

Жизнь и смерть планеты Земля



Рассказано, как и когда возникла планета Земля и её биосфера, рассмотрены основные этапы эволюции жизни на Земле, почему появилась человеческая цивилизация и почему она неизбежно погибнет, как будет развиваться жизнь на Земле после человека, чем она закончится, а также о том, что ждёт нашу планету и само Солнце.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: происхождение Солнечной системы, Земли и Луны, эволюции жизни на Земле

Проф. В.В. МАЛАХОВ
vmalachov@inbox.ru,
биофак МГУ
им. М.В. Ломоносова,
г. Москва

От межзвёздной пыли до первых органических тел

Если мы посмотрим на звёздное небо в телескоп хотя бы со средним увеличением, то увидим не только отдельные звёзды, но и туманности, среди них – очень красивые, спиральные (слайд 2). В 20-е гг. прошлого столетия выдающийся астроном Эдвин Хаббл (слайд 3) доказал, что спиральные туманности – это гигантские звёздные острова, состоящие из сотен миллиардов звёзд (слайды 4–6). К их числу относится и наша Галактика – Млечный Путь (слайд 7). Наиболее крупные из них имеют центральное ядро с чёрной дырой в центре, масса которой примерно 1% массы всех звёзд галактики (масса чёрной дыры $1 \cdot 10^6$ масс Солнца). Между спиральными рукавами звёзды располагаются редко и почти не взаимодействуют друг с другом (слайд 8). Например, в области, где находится наше Солнце, звёзды удалены друг от друга примерно на 4 св. года (их можно сравнить с пылинками в зрительном зале Большого театра). Вокруг таких звёзд могут в течение многих миллиардов лет существовать планетные системы.

Наше Солнце – звезда, скорее всего, третьего поколения. Звёзды первого поколения образовались вскоре после Большого Взрыва. Состояли они, в основном, из водорода и гелия. Звезда светит, потому что в её центре из-за действия гравитационных сил создаётся большое давление и высокая температура. Когда температура превысит 15 млн градусов, начинается ядерная реакция с образованием одного ядра гелия из четырёх



Скопление галактик

Печатается по докладу на Всероссийском Фестивале науки (см. запись прямой трансляции из Шуваловского корпуса МГУ 14.10.2012, начало в 14 ч 37 мин 30 с URL: <http://www.festivalnauki.ru/video/13496>), г. Москва. Презентация представлена на диске. См. также видеолекцию http://polit.ru/article/2012/05/09/anons_malakhov/ – Ред.



Туманность Андромеды

Спиральные галактики и наша Галактика Млечный путь



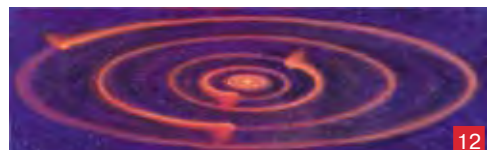
Газо-пылевая Туманность Ориона



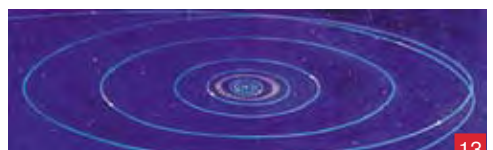
Протозвёздная туманность



Протозвёздный диск



Протопланетный диск, спустя 20 млн лет



Солнечная система, спустя ещё 120 млн лет



14
 Две группы планет Солнечной системы: внутренние (каменные, планеты земной группы – Меркурий, Венера, Земля, Марс) и внешние (газовые гиганты – Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун)



15
 Плотность планет Солнечной системы, г/см³



18
 Протолуна – естественный спутник Земли, в древности она была в 22 раза ближе к ней, а земные сутки составляли всего 6 ч



19
 Космическая катастрофа – мегаимпакт

атомов водорода, а энергия, связанная с дефектом массы (~0,75%), уносится в виде излучения. Когда звёздное горючее кончается, центральная часть звезды начинает сжиматься, температура повышается до десятков миллионов градусов. В этот период идёт синтез более тяжёлых элементов – кислорода, алюминия, кремния, железа, температура повышается до сотен миллионов градусов. Синтез элементов тяжелее железа, например, урана, происходит, когда звезда взрывается (*вспыхивает сверхновая*). Во время взрыва её периферические оболочки сбрасываются и рассеиваются в пространстве. На «могиле» погибшей звезды образуется туманность, обогащённая тяжёлыми элементами, которая служит для образования звёзд второго и третьего поколений (*слайд 9*). Взрыв порождает волны плотности, которые способствуют образованию флуктуаций плотности (*слайд 10*) – зародышей гравитационного стягивания и формирования звёзд следующего поколения, уже содержащих тяжёлые элементы (*слайд 11*).

