УДК 56.01

Архей Карелии и бактериальная палеонтология

М.М. Астафьева

Палеонтологический институт РАН, Москва
E-mail: astafieva@paleo.ru

Описаны недавно обнаруженные биоморфные микроструктуры из верхнеархейских (лопийских) пород Северной Карелии. Предположено присутствие различных микроорганизмов бактериальной природы, цианобактерий и, возможно, даже эвкариот.

Ключевые слова: архей, микроорганизмы, бактерии, цианобактерии, прокариоты, эвкариоты

До последнего времени достоверные находки фоссилизированных остатков эвкариот в архейских отложениях практически не были известны. Исключение составляет работа Б.В. Тимофеева (1982), в которой описаны акритархи из верхнего архея Центральной Карелии и Среднего Приднепровья.

Однако из-за психологической неподготовленности научного сообщества эта работа прошла практически незамеченной, и, мало того, сама возможность нахождения эвкариот в архейских отложениях до сих пор у многих вызывает большие сомнения. Напомню, что традиционно первое появление эвкариот относят к ганфлинтскому времени раннего протерозоя (Schopf, 1983; Knoll, 1994; Сергеев, 2002).

В этой связи А.Ю. Розанов поставил задачу изучения ранних этапов эволюции биосферы Земли, проведения палеоклиматических и палеогеографических реконструкций и обсуждения времени первого появления различных групп организмов, в том числе и некоторых эвкариот. Для ее решения он предложил, во-первых, пересмотреть ряд препаратов из коллекции Тимофеева и, во-вторых, в случае подтверждения данных Тимофеева провести дополнительный сбор каменного материала из архея Карелии.

До недавних пор изучение ископаемых микроорганизмов докембрия, в том числе и архея, традиционно проводилось лишь в шлифах и мацератах (препаратах, полученных химическим разложением пород) под поляризационным оптическим микроскопом. Электронная микроскопия для исследования ископаемых микроорганизмов, как ни странно, почти не применялась. В процессе бактериально-палеонтологических исследований стало ясно, что микроорганизмы часто прекрасно фоссилизируются и сохраняются в ископаемом состоянии (Розанов, 2003). Причем долгое время считалось, что хорошая сохранность характерна для микроорганизмов только в кремнистых породах (Barghoorn, Tylor, 1965; Schopf, 1983; Весталл, Велш, 2002). К тому же в этих работах речь шла преимущественно об ископаемых бактериальных остатках.

При любезном содействии сотрудников ИГГД РАН (Т.Н. Герман и В.Н. Подковырова) А.Ю. Розанов, С.А. Афонин, М.М. Астафьева просмотрели препараты из коллекции Б.В. Тимофеева. Полученные результаты подтвердили правильность его выводов. В связи с этим А.Ю. Розановым было решено провести более детальные исследования архейских пород, используя другие методы, в том числе и метод электронной микроскопии.

После проверки данных Тимофеева летом 2004 г. сотрудниками ИГГД РАН совместно с сотрудниками ПИН РАН были организованы специальные сборы архейских пород, перспективных в отношении ископаемых бактериальных форм.

Полевые работы проводились в северной части Хизоваарской структуры, входящей в состав Парандовско-Тикшозерского зеленокаменного пояса. Хизоваарская структура выполнена мощным, сложно устроенным комплексом вулканогенно-осадочных пород (Кожевников, 2000). Возраст нижней части этого комплекса установлен по возрасту прорывающих его фельзических даек (2803±35 млн. лет). Верхняя часть осадочного комплекса прорывается дайками риодацитов и гранодиоритов с изотопным возрастом 2706±7 млн. лет.

Особый интерес для нас представляла вулканогенно-осадочная ассоциация среднего и кислого состава из нижней части разреза. Она состоит из трех членов: нижняя метаандезитовая толща перекрывается горизонтами кварцевых аренитов, сменяющимися вулканогенно-осадочными породами преимущественно кислого состава. В зоне контакта андезитов с кварцевыми аренитами предыдущими исследователями отмечались горизонты кор выветривания. В ходе полевых работ были отобраны образцы из ископаемых зон выветривания, кварцевых аренитов и залегающих на аренитах туфогенно-осадочных пород и углеродистых сланцев.

