

Фото: Columbia University

БЕСКИШЕЧНЫЕ МОРСКИЕ ЧЕРВИ, НЕФТЬ, ГАЗ И ЖИЗНЬ НА ДРУГИХ ПЛАНЕТАХ

ЧАСТЬ 3.

Академик Владимир МАЛАХОВ,
Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.

В жерлах чёрных курильщиков, где температура воды достигает 300—400°C, никакие организмы существовать не могут. Однако чуть поодаль от самого жерла, на вершине чёрных курильщиков виден характерный белый налёт — это маты,

состоящие из сероводородоокисляющих бактерий, способных выживать при температуре 110—115°C. Ещё дальше, там, где температура падает до 40°C, обитают помпейские черви алвинеллы (названные в честь аппарата «Элвин»). Это многощетинковые кольчатые черви, которые питаются сероводородоокисляющими бактериями, живущими в окружающей среде (в том числе на телах самих алвинелл). Заросли

Продолжение. Начало см. «Наука и жизнь» №№ 2, 3, 2024 г.

◀ *Бактериальные маты вблизи жерла чёрного курильщика, состоящие из микроорганизмов, способных выживать при температуре 110—115°C.*

вестиментифер начинаются там, где температура воды опускается ниже 30°C. Ещё дальше от жерла курильщиков поселяются крупные двустворчатые моллюски калиптогены и батимодиолусы. В их жабрах тоже обитают симбиотические хемоавтотрофные бактерии, хотя эти моллюски сохраняют кишечник.

Вестиментиферы обитают в среде, содержащей высокие концентрации углекислого газа и сероводорода. Эти соединения входят в состав вулканических газов, просачивающихся через трещины в породах. Придонная вода Мирового океана богата нитратами, которые в поверхностных водах всегда в дефиците, — ведь их используют водоросли как источник азота. Для хемоавтотрофных бактерий, живущих внутри клеток трофосомы*, нитраты также необходимы в качестве источника азота, но на больших глубинах их дефицита не наблюдается, ведь там всегда темно и нет водорослей.

Хемоавтотрофные бактерии вестиментифер — эндосимбионты, они обитают внутри тела червя в клетках трофосомы, которая находится в его туловищном отделе, погружённом в толстую хитиновую трубку. Сероводород, кислород, углекислый газ и нитраты надо как-то доставлять глубоко внутрь тела — туда, где живут симбиотические бактерии. Кислород и сероводород поглощаются щупальцами на переднем конце червя. Щупальца — ярко-красные, благодаря гемоглобину, который растворён в плазме крови (эритроциты у сибоглинид нет). Каждое щупальце содержит два кровеносных сосуда — приносящий и выносящий и несёт выросты — пиннулы, увеличивающие их поверхность. Из щупалец кровь попадает в брюшной кровеносный сосуд

и течёт назад. В туловищном отделе она переходит из брюшного сосуда в спинной по системе капилляров, оплетающих дольки трофосомы. Капилляры кровеносной сети трофосомы проникают внутрь крупных её клеток, так что симбиотические бактерии имеют возможность получать сероводород, кислород непосредственно из крови. Далее кровь по спинному сосуду, на котором расположено сердце, течёт вперёд и нагнетается в щупальца.

Но как же кислород, сероводород и другие соединения переносятся к содержащимся в трофосоме бактериям? И то и другое транспортируется по кровеносной системе. То, что гемоглобин — это молекула, предназначенная для транспорта кислорода, мы знаем со школьных лет. На самом деле сероводород тоже способен



фото: Севастопольский аквариум

Помпейский червь алвинелла (Alvinella pompejana), обитающий при температуре 40°C (белый войлок на поверхности тела — нитчатые сероводородокисляющие бактерии).

* Трофосома — массивный тканевый тяж коричневого цвета в туловищном отделе вестиментифер.



Заросли вестиментифер риджейя (Ridgeia piscesae) начинаются там, где температура опускается до 30°C.

Фото из статьи: Liao L., Wankel S. D., Wu M. et al. // Characterizing the plasticity of nitrogen metabolism by the host and symbionts of the hydrothermal vent chemoautotrophic symbioses Ridgeia piscesae — Mol. Ecol. 2014. Vol. 23 — № 6. — P. 1544—1557.