Примерно 4,6 млрд лет назад (*слайд 12*) в окрестностях Солнца вспыхнули две сверхновые, и образовалась протозвёздная туманность, в которой через 10 млн лет зажглось наше Солнце, ещё через 10 млн лет из остатков вещества протозвёздной туманности сформировался плоский протопланетный диск, а спустя следующие 100 млн лет – наша Солнечная система (*слайд 13*). Звёзды живут долго, большинство – миллиарды лет (чем массивнее звезда, тем меньше срок её жизни), поэтому мы не часто наблюдаем формирующиеся звёзды. Тем не менее, их наблюдают, в качестве примера можно привести Т Тельца.

Молодые звёзды характеризуются вспышками, выбросами энергичных корпускул (звёздный ветер), вихревыми магнитными полями, что приводит к сегрегации вещества протозвёздного диска: чем меньше атомная масса элемента в данном объёме, тем дальше от центра оно отодвигается. В результате вблизи звезды остаются наиболее тяжёлые элементы (алюминий, кремний, железо и ещё более тяжёлые), а лёгкие (водород, азот, кислород, другие газы) относятся на периферию. Поэтому в планетной системе выделяются две группы планет (*слайды 14, 15*): близкая к Солнцу (состоит из тяжёлых, каменных планет, плотностью (3,3...5,5) т/м³) и далёкая (большие газовые планеты, плотностью (0,7...1,6) т/м³). У Сатурна, например, плотность меньше 1 т/м³, то есть он бы плавал в чашке с водой (если таковую удалось бы смастерить). Вода – тоже лёгкий элемент, она состоит из водорода и кислорода, и в составе каменных планет воды очень мало. В Солнечной системе вода отодвинута далеко, в кометное облако. Кометы в основном и состоят из льда, принося его время от времени на Землю.

Планеты формируются в результате аккреции – выпадения вещества на планету вследствие гравитационного взаимодействия. Изначально Земля была холодной (–6–8 °С), тектонически мёртвой планетой. То тепло, которое выделялось при столкновениях комков вещества, обладающих космическими скоростями, и ядерного распада составляющих их элементов, рассеивалось в космосе (*слайд 16*). Но Земля уникальна – из планет земной группы только у неё есть такой гигантский спутник (*слайд 17*). По существу, система Земля–Луна это двойная планета. По поводу происхождения Луны есть несколько основных гипотез. По Ушакову и Сорохтину [1], Луна формировалась в близком к Земле районе Солнечной системы и была захвачена Землёй (*слайд 18*). Сначала её орбита была сильно вытянута, но постепенно приблизи-

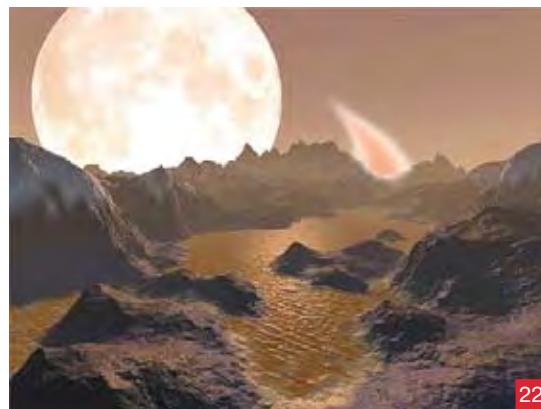
лась к почти круговой и, более того, оказалась близкой к пределу Роша (предел разрушения спутника, 17 000 км). Момент количества орбитального движения Луны был передан Земле и раскрутил её (длительность суток составляла ~6 ч).

Согласно другой гипотезе, Луна образовалась в результате столкновения Земли с массивным космическим телом вроде Марса (слайд 19), что привело к практическому полному её расплавлению на глубину 1,5–2 тыс. км и выбросу массы, из которой очень быстро, в течение примерно нескольких тысяч лет, сформировался наш естественный спутник (слайд 20). Сейчас теория происхождения Луны в результате мегаймпакта явно доминирует, хотя может оказаться, что мода на неё пройдёт. Возраст Земли определён совершенно точно – 4,54 млрд лет и долгое время считалось, что на Земле нет никаких пород возрастом более 4 млрд лет.