Все отобранные образцы изучались на электронном сканирующем микроскопе CamScan-4. Исследовались только свежие сколы пород, отобранные образцы промывались спиртом и для дегазации просушивались в муфельной печи, затем опылялись золотом или никелем. Химические анализы выполнялись микрозондом.

Микроорганизмы, встреченные в изученных породах, можно разделить на три группы: микроорганизмы, одновозрастные с вмещающими породами, эндолиты, т.е. формы, обитавшие в уже образованных породах, и, наконец, формы, представляющие современное засорение.

К первой группе мы относим микроорганизмы, обитавшие непосредственно в бассейне осадконакопления независимо от того, принимали они участие (прямое или косвенное) в процессе образования породы или нет. Отличительная черта микроорганизмов, одновозрастных со вмещающими породами, по нашему мнению, это их слияние с породами. В этом случае микроорганизмы представляют как бы одно целое с породой или же вся порода буквально сложена микроструктурами.

Эндолиты обитают в трещинах пород, а также в пространствах между зернами породы. Кроме того, они могут всверливаться в карбонатные породы или частицы. К этой группе организмов могут относиться бактерии, грибы, водоросли и лишайники. Эндолиты широко распространены и описаны из разнообразных местообитаний, включая холодные пустыни (Westall, Folk, 2003). Эндолитные микроорганизмы встречены и в наших образцах. Классический пример — это обрастание кристаллов или зерен породы колониями микробов (рис. 1, слева). Также относительно легко можно распознать заполнение бактериями трещин в породе (рис. 1, справа). Естественно, в этих случаях никакой речи об одновозрастности бактериоморфных структур с породами быть не может.

И, наконец, необходимо учитывать возможное современное микробное «прорастание» поверхности образцов, как в природных условиях, так и во время транспортировки и хранения. Под микроскопом бактериальное засорение такого рода также довольно легко

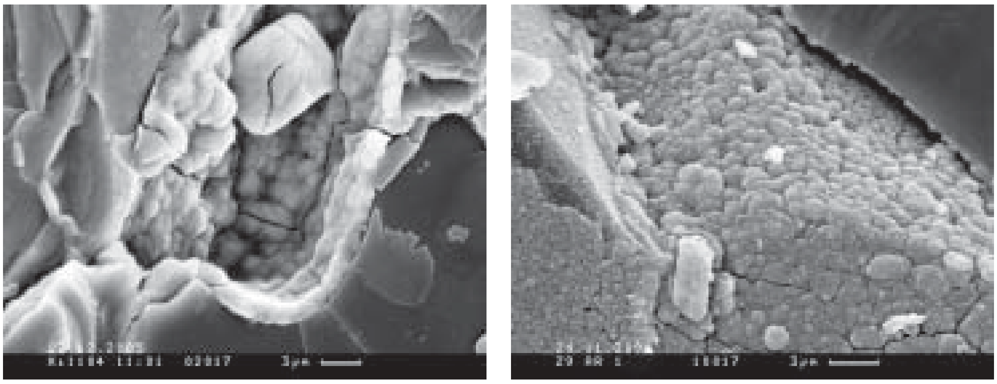


Рис. 1. Ископаемые эндолиты: обрастание зерен породы колониями микробов (слева), заполнение трещин бактериями (справа).

распознаваемо. В этом случае мы видим основную массу породы как бы покрытую (сверху) микробными остатками. Чтобы исключить такое загрязнение, образцы в поле отбирались только со свежими сколами. Только свежие сколы породы использовались также при просмотре образцов в электронном микроскопе.

Статья посвящена биоморфным образованиям, которые органично вплетаются во вмещающие породы, представляя с ними одно целое, и которые мы считаем одновозрастными с ними.

Биоморфные образования, обнаруженные нами, представлены нитевидными, натечными, коккоидными формами и т.д. В результате исследований также были получены данные, позволяющие подтвердить возможность присутствия эвкариот уже в архее (Astafieva et al., 2005; Rozanov, 2005).

1. Нитевидные и палочковидные формы встречены в углеродсодержащих сланцах, кварцитах (метапесчаниках) и туфогенно-осадочных породах. Большая часть этих структур представлена нитями диаметром, как правило, порядка 3–5 мкм, длина которых может достигать (или даже превышать) 100 мкм (рис. 2).