соединяться с молекулой гемоглобина, но в случае гемоглобина человека сероводород связывается с гемом, то есть занимает то место, которое предназначено для кислорода. В результате такой сульфгемоглобин больше не может переносить кислород, и

человек или животное умирает от отравления сероводородом.

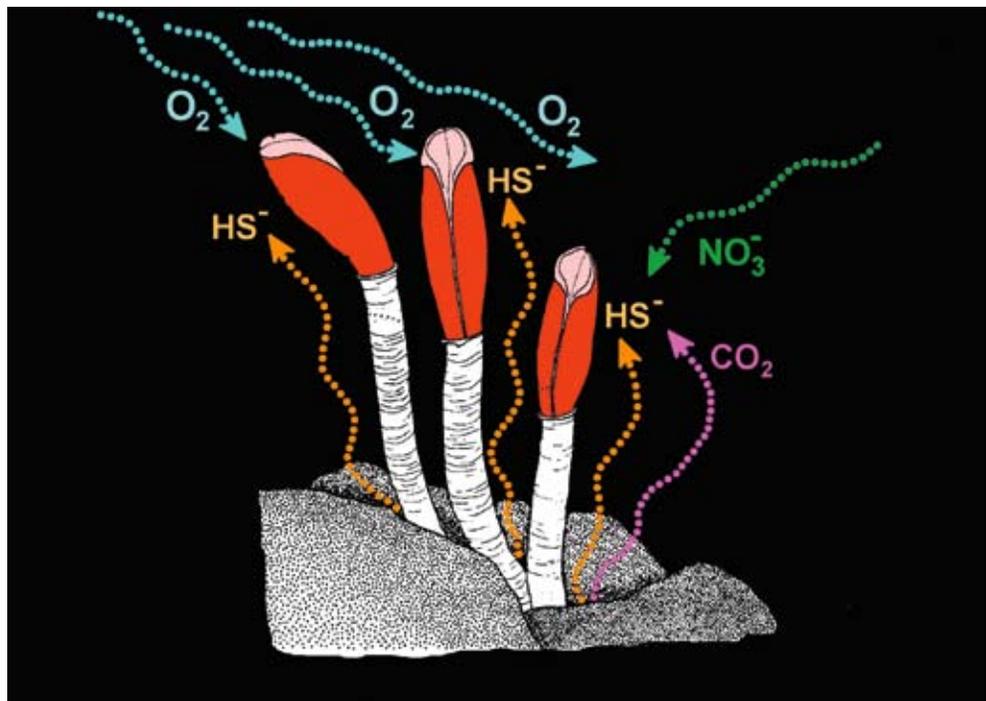
У вестиментифер и других сибоглинид всё иначе. Кислород, как и положено, связывается с гемом, а сероводород соединяется с глобиновыми частями молекулы, а именно, со свободными остатками аминокислоты цистеина. Эта особенность позволяет вестиментиферам транспортировать и кислород, и сероводород одновременно на одной и той же молекуле (но в разных её частях). Нитраты также транспортируются на молекулах гемоглобина, а углекислота — в плазме крови. Кроме того, хозяин предоставляет симбиотическим бактериям продукты собственного обмена — аммиак (продукт азотистого обмена) и углекислоту (продукт дыхания).



