

ЖИЗНЬ БЕЗ СОЛНЦА

Последние два десятилетия XX века ознаменовались открытием необычных сообществ живых организмов в рифтовых зонах Мирового океана – так называемой гидротермальной фауны.

Владимир Малахов



Колония вестиментифер-рифтий (*Riftia pachyptila*); на трубках комменсальные полихеты полиноиды (Гуаймас, 2000 м).

На страницах научно-популярных журналов появились фотографии огромных глубоководных червей – вестиментифер, скоплений необычайно крупных двусторчатых моллюсков и других представителей гидротермальной фауны, обитающей в полной тьме в районах подводной вулканической активности. Как оказалось, наиболее типичные представители гидротермальной фауны – вестиментиферы – не имеют ни рта, ни кишечника и живут в симбиозе с хемоавтотрофными бактериями. Однако история открытия бескишечных животных в океане уводит нас почти на 90 лет назад, к началу XX века.

Погонофоры – бескишечные обитатели морских глубин

В 1914 г. датское исследовательское судно «Сибоба» во время глубоководных тралений вблизи Зондского архипелага добыло несколько экземпляров незрелых морских червеобразных организмов, которые обитали в длинных тонких трубочках. В честь экспедиционного судна им было дано название *Siboglinum*. Сначала они не вызвали особого интереса у биологов, поскольку были отнесены к обычным в морских сообществах многощетинковым червям-полихетам. Однако последующие морские экспедиции приносили все новые находки, и постепенно зоологи стали осознавать, что эти организмы принципиально отличаются от многощетинковых чер-

вей. Их таксономический ранг стал постепенно повышаться – сначала до отдельного отряда, потом до класса, и, наконец, в 1944 г. профессор Московского государственного университета В.Н. Беклемишев выделил их в отдельный тип. Название *Pogonophora* происходит от греческих слов *pogon* – борода и *phoros* – носитель (на переднем конце тела у погонофор имеется венчик длинных извитых щупалец, напоминающих бороду). Глубоководные траления, проведенные во время экспедиций советского исследовательского судна «Витязь», позволили добыть множество видов погонофор из всех районов Мирового океана. Обработкой богатейших коллекций занимался профессор Ленинградского государственного университета, академик А.В. Иванов, который внес решающий вклад в изучение систематики, строения и развития погонофор.

Самым удивительным оказалось то, что «бородатые черви» не имели ни рта, ни кишечника, и способ их питания оставался загадкой. Предлагались самые невероятные объяснения, например считалось, что погонофоры удовлетворяют все потребности за счет всасывания растворенных в морской воде органических веществ. Была выдвинута гипотеза, что из-за необычного способа питания эти организмы обладают крайне низким уровнем обмена веществ, и стало быть, крайне медленным ростом и большой продолжительностью жизни. Как это ни покажется странным сейчас, в 50–60-е годы всерьез обсуждался вопрос о продолжительности жизни этих существ в 40–50 тыс. лет. Дело в том, что их трубочки воткнуты в грунт почти вертикально и пронизывают слои осадка, образовавшиеся тысячелетия назад. До начала 60-х годов XX века никаких органов, позволяющих погонофорам закапываться в грунт, найдено не было. Считалось, что их личинки оседали на поверхность осадка, а затем медленно, в течение нескольких десятков тысяч лет, росли вместе с накоплением слоев осадка. Эта фантастическая идея была отвергнута по-

сле того, как на заднем конце тела погонофор был найден особый сегментированный хвостик, действующий как маленькая лопата и закапывающий червя в грунт по мере роста.

Профессор А.В. Иванов предположил, что «бородатые черви» обладают наружным пищеварением в бокале щупалец. Наличие на щупальцах тончайших одноклеточных выростов – пиннул, снабженных кровеносными капиллярами, рассматривалось как косвенное подтверждение возможности всасывания пищи через покровы. Делались безуспешные попытки найти в щупальцах пищеварительные энзимы. Оставалось непонятным, почему, собственно, эти организмы прибегли к столь странному способу питания, редуцировав рот и кишечник, которыми успешно пользуются все остальные животные. Тем не менее эта гипотеза была принята многими авторами и до начала 80-х гг. XX века излагалась в учебниках зоологии.