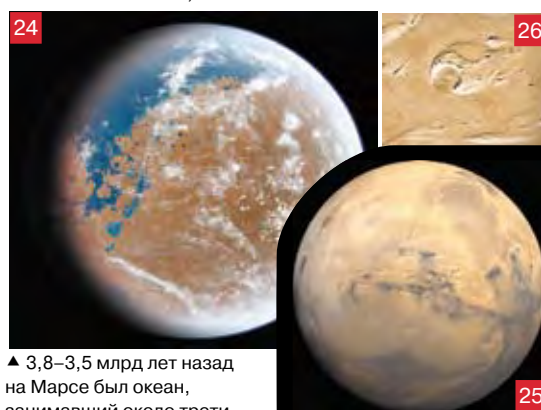
Однако ситуация изменилась, когда в Джек Хилл (Австралия) были обнаружены маленькие кристаллики очень твёрдого минерала циркона ($ZrSiO_4$) (слайд 21). Исследования изотопного состава показали, что эти кристаллы, во-первых, имеют очень большой возраст (4,2–4,4 млрд лет), а во-вторых, что они формировались в присутствии жидкой воды. Это означает, что если не мировой океан, то более или менее значительные водоёмы появились на Земле уже через 100 млн лет после её образования. Скорее всего, это были условия, несколько напоминающие русскую баню (слайд 22). Это высокая (100–200 °C) температура, большая влажность и высокое (несколько атмосфер) давление. Значит, что спустя первые сто миллионов лет после образования планеты на ней появились условия для протекания сложных химических реакций и возникновения жизни.

Независимо от того, каким образом Луна стала спутником нашей планеты, первые 500 млн лет она находилась очень близко к Земле и должна была вызывать на Земле очень сильные приливы, в том числе в тверди. Сейчас в экваториальной плоскости дважды в сутки почва поднимается и опускается на 30 см. А когда Луна находилась на расстоянии не 384 000 км, а 17 000 км, то высота приливной волны достигала 1,5 км. Другими словами, каждые 3–4 ч по нашей холодной каменной Земле прокатывалась огромная волна, подплавлявшая поверхность планеты. По теории Сорохтина–Ушакова именно энергия приливного воздействия Луны, добавлявшаяся к энергии гравитационного сжатия и радиоактивного разогрева, стимулировала тектоническую активность Земли (слайд 23).

Тектоническая активность, свидетельством которой на Земле являются кристаллики циркона, была и на других планетах. В результате извержений выделяются газы, главным образом углекислый газ

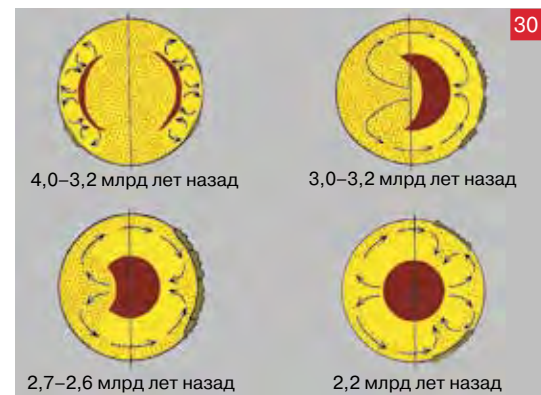


22 Так вероятно выглядела Земля в период последней интенсивной метеоритной бомбардировки (около 3,3 млрд лет назад). Обратите внимание на большие размеры Луны, которая в то время находилась к Земле значительно ближе, чем сейчас



24 ▲ 3,8–3,5 млрд лет назад на Марсе был океан, занимавший около трети поверхности планеты

25 ► Ныне Марс выглядит абсолютно сухой планетой. Вода на Марсе сохранилась в виде льда под поверхностью, при падении крупных метеоритов лёд плавится, следы потоков воды видны рядом с кратерами (на врезке) высвобождаемой при падении крупных метеоритов на поверхность Марса и в настоящее время