На снимках видны довольно толстые чехлы нитчатых форм. Поверхность их негладкая, бугорчатая. В левом верхнем углу снимка виден продольный разрез чехла, который показан рядом в увеличенном виде. Интересно, что чехол изнутри покрыт мелкими ($d<0,5$ мкм)

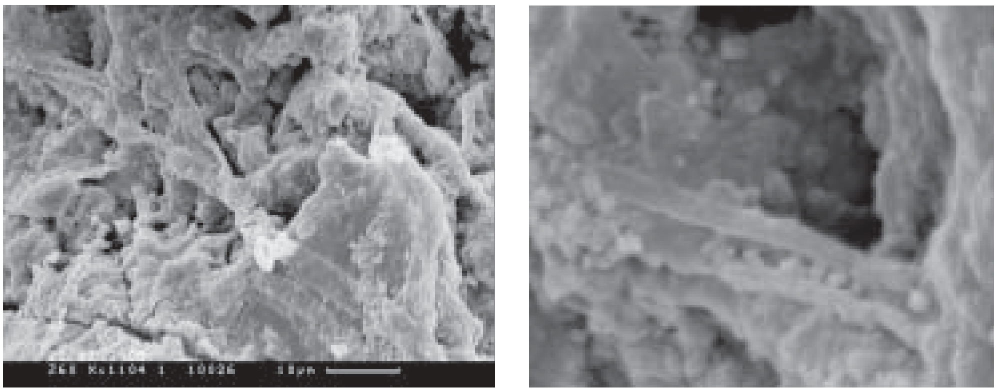


Рис. 2. Нитевидные формы в архейских углеродсодержащих сланцах Хизоваара (справа увеличенный фрагмент верхней левой части левого снимка).

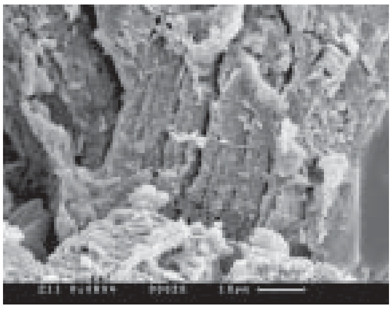


Рис. 3. Структура, напоминающая слой циано-бактериального мата.

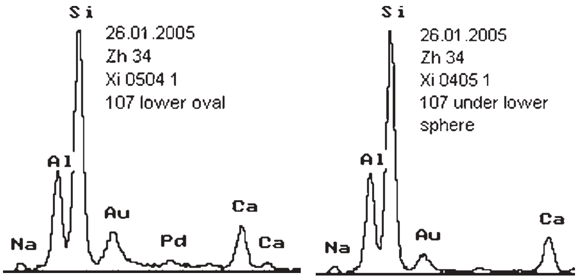


Рис. 4. Химический состав коккоидных форм (слева) и вмещающих пород (справа).

сферическими гранулами, по всей видимости, опаловыми. Это изображение напоминает начальную стадию выпадения опала, когда в клеточной оболочке образуются островки из сросшихся сферических гранул. Процесс подобного окремнения микроорганизмов был изучен на современных естественных объектах из термальных источников кальдеры Узон на Камчатке, где он происходит при концентрации кремнезема не меньше предела насыщения (Крылов, Тихомирова, 1988). Судя по морфологии и размерам, архейские нитчатые структуры, вероятно, относятся к цианобактериям. Интересно отметить, что в одном образце обнаружена структура, напоминающая цианобактериальный мат (рис. 3).

2. Коккоидные формы в лопийских породах Хизоваара также встречены как в углеродсодержащих сланцах, так и туфогенно-осадочных породах. Эти формы представлены несколькими модификациями.

В углеродсодержащих сланцах, туфопесчаниках (метапесчаниках с примесью кислого вулканического материала), туфогенно-осадочных и осадочных породах встречены довольно своеобразные коккоидные формы. Химический состав их соответствует составу вмещающих пород (рис. 4).

Эти кокки представляют собой округлые формы диаметром порядка 2–5 мкм, которые почти всегда образуют скопления (рис. 5).

