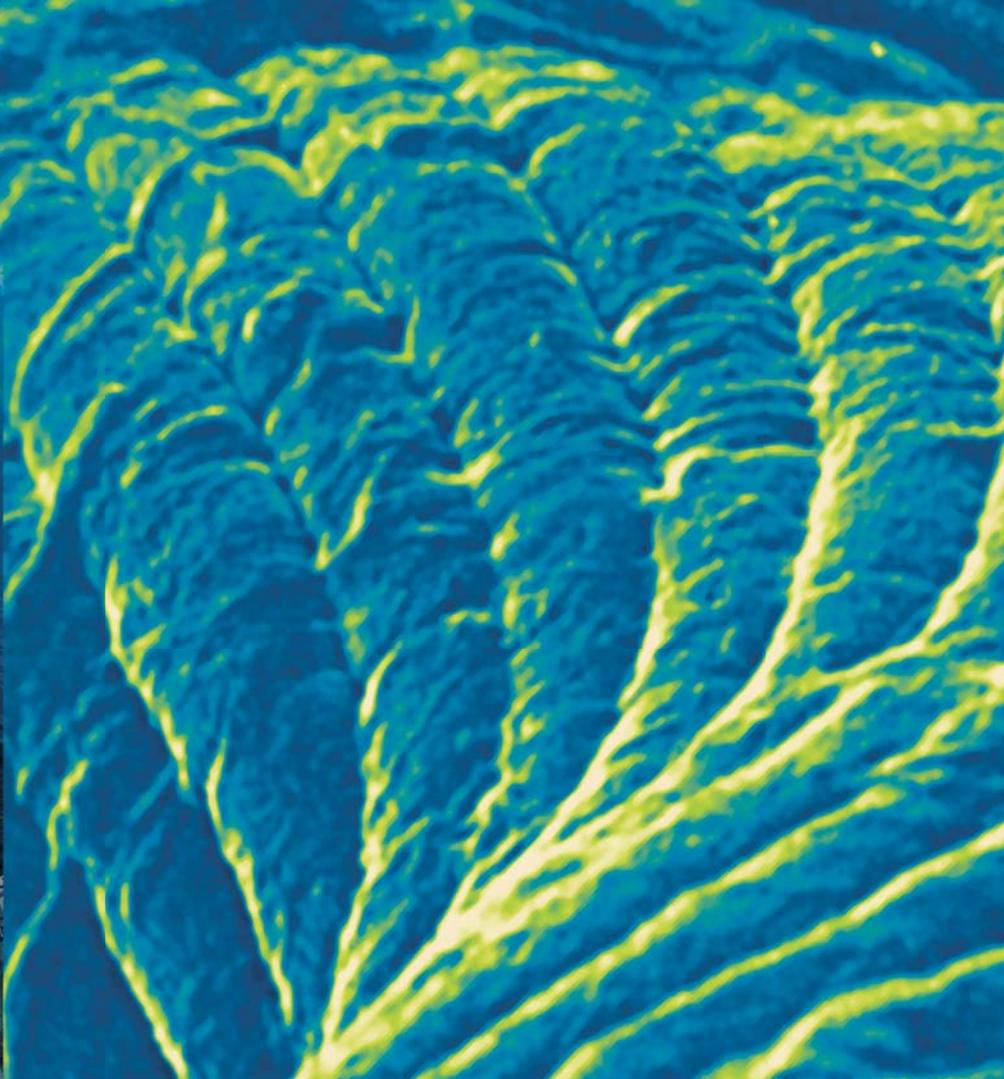


ПРОИСХОЖДЕНИЕ и ЭВОЛЮЦИЯ ЖИЗНИ НА ЗЕМЛЕ

Тема «Происхождение и эволюция жизни на Земле» поистине необъятна. В этом номере мы продолжаем разговор о главной тайне жизни. Читатели узнают об эволюции сообществ микробов — невидимых истинных «хозяев» планеты, и о созидательной роли геологических катастроф в становлении и развитии биосферы. Но тема остается открытой...