Открытие гидротермальных сообществ

Во второй половине XX века общепринятой парадигмой геологии стала глобальная тектоника плит. Суть теории в том, что верхняя мантия нашей планеты расколота на несколько крупных плит, которые движутся друг относительно друга по поверхности частично расплавленной прослойки, отделяющей верхнюю мантию от нижней – астеносферы. Причиной подвижности главным образом стала гравитационная дифференцировка недр Земли. Около 4,5 млрд. лет назад, в эпоху формирования планеты, ее внутренние компоненты оказались произвольно перемешанными. С тех пор непрерывно идет процесс опускания тяжелых компонентов (железа, никеля и др.) к ядру планеты и подъем легких веществ (соединений алюминия, кремния и др.) к поверхности. Так сформировались железоникелевое ядро Земли и силикатная мантия. Однако этот процесс продолжается и по сей день. Там, где элементы опускаются в глубь Земли, литосферные плиты движутся навстре-



Передний конец рифтии (*Riftia pachyptila*)

чу друг другу – и громоздятся горы. Там, где из глубин Земли «всплывают» легкие компоненты, плиты расходятся – и формируется новая океаническая кора, действуют подводные вулканы, появляются срединные океанические хребты.

Скорость движения литосферных плит относительно друг друга может быть очень высока. Например, плиты, образующие дно Тихого океана, смещаются на 25–28 см в год. На стыке соседних плит возникает система трещин, по которым сквозь толщу океанической коры просачиваются горячие газы, нагревающие воду до температуры 300–400 градусов (при высоком давлении на больших глубинах кипения не происходит даже при температуре в несколько сот градусов). В воде растворено много сероводорода и сульфидов металлов (железа, цинка, никеля, меди), которые окрашивают ее в черный цвет. Горячие струи этого раствора смешиваются с холодными придонными слоями океана, охлаждаются, сульфиды выпадают в осадок и формируют особые конические образования высотой в несколько десятков метров – черные курильщики. Так их называют из-за мощных потоков горячего сульфидного раствора, напоминающих ▶

клубы черного дыма (рис. на стр. 89). Концентрации металлов в горячей воде черных курильщиков превышают таковые в обычной морской воде в миллионы раз.

Подобные районы всегда привлекали геологов, так как позволяли вочию наблюдать формирование ценнейших сульфидных руд. Правда, целенаправленное изучение гидротермальных оазисов стало возможным только после создания специальных глубоководных управляемых аппаратов – миниатюрных подводных лодок, способных погружаться на глубины в несколько тысяч метров и собирать образцы грунта с помощью механических манипуляторов.

Однако исследователи совершенно не ожидали обнаружить в рифтовых зонах богатую фауну. Редкие обитатели океанских глубин, куда никогда не проникает солнечный свет, вынуждены питаться «отбросами с барского стола», т.е. остатками отмерших организмов, попадающих из богатых жизнью верхних слоев воды. Численность и биомасса животных на больших глубинах очень малы. Рифтовые зоны с горячими вулканическими газами,

содержащими высокие концентрации сероводорода, тяжелых металлов и других ядовитых для большинства организмов соединений, казалось, должны быть долинами смерти среди пустынных глубин. Однако первые же фотографии, сделанные исследователями, показали изобилие живых существ в составе гидротермальных сообществ. На снимках видны склоны черных курильщиков, до самых вершин покрытые толстым слоем бактерий (сплетения миллиардов бактериальных клеток образуют так называемые маты), способных выживать при температуре до +120°C. В отдалении от устья курильщиков, там, где температура опускается ниже +40°C, на уступах курильщиков хорошо различимы сплетения белых трубок гигантских (до 2,5 м) червей с ярко-алыми щупальцами. В зарослях трубок ползали крабы, рядом плавали рыбы, в расселинах сидели крупные (20–30 см) двусторчатые моллюски, попадались осьминоги, словом, жизнь кипела. Красота и богатство биологических сообществ черных курильщиков, резко контрастирующие со скудным и однообразным населением

ложе океана, так поразили исследователей, что они весьма поэтично окрестили некоторые из гидротермальных оазисов «Райским садом», «Розовым садом» и т.п.