Поверхность этих сфер покрыта как бы «пушистой» оболочкой, довольно плотной и толстой, облекающей каждую кокку в отдельности. На некоторых экземплярах наблюдаются

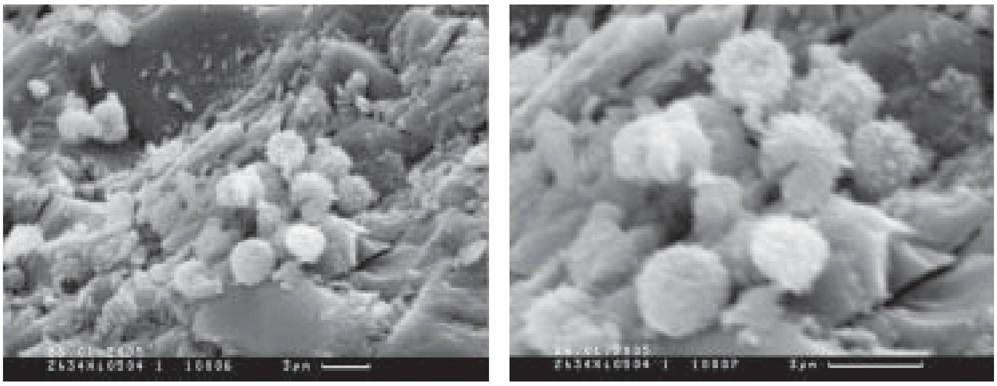


Рис. 5. Коккоидные формы из метапесчаника, туфопесчаника.

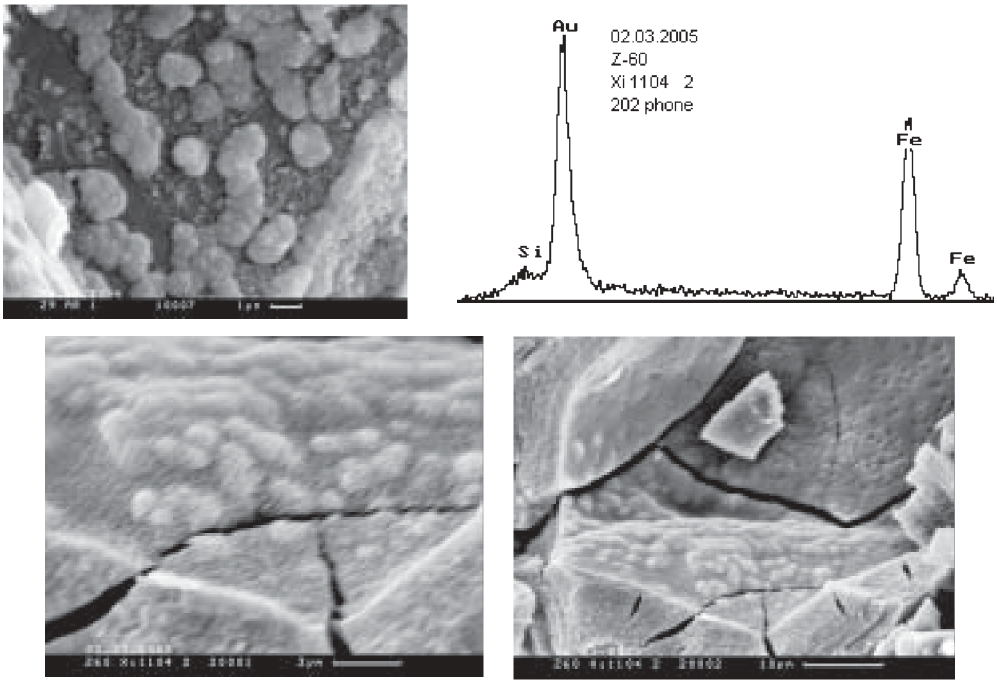


Рис. 6. Коккоидные структуры, связанные с ожелезнением из углеродсодержащих сланцев. Мы предполагаем, что эти структуры — ожелезненные остатки коккоидных бактерий или железобактерии. Однако не исключено, что они являются эндолитами.

трещины в этом покрове. Наличие подобной орнаментированной оболочки является признаком, характерным как для прокариот, так и для эвкариот.

Другие группы обнаруженных в углеродсодержащих сланцах коккоидных структур связаны с ожелезнением.

Во-первых, это несколько более мелкие (диаметр до 2 мкм), ожелезненные округлые формы, как правило, соединенные в цепочки или образующие сплошную массу (рис. 6).

Во-вторых, это одиночные кокки, имеющие неровную бугорчатую поверхность, диаметром 3–4 мкм, вкрапленные в породу (рис. 7).

