаты.

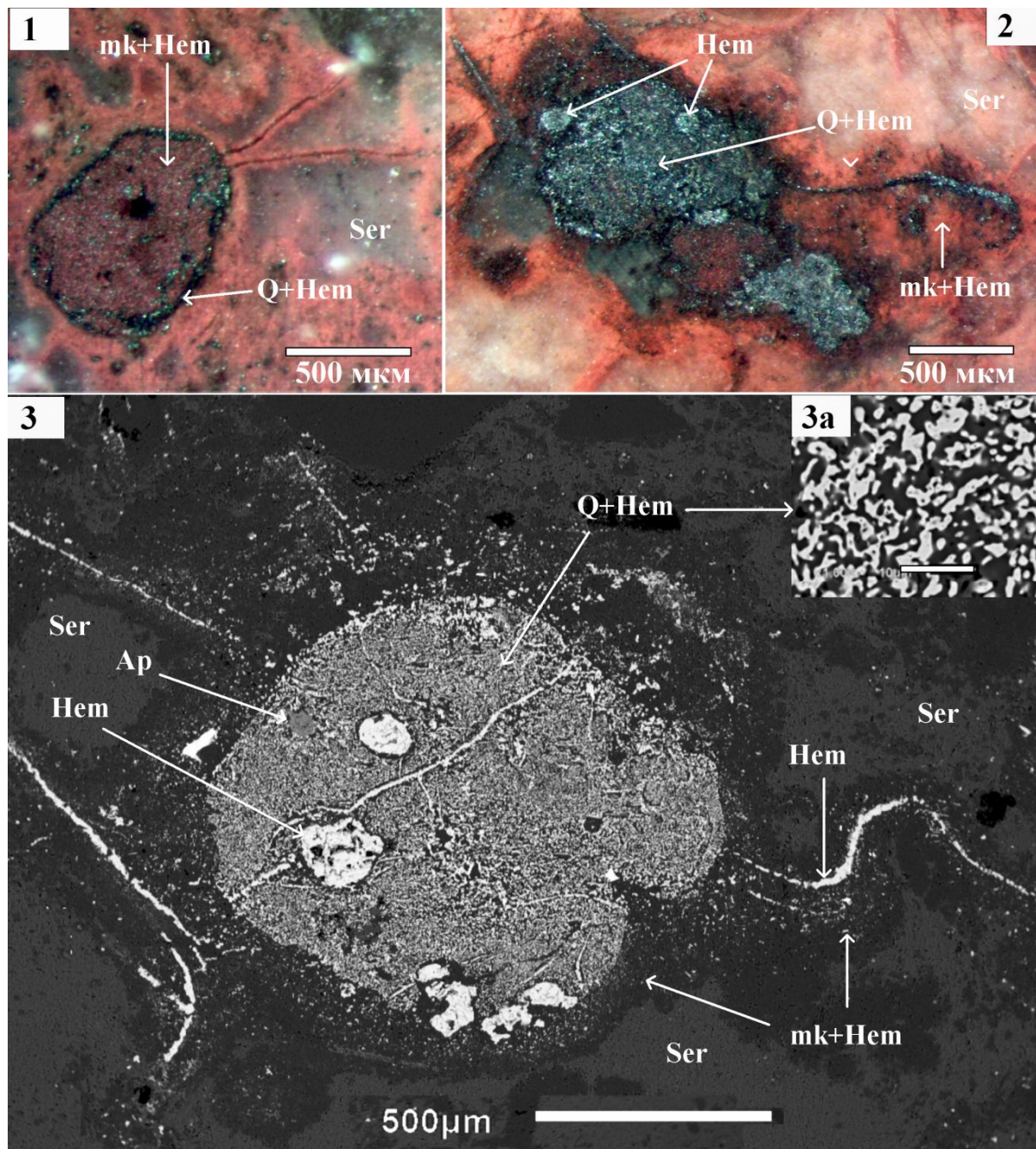


Рис. 1. Структуры микрофоссилий флагеллат в микрокварцитах из цемента брекчий в риолитах. **1.1.** Структура флагеллаты с двумя жгутиками, сложенная микрокварцитом с вкрапленниками гематита (mk+Hem), в микрокварците (mk) и серицитовом агрегате (Ser). Аншлиф. **1.2.** Структура флагеллаты, сложенная кварц-гематитовым агрегатом (Q+Hem). Видны округлые образования, подобные ядру и вакуолям, сложенные гематитом. Аншлиф. **1.3.** *Protoflagellates yukhalina* в серицитовом агрегате – Ser (серое), внутри сложенная кварц-гематитовым агрегатом (Q+Hem, гематит – светлосерое, кварц – темно-серое) с симплектитовой структурой (**1.3a**, масштабная линейка – 5 мкм) (70% зерен Q и 30% зерен Hem). Два округлых образования, подобные ядру и вакуоли, замещены гематитом. Определено округлое зерно апатита (Ap). Микрофото в отраженных электронах на растровом электронном микроскопе JSM-6510LA. Аншлиф.