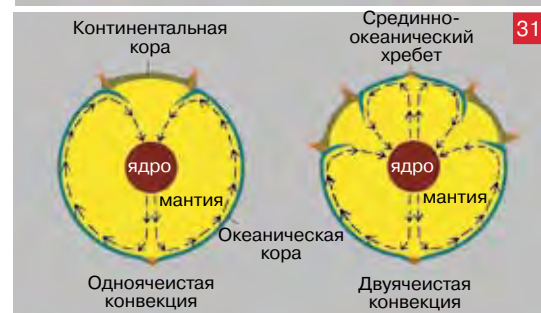


30 4,0–3,2 млрд лет назад

3,0–3,2 млрд лет назад

2,7–2,6 млрд лет назад

2,2 млрд лет назад



31 Континентальная кора

Срединно-океанический хребет

ядро

ядро

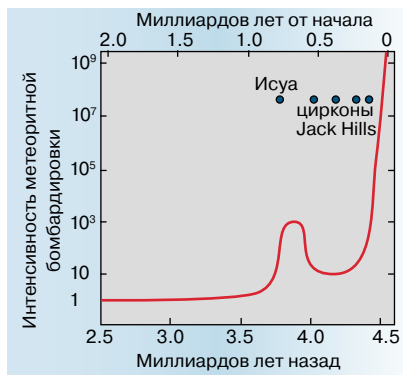
мантия

мантия

Океаническая кора

Одноячейстая конвекция

Двухячейстая конвекция



29

Развитие глобального конвективного процесса, ответственного за движение литосферных плит [1]

График, иллюстрирующий интенсивность метеоритной бомбардировки в первые 2 млрд лет существования Земли

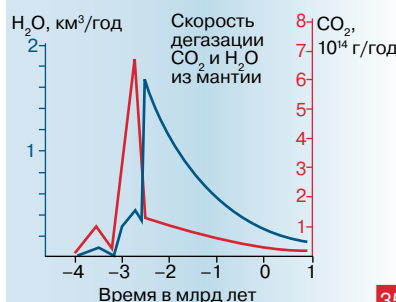
и водяной пар, которые формируют газовую и водную оболочки планеты. Так, на Марсе в первый миллиард лет его существования извергалось множество вулканов, выделялось много воды, давление атмосферы было больше теперешнего земного в 1,5 раза, и древний марсианский океан покрывал более трети поверхности (слайд 24). Там вполне могла существовать жизнь. Потом тектоническая активность Марса ослабела (он меньше Земли по массе почти на порядок), атмосфера не смогла удержаться, вода частично испарилась, частично застыла, и сейчас Марс выглядит безводной планетой (слайд 25). Если спустить марсианскую атмосферу до плотности земной, её толщина составит всего 10 см (по щиколотку). Тем не менее под поверхностью Марса осталась застывшая вода, которая вытекает потоками, когда падающие космические тела пробивают поверхностную корку и расплавляют лёд (слайд 26).

Поверхность планет земной группы испещрена кратерами (слайды 27, 28). 90% из них образовалось во время так называемой последней метеоритной бомбардировки 3,9 млрд лет назад, которая способствовала повышению тектонической активности планет, в том числе и Земли (слайд 29). В результате всех воздействий (включая приливное, гравитационное и радиоактивное) начался процесс сегрегации недр: они расплавились, тяжёлые компоненты (показаны коричневыми точками на слайде 30) опускались вниз, лёгкие (жёлтый фон) с конвективными потоками поднимались на поверхность (выплавились). Силикаты формировали мантию, а железо с примесью тяжёлых металлов (25% всего вещества) – ядро. Около 2,6 млрд лет назад этот процесс закончился, установился конвективный процесс, который определяет движение литосферных плит (с кошмарной скоростью: 20 см/год!), возникло заметное магнитное поле (в отличие от Марса, Меркурия, Венеры Луны). Это граница между археем и протерозоем.