Рифейские бактериальные
строматолиты, Австралия

В истории изучения природы попытки объяснить целое через часть на пути редукционизма неоднократно сменялись попытками объяснить части через целое в системном подходе. В современном естествознании эти тенденции вылились, соответственно, в господствующую идеологию дарвинизма с молекулярной генетикой как ее остром, и в геосферно-биосферную систему взглядов, призванную выявить возможности устойчивого развития.



ЗАВАРЗИН Георгий Александрович — действительный член РАН, доктор биологических наук, заведующий отделом микробных сообществ Института микробиологии РАН

Микробы держат небо

Эволюцию привыкли представлять в виде дерева. Его так и называют — эволюционным. Но она, скорее, напоминает пирамиду

СУММА БОЛЬШЕ СЛАГАЕМЫХ

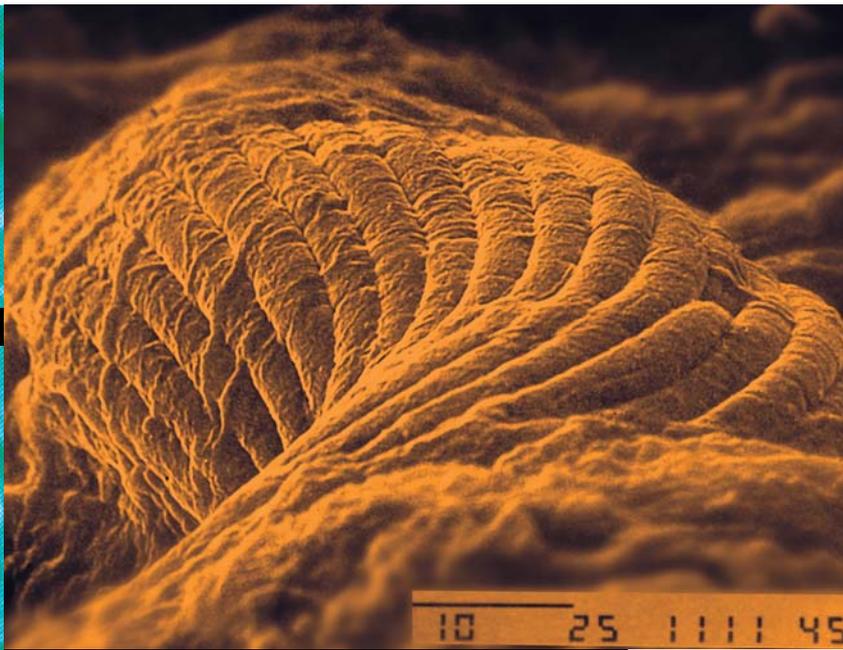
Чтобы корректно оперировать понятием «жизнь», нужно сначала разобраться с понятием системы. Каковы же ее характеристики? Во-первых, любая система состоит из отдельных компонентов, взаимодействующих между собой определенным образом. Например, простейший одноклеточный организм состоит из 4-х компонентов: мембраны, изолирующей клетку от окружающей среды, наследственного материала в виде ДНК, рибосомы (аппарата для синтеза белка) и цитоплазмы, т. е. внутренней клеточной среды, где протекают все процессы метаболизма.

Теперь плавно переходим к главному тезису: свойства системы не являются простой суммой свойств составляющих ее компонентов. На этом уровне возникает новое качество. Вспомним, например, изначальную дискретность жизни: хотя все клеточные компоненты и исполняют конкретные биологические функции, жизнь является свойством системы компонентов, объединенных в организм, и только в виде организмов нам известна.

Следующее, на что нужно обратить внимание, — это неизбежная иерархичность систем. Чтобы правильно исследовать систему, требуется трехуровневый анализ. То есть необходимо не только учитывать все входящие в систему элементы, но и понять, в какую большую систему она вписывается. Любой организм существует не сам по себе, а лишь как составная часть какой-либо экосистемы, включающей среду обитания. А разные экосистемы являются частями биосферы, включающей в себя биоту (живое) и географическую оболочку Земли. И именно эта большая система имеет определяющее значение для существования жизни вообще.