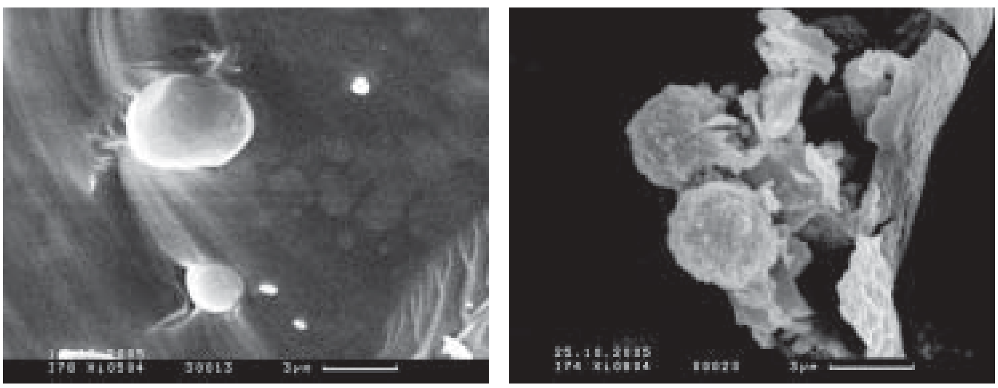


Рис. 7. Одиночные коккоидные формы, отмеченные лишь в туфогенно-осадочных породах.

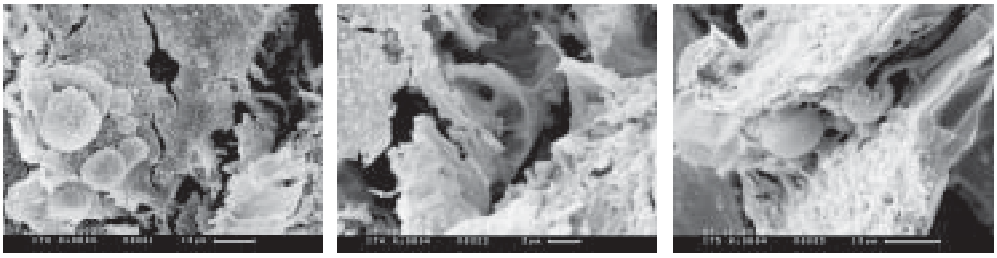


Рис. 8. Коккоидные формы с шероховатой поверхностью.

В-третьих, это более крупные сферические формы с диаметром порядка 10 мкм (рис. 8). Они особенно интересны тем, что представлены кокками (состоящими в основном из кремния и железа), с сильно шероховатой (пупырчатой) поверхностью.

В некоторых случаях эти коккоидные формы покрыты довольно толстой неровной бугорчатой, пузырчатой оболочкой (чехлом или покрывалом), в химическом составе которой резко превалирует железо (рис. 9).

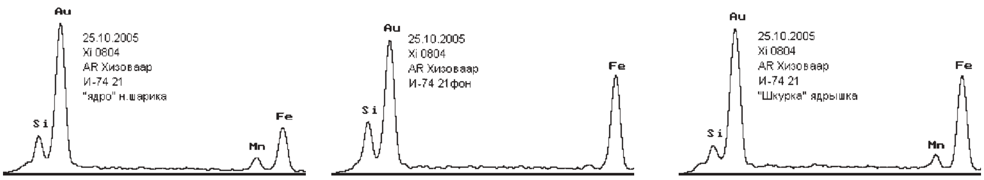


Рис. 9. Химический состав ядра коккоидной формы (слева), вмещающих пород (в середине) и «чехла» кокки (справа).

Можно предположить, что этот покров ни что иное, как ожелезненный гликокаликс, покрывавший эти формы при жизни. Есть и другое, несколько менее вероятное предположение, что ожелезненный покров — это вторичное образование, которое может быть связано с деятельностью эндолитов. Внутреннее строение этих коккоидных структур, по всей видимости, представлено на рис. 8 в середине и говорит о довольно сложной структуре этих форм.

К этой группе примыкают своеобразные «пушистые» формы. Их, вероятно, можно рассматривать как биогенную форму, покрытую «игольчатой» ожелезненной оболочкой (рис. 10).