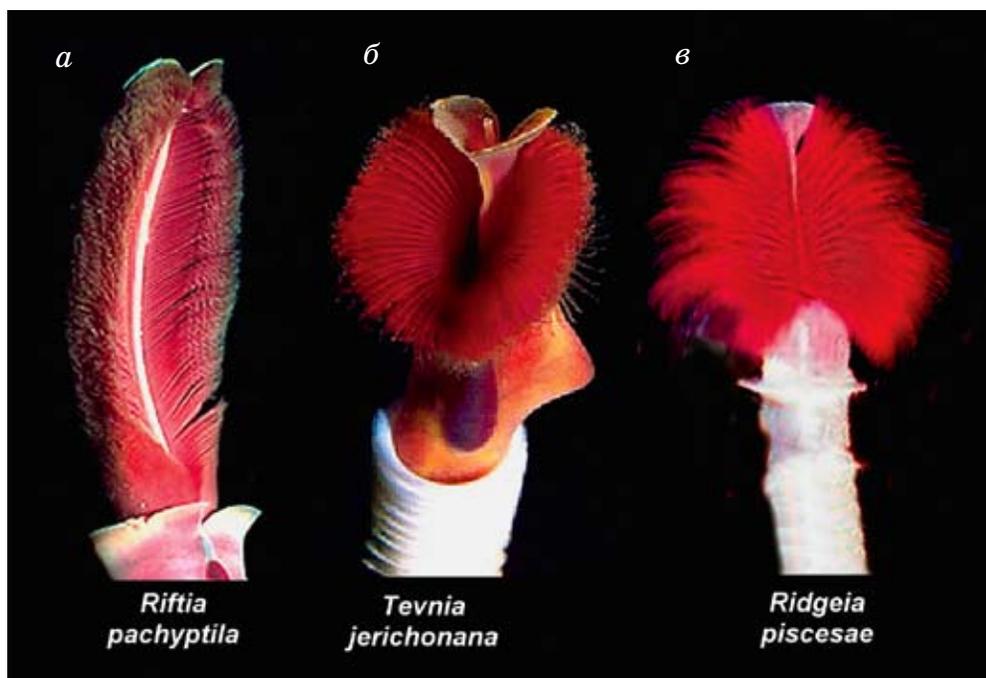
Фото: naturerules1.fandom.com/CC BY-SA 3.0

Поселения двустворчатых моллюсков калиптогена (Calyptogenes) по периферии гидротермального очага. Эти моллюски сохраняют пищеварительный тракт, но имеют хемоавтотрофные симбиотические бактерии в жабрах.

Гемоглобина у вестиментифер очень много, и он представлен тремя типами молекул. Молекулы гемоглобина вестиментифер очень крупные. Молекулярная масса одного из типов гемоглобина 3 млн 200 тыс. а. е. м. Это почти в 50 раз боль-

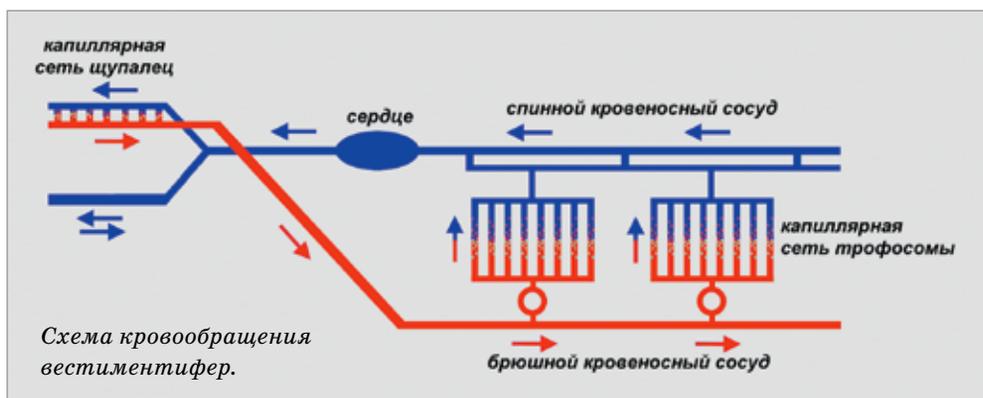
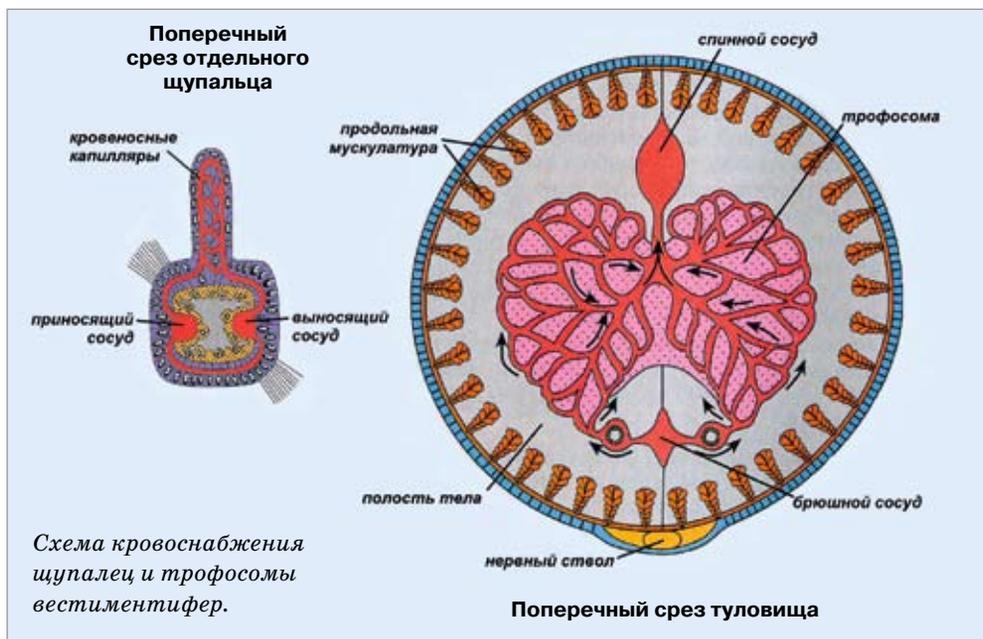


