

К вопросу о роли микроорганизмов в формировании структурно-текстурных особенностей строматолитов

Т.В. Литвинова

Геологический институт РАН, 119017 Москва, Пыжевский пер. 7
litvinova-geo@rambler.ru

С помощью СЭМ изучена микроструктура строматолитов рода *Sundia* из нижнепротерозойских отложений Карелии. Наряду с известными, широко распространенными биогенными ультрамикроструктурами были обнаружены остатки довольно крупных (до 200×18 мкм) водорослей, ранее не наблюдавшиеся в строматолитах различной географической приуроченности и возраста, в том числе и в нижнем протерозое Карелии. Анализируется участие этих и других микроорганизмов в формировании описываемых строматолитовых построек.

Введение

Строматолитовые постройки Южной Карелии находятся в пределах Онежского синклиниория (рис. 1), усложненного складками более низкого порядка. Это крупная раннепротерозойская структура залегает с угловым и стратиграфическим несогласием на более древних отложениях – архейских гранитах, гнейсах, амфиболитах, метаморфизованных вулканических породах. В общей стратиграфической шкале докембрия России карелий, или карельская эzonотема, делится на нижнекарельскую и верхнекарельскую эратемы. В региональной схеме нижний карелий разделен (снизу вверх) на три надгоризонта: сумий, сариолий и ятулий, в котором и обнаружены строматолиты; верхний карелий включает людиковий, калевий и вепсий.

В целом ятулий характеризуется развитием древних кор выветривания, широким распространением кварцитов и кварцевых конгломератов с прослоями высококалиевых пелитов, аномально тяжелым составом карбонатного углерода и распространением в его верхней части (туломозерском надгоризонте) разнообразных строматолитовых построек. Разрезам ятулийского надгоризонта также свойственны переменная мощность и фациальная изменчивость. Нижняя граница стратона проводится по древней коре химического выветривания, которая прослеживается в основании разрезов ятулия практически на всех подстилающих его породах. Верхняя граница фиксируется контактом розовых доломитов и перекрывающих их темно-серых алевро-

литов и вулканитов людиковия, то есть подошвы верхнего карелия.

Ятулийский надгоризонт (2450–2180 млн л. н.) обычно рассматривается в качестве репера при проведении региональных и межрегиональных стратиграфических корреляций. Он расчленяется (снизу вверх) на янгозерскую, медвежьевогорскую и туломозерскую свиты [Негруца, 2011]; в последней (рис. 2) и установлены строматолиты [Рябинин, 1941; Бутин, 1966; Макарихин, Кононова, 1983].

Янгозерская свита представлена толщей кварцитов, конгломератов и гравелитов кварцевого и гранитового состава, разделенных глинистыми сланцами; в ее верхней части развиты эфузивные породы основного состава.

Медвежьевогорская свита сложена гравелитами, песчаниками, кремнистыми и гематитовыми сланцами, реже доломитами, чередующимися с пачками туфов и туфосланцев. Этот комплекс также перекрывается мощной толщей эфузивных пород основного состава.

В нижней части туломозерской свиты распространены гравелито-песчано-сланцевые отложения карбонатного и карбонат-магнезитового состава с примесью галита и отдельными прослоями гематитовых сланцев, а верхняя включает толщу ритмично-слоистых терригенно-карбонатных пород (рис. 2).

Анализ гранулометрического состава пород туломозерской свиты, характер ее текстурно-структурных особенностей, а также распростра-