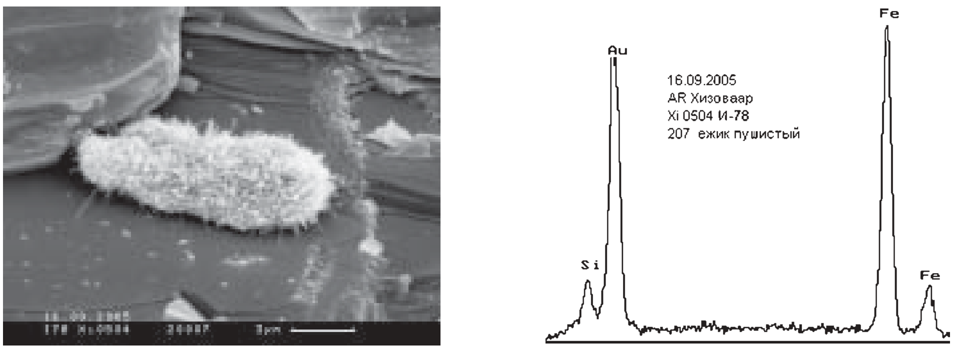


Рис. 10. Биогенная форма, покрытая «игольчатой» ожелезненной оболчкой, и ее химический анализ.

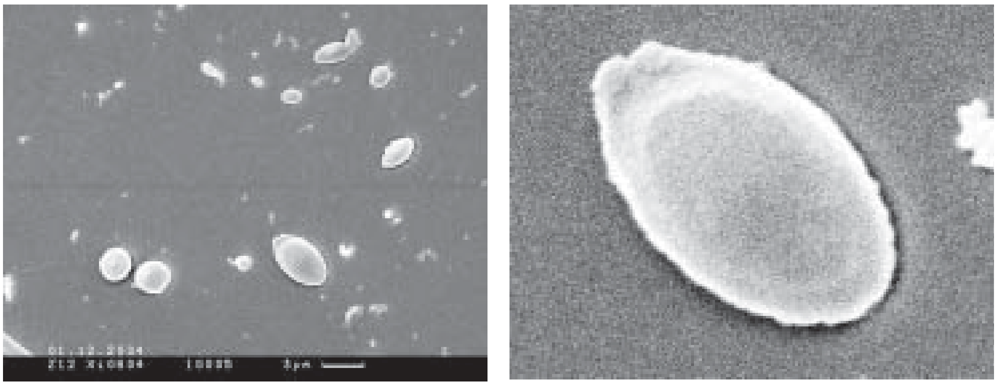


Рис. 11. Уплощенно-овальные формы в туфогенно-осадочных породах. Справа – увеличенный фрагмент левого снимка.

Однако хорошая сохранность иголочек настораживает, и не исключено, что эти формы являются более поздними образованиями.

3. В туфогенно-осадочных породах обнаружены также своеобразные уплощенно-овальные формы, длина которых достигает 5 мкм, ширина — порядка 3 мкм. Они погружены или, можно сказать, «утоплены» во вмещающие породы (рис. 11). Поэтому, мы считаем их одновозрастными с породами, т.е. лопийскими.

Эти формы по краям окантованы тонким выпуклым валиком, на одной из узких сторон которого видны два миниатюрных (d<0,5 мкм) шаровидных образования (рис. 11, справа). На другом снимке наблюдается возможно деление клеток: от материнской клетки отпочковывается более мелкая дочерняя клетка (рис. 12).

Встречены также сложноорганизованные формы. Во-первых, обнаружена бутылочковидная форма, покрытая чешуйчатыми пластинками (рис. 13).

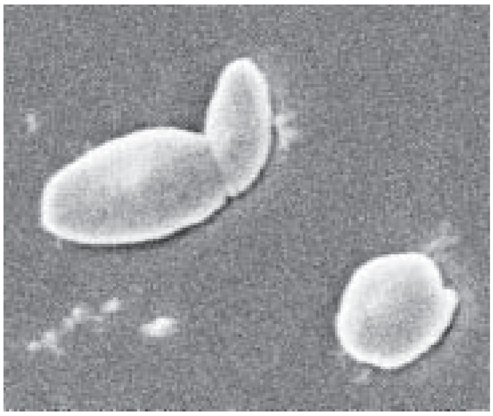
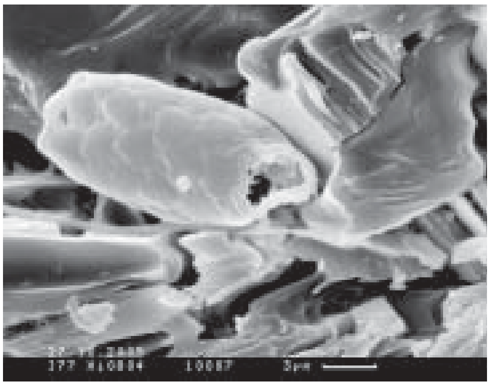