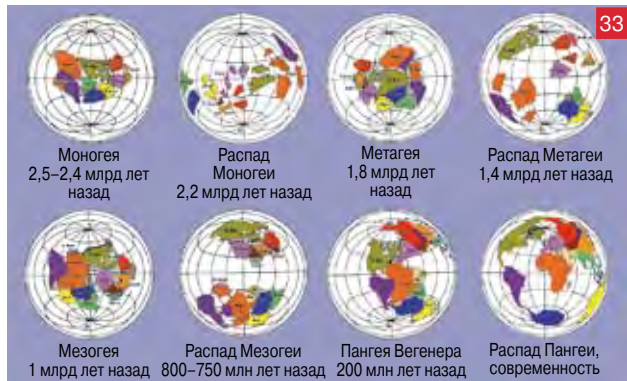
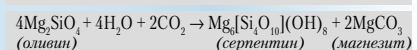
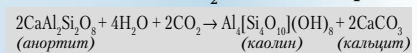
Различают плотностно-тепловую конвекцию двух типов (слайд 31): одноячейковую и двуячейковую. При одноячейковой конвекции материал опускается только на одном единственном полюсе, и поднимается только на другом, тоже единственном. Это означает, что существует только один гигантский материк (на верхнем рисунке – сверху) и один гигантский океан. При двуячейковой конвекции имеются две области погружения тяжёлого материала в ядро и две области выплавки лёгкого материала, соответственно формируются два больших океана и две группы материков. Мы живём в период двуячейковой конвекции, и в очень гру-



Границы литосферных плит на современной Земле



Связывание CO₂ в земной коре

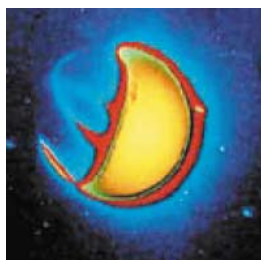


бом приближении у нас сейчас два больших океана – Тихий и Атлантический. Посредине Атлантического океана есть срединный Атлантический хребет, где лёгкий мантийный материал поднимается на поверхность, формируя тонкую океаническую кору, которая движется в обе стороны, погружаясь под материки и вызывая землетрясения, цунами, вулканическую деятельность. То же примерно происходит и в Тихом океане. В Атлантике эти скорости составляют 5–6 см/год, а в Тихом – 20–23 см/год. Поэтому по границам Тихого океана сильнее всего очаги природных катастроф (слайд 32). Если Японию трясёт каждые 20–30 лет, то Европу – каждые 200–300 лет.

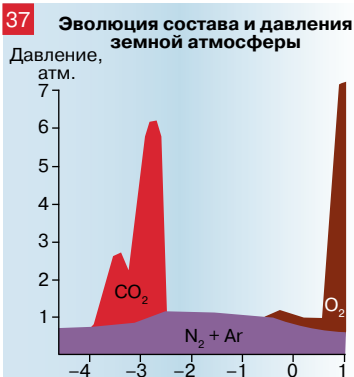
Смена типов конвекции происходила уже не раз (слайд 33). В результате одноячейковой конвекции 2,5 млрд лет назад образовался первый единый материк – Моногея. Затем в результате смены конвекции на двуячейковую он распался, новый единый материк сформировался в среднем протерозое (Метагея), а затем в позднем протерозое – Мезогея. Последний единый материк – Пангея Вегенера – возникла в фанерозое. Около 200 млн лет она распалась на современные группы материков, которые в будущем, через 600–800 млн лет образуют новую Пангею. Этот процесс не бесконечен. Когда примерно через 1,5 млрд лет все тяжёлые элементы опустятся в ядро и Земля потеряет внутреннее тепло, процесс конвекции затухнет.

Вместе с выплавкой силикатов происходило выделение газов из недр планеты (в основном, углекислого газа и паров воды, слайд 34, 35). Если бы весь углекислый газ, выделившийся из недр за 4,4 млрд лет, сохранился в атмосфере, то сейчас давление было бы около 500 атм., а температура – около 500 °С. К счастью для нас, в присутствии воды углекислый газ связывался с породами земной коры (слайд 36) с формированием глин, серпентинов и других горных пород. Поэтому атмосферное давление на Земле никогда не превышало 5–6 атм. (слайд 37), а приземная температура – 70 °С (слайд 38, сейчас – около 15 °С).

Воды на Земле очень мало. В соответствии с теорией Сорохтина–Ушакова вся она появилась в результате плавления базальтов (содержание воды ~0,05%). Если бы она оставалась в виде только жидкой воды, то уровень океанов был бы на 5 км выше нынешнего. Но, поднимаясь из недр



Астрофото Земли в УФ-лучах: отчётливо видно голубое облако улетучивающегося в космос водорода



через расплавленное железо, часть воды разлагается на оксид железа и водород ($H_2O + Fe \rightarrow FeO + H_2 \uparrow$), а часть, поднявшись на поверхность, диссоциирует под действием УФ-излучения ($H_2O + hv \rightarrow H_2 \uparrow + O \uparrow$) с образованием водорода (который не удерживается Землёй и улетает в космос) и кислорода (который сразу же реагирует с железом). На астрофото Земли в УФ-диапазоне хорошо заметен голубой водородный шлейф – это улетают в космос наши океаны.