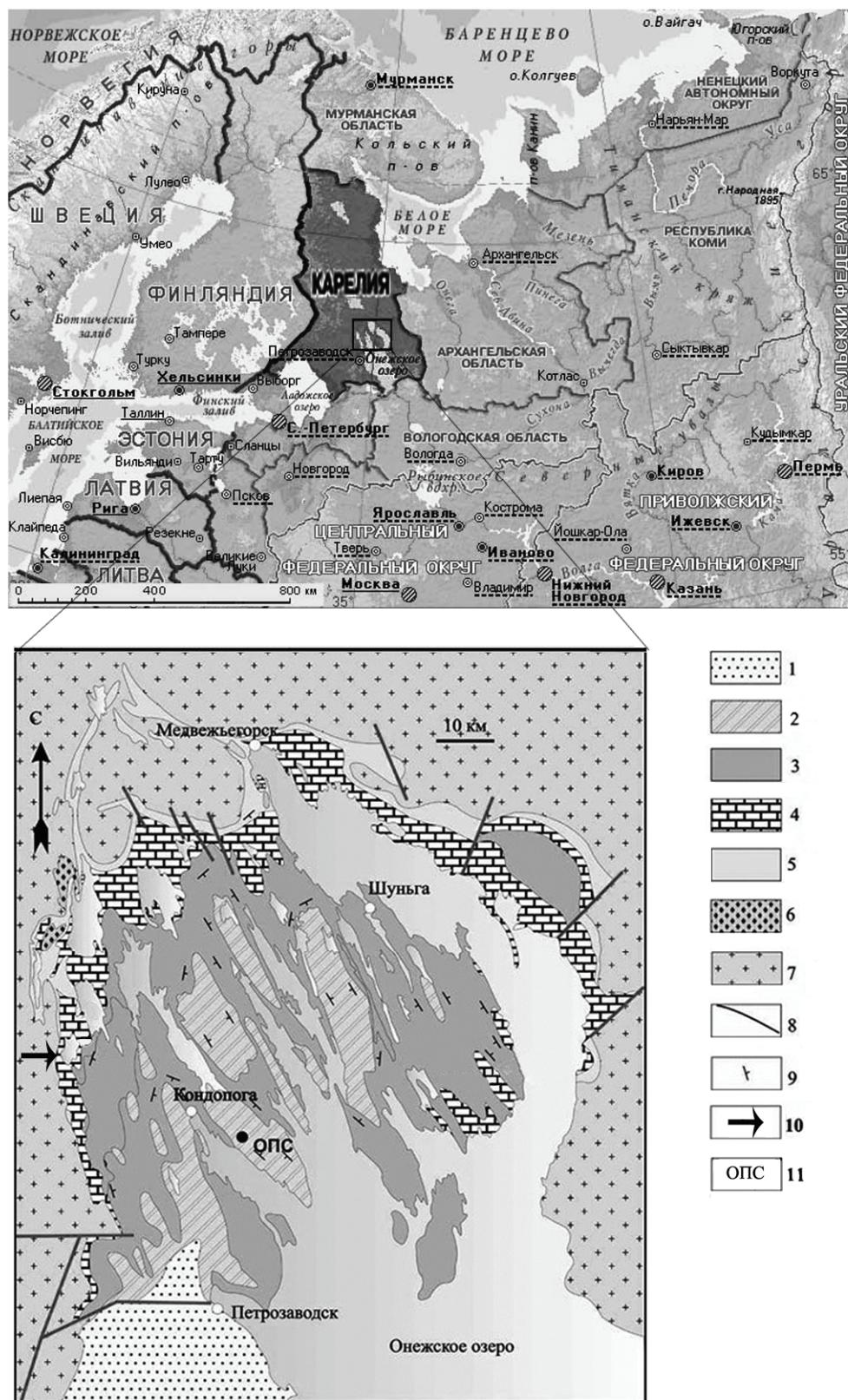


Рис. 1. Геологическая схема Онежского синклиниория [Отчет..., 2009]: 1 – вепсийский надгоризонт; 2 – калевийский надгоризонт; 3 – людиковийский надгоризонт; 4, 5 – ятулийский надгоризонт (4 – онежский горизонт; 5 – сегозерский горизонт); 6 – сариолийский надгоризонт; 7 – архейский фундамент; 8 – разрывные нарушения; 9 – элементы залегания слоистости; 10 – место отбора проб (оз. Сундозеро); 11 – Онежская параметрическая скважина

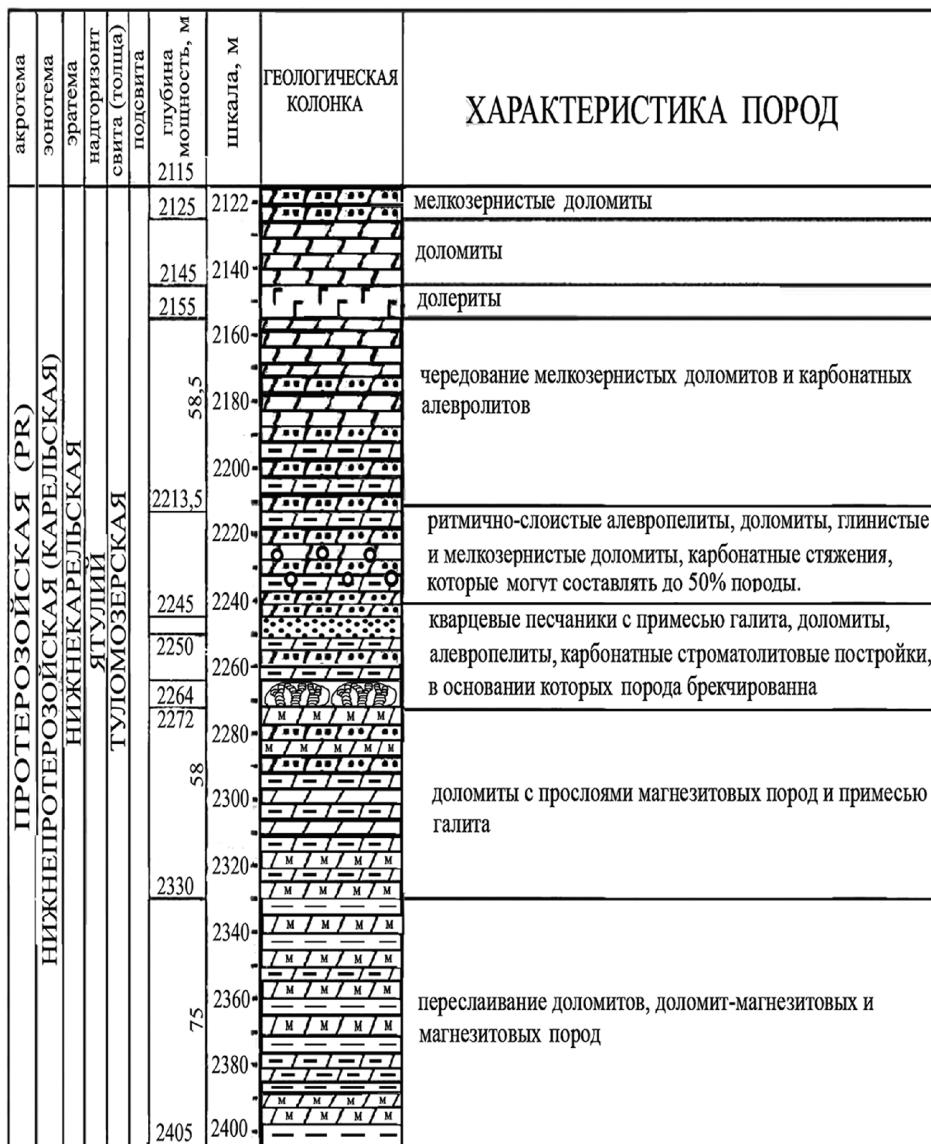


Рис. 2. Фрагмент геологической колонки туломозерской свиты, включающий изученные строматолиты. Использованы материалы Онежской параметрической скважины [Крупеник, Свешникова, 2009]

нение строматолитов в ее верхней части указывает на то, что она была сформирована в мелководных условиях прибрежно-морских и морских фациальных обстановок в аридном климате.

На границе туломозерского и людиковийского надгоризонтов сухой климат сменился на умеренно-увлажненный и, как предполагается, произошло еще большее усиление биогенных процессов, приведших к формированию мощных толщ осадков с повышенным содержанием углеродистого вещества [Skuf'in, 2002]. К этому же времени приурочено формирование магнезиальных базальтов.

Некоторые исследователи [Магницкая и др., 1996] предлагают разделение туломозерской свиты на нижнюю, преимущественно терриген-

ную, и верхнюю карбонатную части – соответственно на сегозерский и онежский горизонты, что обосновывается широким распространением в последнем биогенных построек.