Рис. 12. Характер деления уплощенно-овальных структур. Такой тип деления характерен для низших грибов. Напоминаю, что клеточный цикл размножения бактерий осуществляется путем бинарного деления. При этом все компоненты клетки распределяются между сестринскими клетками поровну.

Эта форма напоминает представителей позднепротерозойского рода Melanocyrillium, занимающего неясное систематическое положение. Отличие неопротерозойских форм Melanocyrillium от архейских в их большем размере (на порядок). Ранее высказывалось мнение, что Melanocyrillium следует относить к Chitinozoa (Bloeser et al., 1977). Однако позднее было показано, что Melanocyrillium и хитинозои не имеют родственных отношений (Bloeser, 1985). Этим же автором было высказано предположение, что меланоцирилиумы представляют стадию цист (или, возможно, какой-то другой тип репродуктивной стадии) некоторых организмов (неопределенных водорослей, причем сам этот организм, вероятно, не обладал возможностью сохраняться в той физической среде, в ко-



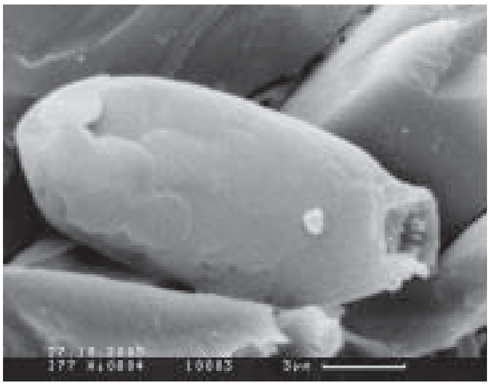


Рис. 13. Бутылочковидная форма из туфогенно-осадочных пород.

торой его «цисты» (Melanocyrillium) сохранялись. Melanocyrillium также относили к спорангиям водорослей (Horodyski, 1987) и к гетеротрофным планктонным протистам? сходным с тинтиннидами (Fairchild et al., 1978; Knoll and Vidal, 1980; Knoll, Calder, 1983). Дж. Шопф (Schopf, 1992) предположил, что бутылочковидные формы являются цистами раковинных амеб. Однако С.М. Портер и А.Х. Нолл (Porter, Kholl, 2000) предложили отнести их (роды Melanocyrillium и Caraburina) к самим раковинным амебам. Такая интерпретация укрепляет ту точку зрения, согласно которой диверсификация эвкариот уже в среднепротерозойское время была достаточно продвинутой. Если предположить, что наши «бутылочки» одновозрастны с вмещающими их породами, а данных, опровергающих это, не обнаружено, то можно говорить о существовании в позднеархейских морях представителей эвкариот: либо водорослей, либо раковинных амеб. Однако наши находки единичны, имеют слишком высокую сохранность, и поэтому мы пока воздерживаемся от окончательных выводов.

Проведенные исследования позволяют предположить присутствие в позднеархейских морях Северной Карелии разнообразных микроорганизмов бактериальной природы, а также, возможно, и эвкариотных форм.

Я искренне благодарна А.Б. Вревскому, Т.Н. Герман, В.Н. Подковырову, Н.А. Алфимовой, В.А. Матреничеву, Я.Е. Малаховской, Л.М. Герасименко, М.А. Федонкину за помощь в сборе материалов, за ценные советы, обсуждение рукописи в процессе работы, а также А.В. Кравцеву и Л.Т. Протасевичу за помощь в работе на электронном сканирующем микроскопе CamScan-4.

Работа выполнена по программе Президиума РАН «Возникновение и эволюция биосферы», подпрограмма II («Возникновение жизни и эволюция геобиологических систем»). Она поддержана грантами РФФИ 05-04-48008, 03-05-64499 и НШ-974.2003.5.

