

УДК 561 (232)

ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ИЗВЕСТКОВЫХ ВОДОРОСЛЕЙ ПРИ ПЕРЕХОДЕ К ФАНЕРОЗОЙСКОЙ БИОСФЕРЕ

© 2014 В.А. Лучинина, А.А. Терлеев

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН
LuchininaVA@ipgg.sbras.ru

В статье рассматриваются особенности минерализации венд-раннепалеозойских водорослей, сохранившихся в нескольких вариациях: кремненными, органостенными, обызвествленными, иногда частично фосфатизированными. На этом фоне преобладали обызвествленные формы отделов Chlorophyta и Rhodophyta. Известковые водоросли дважды подвергались минерализации, если первичная структура была прижизненной, то второе карбонатное покрытие образовывалось благодаря осаждению кальция на отмершие талломы с помощью бактериально-цианобактериальных ассоциаций, выполняющих роль катализаторов. В случае нахождения мест fossilизации водорослей вблизи рудных месторождений, их пористая карбонатная оболочка могла изменить цвет в зависимости от химических элементов, преобладающих в растворе.

ВВЕДЕНИЕ

Статья написана с целью, во-первых, отразить особенность минерализации известковых водорослей – основных продуцентов карбоната кальция, преобладавших в осадочных фациях на рубеже венда-кембрия. Во-вторых, оценить очевидные диагенетические изменения fossilизированного биогенного материала с помощью знаний о первичной природе обызвествленных водорослей.

Начиная с позднего рифея и на протяжении венда – кембрия лишь очень немногие водоросли разработали процесс прижизненного обызвествления и это были представители отделов Chlorophyta и Rhodophyta. При этом карбонат, производимый Chlorophyta откладывался на поверхности слоевищ,

в то время как у Rhodophyta кальцификация происходила на уровне клеточных мембран (Taylor et al., 2009; Cuif et al., 2011).-

Изначально и до настоящего времени, если допустить, что современные и ископаемые формы строили скелет по одному принципу, то у Chlorophyta таллом, практически, всегда был арагонитовым, в то время как большинство форм Rhodophyta образовывали кальцит (исключение – современный род *Peysnella*, использующий арагонит). Но подтвердить это предположение на кембрийском материале пока невозможно из-за значительных диагенетических изменений первичного карбоната, уничтоживших почти все морфологические элементы водорослей, что отразилось на многочисленных разногласиях среди специалистов по поводу установления природы известковых водорослей (Riding, 1990; 2001; Pratt, 1984, 1995; Pratt et al., 2001).

Мы придерживаемся той систематики бентосной венд-кембрийской известковой альгофлоры, которая была принята и обоснована нами в серии ранее опубликованных работ (Терлеев, Лучинина, 2000; Лучинина, 2009).

ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ДРЕВНИХ ИЗВЕСТКОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ

Некоторые особенности минерализации известковых водорослей рассматривались нами на примерах наиболее типичных представителей венд-кембрийских родов, таких как *Proaulopora*, *Epiphyton*, *Renalcis*, а также ордовикской сифонеи с редко встречающейся уникальной сохранностью сифонов внутри таллома.

Отдел Chlorophyta. Зеленые водоросли

Одним из древнейших представителей зеленых известковых водорослей, несмотря на малое количество доказательств, большинством исследователей признавался род *Proaulopora*, впервые описанный в рукописном отчете А.Г. Вологдиным в 1934 г. из нижнего кембрия Западного Саяна. Впоследствии материал был опубликован в 1962 г. (Вологдин, 1962). Но ранее П.С. Краснопеева (1937), прочитавшая отчет Вологодина и обнаружившая род *Proaulopora* в нижнем кембрии Хакасии, признала приоритет Вологодина и описала род под его авторством с типовым видом *P. rarissima* Vologdin, 1937.

Что касается установления систематического положения рода, то Вологдин поместил его с некоторым сомнением в семейство Dasycladaceae (?). Не менее именитый палеоальголог В.П. Маслов, не вдаваясь в объяснения, описал этот же род из нижнего кембрия р. Лены, но под новым названием *Palaeonites* (Маслов, 1956), указав, что он похож на сифонеи, но также поставил знак вопроса. В последующих работах систематика рода продолжала оставаться дискуссионной (Кордэ, 1957, 1973; Лучинина, 1971 и др.) и до настоящего времени не найдены достоверные доказательства принадлежности рода к сифоновым водорослям несмотря на то, что фрагменты кембрийских *Proaulopora* сохранялись лучше по сравнению с остатками

других известковых водорослей – таллом был четко очерчен, хорошо выражены контуры двуслойной оболочки с тончайшими элементами «воротничков» или «члеников», но при этом исчезала система внутренних сифонов (табл. I, фиг. 7–11, 13), основного диагностического признака сифоновых водорослей, что и повлияло на дискусионность в понимании природы рода.