Морфология нижнепротерозойских строматолитов Карелии и часто невыразительная микроструктура их очень мелких строматолитовых столбиков существенно отличается от рифейских биогенных построек и ни на одном уровне организации не вписывается в общепринятую формальную классификацию строматолитов докембрия. При работе с карельскими строматолитами не используются таксоны ранга более высокого, чем род [Макарихин, Кононова, 1983], то есть в их формальной классификации выделяются только роды и виды.

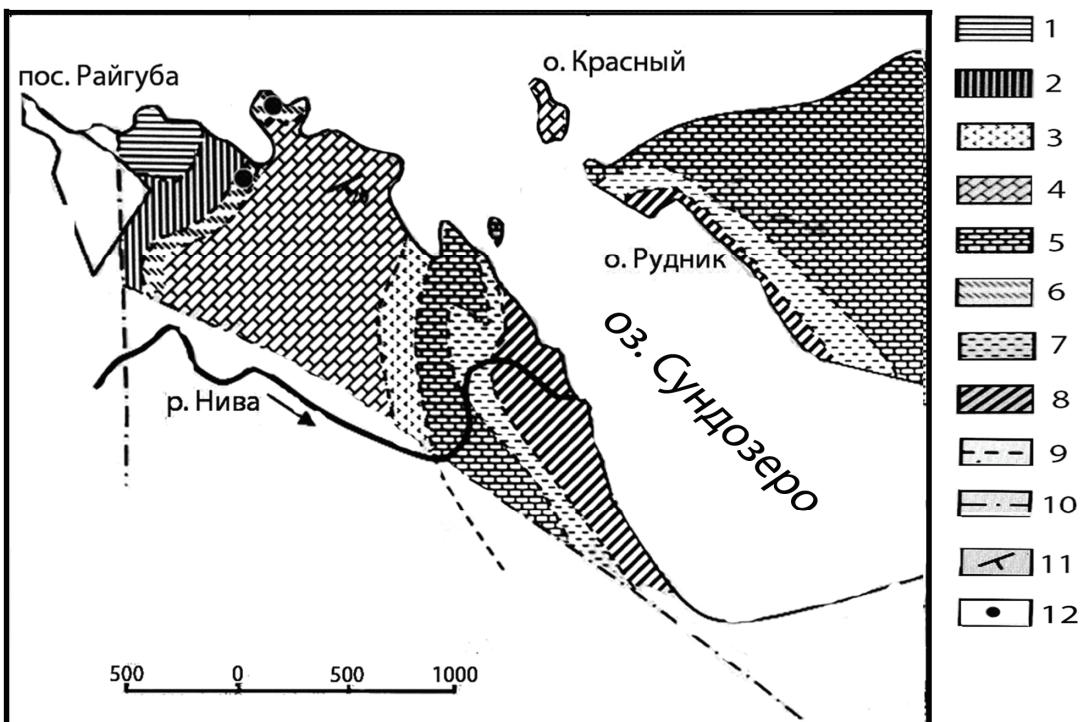


Рис. 3. Геологическая схема юго-западной части оз. Сундозеро (по [Медведев, 2006] с незначительными изменениями) и места отбора строматолитов *Sundia* туломозерской свиты: 1–7 – ятулий, туломозерская свита, онежский горизонт (1–5 – доломиты, доломитовые известняки, карбонатные песчаники и алевролиты с различными родами строматолитов; 6 – область распространения строматолитов рода *Sundia*; 7 – лавовые покровы плагиоклаз-пироксеновых порфиритов); 8 – людиковий, карбонатные алевролиты; 9 – стратиграфические границы; 10 – разрывные нарушения; 11 – элементы залегания слоистости; 12 – места отбора проб со строматолитами *Sundia*

В настоящей работе рассматривается один из таксонов строматолитов, в котором, наряду с часто встречающимися формами, обнаружены весьма необычные и достаточно широко распространенные биогенные ультрамикрообразования,

сыгравшие заметную роль в формировании текстурно-структурных особенностей этой породы. Они не имеют морфологических аналогов ни в более поздних постройках докембра, ни среди одновозрастных карельских таксонов.

Материал и методика исследования

В статье представлены результаты исследования образцов одного из нижнепротерозойских формальных родов строматолитов – *Sundia* Butin [Бутин, 1966]. Материал собран автором в Кондопожском районе Центральной Карелии, на расстоянии от 1000 до 2500 м на северо-восток от пос. Райгуба, в скальных обнажениях юго-западного берега оз. Сундозеро (далее в тексте – ОС), координаты отбора образцов – 62°23'22" с. ш. и 33°45'01" в. д. (рис. 3). Кроме того, был изучен керновый материал из Онежской параметрической скважины (ОПС, рис. 1), пробуренной до глубины 3500 м и вскрывшей мощные толщи осадочно-вулканогенного людиковия верхнего протерозоя и осадочного ятулия нижнего протерозоя [Отчет..., 2009], который на глубине 2264–

2272 м включает (рис. 2) строматолитовые постройки.

Изучение образцов проводилось на растровом электронном микроскопе TesScan MV-2300 с энергодисперсионной приставкой Cambridge instruments INCA-200 (диаметр анализируемого участка 1 мкм, чувствительность по легкой матрице 0,001%). Рассматриваемые пробы представляли собой свежие сколы строматолитов, не превышавшие 10–20 мм в диаметре, на которых, благодаря объемным формам частиц, достаточно хорошо фиксируются фосилизированные цианобактерии и биогенные ультрамикроструктуры. Участок для исследования предварительно выбирался на образце с помощью бинокулярной лупы. Опыление проб осуществлялось золотом,

что позволяло фиксировать в них углерод и его количество.

Детальное изучение формы кристаллизации минеральных составляющих породы и определение их химического состава значительно помогают установлению присутствующих в них фоссилизированных органических остатков и позволяют оценить роль вторичных процессов, способных существенно завуалировать или, наоборот, имитировать подобие биогенных структур и объектов.