Вода гидротермального очага, в котором обитают рифтии и другие вестиментиферы, насыщена сероводородом, углекислым газом, кислородом и нитратами.



Щупальцевый отдел различных вестиментифер из гидротермальных очагов Тихого океана: рифтия (а), тевния (б), риджейа (в).

Фото: (а) Peter Batson/people.whitman.edu; (б) Sarah Miller/Wikimedia Commons/CC BY-SA 3.0; (в) J. Flores из статьи: Andersen A. C., Flores J. F., Hourde S. Comparative branchial plume biometry between two extreme ecotypes of the hydrothermal vent tubeworm *Ridgeia piscesae* // Can. J. Zool. 84: 1810—1822 (2006).



ше, чем у гемоглобина человека. Шестиугольные молекулы такого гемоглобина настолько велики (около 0,03 мкм), что их легко рассмотреть при средних увеличениях электронного микроскопа. Молекулы двух других типов гемоглобина поменьше (около 400 тыс. а. е. м.) и тоже в несколько раз крупнее, чем гемоглобин человека. При этом у вестиментифер гемоглобин содержится не только в сосудах кровеносной системы, но и в жидкости полости тела (то есть в целоме).

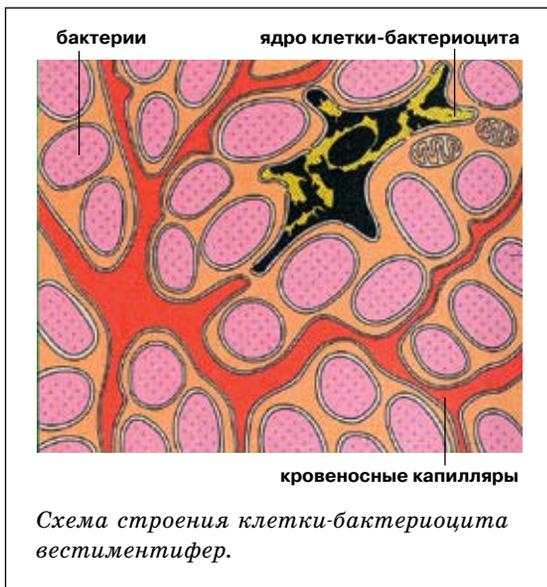
Зачем же вестиментиферам так много гемоглобина? Оказывается, он нужен не только для транспорта кислорода, сероводорода и нитратов. Дело в том, что сероводород — это клеточный яд, который инактивирует важнейший фермент клеточно-

го дыхания — цитохром-с-оксидазу. Вот почему большинство организмов (кроме некоторых групп бактерий) не могут выживать при высоких концентрациях сероводорода в окружающей среде. Способность гемоглобина сибоглинид связываться с сероводородом снижает его концентрацию в тканях животного. Сероводород из внешней среды, конечно, проникает внутрь организма, но 99% его связывается с гемоглобином. Получается, что в окружающей среде сероводорода много, а внутри организма практически нет, и отравления тканей ядовитым веществом не происходит. Так сибоглиниды и живут в среде, насыщенной этим газом. Не исключено, что даже сама способность гемоглобина сибоглинид