Похожими формами, судя по фотографиям, можно было бы считать представителей рода *Aeolisaccus* Elliot из верхнего мела острова Андрос, относимые к цианобактериям (Barattolo, 1990), а также род *Decastronema*, выделенный С. Голубичем с соавторами (Golubic, Radojicic, Lee Seong-Joo, 2006) из мела Сербии и Черногории и сопоставленный ими с современными представителями рода *Scytonema* (цианобактерии) из межприливных участков острова Андрос.

Подобные противоречия, возможно, объясняются морфологическим параллелизмом в развитии различных таксономических групп. Нередко отдельные типы структур вегетативного тела водорослей бывают схожи у представителей нескольких отделов.

Что касается стратиграфического диапазона местонахождений рода *Proaulopora*, то он зафиксирован от верхнего рифея до ордовика включительно, при этом, помимо известковых талломов, были обнаружены органостенные, а также минерализованные формы в кремнях (Пятилетов и др., 1981). Добавился также частично фосфатизированный материал, выделенный в результате растворения в уксусной кислоте (табл. I, фиг. 13).

Примером уникальной минерализации зеленых водорослей является ордовикская обызвествленная сифония (табл. I, фиг. 12) с редкой сохранностью внутри таллома сифона первого порядка, от которого отходят более мелкие сифоны второго порядка, что обычно исчезает в процессе фоссилизации. Подобная сохранность объясняется частичным окремнением морфологических элементов. Образец был отобран О.Д. Суетенко, в юго-западной части Монголии в баянлэгской структурной зоне, расположенной севернее Джинсэтинского хребта в Гобийском Алтае. Монголии. Верхний ордовик установлен на основании комплексов строматопорат, мшанок и ругоз (Ulitina et al., 1976).

Отдел Rhodophyta. Красные водоросли

Классическим примером венд-кембрийских красных известковых водорослей являются представители родов *Epiphyton* и *Renalcis*, без которых не формировалась ни одна органогенная постройка того времени. Систематика этих водорослей не менее противоречива, чем у зеленых. Наши представления о ней изложены в серии публикаций (Терлеев, Лучинина, 2000; Терлеев, Лучинина, 2006; Luchinina, Terleev, 2003, 2008; Лучинина, 2009, 2013).

В отличие от современных известковых талломов Chlorophyceae, с трубчатыми неклеточными сифонами и структурами, обызвествленными в области внешних плазмемных мембран, талломы класса Rhodophyceae сложены клетками. Обызвествление происходило на внешней плазмемной мембране между двумя соседними клетками. Впоследствии, клетки погиба-

ли и больше не выполняли вспомогательную роль для жизни поверхностного слоя. Те же процессы прослеживались и у древних представителей рода *Epiphyton*, у которых в большинстве случаев сохранялся лишь многоосевой кустистый таллом и из-за недостатков других морфологических признаков природа самого распространенного кембрийского рода оставалась невыясненной, пока не были обнаружены экземпляры с уникальной сохранностью клеток, спорангиев, а также плазмодесм и нематетий, позволившие нам уверенно рассматривать род в составе отдела Rhodophyta. Плохая сохранность элементов морфологии у *Epiphyton* объяснялась тем, что его представители подвергались обызвествлению дважды: сначала выделение карбоната кальция самой водорослью происходило прижизненно внутриклеточно, как это случается у современных красных водорослей, например, у *Corallina*, а после отмирания организма поверхность талломов заселялась бактериально-цианобактериальными ассоциациями, активно осаждавшими карбонат кальция, образуя, таким образом, известковый чехол, полностью скрывающий и уничтожавший первичную структуру при жизни обызвествлявшейся водоросли (Лучинина, Тихомирова, 1988).

Не менее красноречивые примеры изменчивости известковых водорослей в процессе минерализации можно привести из биогермов нижнего кембрия Южного Тянь-Шаня, в северных предгорьях Туркестанского хребта где в мощной осадочно-эффузивной толще встречены многочисленные представители *Renalcis* и *Epiphyton*, отличающиеся по своему облику от типичных представителей этих родов (табл. I, фиг. 1–3; табл. II, фиг. 1–5) (Журавлева, Репина, Яскович и др., 1970).