Кратко упомянем еще два очень важных свойства систем, к которым мы еще вернемся: первое — в систему можно поместить только совместимые с ней элементы, при этом для соответствия имеют значение только функциональные свойства. И второе — функциональные системные компоненты могут быть с успехом заменены другими со сходными функциями.





Верхний цианобактериальный слой современного галофильного мата. Жгут *Microcoleus chthonoplastes*, состоящий из более, чем 20 трихомов, одетых одной тонкой слизистой, местами складчатой оболочкой

«На заре жизни на Земле существовало лишь прокариотное сообщество, и становление биосферы происходило под действием только бактерий. Все остальные события — лишь модификация биосферной системы, созданной в период исключительного господства “невидимых”» (Г. З.)



Реконструкция строматолитовой постройки

ЖИЗНЬ НА СТАРТЕ

Начнем с того, что первичную биосферу Земли сформировали бактерии или, более строго, *прокариоты* (безъядерные одноклеточные организмы). Представить себе прокариотную биосферу ранее, чем 3,5 млрд лет назад, крайне затруднительно из-за отсутствия соответствующих геологических данных — за исключением одиночных местонахождений метаморфизированных архейских пород. Поэтому современные реконструкции носят несколько зыбкий характер и строятся по аналогии.

Все свободноживущие организмы в качестве источника энергии используют окислительно-восстановительные реакции. Простейшим микробным сообществом можно считать сообщество *гидрогенотрофных микроорганизмов*. В качестве восстановителя они используют водород, образующийся при реакции воды с перегретыми горными породами, т. е. в условиях достаточно высоких температур. Такие организмы сейчас широко встречаются среди представителей глубинной микрофлоры, населяющей поры горных пород примерно до глубины 3 км. Очевидно, что на такой глубине и в таких условиях эти реликтовые формы в незапамятные времена могли жить, игнорируя ультрафиолетовое излучение, губительное на поверхности при отсутствии озонового слоя.

К сожалению, из этой группировки не удастся вывести *фотоавтотрофов*, которые стали основными производителями органического вещества на Земле. Именно эти организмы открыли на необратимо остывающей планете новый внешний источник энергии — солнечный свет. Фотоавтотрофы начали «работать» при температуре от нуля до примерно 60°C.

Если кто-то считает, что мы зря разобрались с основами анализа систем, то пусть попробует вывести свойства биосферы из свойств информационных наследственных молекул! Это будет так же некорректно, как начать поиски «универсального общего предка» без четкого представления о среде обитания и геохимических процессах, в которые он должен вписаться, чтобы обеспечить себе длительное существование в масштабах эволюционного времени. Чтобы понять, как возникла и эволюционировала жизнь, нужно следовать логике анализа больших систем «сверху вниз», от общего к частному, что мы дальше и попытаемся сделать при рассмотрении эволюции микробных сообществ.

СИНЕ-ЗЕЛЕННЫЕ ЧЕМПИОНЫ

Важнейшими фотоавтотрофами стали *цианобактерии*, известные как сине-зеленые водоросли. Эти удивительные самодостаточные организмы, ошибочно называемые водорослями, сейчас обитают на нашей планете везде — в тропиках, горах, морях, даже на атомных полигонах. С водорослями и растениями вообще этих бактерий объединяет наличие пигмента хлорофилла, благодаря которому они осуществляют реакцию фотосинтеза.

С появлением цианобактерий наша биотическая система становится автономной, с замкнутыми циклами всех биогенных элементов. Цианобактерии служат первичными производителями органического вещества и свободного кислорода в атмосфере, а хемотрофные бактерии — деструкторами, разрушающими органику и возвращающими ее в биотический цикл. При этом неполное разрушение приводит к накоплению углерода осадочных горных пород — керогена.