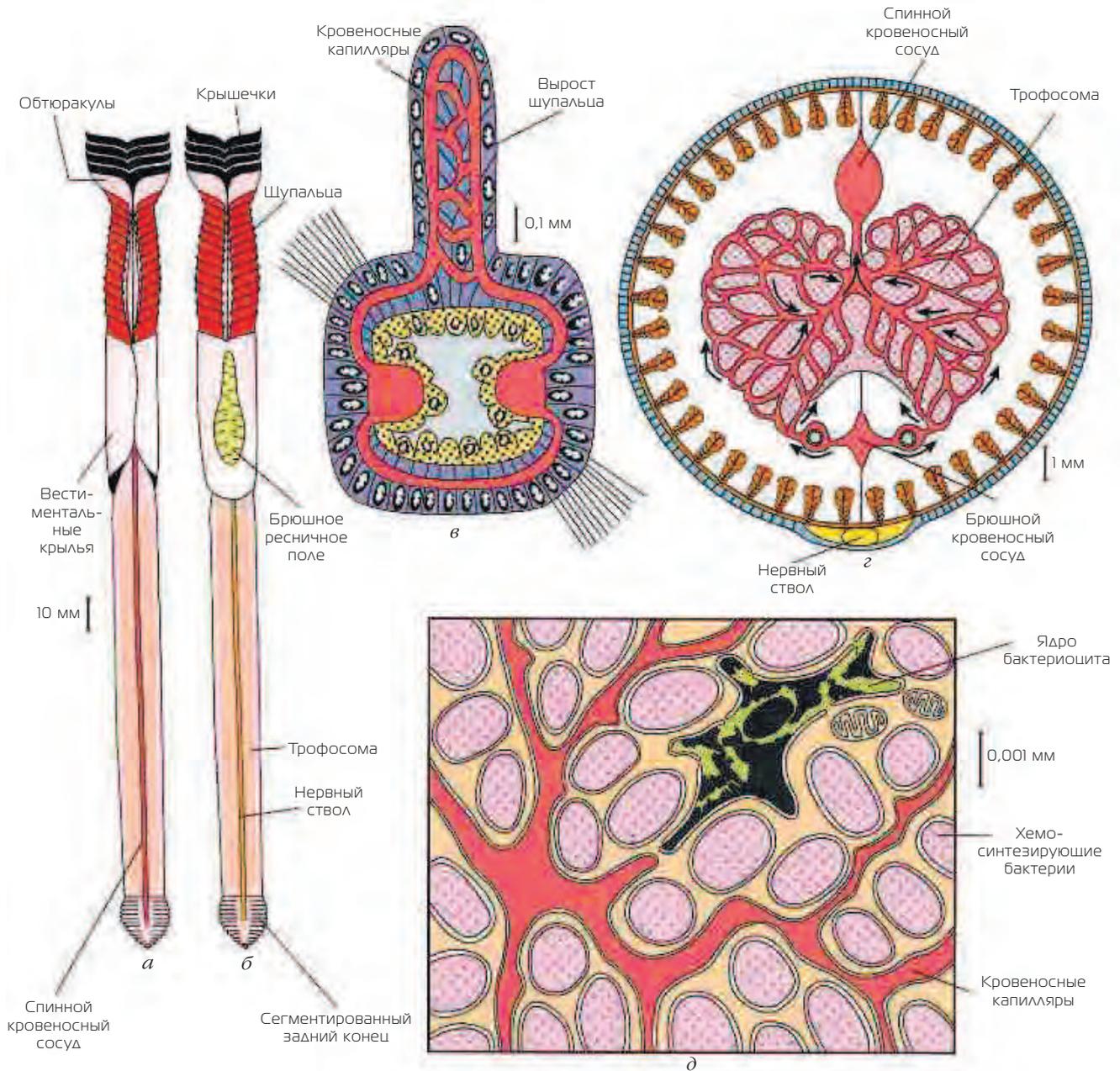
Первые фотографии появились в научно-популярных журналах, и подписи под ними гласили: «Гигантские глубоководные кольчатые черви». Кстати, А.В. Иванов, посмотрев на цветные изображения белых трубок с красными щупальцами, уверенно сказал: «Я думаю, что это не кольчатые черви, а погонофоры». Так и оказалось – трубки и торчащие из них щупальца принадлежали вестиментиферам (*Vestimentifera*, от латинских слов *vestimentum* – одежда, *fero* – носить), также относящимся к типу погонофор. Следует отметить, что иногда вестиментифер рассматривают и как самостоятельный тип, но все же близкий к погонофорам.

Вестиментиферы – визитная карточка гидротермальных сообществ

Первый представитель гигантских вестиментифер из рифтовых зон Мирового океана – Рифтия (*Riftia pachyptila*) – был описан в 1981 г. американским зоологом М. Джонсом. К настоящему времени известно около 15 видов этих животных. На протяжении 80–90-х годов рифтовые зоны стали объектом исследований научных учреждений разных стран, в том числе и Института океанологии Российской академии наук. Подводные аппараты Института океанологии РАН «Пайсис» и «Мир» собрали богатые коллекции вестиментифер и других представителей фауны этих областей. У взрослых вестиментифер (как и у погонофор) нет ни рта, ни кишечника. По оси туловищного отдела вестиментифер проходит массивный клеточный тяж, который сначала считался запасующим органом и был назван трофосомой. Электронно-микроскопические исследования показали, что крупные клетки трофосомы содержат множество вакуолей с бактериями. Бактерии вестиментифер принадлежат к группе сероводородоокис-



Колония вестиментифер *Riftia pachyptila* на затухающем участке гидротермального поля (21° с.ш. Восточно-Тихоокеанское поднятие, глубина 2600 м).