В добавлении к этому, пористый вторичный чехол как у *Epiphyton*, так и у *Renalcis* нередко пропитывался растворами, содержащими различные микроэлементы, из-за чего талломы одних и тех же водорослей обретали разную окраску (табл. II, фиг. 6). Так, например, первичная карбонатная оболочка водорослей, обитавших вблизи рудообразующих систем Кызыл-Ташского колчеданного месторождения, подвергалась активному воздействию гидротермальных растворов и меняла цвет из-за включения, например, железа (Терлеев и др., 2013). Подобное явление отмечено и в монографии Э.Л. Школьника с соавторами (Школьник, Жегалло, Батурин и др., 2012) на примере рода *Epiphyton* с черной известковой оболочкой, изменившей цвет под влиянием марганцевых растворов в Усинском рудном месторождении (Кемеровская область) в рудовмещающих породах нижнего кембрия.

И, наконец, небольшое замечание касается так называемой «водоросли» *Nuia* на примере экземпляра из нижнего кембрия Дальнего Востока (Беляева и др., 1975) (табл. I, фиг. 4). В последнее время подобное образование палеоальгологи не идентифицируют с водорослями, а считают объектом, возникшим в результате специфической фоссилизации различных органических фрагментов, в том числе и водорослевых.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В начале фанерозоя среди массы водорослей лишь немногие формы работали известковую биоминерализацию и это были только представители отделов *Chlorophyta* и *Rhodophyta*. Они минерализовались по-разному: кальцификация представителей семейства *Chlorophyceae* происходила, главным образом, на поверхности слоевищ и между сифонами, уменьшаясь от периферии к центру, в то время как формы семейства *Rhodophyceae* обызвествлялись внутриклеточно на уровне клеточных мембран. Органо-минеральные взаимодействия в процессе осаждения кальцита в стенках красных водорослей в основном аналогичны процессам, наблюдаемым у кораллов и моллюсков.

Биоминерализация известковых водорослей на изученном рубеже происходила дважды в связи с тем, что бактерии и цианобактерии использовали их отмершие талломы в качестве готового питательного субстрата и, в результате метаболической деятельности активизировали процессы осаждения карбоната кальция, образуя второй известковый чехол вокруг прижизненно-обызвествленного таллома. В случае обитания водорослей вблизи тектонически активных структур, а также рудообразующих месторождений бактерии и цианобактерии осаждали из гидротермальных перенасыщенных растворов железо, марганец, фосфор и другие элементы.

Помимо карбонатной минерализации, в кембрийском периоде наблюдалась и окремненная альгофлора, но ее количество несравненно меньше по сравнению с рифейской. Описаны случаи разной минерализации представителей одного рода, например, *Proaulopora*, сохранившаяся с обызвествленными, окремненными и органостенными талломами.

Возможно, детализация особенностей минерализации венд-кембрийских известковых водорослей частично будет способствовать устранению некоторых неопределенностей в их систематике, если принять во внимание то, что аналогичный процесс у современных красных представителей почти исключительно кальцитовый, а у зеленых – арагонитовый.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 13-05-01107 и 13-05-00334), программы Проблемы происхождения жизни и становления биосферы (проект 28.1) и проекта НИР 23.4 (Стратиграфия фанерозоя арктических территорий и акваторий России как основа для проектирования и проведения геологоразведочных работ в Северном Ледовитом Океане).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вологдин А.Г. 1962. Древнейшие водоросли СССР. М.: Изд-во АН СССР. 655 с.
- Беляева Г.В., Лучинина В.А., Назаров Б.Б. и др. 1975. Кембрийская фауна и флора хребта Джагды (Дальний Восток). М.: Наука. 207 с.
- Журавлёва И.Т., Ретина Л.Н., Яскович Б.В. и др. 1970. К познанию раннего кембрия Южного Тянь-Шаня. Ташкент: ФАН. 52 с.