Первые цианобактерии, сходные по строению с современными, жили, согласно палеонтологическим данным, 2,7 млрд лет назад. Интересно, что эти невообразимо древние организмы с успехом идентифицируются по современным определителям — так мало изменений претерпели они за миллиарды лет существования! Приведенная выше цифра довольно условна, потому что, например, мелкие кокковидные сине-зеленые, ныне населяющие океан, трудно различить даже в микроскоп. Поэтому подобные организмы могли существовать в еще более древние времена, но современными методами бактериальной палеонтологии их следы пока обнаружить нельзя.

Возраст палеонтологических находок сине-зеленых в древних горных породах на суше равен 2,2 млрд лет. Возможно, они обитали также на влажном грунте, в эфемерных водоемах и в пористых породах (как в современных пустынях и Антарктиде), где их останки не могли сохраниться. Настоящими памятниками сине-зеленым водорослям стали строматолиты — поразительные «каменные ковры», представляющие собой окаменевшие продукты жизнедеятельности древних

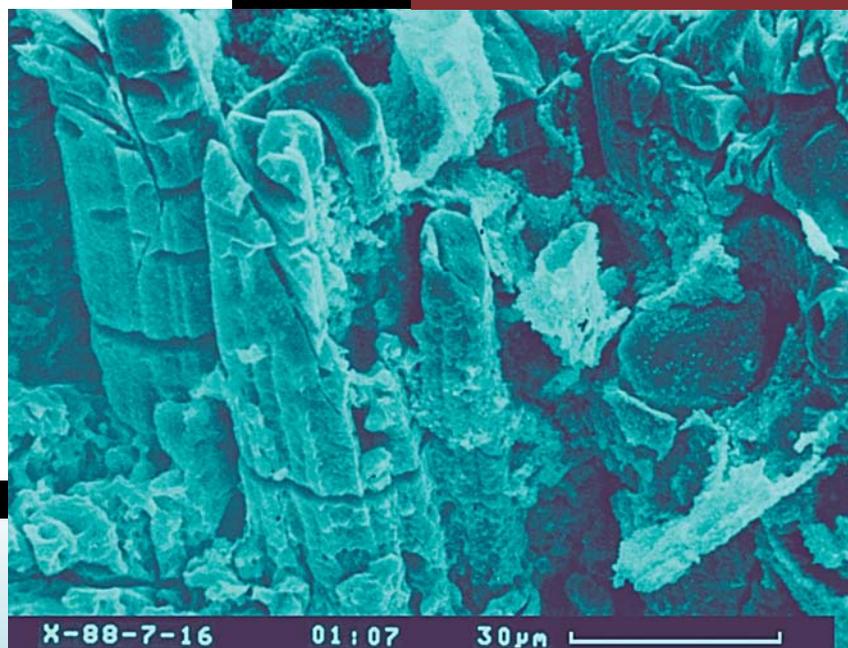
цианобактериальных сообществ — как продуцентов, так и разрушителей.

Упомянутыми сообществами была создана полноценная биосфера современного геохимического типа. Функционировала она достаточно долго — 2–3 млрд лет — и за это время сформировала устойчивый живой покров планеты. И если в качестве критерия эволюционной продвинутости брать численность и устойчивость организмов, то именно цианобактериальное сообщество нужно считать абсолютным чемпионом.

ЭВОЛЮЦИОННАЯ ПИРАМИДА

Следующий этап в развитии нашей системы — появление *эукариот* (организмов с полноценным клеточным ядром) и многоклеточных организмов. Время их появления точно не установлено, однако можно с уверенностью сказать, что ранее 1-го млрд лет назад эукариоты главных ролей на Земле не играли.

«Эволюция живого обычно представляется в виде генеалогического дерева, развивающегося от немногих предковых форм, которые должны были бы вымереть как менее приспособленные. На самом же деле в природе сосуществуют представители всех основных групп организмов — от примитивных до самых сложных, — когда-либо появлявшихся в истории биосферы» (Г. З.)