Анализ природы частиц, непохожих на минеральные агрегаты, проводился как с учетом морфологии исследуемых объектов, так и их химического состава. Последний является очень важным критерием и помогает не только отделить образования биогенного происхождения от минералов, характеризующихся достаточно стабильным составом, но и застраховаться от ошибки, связанной с загрязнением пробы современными грибами и их гифами. Ведь, несмотря на тщательную подготовку проб, опасность их за-

сорения всегда существует. Однако гифы на цело состоят из углерода, тогда как фоссилизированные организмы сложены преимущественно карбонатным, реже кремневым или фосфатным материалом, но, в отличие от минеральных агрегатов, характеризуются повышенным содержанием углерода и частым присутствием в микродозах ряда биофильных элементов (Mg, Si, Na, K, P, Cl или F, реже Tr); последних также никогда не бывает в гифах.

Исследование шлифов с помощью сканирующего электронного микроскопа дополняло и уточняло сведения о химическом составе рассматриваемых объектов, поскольку из-за рельефной поверхности исследуемых проб не всегда можно установить их точечный состав или получить полную сходимость элементов.

Изученный материал (в том числе палеонтологические шлифы и пробы) хранится в Геологическом институте РАН, коллекция № 2011. Пробы и шлифы приготовлены из образцов № 128S_k/2011 (ОС) и № 6255/2011 (ОПС).

Описание

Тип Stromatolites. Строматолиты Под *Sundia* Butin, 1962

Под *Sundia* с единственным (типовым) видом *S. mira* был установлен Р.В. Бутиным [1966] на нижнепротерозойском материале из района озер Сундозеро и Пялозеро. Это родовое название вошло в литературу [Раабен, 1972; Крылов, 1975; и др.]. Позднее было предложено изменить его на *Sundosia* [Макарихин, Кононова, 1983]: авторы аргументировали свое предложение тем, что род был назван по имени породообразующей водоросли, но поскольку объект «включает в себя только строматолиты, а не строившие их водоросли, и этот таксон может быть сохранен в качестве формального вида, типового для выделяемого нового рода *Sundosia*» [Макарихин, Кононова, 1983, с. 117]. Такая позиция противоречит «Международному кодексу ботанической номенклатуры» сразу в двух пунктах: нарушает принцип приоритета и использует в качестве типового вид, ранее послуживший номенклатурным типом для другого рода. Поэтому родовое название *Sundosia* должно быть отвергнуто и как младший омоним родового эпитета *Sundia*, и как родовое название, типифицированное видом ранее описанного рода *Sundia*.

Изучение описываемого таксона с помощью СЭМ позволило по достоинству оценить прозорливость его автора, который сумел обнаружить водорослевые остатки и без использования электронного микроскопа – размерность и широкое

распространение этих образований позволили внимательному ученому увидеть их и при оптическом исследовании. Заслуга Р.В. Бутина заключается еще и в том, что он не только установил, но и верно оценил значение этих водорослей для формирования структуры данного строматолита, что было достаточно сложно сделать не прибегая к помощи СЭМ.

В связи со сказанным выше здесь и далее будет использоваться родовое название *Sundia*.

Sundia mira Butin, 1962

Вид представлен тесно расположенным субцилиндрическими столбиками, высота которых не превышает 50–70 мм, диаметр – 10–15 мм, ветвление наблюдается редко [Макарихин, Кононова, 1983]. Ограничение ориентировано как поперек, так и вдоль столбика. Форма поперечного сечения овальная (табл. I, фиг. 1), концентрически слоистая, нечеткая. Боковая поверхность неровная, с бугорками и впадинками. Строматолиты имеют пеструю окраску, от серовато-розовой до багряно-красной, за счет присутствия примеси мелкодисперсного гематита [Макарихин, Кононова, 1983].

Изучение представителей *Sundia mira* с помощью электронного микроскопа выявило достаточно широкое распространение на возвышенных участках их рельефа вытянутых тонких однотипных образований, длиной до 200 мкм, и шириной не более 18 мкм (табл. I и II). При этом

даже в пределах одного небольшого фрагмента пробы (400×400 мкм) можно встретить скопление подобных образований (табл. I, фиг. 2), каждое из которых погружено в углубление. Одни из них закручиваются по стенкам внутри полости с овальным сечением (табл. I, фиг. 3; табл. II, фиг. 2, 3), частично или полностью заполняя его (табл. II, фиг. 4), другие протягиваются вдоль узких вытянутых полостей (табл. I, фиг. 4–9; табл. II, фиг. 1). Независимо от расположения, все образования имеют монолитное однообразное строение при полном отсутствии каких-либо поверхностных либо внутренних морфологических особенностей (табл. II, фиг. 4, 5, 8, 9; табл. II, фиг. 1).

Химический состав описываемых образований (табл. II, фиг. 5, 6) существенно отличается от состава вмещающей породы, сложенной карбонатным либо карбонатно-кремневым материалом. Наравне с карбонатной составляющей, они включают относительно высокое, даже в сравнении с другими находками биогенных образований, количество углерода, сопоставимое лишь с таковым в бактериальных пленках.

Как и в других биогенных образованиях, органический углерод сопровождается микродозами

некоторых биофильных элементов, в данном случае – Si, P, Mn, Na, Cl, K, иногда Fe, Mn. Результаты химического анализа продемонстрированы на графике по материалам из керна Онежской сверхглубокой скважины (табл. II, фиг. 5, 6).

Данные по пробам из ОС незначительно отличаются от них, характеризуясь меньшей стабильностью состава за счет более поздних гипергенных процессов. Все эти образования тесно соприкасаются со стенками как овальных (табл. II, фиг. 3), так и узких вытянутых полостей (табл. II, фиг. 10).

Изучение описываемых строматолитов показало, что ни у одного другого строматолитового таксона Карелии, даже в пределах этого же разреза, подобные образования не обнаружены. И лишь в той же пробе встречены округлые органические образования с еще более высоким содержанием углерода, имеющие в поперечном сечении слоистое строение (табл. II, фиг. 4). При увеличении этих образований до 20 мкм хорошо видно, что они включают точно такие же тонкие длинные частицы, которые, свертываясь, плотно заполняют отверстие по кругу, от окружности к центру, формируя, таким образом, плохо фиксируемую слоистость (табл. II, фиг. 4).