- Краснопеева П.С. 1937. Водоросли и археоциаты древнейших толщ Потехинского планшета Хакассии // Мат-лы по геологии Красноярского края. Томск: Изд-во Зап.-Сиб. геол. треста. С. 1–51.
- Кордэ К.Б. 1957. Новые представители сифонниковых водорослей // Мат-лы к Основам палеонтологии. Вып. 1. М. С. 67–74.
- Кордэ К.Б. 1973. Водоросли кембрия. М.: Наука. 349 с.
- Лучинина В.А. 1971. К систематике рода *Proaulopora* Vologdin // Водоросли палеозоя и мезозоя Сибири. М.: Наука. С. 5–8.
- Лучинина В.А. 2009. *Renalcis* и *Epiphyton* – различные формы единого жизненного цикла известковых водорослей // Палеонтол. журн. № 4. С. 101–105.
- Лучинина В.А. 2011. Палеоальгология при переходе от циано-бактериальной (строматолитовой) к водорослевой экосистеме на примере кембрийских отложений Сибирской платформы / Ред.: С.В. Рожнов, Г.А. Заварзин. Рифогенные формации и рифы в эволюции биосферы. М.: ПИН РАН. С. 26–37.
- Лучинина В.А. 2013. Кембрийская альгофлора – ассоциация различных групп микроорганизмов // Палеонтол. журн. Т. 47. № 9. С. 1–8.
- Лучинина В.А., Тихомирова Н.С. 1988. О новой форме сохранности раннекембрийских водорослей и их ультраструктуре / Ред.: В.Н. Дубатовол, Т.А. Москаленко. Новосибирск: Наука. С. 12–14.
- Маслов В.П. 1956. Ископаемые известковые водоросли СССР. М.: Изд-во АН СССР. 301 с.
- Пятилетов В.Г., Лучинина В.А., Шенфиль В.Ю., Якишин М.С. 1981. Новые данные о древних водорослях Сибири // Докл. АН СССР. Т. 261. № 4. С. 982–983.
- Терлеев А.А., Лучинина В.А. 2000. Новые факты по установлению природы рода *Epiphyton* Bornemann, 1886 // Новости палеонтологии и стратиграфии. Вып. 2–3. С. 173–177.
- Терлеев А.А., Лучинина В.А. 2006. Новые морфологические элементы у рода *Epiphyton* Bornemann, 1886 // Эволюция биосферы и биоразнообразия. М.: КМК. Р. 147–151.
- Терлеев А.А., Токарев Д.А., Лучинина В.А. и др. 2013. Цианобактерии, водоросли в базальтах и железисто-кремнистых отложениях тумат-тайгинской свиты нижнего кембрия Кузыл-Таштыгского рудного месторождения (Восточная Тува) // Водоросли в эволюции биосферы. Мат-лы I палеоальгологической конф. М.: ПИН РАН. С. 141–143.
- Школьник Э.Л., Жегалло Е.А., Батурич Г.Н. и др. 2012. Исследование марганцевой, железомарганцевой минерализации разных природных обстановок методами сканирующей электронной микроскопии. М.: Эслан. 472 с.
- Barattolo F. 1990. Mesozoic and Cenozoic marine benthic calcareous algae with particular regard to Mesozoic dasycladaleans // *Calcareous algae and Stromatolites*. Springer-Verlag. P. 504–540.
- Cuif J.-P., Dauphin Y., Sorauf J.E. 2011. *Biominerals and fossils through time*. Univ. press. Cambridge. 480 p.
- Golubic S., Radojic R., Lee Seong-Joo. 2006. *Decastronema kotori* gen.nov.: comb. nov., a mat-forming cyanobacterium on Cretaceous carbonate platforms and its modern counterparts // *Carners de Geologie/Notebooks on Geology*. Art. 2006/02. P. 1–17.
- Luchinina V.A., Terleev A.A. 2003. Peculiarities in the development of Early Cambrian calcareous algae on the Siberian platform // *Acta micropalaeontol. Sin.* V. 20. № 1. P. 31–38.

- Luchinina V.A., Terleev A.A.* 2008. The morphology of the genus *Epiphyton* Bornemann // *Geologia Croatica*. V. 61. № 2–3. P. 105–111.
- Pratt B.R.* 1984. *Epiphyton* and *Renalcis* – diagenetic microfossils from calcification of coccoid blue-green algae // *J. sediment. petrol.* V. 54. № 3. P. 0948–0971.
- Pratt B.R.* 1995. The origin biota and evolution of deep-water mounds // *Carbonate mud mounds; their origin and evolution* // Intern. Assoc. of Sedimentologists, Spec. publ. V. 23. Blackwell Sci., Oxford. P. 49–123.
- Pratt B.R., Spincer B.R., Wood R.A., Zhuravlev A.Yu.* 2001. Ecology and evolution of Cambrian Reefs // *The Ecology of the Cambrian Radiation*. Columbia univ. press. N-Y. P. 254–274.
- Riding R.* 1990. Calcified Cyanobacteria / Ed. R. Riding. *Calcareous Algae and Stromatolites*. Springer-Verlag. P. 55–87.
- Riding R.* 2001. Calcified Algae and Bacteria / Eds A.Yu. Zhuravlev, R. Riding. *The Ecology of the Cambrian Radiation*. Columbia univ. press. N-Y. P. 445–473.
- Taylor T.N., Taylor E.L., Krings M.* 2009. *Paleobotany. The Biology and Evolution of Fossil Plants*. Acad. press is an imprint of Elsevier. 1253 p.
- Ulitina L.M., Bolshakova L.N., Kopaevich G.V.* 1976. Peculiarities of distribution Stromatoporates, Corals and Bryozoa in the Paleozoic section of Djinsetin mountain ridge (Goby Altay) / *Palaeontology and stratigraphy of Mongolia*. Transactions. V. 3. Moscow, Nauka. P. 327–340.