Архейский океан (слайд 39) был горячим (в среднем, 55–60 °С) и кислым (из-за большой концентрации CO_2), то есть очень благоприятным для многих примитивных форм жизни, в том числе для археобактерий. Первые признаки жизни были обнаружены в древнейших породах с признаками осадочно-происхождения, найденных в Гренландии (формация Исуа, 3,8 млрд лет, слайды 40, 41). Они содержат прослойки углерода, образовавшегося, как показал изотопный анализ, в процессе фотосинтеза (хотя есть немало гипотез и небиогенного происхождения углерода из пород Исуа). Если считать, что тектоническая активность (а значит, и выделение паров воды) началась на Земле только 4 млрд лет назад, то первые осадочные породы, вода и жизнь появились на нашей планете уже через 200 млн лет после этого и практически одновременно. Вот почему так популярны идеи панспермии – о занесении жизни из космоса. Но если считать, что вода и другие условия, пригодные для зарождения жизни и на Земле и на других планетах земной группы, появились уже через 100 млн лет после формирования планеты, то этот промежуток увеличивается до 600 млн лет. Оформленные остатки живых организмов, сходные с современными бактериями, были найдены только в породах возрастом 3,5 млрд лет (формация Варравуна в Западной Австралии, слайд 42). Означает ли это, что первый миллиард лет жизнь существовала не в виде индивидуальных организмов, а в виде плёнок и непрерывных тяжёлых в породах горных пород? Поневолe вспоминается разумный океан из романа Станислава Лема. Вполне возможно, что так мог выглядеть мир РНК и РНК-белковый мир, ранний ДНК-вый мир. Эти вопросы сейчас активно обсуждаются в литературе. Возможно, что неклеточные организмы (вирусы, вирионы, плазмиды) представляют собой остатки того древнего мира неклеточной жизни.

Самые распространённые ископаемые архея и протерозоя – это строматолиты (слайды 43, 44). Геологи давно подозревали, что строматолиты – результат деятельности древних фотосинтетических организмов, близких к цианобактериям. Это предположение блестяще подтвердилось, когда были найдены современные строматолиты, совершенно идентичные архейским (слайды 45, 46). Они существуют на тропических мелководьях, там, где условия близки к архейским: вода сильно прогрета и содержит мало кислорода.

Литература

1. Сорохтин О.Г., Ушаков С.А. Развитие Земли. М: Изд-во МГУ, 2002. 506 с. <http://macroevolution.narod.ru/sorohotin.htm> (2 из 3) [30.12.2008 2:02:51]

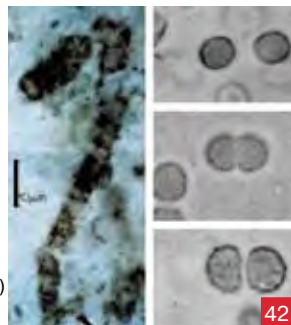
Продолжение следует



Горячий и кислый архейский океан



Породы формации Исуа (3,8 млрд лет), в которых обнаружен фотосинтетический углерод (вверху) и остатки прокариотных организмов формации Варравуна (3,5 млрд лет)



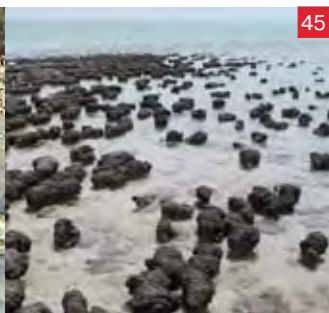
42



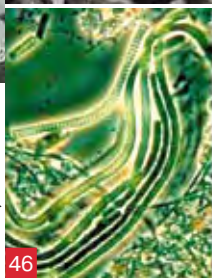
▲ Минерализованные остатки архейских строматолитов и современные строматолиты:

в заливе Шарк Бэй (Австралия) ▶

на Багамских островах ▶▶



45



46