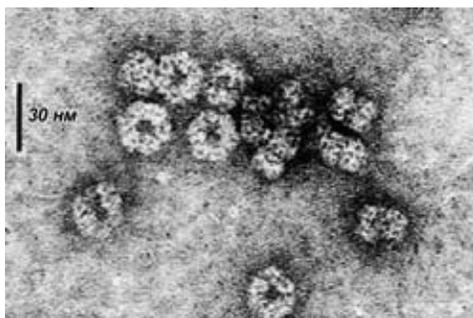
связывать сероводород цистеиновыми остатками первоначально появилась как адаптация к обитанию в среде, насыщенной сероводородом. Такой способностью обладает гемоглобин помпейского червя алвинеллы из гидротермальных биотопов и даже гемоглобин обычного в наших северных морях кольчатого червя-пескожила, который обитает в толще осадка, заражённого сероводородом. Возможно, предки вестиментифер, имевшие рот и кишечник, питались сероводородоксилирующими бактериями, как это делает помпейский червь алвинелла. Позже, когда они стали культивировать эти бактерии внутри тела, способность гемоглобина связывать сероводород пригодилось для транспорта данного вещества.

Интересно, что яйцеклетки вестиментифер не содержат бактерий, то есть от матери к потомству бактерии не передаются. Личинки вестиментифер тоже не содержат бактерий. Более того, у личинок есть рот и рудиментарный кишечник. Когда личинка начинает ползать по поверхности субстрата, хемоавтотрофные бактерии проникают в организм сибоглинид из внешней среды. Это происходит через покровы, но, вероятно, также и через кишечник. После проникновения бактерий рот и кишечник редуцируются, а бактерии поселяются в трофосоме. Таким образом, каждое поколение сибоглинид заражается бактериями заново, и в разных районах у одного и того же вида сибоглинид бактерии могут принадлежать к разным штаммам. Подобный способ заражения говорит о том, что предки сибоглинид первоначально питались хемоавтотрофными бактериями (как это делают помпейские черви алвинеллы), а потом научились их культивировать.

Открытие гидротермальных оазисов заставляет задуматься об источниках энергии для жизни на нашей планете. На суше основные продуценты органического вещества — это многоклеточные растения, то есть мхи, папоротники, хвойные и цветковые растения. В океане основные производители органического вещества — планктонные диатомовые водоросли — одноклеточные организмы, тело которых заключено в прочную раковинку из двуокиси кремния. Немалый и, возможно, недооценённый