Объяснение фототаблицы 1

Фиг. 1. *Renalcis gelatinosus* Korde, 1961, × 100; черная контрастная обочка оконтуривает светлую центральную часть колонии, обычно окрашенную в серый цвет; Южный Тянь-Шань, Туркестанский хребет, р. Арглы; верхняя часть нижнего кембрия.

Фиг. 2. *Renalcis* sp., × 50; слившиеся колонии имеют псевдоветвистую форму; Южный Тянь-Шань, Туркестанский хребет, р. Арглы; верхняя часть нижнего кембрия.

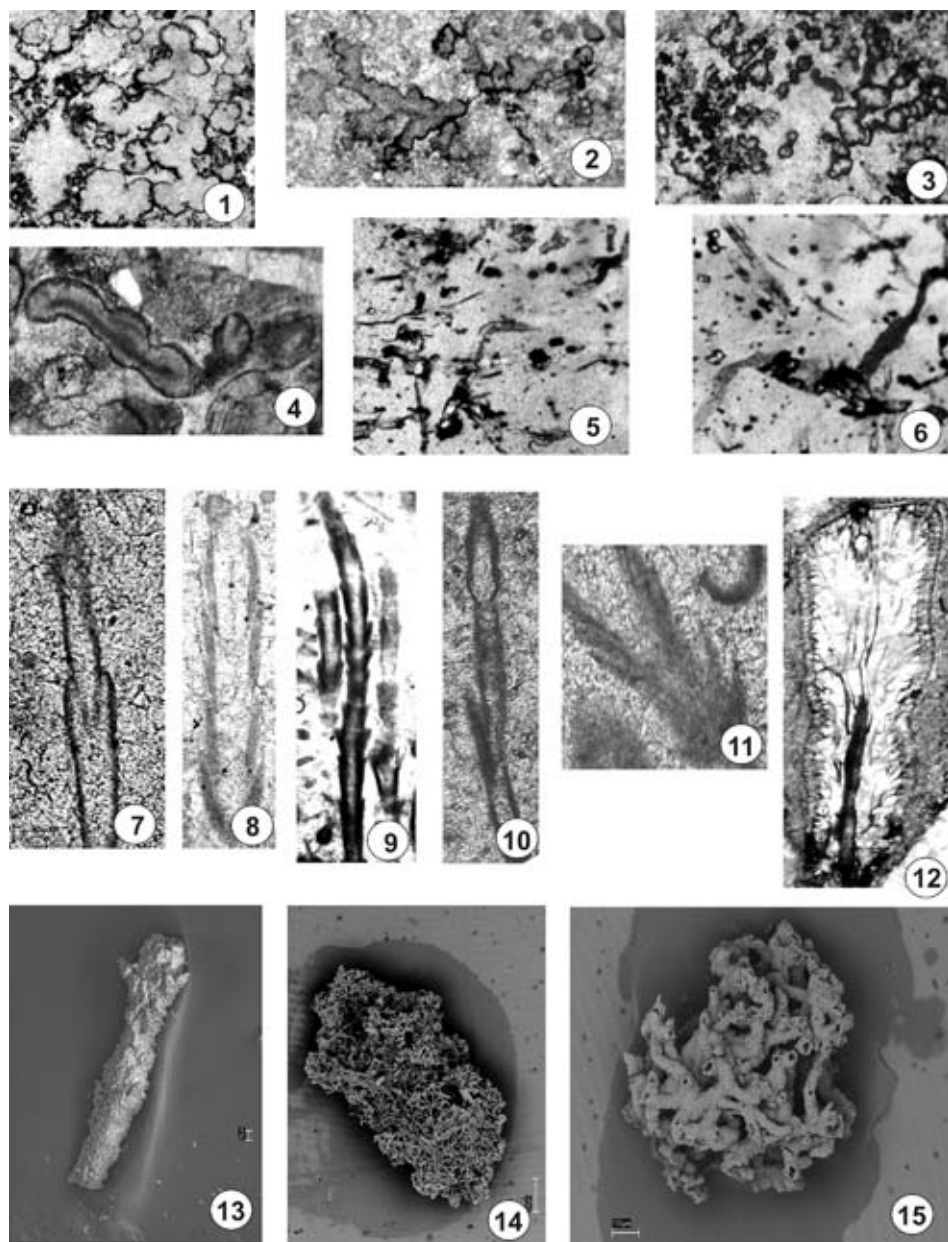
Фиг. 3. *Renalcis pectunculus* Korde, 1961, × 50; Южный Тянь-Шань, Туркестанский хребет, р. Арглы; верхняя часть нижнего кембрий.