Обсуждение

Обычно в докембрийских породах все находки микроорганизмов объединяются под собирательным названием «цианобактерии». Разделить их на бактерии и водоросли практически невозможно из-за несовершенной сохранности и часто – отсутствия аналогов среди современных организмов. В данном случае, судя по размеру, морфологическим особенностям, отсутствию каких-либо усложняющих форму элементов и приуроченности к углублениям можно предположить, что эти органические образования существенно отличались от известных таксонов цианобактерий, а потому, с некоторой долей условности, их можно отнести непосредственно к эвкариотным водорослям, как они и будут именоваться далее.

Приуроченность остатков этих водорослей к «норкам», возможно, указывает на то, что они являлись эндолитами, то есть сверлящими организмами, которые поселялись на поверхности субстрата, а затем внедрялись в него за счет выделения органических кислот, растворявших находящийся под ними известковый ил. Это подтверждается и тем, что подобные отверстия в породе, полые либо заполненные осадочным материалом, отсутствуют.

Жизнедеятельность в углублениях могла иметь ряд ощутимых преимуществ. Так, предпо-

лагается, что ранний протерозой был временем, для которого характерно отсутствие защищающего от солнечной радиации (излучения) озонового слоя и наличие сильных ветров, возникавших в условиях резких перепадов температур и несуществования растительности. Однако освещение было необходимо водорослям в качестве источника энергии для фотохимических реакций, роста и развития. В этой ситуации углубления («норки») представляются полезным укрытием. С одной стороны, водоросли не теряли связь с внешней средой: ведь им необходим был не только свет, но и определенная, относительно устойчивая температура, наличие биологически активных веществ, макро- и микроэлементов, неорганического углерода, извлекавшихся ими из воды. С другой стороны, в таком укрытии водоросли были надежно защищены от различных нежелательных внешних воздействий.

Поступление в слоевище биологически активных веществ и кислорода имеет важное значение для жизнедеятельности водорослей, как и наличие неорганических источников углерода, что зависит не только от их концентрации в воде, но и от скорости течения. Последнее может играть как положительную, так и отрицательную роль ввиду отсутствия у водорослей корневой

системы [Сиренко, Козицкая, 1988]. Нижнепротерозойские водоросли были уже способны к оксигенному фотосинтезу, то есть могли ассимилировать на свету углекислый газ, но его недостаток нужно было пополнять из воды, которая могла служить и в качестве источника водорода.

Водоросли развивались, поглощая из окружающей водной среды растворы минеральных солей и углекислоты, а затем перерабатывали их в необходимые для жизни органические соединения – белки, углеводы, жиры – и получали таким образом энергию для роста и размножения. Поэтому наиболее благоприятные условия для формирования дочерних поколений создавались в уже готовых неглубоких полостях: вода в них была обогащена органическим веществом и микроэлементами, освещения хватало. В то же время эти полости защищали организмы от прямых космических лучей и сильных течений, но не затрудняли постоянного водообмена, выносившего продукты разрушения и доставлявшего питательные вещества и кислород.

Благодаря комфортным условиям, отверстие полностью заполнялось водорослями и разрасталось. Возникала относительно крупная округлая структура, показанная нами на табл. II, фиг. 4, а жизнедеятельность последующих поколений водорослей приводила к погружению ее фундамента и наращиванию постройки вверх, постепенно формируя столбик.

Водоросли строили и заполняли как круглые, так и вытянутые отверстия. Такова была, по-видимому, одна из ранних «проб жизни», испытывавших различные формы и способы существования, пригодные для выживания и продолжения рода.

Ограниченнное распространение описываемых форм, по-видимому, говорит о существовании лимитирующих факторов, не позволявших этим организмам осваивать другие участки Онежской акватории. Узкая локализация могла быть вызвана различными причинами в контрастных климатических условиях протерозоя. Минеральный состав воды, соленость и состав субстрата существенно не отличались в пределах одного водоема, где достаточно тесно соседствовали строители различных строматолитовых построек, а вот локальная обстановка могла отличаться, например, наличием или отсутствием течений, степенью освещения и обогрева. Фациальные условия также могли существенно варьировать в небольших отшнурованных лагунах, в которых значительно возрастали соленость и удельная концентрация макро- и микроэлементов.

В тех случаях, когда плотно соприкасающиеся водоросли полностью заполняли окружное отвер-

стие (табл. II, фиг. 4), возникали образования, характеризующиеся наиболее высоким содержанием углерода, однако установить слоистость подобной структуры можно только при очень большом увеличении. Но если в «норках» оставалось свободное пространство между участками скрученного слоевища, оно нередко заполнялось карбонатным осадком. А затем и водоросли частично замещались и перекристаллизовывались, что привело к возникновению минерализованных окружных образований с четким концентрическим строением (табл. II, фиг. 7), сформировавшихся за счет чередования карбонатного и карбонатно-органического материала (табл. II, фиг. 7, 7₂, 7₃).

Чем крупнее отверстие (табл. II, фиг. 4) или чем плотнее оно «забито» слоевищем водорослей (табл. II, фиг. 7₁), тем больший шанс получал организм для длительного существования, по возможности вытесняя поступающий карбонатный осадок или растворяя его. Такие отверстия могли использоваться неоднократно и не одним поколением относительно длительное время, причем каждый последующий организм был обеспечен питательными веществами за счет предшественников. Последующие процессы обезвоживания, уплотнения и кристаллизации завершали формирование столбиков, полностью или частично заполненных водорослями. В первом случае основную роль играл органический материал достаточно хорошей сохранности и окрашивал их в темный цвет, во втором возникало поперечное концентрическое строение столбиков, в которых чередуются перекристаллизованные биогенный и светлый минеральный материалы.

Сложная и беспорядочная структура *Sundia* связана также с присутствием многочисленных цианобактерий – спутников водорослей, для которых такое соседство было весьма полезно. Действительно, именно в этих организмах биominеральные ультрамикроструктуры более многочисленны и разнообразны, чем в других строматолитах [Литвинова, 2014а, б], в том числе и в Карелии [Литвинова, 2012]. Среди них достаточно широко распространены окружные образования с неровной шероховатой поверхностью (табл. III, фиг. 1–6) диаметром 5–6 мкм. Скопления таких частиц хорошо выделяются на фоне пелитоморфной карбонатной породы как по морфологии, так и по составу, занимая участки субстрата площадью 3600–3800 мкм².