Вероятно, остатки чехлов, заключавших по несколько нитей цианобактерий из Хубсугульских фосфоритов

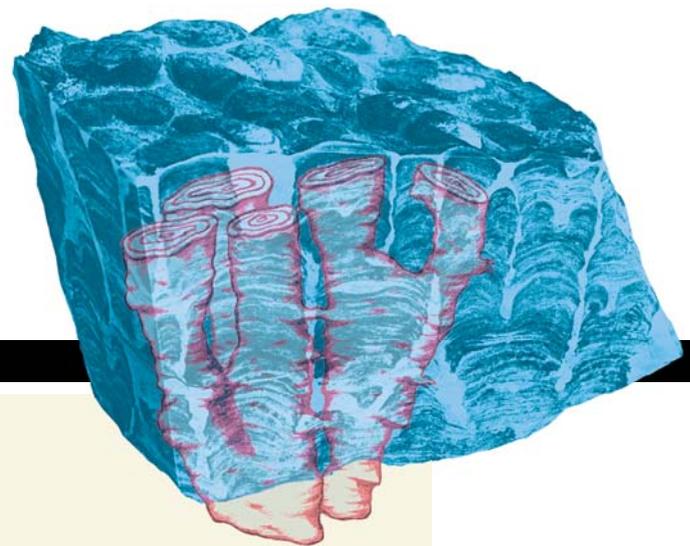
Современный галофильный мат. Захороненные слои с цистами зеленой водоросли *Dunaliella salina* Teod., на поверхности которых видны характерные бугорки

Строматолитовый монолит с полированными поверхностями распилов. Хорошо видны темные и светлые полосы — следы нарастания отдельных столбиков за счет выделения цианобактериями известкового материала (образец из коллекции Центрального сибирского геологического музея при Объединенном институте геологии, геофизики и минералогии СО РАН, г. Новосибирск)

Сразу отметим, что эукариоты и многоклеточные возникли не на пустом месте, но вписались в прокариотную биосферу, как среду своего обитания. Эукариотная биота была значительно «уже» прокариотной биосферы: только бактериальные организмы по-прежнему выносили экстремальные условия — высокие температуры, соленость и т. д. Такие реликтовые микробные сообщества, сохранившиеся до сих пор в высокоминерализованных озерах, морских лагунах и гидротермах, могут служить моделями древней биосферы.

В результате мы видим значительное сужение базиса жизни. «Новое», как это и полагается согласно

Схема первобытной прокариотной биосферы



системным представлениям, вписывается в рамки уже существующего, а сохранение «старого» является необходимым условием дальнейшего поступательного развития системы. То есть эволюции. Если стоять на этих позициях, то вместо обычного эволюционного дерева перед нами отчетливо вырисовывается настоящая эволюционная пирамида (или, по настроению, Вавилонская башня).

«АЛЬТЕРНАТИВНАЯ» ЖИЗНЬ

Когда в 1977 г. франко-американская экспедиция обнаружила вблизи Галапагосских островов, в безднах океана, поля гигантских двусторчатых моллюсков, плотные стаи креветок и сплетения червевидных вестиментифер, напоминающие ожившую макаронную фабрику, ученый мир был поражен. Никто не ожидал встретить на многокилометровой глубине, под громадным давлением, в беспросветной тьме, настоящие оазисы жизни. Ныне они открыты во всех океанах — на глубинах от 400 до 7000 м.