Фиг. 4. *Nuia* Maslov, 1954, раскристаллизация осадка вокруг фрагмента известковой водоросли *Girvanella* sp., × 60; Дальний Восток, хребет Джагды; нижний кембрий, шевлинская зона.

Фиг. 5, 6. Окремненные нитчатые водоросли, × 60; Центральный Казахстан, Тектурмасский антиклинорий; средний ордовик.

Фиг. 7–11. *Proaulopora rarissima* Vologdin 1937, фиг. 7, 8 – × 100, фиг. 9, 10 – × 50, фиг. 11 – × 200; Восточный Саян, бассейны рр. Колба и Жержул; нижний кембрий.

Фиг. 12. Сифонозная водоросль, × 20; окремненный центральный сифон и отходящие от него сифоны более мелких порядков; Монголия, Гобийский Алтай; средний ордовик, баянлэгская структурная зона.



Фиг. 13–15. Частично фосфатизированные фрагменты известковых водорослей после растворения: фиг. 13 – *Proaulopora* sp., $\times 100$; фиг. 14 – *Girvanella* (?) sp., $\times 40$; фиг. 15 – *Girvanella* sp., $\times 60$; Сибирская платформа, Туруханский р-н; нижний кембрий.

Объяснение фототаблицы II

Фиг. 1–5. *Epiphyton fruticosum* Vologdin, 1932, × 30; колонии, объединяющие мелкие кустистые талломы; по краям колонии контрастно окрашены темным веществом, в то время как веточки талломов имеют не характерный для водоросли светлый цвет в результате выщелачивания первичной серой окраски карбонатного чехла; Южный Тянь-Шань, Туркестанский хребет, р. Арглы; верхняя часть нижнего кембрия.

Фиг. 6. *Epiphyton scapulum* Korde, 1961, × 30; таллом пигментирован углисто-графитистым веществом, обусловившим темную окраску; Южный Тянь-Шань, Туркестанский хребет, р. Арглы; верхняя часть нижнего кембрия.

Фиг. 7–8. *Epiphyton* sp., частично фосфатизированный и выделенный растворением в уксусной кислоте, × 200; темные отверстия – полости, в которых располагались «веточки» кустистого таллома, окруженные бактериально-цианобактериальной карбонатной массой; фиг. 8 – в продольном срезе зафиксирована толщина вторичного известкового покрытия, осажденного бактериально-цианобактериальными ассоциациями; Алтае-Саянская область, Кузнецкий Алатау, р. Кия.

Фиг. 9. *Epiphyton* sp., × 20; туфовая, частично пиритизированная карбонатная масса вокруг известковых талломов *Epiphyton*, от которых остались лишь темные полости после растворения первичных известковых образований; Сибирская платформа, Туруханский р-н; нижний кембрий.

FEATURES MINERALIZATION OF CALCAREOUS ALGAE IN TRANSITION TO PHANEROZOIC BIOSPHERE

V.A. Luchinina, A.A. Terleev

In the article discusses the features of mineralization Vendian - Early Paleozoic algae preserved in different variations :silicified , with organic walls , calcified , sometimes partially phosphatized. Among them were dominated calcareous forms of Divisions Chlorophyta and Rhodophyta. Calcareous algae exposed mineralization twice and if the primary structure was lifetime , the second carbonate cover was formed due to the deposition of calcium on the dead thallus with using bacterial-cyanobacterial associations, acting as catalyts. In the case of finding the locations fossilization of algae near ore bodies, their porous carbonate cover was able to change color depending on the chemical elements prevailing in solution.

Таблица II