Литература

Весталл Ф., Велш М. 2002. Раннеархейские ископаемые бактерии // Бактериальная палеонтология. М.: ПИН РАН. С. 84–90

Кожевников В.Н. 2000. Архейские зеленокаменные пояса Карельского кратона как аккреционные орогены. Петрозаводск: Карельск. Научн. центр РАН. 223 с.

Крылов И.Н., Тихомирова Н.С. 1988. К образованию кремнистых микрофоссилий // Палеонтол. журн. № 3. С.3–9.

Розанов А.Ю. 2003. Ископаемые бактерии, седиментогенез и ранние стадии эволюции биосферы // Палеонтол. журн. № 6. С. 41–49.

Сергеев В.Н. 2002. Окремненные микрофоссилии // Бактериальная палеонтология. М.: ПИН РАН. С. 91–96.

Тимофеев Б.В. 1982. Микрофитофоссилии раннего докембрия. Л.: Наука. 128 с.

Ушатинская Г.Т. Процесс окремнения // Бактериальная палеонтология. М.: ПИН РАН. С. 66–67.

Astafieva M.M., Hoover R.B., Rozanov A.Yu., Vrevskiy A.B. 2005. Fossil microorganisms in Archaean deposits of Northern Karelia // Proceed. SPIE. Vol. 5906. Instruments, Methods, and Missions for Astrobiology. Bellingham. P. 5906-1 – 5906-6.

Barghoorn E.S., Tylor S.A. 1965. Microorganisms from the Gunflint cherts // Science. Vol. 147. No 3658. P. 563–577.

Bloeser B. 1985. Melanocyrillium a new genus of structurally complex Late Proterozoicmicrofossils from the Kwaguant forъation (Chuar Group), Grand Canyon, Arisona // J. Paleontol. Vol.59. No. 5. P. 741–765.

Bloeser B., Schopf J.W., Horodyski R.J., Breed W.J. 1977. Chitinozoan from the Late Precambrian Chuar Group of the Grand Canyon, Arizona // Science. Vol. 195. P. 676–679.

Fairchild T.R., Barbour A.P., Haralyi N.L.E. 1978. Microfossils in the «Eopaleozoic» Jacadigo Group at Urucum, Mato Grosso, south-west Brazil // Bol. Inst. Geoscien. Univ. Sao Paulo. No. 9. P. 74–79.

Horodyski R.J. 1987. A new occurrence of the vase-shaped fossil *Melanocyrillium* and new data on this relatively complex Late Precambrian fossil // Geol. Soc. Amer. Abstr. with Programs. No. 19. P. 707.

Knoll, A.H. 1994. Neozoic evolution and end nomental change // Early life on Earth. N.Y.: Columbia Univ. Press. P. 439–449.

Knoll, A.H., Calder S. 1983. Microbiotas of the late Precambrian Rysso Formation, Nordaustlandet, Svalbard // Paleontology. Vol. 26. P. 467–496.

Knoll A.H., Vidal G. 1980. Late Proterozoic vase-shaped microfossils from the Visingso Beds, Sweden // Geol. Foreningens I Stockholm Forhandlingar. Bd. 102. S. 207–211.

Porter S.M., Kholl A.H. 2000. Testate amoebae in the Neoproterozoic Era: evidence from vase-shaped microfossils in the Chuar Group, Grand Canyon // Paleobiology. Vol. 26. No. 3. P. 360–385.

Rozanov A.Yu. 2005. Geological events in the Precambrian Era // Proc. SPIE. Instruments, Metods and Mission for Astrobiology. SPIE Bellingham, San Diego, California: 5906. 59060N-1– 59060N-9.

Schopf J.W., eds. 1983. Earth's biosphere, its origin and evolution. Princeton: Univ. Press. 544 p.

Schopf J.W. 1992. Evolution of the Proterozoic biosphere: benchmarks, tempo, and mode // Schopf J.W., Klein C., eds. The Proterozoic biosphere: a multidisciplinary study. Cambridge: Univ. Press. P. 585–600.

Westall F., Folk R.L. 2003. Exogenous carbonaceous microstructures in Early Archaean cherts and BIFs from the Isua Greenstone Belt: implications for the search for life in ancient rocks // Precambrian Research. 2003. Vol. 126. P. 313–330.