В составе этих колоний встречаются отдельные маленькие шарики правильной формы (табл. III, фиг. 6₁) размером от 1 до 2,5 мкм, природа которых далеко не всегда ясна. Подобные образования установлены в строматолитах разного возраста и обычно приурочены к месторас-

положению сообщества фоссилизированных бактерий, причем их химический состав может не отличаться от других минерализованных организмов, как в данном случае, когда те и другие характеризуются повышенным содержанием углерода и присутствием некоторых микроэлементов.

Аналогичный шарик выявлен нами и среди колонии железобактерий, как будет показано далее. Однако состав таких частиц далеко не всегда одинаков, даже если они находятся рядом и погружены в карбонатный матрикс. Так, в некоторых строматолитах аналогичные правильные шарики сложены полностью кремнеземом, в этом случае, по-видимому, следует относить их к минеральным агрегатам.

Подчас идентичные по форме и размеру и находящиеся рядом образования могут быть различны по составу. При этом не следует забывать, что в условиях полного замещения породы кремнеземом или фосфатом в строматолитовых биогенных ультрамикроструктурах органический углерод практически не сохраняется [Литвинова, 2014а].

По-видимому, в каждом конкретном случае требуется специальное изучение этих частиц с обязательным определением их состава и сопоставлением данных по расположению объектов в пробе, соотношениям этих объектов с другими биогенными и минеральными образованиями и с вторичными изменениями в породе. Это позволяет дифференцировать подобные шарики по их генезису. В рассматриваемом случае есть все основания считать их биогенными.

Кроме того, в пробах, взятых как из керна, так и из обнажения, в пелитоморфном карбонатном материале обнаружены скопления пустот диаметром около 1 мкм, причем неминерального происхождения (табл. III, фиг. 7–9). Среди этих пустот наблюдалась фоссилизированная нитевидная частица (табл. III, фиг. 10). Взаимное расположение и размер пустот и частиц позволяют предположить их генетическую связь.

Встречаются также достаточно крупные (55–70 мкм в длину, 30–40 мкм в наиболее широкой части) конусовидные частицы (табл. III, фиг. 12).

Химический состав всех этих образований также характеризуется избытком углерода и присутствием микродоз других биофильных элементов, что позволяет легко отличить их от любых минеральных агрегатов, поскольку вмещающая порода, как правило, представлена преимущественно пелитоморфным материалом карбонатного состава с отдельными характерными кубическими кристаллами доломита, иногда частично или полностью замещенного кремнеземом.

В некоторых случаях отчетливо просматривается своеобразная структура: тонкие вытянутые «кружевные» образования (табл. III, фиг. 11) с «ячейками» (табл. IV, фиг. 1), опоясывающие, иногда не один раз, кристалл доломита. Есть все основания полагать, что подобные ультрамикроструктуры возникли в результате замещения кремнеземом тех же нитевидных бактерий. Формирование подобных структур детально продемонстрировано на примере биопленок современных термальных источников Камчатки (кальдера Узон), пробы из которых были отобраны В.К. Орлеанским и изучены с помощью электронного микроскопа [Крылов, Тихомирова, 1988]. Количество кремнезема в этой кальдере ниже уровня насыщения, поэтому выпадение кристаллов кремнезема из раствора происходит лишь за счет повышения его концентрации на периодически пересыхающих участках [Ушатинская, 2002].

В.К. Орлеанскому удалось отобрать образцы пород, последовательно подвергавшихся изменениям. Их исследование И.Н. Крыловым и Н.С. Тихомировой [1988] позволило установить этапы окремнения цианобактерий и зафиксировать различные стадии этого процесса (табл. IV, фиг. 4): от первоначального выпадения глобул опала (табл. IV, фиг. 2, 3) до полного замещения осадка кремнеземом (табл. IV, фиг. 5).

Однозначно интерпретировать природу подобных образований в древних отложениях крайне сложно, а иногда и невозможно, особенно если приходится наблюдать лишь последнюю стадию замещения цианобактерии кремнеземом (табл. IV, фиг. 5), но в рассматриваемом случае это было вполне реально.

Сопоставление структур (табл. III, фиг. 4; табл. IV, фиг. 1), оконтуривающих кристалл доломита, с практически идентичной формой, демонстрирующей окремнение живой нити из кальдеры Узон в современных термальных источниках Камчатки (табл. IV, фиг. 2, 3), указывает на то, что они, по-видимому, являются псевдоморфозами по нитчатым бактериям. Особенно если учесть, что в данном случае рассматриваются нижнепротерозойские отложения со всеми вытекающими из этого следствиями. Таким же образом трактуются аналогичные структуры и другими исследователями [Ископаемые бактерии..., 2011].

Наличие фоссилизированных биопленок (табл. IV, фиг. 6, 7), представляющих собой минерализованные смятые сгустки обезвоженной бактериально-слизистой оболочки, подтверждает подобное толкование генезиса рассматриваемых выше структур.

Такие образования достаточно широко распространены в строматолитах разного возраста

К вопросу о роли микроорганизмов в формировании структурно-текстурных особенностей строматолитов

[Наугольных, Литвинова, 2014; Леонова и др., 2014]. Они могут включать скопления нитевидных частиц и их пучки, очертания которых часто достаточно хорошо проглядываются в этих микроструктурах (табл. IV, фиг. 6₁).

В пробах из образцов строматолитов *Sundia*, неравномерно окрашенных в красные цвета, были установлены и другие объекты, которые, судя по форме и составу (повышенное содержание углерода и железа), имеют биогенное происхождение. Среди них встречаются отдельные крупные круглые частицы (табл. IV, фиг. 8); более широким распространением пользуются колонии мелких (1–4 мкм) округлых образований (табл. IV, фиг. 10). Кроме того, на фоне пелитоморфного карбонатного цемента по цвету, структуре и составу выделяются крупные неровные участки (табл. IV, фиг. 11), отделенные от вмещающей породы углублением до 1 мкм в ширину и порядка 0,5–0,9 мкм в глубину. Детальное исследование показывает, что это колония, в составе которой объединены остатки различных организмов. Среди них нитевидные образования и их следы (табл. IV, фиг. 11₁, 11₃, 11₅) и шарики (табл. IV, фиг. 11₂), а также расплеснутые смятые биопленки со сморщенной поверхностью, включающие пучки нитевидных частиц (табл. IV, фиг. 11₄) и др. Химический состав всех таких образований и объединяющего их матрикса, наряду с карбонатным материалом, в той или иной степени замещенным кремнеземом, также характеризуется повышенным содержанием железа и углерода (табл. IV, фиг. 9).