Строение вестиментифер: *a* – внешний вид вестиментиферы *Ridgeia* со спинной стороны; *б* – то же, вид с брюшной стороны; *в* – поперечный срез шупальца; *г* – поперечный срез через туловищный отдел, стрелки показывают направление движения крови; *д* – часть клетки-бактериоцита с пронизывающими ее кровеносными капиллярами.

ляющих бактерий. Они окисляют сероводород до серы (а потом до серной кислоты, нейтрализуемой карбонатами) и полученную энергию используют для синтеза органических веществ из углекислого газа и воды. Процесс носит название хемосинтеза и харак-

терен для многих видов свободно живущих бактерий, обитающих там, где в окружающей среде много сероводорода и есть кислород.

В гидротермальных оазисах сероводород поступает из черных курильщиков, а кислород – за счет подсоса

холодной и богатой кислородом глубинной воды, окружающей зоны источников. Как же бактерии, обитающие в трофосоме в глубине тела, получают сероводород и кислород? Оказалось, что оба вещества транспортируются сложной кровеносной

системой вестиментифер. Сеть капилляров проникает непосредственно внутрь клеток трофосомы и при этом так густа, что любую бактерию от ближайшего капилляра отделяет не более двух других бактерий. Гемоглобин вестиментифер соединяется и с кислородом, и с сероводородом, при этом сероводород обратимо связывается с белковой частью молекулы, а кислород – с гемом. Впрочем, при недостатке кислорода бактерии способны получать его, переводя нитраты, которыми богаты глубинные воды океана, в нитриты. Бактерии, защищенные внутри организма хозяина от неблагоприятных воздействий, получают от него сероводород и кислород. За счет самопеперивания части клеток трофосомы

вместе с бактериями червь получает органические вещества, которые служат единственным источником его питания. Таким образом, сожительство хемосинтезирующих бактерий и вестиментифер является взаимовыгодным симбиозом.

Погонофоры – указатели месторождений нефти и газа

Открытие симбиотрофного питания у вестиментифер, натолкнуло исследователей на мысль о способе питания типичных погонофор, известных задолго до открытия гидротермальных оазисов. В их организме имеется загадочный орган – замкнутый с обоих концов срединный канал. Обнаружение в клетках этого органа бакте-

рий позволило считать срединный канал гомологом трофосомы. Правда, бактерии, найденные у погонофор, принадлежат к другой группе прокариотных организмов – это метанокисляющие бактерии. Они синтезируют органическое вещество за счет окисления метана.

Откуда берется метан в толще грунта? Прежде всего он просачивается из подводных месторождений нефти и газа, причем его концентрация (около 1 мл на куб. дм грунта) достаточно высока для того, чтобы бактерии могли не только существовать, но еще и «кормить» хозяина. Поэтому места обитания погонофор перспективны для поисков подводных залежей этих ценнейших ископаемых. Интересно, что те районы, в которых обитают немногие относительно мелководные виды погонофор (Северное море, прибрежные районы вблизи о. Сахалин, Баренцево море), – это как раз районы, в которых ведется добыча нефти и газа.

Однако большинство представителей класса погонофор – обитатели больших глубин Мирового океана, где нефть и газ не только не добывают, но и не ищут. Современные технологии не рассчитаны на разработку полезных ископаемых на таких глубинах. Но недалеко то время, когда мелководные месторождения истощатся. Вот тогда погонофоры и укажут нам, где нужно искать глубоководные залежи нефти и газа.

Происхождение симбиоза

Погонофоры и вестиментиферы – это один из наиболее ярких примеров симбиоза животных с прокариотными организмами. В гидротермальных оазисах немало других существ, культивирующих хемоавтотрофные бактерии. Так, у крупных двустворчатых моллюсков – калиптоген и батимодиолосов, обитающих рядом с вестиментиферами, бактерии поселяются в жабрах. Однако эти моллюски сохраняют (хотя и в упрощенном виде) пищеварительный тракт. Многощетинковый червь альвинелла выращивает бактерии на поверхности тела, однако имеет и нормально развитый пищевари-



Колония вестиментифер *Ridgeia piscesae* на поселении гастропод *Lepetodrilus sp.* у подножия гидротермальной постройки (гора Осевая, 1570 м).