В океанических рифтовых долинах-расщелинах раскаленная лава, с температурой около 1200°C, поднимается из земных недр к поверхности. Навстречу ей по трещинам сочится морская вода. Она нагревается до 500–850°C, обогащается соединениями металлов и серы и «фонтанирует». Эти источники

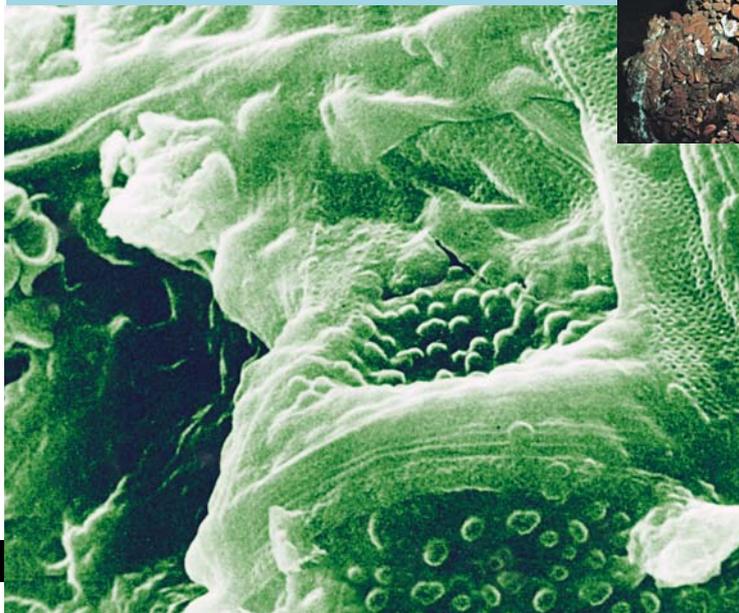
называют *гидротермами*, *вентами* или «*черными курильщиками*» (из-за темной взвеси сернистого железа).

При отсутствии света сообщество организмов, образующееся вокруг гидротерм, использует химическую энергию. Его основу составляют хемосинтезирующие серные бактерии, которые производят органические вещества за счет энергии, выделяемой при окислении соединений серы. Все сообщество живет на изживении этих бактерий. Вестиментифера рифтия строит трубки до трех метров длиной, откуда высовывает алый жаберный султан. Почти все ее тело занимает особый губчатый орган — *трофосома*, где содержится до 10 млн серных бактерий. У кольчатых червей *альвинелл* такие бактерии сидят прямо на поверхности тела, а у двусторчок — в жабрах. Все эти животные служат кормом креветкам, крабам и рыбам. Всего же ныне насчитывается более 500 видов гидротермальных животных.

В 1979 году советский геолог-тектонист Л. Зоненшайн выдвинул гипотезу о том, что Уральские горы образовались на месте «схлопнувшегося» океана, и знаменитые южно-уральские месторождения медного колчедана являются ископаемыми «черными курильщиками» силурийско-девонского возраста! Действительно, со временем российские ученые нашли в них всю ископаемую

Высокотемпературный «черный курильщик», 600 м, Восточно-Тихоокеанское поднятие

Современный галофильный мат. Цисты *Dunaliella salina* (справа) и смятые клетки пурпурной бактерии *Thiocapsa* (слева) среди створок диатомовых водорослей



Первые этапы пространственной экспансии жизни



НОВЫЙ «СТАРЫЙ» МИР

В новом эукариотном мире, возникшем «над» прокариотной биосферой, появились группы, способные выполнять те же функции, что и прокариоты. Прежде всего, это относится к водорослям, подобно цианобактериям обладающим способностью к фотосинтезу. Они начинают завоевывать океан и вытеснять цианобактериальные сообщества с мелководий морей и озер. Но, в отличие от сине-зеленых, у водорослей есть один крупный недостаток: они не в состоянии фиксировать атмосферный азот.

Эту проблему биосфера решила на уровне сообщества: избыточный синтез безазотистого органического вещества эукариотами стал источником для жизни азотфиксирующих бактерий, разрушителей органики. Это служит наглядным примером того, что главным действующим лицом в природе выступает отнюдь не отдельный организм или вид, но сообщество как кооперативное единство.