Включения микродисперсного гематита, способного окрасить описываемые строматолиты в багряно-красные цвета [Макарихин, Кононова, 1983], обнаружены не были. Связать формирование такой окраски породы с появлением приблизительно в это же время свободного кислорода было бы возможно, если бы все строматолиты являлись красноцветными, а не отдельные представители одного рода. По-видимому, в данном конкретном случае можно говорить о роли железобактерий (табл. IV, фиг. 8–11), способных изменить подобным образом цвет породы.

Таким образом, колония организмов, принимавших участие в построении строматолитов рассматриваемого таксона, объединяла водоросли и различные цианобактерии, сложное взаимодействие которых регулировало ее жизнедеятельность. Существование прямых и обратных связей между организмами сообщества, включавшего продуцентов и редуцентов (деструкторов), поддерживало цианобактериальный мат в относительном равновесии [Заварзин, 1993]. Его устойчивость определялась замкнутостью и самодостаточностью за счет подбора различных компонентов и их уравновешивания в системе, причем многие виды организмов не смогли бы выжить в одиночку, то есть для сообщества цианобактерий характерна не конкуренция, а дополнение друг друга [Pfening, 1989]. Процессы литификации и дальнейшие вторичные преобразования завершили формирование сложной структуры породы (табл. I, фиг. 1).

Заключение

Морфологическое своеобразие рода *Sundia*, связанное с текстурно-структурными особенностями и окраской породы, возникло в результате жизнедеятельности организмов. По составу и морфологическим критериям сообщество строматолитостроителей этого рода включало водоросли и разнообразные цианобактерии: кокковидные, нитевидные, в форме конуса и палочки, а также железобактерии.

Поселение водорослей на экологически благоприятных приподнятых участках первоначально-го рельефа давало возможность воспользоваться наиболее благоприятными условиями для роста организмов благодаря свету и теплу, а внедрение в осадок оберегало их от ветров, течений, прямых солнечных лучей и других деструктивных процессов. Все это создавало комфортную обстановку для их жизнедеятельности: отмершие организмы обеспечивали последующих дополнительным питанием и служили источником углерода.

Локальная биопродуктивность колонии значительно возрастила за счет относительно крупных водорослей, вокруг которых обустраивались многочисленные цианобактерии. Прямые и обратные связи продуцентов и деструкторов поддерживали жизнеспособность биосистемы, возвращая ее в стабильное состояние.

Водоросли играли главную роль в формировании округлых и овальных микро- и макроэлементов породы, бактерии подчеркивали и усложняли структуру строматолита многочисленными деталями, зафиксированными при литификации осадков и последующих вторичных процессах преобразования.

Железобактерии при росте культуры вырабатывали углекислую окись железа, которая и окрасила строматолиты рода *Sundia* в багряно-розовые цвета, что существенно отличает их по цвету от других формальных строматолитовых таксонов Карелии.

Благодарности

Керновый материал из Онежской параметрической скважины был любезно предоставлен П.В. Медведевым (Институт геологии КарНЦ РАН), за что автор приносит ему свою искреннюю благодарность.

Исследования проведены в соответствии с планами научно-исследовательских работ ГИН РАН (АГН, КБС – тема № 0135-2016-0021), электронно-микроскопическое изучение строматолитов выполнено при поддержке проекта РФФИ № 17-55-45-081_IND.

Литература

Бутин Р.В. Ископаемые водоросли протерозоя Карелии // Остатки организмов и проблематика протерозойских образований Карелии. – Петрозаводск, 1966. – С. 349.

Заварзин Г.А. Развитие микробных сообществ в истории Земли // Проблемы доантропогенной эволюции биосфера. – М.: Наука, 1993. – С. 212–222.

Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах / *М.М. Астафьевая, Л.М. Герасименко, А.Р. Гептнер, Е.А. Жегалло, С.И. Жмур, Г.А. Карпов, В.К. Орлеанский, А.Г. Пономаренко, А.Ю. Розанов, Е.Л. Сумина, Г.Т. Ушатинская, Р. Хувер, Э.Л. Школьник*. – Москва: ПИН РАН, 2011. – 172 с.

Крылов И.Н. Строматолиты рифея и фанерозоя СССР. – М.: Наука, 1975. – 245 с.

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

Крупеник В.А., Свешникова К.Ю. Онежская параметрическая скважина. – Ярославль: ОАО НПЦ Недра, 2009. (http://karelnedra.karelia.ru/geolininform/onego_skv_0.htm)

Леонова Л.В., Литвинова Т.В., Главатских С.П. Специфические микроагрегаты и проблематичные микрофоссилии – спутники биохемогенных пород // Становление скелета у различных групп и биоминерализация в истории Земли. – М.: ПИН РАН, 2014. – С. 63–71.

Литвинова Т.В. Биогенные ультрамикроструктуры строматолитов Карелии // Современная микропалеонтология. X Всероссийское микропалеонтологическое совещание. – Геленджик, 2012. – С. 492–496.

Литвинова Т.В. Строматолитовые фосфориты Южного Урала и их генезис // Литосфера. – 2014а. – № 2. – С. 50–59.

Литвинова Т.В. Ультрамикроструктуры строматолитового рифа Северного Прианабарья и их происхождение // Литология и полезн. ископаемые. – 2014б. – № 5. – С. 443–454.

Магницкая Т.Э., Макарихин В.В., Медведев П.В. и др. Опорный разрез ятулийского надгоризонта и вопросы корреляции // Тез. докл. на Междунар. конф. «Корреляция геологических комплексов Фенноскандия». – СПб., 1996. – С. 44–45.