тельный тракт. По-видимому, для моллюсков и многощетинковых червей симбиотические бактерии являются лишь источником дополнительного питания, в то время как вестиментиферы и погонофоры полностью находятся на «иждивении» бактерий.

Исследования яйцеклеток вестиментифер показало, что бактерий в них нет, и следовательно, бактериальные симбионты от матери к потомству не передаются. Откуда же они берутся в клетках трофосомы?

Ответ на этот вопрос удалось получить в результате изучения личиночного развития вестиментифер. Оказалось, что личинки их организмов имеют нормально развитый рот и кишечник. В течение нескольких суток они плавают в толще воды с помощью венчика ресничек, затем опускаются на субстрат и ползают по поверхности грунта, заглатывая хемосинтезирующие бактерии из внешней среды, заражаются ими, после чего рот и анус у молодых червей редуцируются, а кишечник превращается в орган бактериального питания – трофосому. Недавние исследования показали, что личинки типичных погонофор тоже имеют нормальный рот и кишечник и заражаются симбионтами (метанооксилирующими бактериями) из внешней среды, при этом их трофосома сохраняет просвет (недаром же раньше ее называли срединным каналом) и больше похожа на кишечник, чем сильно видоизмененная трофосома вестиментифер.

Личиночное развитие этих червей, вероятно, рекапитулирует (то есть повторяет в сокращенной форме) определенные этапы филогенеза этих животных. Можно предположить, что их предки сначала просто питались бактериями (как это делают сейчас многие донные беспозвоночные), а затем некоторые виды бактерий, проникнув в цитоплазму клеток кишечника, превратились в симбионтов.

Другая жизнь

Гидротермальные сообщества – пример жизни, существующей не за счет солнечной энергии, а за счет тектони-

ческой энергии планеты. Это означает, что поиски внеземной жизни вполне реальны на тех планетах, где сохранилась тектоническая активность, где есть активный вулканизм. Наибольший интерес здесь могут представлять спутники планет-гигантов, такие как Европа, Ио. Планеты-гиганты и их спутники находятся на громадном расстоянии от Солнца, и температура на их поверхности ниже полутора сотен градусов. В то же время активная вулканическая деятельность позволяет поддерживать под толстым покровом из замерзшей углекислоты, метана, аммиака и льда высокую температуру, а вулканические газы могут быть потенциальным источником химической энергии для примитивной (а может быть, и не слишком) жизни.

Да и на нашей планете при различных катаклизмах, связанных с колебаниями интенсивности солнечного излучения, жизнь может сохраняться в гидротермальных оазисах. Солнце – очень стабильная звезда, но все же не настолько, чтобы полностью исключить всякую возможность слабых колебаний интенсивности излучения. Возможно, именно эти колебания вызывают периодические (примерно каждые 200 млн. лет) оледенения планеты. Существуют и другие точки зрения на причины подобных явлений, но в любом случае ледниковые периоды приводили к снижению фотосинтеза как на поверхности суши, так и в океане. В периоды наиболее сильных похолоданий, как, например, протерозойского (около 700 млн. лет назад), льды, возможно, спускались почти до 40-х широт.

Другая причина, которая могла вызывать резкое снижение фотосинтеза, – падения астероидов, которые, несомненно, имели место за 4 млрд. лет существования жизни на нашей планете. При этом в верхние слои атмосферы выбрасывались колоссальные массы пыли и пепла (существует предположение, что падение такого астероида около 60 млн. лет назад вызвало всепланетную катастрофу, погубившую мир динозавров).



Изящный высокотемпературный черный курильщик (21° с.ш., Восточно-Тихоокеанское поднятие).

Аналогичные последствия грозят нашей планете в случае глобальной ядерной катастрофы: пепел сгоревших городов и лесов вызвал бы так называемую «ядерную зиму», понижение интенсивности солнечного излучения, достигающего поверхности Земли, и падение температуры на долгие годы. Все эти катастрофы означали бы гибель множества видов растений и животных и уничтожение целых сообществ. Но жизни в гидротермальных оазисах эти катастрофы не угрожают (хотя для цивилизации такие катастрофы стали бы губительными). ■

ОБ АВТОРЕ:

Малахов Владимир Васильевич, профессор кафедры зоологии и сравнительной анатомии беспозвоночных МГУ. Автор 170 публикаций. Область научных интересов – сравнительная анатомия и эмбриология беспозвоночных. Член-корреспондент Российской академии естественных наук, член-корреспондент Российской академии наук.

Фотографии получены с использованием ГОА «Мир-1» и «Мир-2» в Лаборатории научной эксплуатации глубоководных обитаемых аппаратов под руководством профессора А.М. Сагалевича. Обработка фотографий – Ю.А. Володин.