Таким образом, приоритет в любом сообществе имеют трофические, т. е. пищевые, цепи, создающие в нем «обмен веществ», аналогичный метаболизму клетки. Все группировки организмов в сообществе выполняют сеть взаимодополняющих химических реакций, причем один организм может быть заменен другим, отличным по происхождению и виду, но осуществляющим такую же функцию. Индивидуум — ничто, общество — все! А сообщество в целом ограничивается требованиями геофизической среды, и прежде всего — транспортом вещества между элементами. Удовлетворяет этим требованиям только единая замкнутая система функционально комплементарных организмов. В природе нет «универсальных солдат», которые в одиночку справились бы со всеми задачами.

«Реликтовые микробные сообщества, развивающиеся в экстремальных условиях (например, в гидротермах или содовых озерах), представляют собой аналоги экосистем прошлого. Развитие таких сообществ в местах, где “трава не растет и скот не пьет”, означает, что эволюция и усложнение организмов сопровождалось сужением базы жизни» (Г. З.)

первых простейших одноклеточных эукариот, способных захватывать твердые частицы, стали крупнейшей инновацией, предшествующей прочим изменениям в архитектуре их клеток. С этого времени оболочки клеток могли перевариваться внутри организмов, и бактерии получили статус «жертв». И если раньше отмирание прокариот происходило вследствие исключительно внутренних причин, то теперь картина была совершенно иной: на охоту — вернее, на «пастбище» — отправились

первые «бактероядные» хищники...

В дальнейшей эволюции сообществ каждый шаг в усложнении организации живых существ сопровождался образованием новых ниш для бактерий. Так, благодаря сформированному пищеварительному тракту животные, с точки зрения кишечной микрофлоры,



«Микробное сообщество возникает не путем расхождения и приобретения способностей у определенных видов, но собирается из филогенетически удаленных, “не родственных” организмов, условия для которых задаются ландшафтом. В этом смысле эволюция микробных сообществ — основная движущая сила биогеохимической эволюции биосферы — находится в области недарвиновских представлений» (Г. З.)

Современные бактериальные строматолиты, Австралия

В статье использованы фотографии, сделанные с помощью сканирующего электронного микроскопа, из «ATLAS of Microorganisms from Ancient Phosphorites of Khibsugul (Mongolia)» (2000, Huntsville, Alabama, USA), изданного по результатам совместного проекта Палеонтологического института РАН и NASA-Marshall Space Flight Center (NASA/TP—2000—209901)

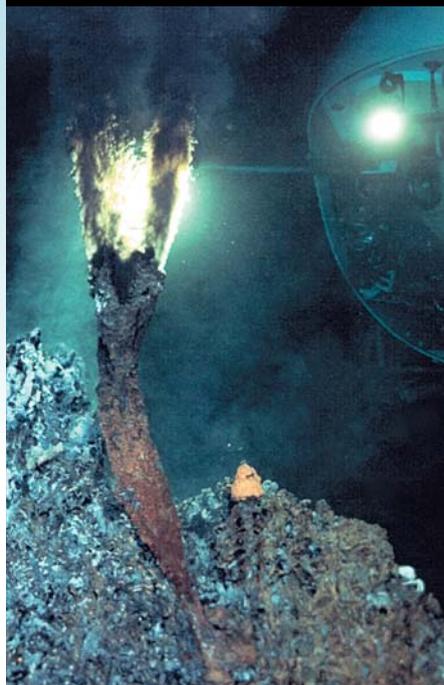
Существенно ограничивала бактериальный мир принципиальная несовместимость строения прокариот с питанием твердым субстратом. Проход твердой частицы через мембрану нарушал у них работу самой клетки. Поэтому «хищный образ» жизни был не для прокариот. Изменения мембранных структур у

представляют собой просто ходячие трубчатые «ферментеры». При этом для всякого усложнения пищевых цепей и систем незаменимым правилом остается то, что они начинаются с первичных производителей органического вещества, т. е. с цианобактериально-водорослево-растительного звена, а заканчиваются деструкторами. Круг жизни всегда должен быть замкнут.