В первом приближении *Protoflagellates yukhalina* имела форму сплюснутого эллипсоида. Его объем, вычисленный по формуле $V=4/3\pi abc$, где $a - 500$ мкм; $b - 600$ мкм; $c - 300$ мкм составляет 376991000 мкм³. Масса 1 мкм³ воды составляет 1 пг пикограмм (пг – 10^{-12} грамма). Плотность цитоплазмы клеток в первом приближении немногим более плотности воды (1 г/см³). Следовательно, масса сырой массы протофлагеллаты могла составлять около 376991000 пг.

Количество АТФ в современных клетках в среднем составляет $0,04\%$ от сырой массы клетки (Laura; et al., 2008). Таким образом, в клетке протофлагеллаты могло содержаться – 150800 пг АТФ. При этом в общем балансе массы клетки вклад фосфора из генома ядра и нуклеотидов митохондрий незначителен. Так, самый крупный геном «живого ископаемого» одноклеточной амёбы *Amoeba dubia* (размером около 1 мм) содержит 670 миллиардов пар оснований (в 200 раз больше, чем геном человека). Если в среднем 1 миллиард пар оснований имеет массу приблизительно 1 пг, то масса генома одноклеточной *Amoeba dubia* составляет всего лишь 670 пг .

Зерно апатита в первом приближении имеет форму сплюснутого сфероида, объем которого, вычисленный по формуле $V=4/3\pi abc$, где $a - 25$ мкм; $b - 40$ мкм; $c - 25$ мкм составляет 104720 мкм³. Плотность апатита – 3.2 г/см³ и его зерно имеет массу 335100 пг. Апатит содержит 19% фосфора, и, следовательно, в зерне апатита содержится 63670 пг фосфора. Такого количество фосфора достаточно для образования молекул АТФ с общей массой 343820 пг, что составило бы около $0,1\%$ от сырой массы клетки. С одной стороны это может быть естественным содержанием фосфора (и соответственно нуклеотидов) в цитоплазме и ядрах древних клеток. С другой стороны следует учитывать, что при окремнении и ожелезнении цитоплазмы и ядер, некоторая часть фосфат-ионов могла быть вынесена за пределы клеток вместе с продуктами распада органических соединений – водой и углекислотой. Таким образом, полученные расчетные значения содержания АТФ в цитоплазме протофлагеллаты – $0,1\%$ молекул АТФ от сырой массы клетки, можно рассматривать как минимальные.

Представленные расчеты массы нуклеотидов в клетках древнейших *Protoflagellates yukhalina* ($0,1\%$ молекул АТФ от сырой массы клетки) весьма приблизительны, но доступный для изучения каменный материал с микрофоссилиями хорошей сохранности позволит в дальнейшем уточнить эти данные и произвести расчеты для других видов микроорганизмов.

Литература

1. Беляев А. М. Петрология вулканитов формации рапакиви (о. Гогланд) // Региональная геология и металлогения, №55, 2013, с. 28-36.
2. Беляев А.М. Роль вирусов в эволюции ранней биосферы Земли //Труды Международного семинара Геология, геоэкология, эволюционная география. Том XVI. СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2017. с. 25-28. ISBN 978-5-8064-2454-0.
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] <https://rdcu.be/8n18>
3. Беляев А.М. Перспективы изучения микрофоссилий в вулканогенно-осадочных кремнистых породах Палеопротерозоя //Материалы LXIV сессии Палеонтологического общества, 2018, т.2. с.28-43.
4. Мокиевская В.В. Органический фосфор в воде Тихого океана. В кн.: Химические процессы в морях и океанах. М.: Наука.
5. Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах. (ред. А.Ю. Розанов и Г.Т. Ушатинская), Москва, ПИН РАН, 2011, 171 с.
6. Diaz, Ellery Ingall, Claudia Benitez-Nelson, David Paterson, Martin D. de Jonge, Ian McNulty, Jay A. Brandes. Marine Polyphosphate: A Key Player in Geologic Phosphorus Sequestration // *Science*. 2008. V. 320. P. 652–655 [DOI: 10.1126/science.1151751].
7. Laura Wegener Parfrey; et al. (2008). The Dynamic Nature of Eukaryotic Genomes // *Molecular Biology and Evolution*. 25: 787–794. [doi:10.1093/molbev/msn032].