Макарихин В.В., Кононова Г.М. Фитолиты нижнего протерозоя Карелии. – Л.: Наука, 1983. – 180 с.

Медведев П.В. Раннепротерозойские окаменелости заповедника «Кивач» // Тр. Карельского научного центра РАН. Вып. 10. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. – С. 90–94.

Наугольных С.В., Литвинова Т.В. Строматолиты из пермских отложений Пермского Приуралья: новый форм-род *Alebastrophyton* Naug. et Litvinova, gen. nov. // Палеонтология в музейной практике. Сб. научн. работ. – М.: Медиа-Гранд, 2014. – С. 33–43.

Негруца В.З. Проблемы стратиграфии нижнего докембria России (историко-методологический анализ) // Литосфера. – 2011. – № 1. – С. 3–19.

Отчет по объекту «Онежская параметрическая скважина», отв. исполнитель Наркисова В.В. – Ярославль: НПЦ Недра, 2009 г. (С отчетом можно познакомиться в фондах Карельского ТФИ.)

Раабен М.Е. Верхний рифей как биостратиграфическая единица // Геология докембria. – М.: Наука, 1972. – С. 23–30.

Рябинин В.Н. Органические остатки в карбонатных породах южной Карелии // Материалы по геологии и полезным ископаемым Карело-Финской ССР, Ленинградской и Мурманской областей. № 4. – М.: Наука, 1941. – С. 8–21.

Сиренко Л.А., Козицкая В.Н. Биологически активные вещества водорослей и качество воды. – Киев: Наук. думка, 1988. – 256 с.

Ушатинская Г.Т. Окремнение // Бактериальная палеонтология. – М.: ПИН РАН, 2002. – С. 66–68.

Pfennig N. Ecology of phototropic purple and green sulfur bacteria // Autotrophic bacteria. – B. etc.: Springer, 1989. – P. 97–116.

Skufin P.K. Pechenga rift belt and related Cu-Ni deposits // Major geological sights of the Kola Peninsula. – Apatity, 2002. – 66 p.

Объяснения к таблицам

Таблица I

Остатки водорослей в строматолитах Sundia из ОС; нижний протерозой, ятулийский надгоризонт, туломозерская свита

Фиг. 1. Строматолит *Sundia*, концентрически слоистая, нечеткая текстура.

Фиг. 2. Скопление остатков водорослей на небольшом участке породы.

Фиг. 3–9. Остатки водорослей различной величины, фрагменты фиг. 2.

Фиг. 10. Остатки водорослей в узкой вытянутой нише.

Таблица II

Остатки водорослей и биогенные ультрамикроструктуры в строматолитах из керна ОПС; нижний протерозой, ятулийский надгоризонт, туломозерская свита

Фиг. 1–3. Остатки водорослей в вытянутых (1), округлых (2) и округло-вытянутых (3) нишах.

Фиг. 4. Концентрическая структура, возникшая в плотно заполненных водорослями отверстиях.

Фиг. 5, 6. Химический состав остатков водорослей в строматолитах ОС (5) и ОПС (6).

Фиг. 7. Округлые образования в нише, межводорослевое пространство заполнено карбонатным осадком.

Фиг. 7₁. Поперечный разрез остатка водоросли, фрагмент фиг. 7.

Фиг. 7₂, 7₃. Концентрическое строение округлых образований в нишах, в которых чередуются карбонатный и органический материал, фрагменты фиг. 7.

Таблица III

Остатки цианобактерий, следы их жизнедеятельности и биогенные ультрамикроструктуры из ОС, нижний протерозой, ятулийский надгоризонт, туломозерская свита

Фиг. 1–6. Остатки колоний коккоидных цианобактерий.

Фиг. 6₁. Шарик правильной формы, фрагмент фиг. 6.

Фиг. 7–9. Округлые отверстия биогенного происхождения.

Фиг. 10. Минерализованная нитевидная цианобактерия.

Фиг. 11. Биогенная структура, возникшая в результате окремнения нитевидной цианобактерии.

Фиг. 12. Конусовидное биогенное образование.

Таблица IV

Остатки цианобактерий, следы их жизнедеятельности и биогенные ультрамикроструктуры; нижний протерозой, ятулийский надгоризонт, туломозерская свита

(фиг. 2–5 заимствованы из экспериментальной работы, посвященной окремнению современных цианобактерий в кальдере Узон на Камчатке [Крылов, Тихомирова, 1988], на остальных – материал из ОС)

Фиг. 1. Биогенная структура в строматолите, возникшая в результате окремнения нитевидной цианобактерии.

Фиг. 2, 3. Современные кремневые бактериальные формы, первая стадия перекристаллизации в процессе окремнения.

Фиг. 4. Различные стадии окремнения бактерии: от живой нити (1) до полного замещения кремнеземом (6).

Фиг. 5. Последняя (шестая) стадия перекристаллизации в процессе окремнения современной нитевидной бактерии.

Фиг. 6, 7. Минерализованные бактериальные пленки.

Фиг. 6₁. Пучок минерализованных нитевидных цианобактерий, фрагмент фиг. 6.

Фиг. 8. Крупное округлое образование с повышенным содержанием углерода и железа.

Фиг. 9. Химический состав остатков железобактерий.

Фиг. 10, 11. Колония железобактерий.

Фиг. 11₁, 11₃, 11₅. Пучок нитевидных образований, фрагмент колонии железобактерий.

Фиг. 11₂. Шарик правильной формы.

Фиг. 11₄. Бактериальная биопленка.

Possible role of microorganisms in the formation of structural and textural features of stromatolites

T.V. Litvinova

Geological Institute of RAS, Pyzhevsky per. 7, 119017 Moscow, Russia

Microstructures of stromatolites of genus *Sundia* from the Lower Proterozoic deposits of Karelia were investigated using SEM. Along with well-known, wide-spread biogenic ultramicrostructures, remains of quite large (up to 200×18 μm) algae have been revealed. These algae have not been observed before in stromatolites of different geographic confinedness and ages, including those from the Lower Proterozoic of Karelia. The role of these and other microorganisms in formation of the described stromatolite buildups is analysed.