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ МИРЫ ПЕРЕСЕКАЮТСЯ

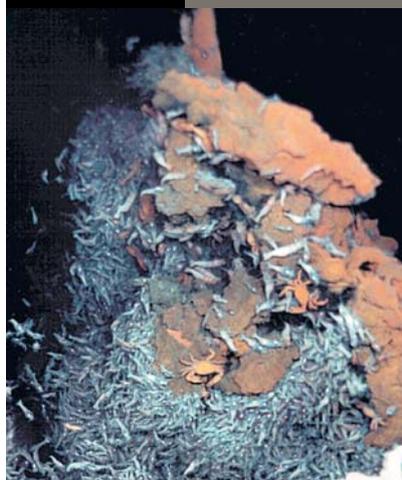
И что же, в конце концов, мы видим, бросая взгляд с вершины прогрессивной морфологической эволюции? Необратимые изменения геосферы диктовали свои законы биоте. Появлялись, усложнялись и исчезали организмы, но микробы во все времена как были, так и оставались базисом планетарной системы поддержания жизни. Именно поэтому столь четко и слаженно работает наша огромная геосферно-биосферная машина, включающая в себя комплекс сопряженных геобиохимических циклов и процессов, которые объединены глобальным планетарным круговоротом вещества и энергии.

Вот вам и эволюционный прогресс! При всей нашей морфологической продвинутости мы, вместе с животными, обеспечиваем лишь скромные 3 % от круговорота углерода на нашей планете! Просто несопоставимо с тем, что приходится на долю микробов. Но о них мы вспоминаем, только когда заболит горло, скиснет молоко или «зацветет» любимый купальный водоем. И еще не было прецедента, чтобы «зеленые» забили тревогу по поводу судьбы редкого вида маленьких цианобактериальных стоиков. А впрочем... Разве нуждаются в нашем признании и одобрении «сильные» мира сего?



Скопление креветок и крабов, 3660 м, Срединно-Тихоокеанский хребет

Колония мидий, 1688 м, Срединно-Атлантический хребет



биоту, типичную для гидротерм. Постепенно «докопались» и до более древних, докембрийских, «курильщиков». Возник вопрос: а не зародилась ли жизнь среди горячих серных котлов? Соединения серы и поныне поставляют энергию клеткам, причем не только у гидротермальных организмов. Может быть, это дань далекому прошлому, когда «семена» жизни вызревали вблизи горячих серных источников?

В восьмидесятые годы в Байкале с помощью глубоководных аппаратов «Пайсис» было обнаружено сообщество организмов, сформировавшееся в районе выброса термальных вод. Источник теплой воды с повышенной минерализацией расположен в северной котловине Байкала в районе бухты Фролиха на глубине более 400 м.

Вокруг фролихинской гидротермы раскинулись «поляны» (маты), покрытые белыми нитчатыми пленками из цианобактерий и нитевидных сульфат-редуцирующих бактерий, плотные поселения из корковых губок, в массе встречаются различные черви, моллюски, ракообразные и рыбы. При этом если для глубоководной фауны Байкала в целом характерно преобладание мелких животных, то в районе вента крупные животные — не редкость.

Голубой цвет грунта в районе вента говорит об отсутствии кислорода в непосредственной близости ко дну. Однако количество живых организмов вокруг источника огромно. Биота фролихинского вента является аналогом океанических донных сообществ, населяющих относительно малопрогретые метаново-сульфатные просачивания. Этот гидротермальный оазис с его удивительной «альтернативной» жизнью — еще одна уникальная черта маленького пресноводного «океана» Байкала.

Фотографии «черных курильщиков», получены с использованием глубоководных обитаемых аппаратов «Мир-1» и «Мир-2» Лабораторией научной эксплуатации глубоководных обитаемых аппаратов Института океанологии РАН под руководством проф. А. М. Сагалевича. Обработка фотографий — Ю. А. Володин.