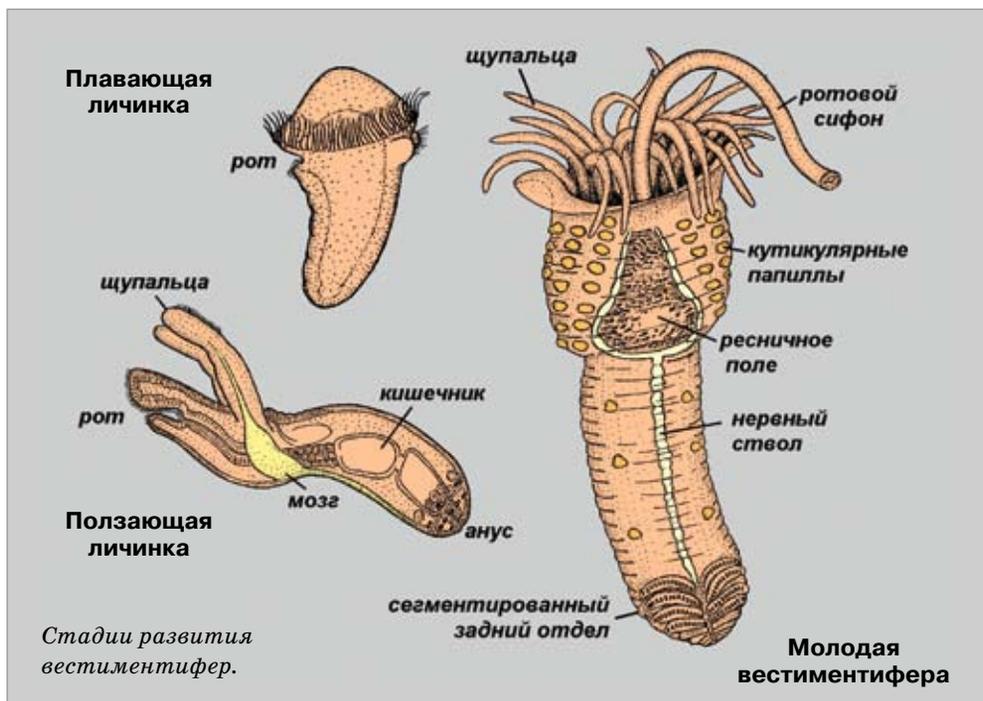


вклад вносят синезелёные водоросли, которые на самом деле — фотосинтезирующие цианобактерии. Морская вода хорошо поглощает свет, поэтому фотосинтез возможен только в самом поверхностном слое. Этот слой так и называют — эуфотический. На толщину данного слоя влияет количество в нём планктонных организмов: чем больше планктонных животных и растений, тем больше рассеивается свет, и толщина эуфотического слоя уменьшается. В продуктивных приполярных районах Мирового океана, где в воде много планктона, толщина эуфотического слоя составляет менее 50 м, а в тропических районах, особенно вдали от берегов, он простирается

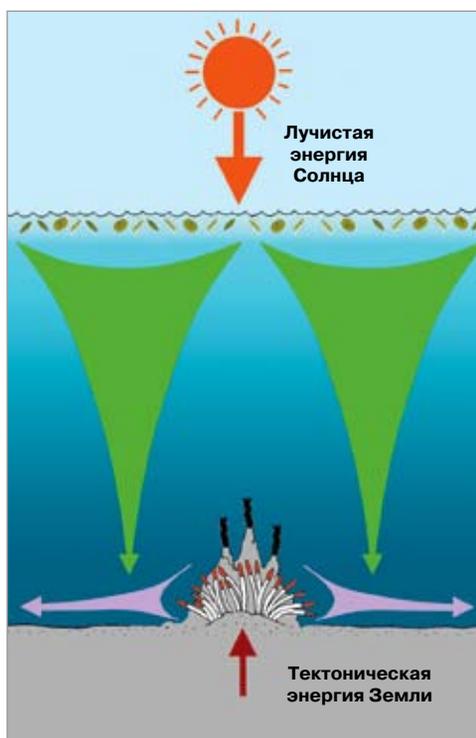


Молекулы гемоглобина вестиментифера в электронном микроскопе.

Фото из статьи: Zal F., Lallier F. H., Wall J. S., Vinogradov S. N., Toulmond A. The multi-hemoglobin system of the hydrothermal vent tube worm *Riftia pachyptila*. I. Reexamination of the number and masses of its constituents // Biol. Chem. 1996. V. 271. № 15. P. 8869—8874.



до глубины 200 м. В любом случае толщина эуфотического слоя невелика по сравнению со средней глубиной Мирового океана, которая составляет около 3800 м (а макси-



мальная глубина — около 11 км). Население водной толщи и дна Мирового океана кормится за счёт тонкого эуфотического слоя. Органическое вещество попадает в глубины океана по пищевым цепям за счёт вертикальных миграций: ночью глубоководные организмы поднимаются в верхние слои воды, а днём опускаются в глубокие слои воды. Другой важнейший источник пищи — так называемый дождь трупов*. Трупы и фрагменты тел мелких планктонных организмов, облепленные бактериями, постепенно тонут. Наблюдатели подводных аппаратов описывают это явление как «морской снег». В свете прожекторов хлопья «морского снега» медленно опускаются в тёмные глубины океана. Чем глубже живут организмы, тем меньше им достаётся от этого «дождя трупов». Вот почему на больших глубинах жизнь, как правило, скудна. Средняя биомасса донных организмов в

Два источника энергии в биосфере Земли. Зелёные стрелки — поток фотосинтетического органического вещества из поверхностного эуфотического слоя. Фиолетовые стрелки — поток хемосинтетического органического вещества из гидротермальных очагов.



Обитатели гидротермальных очагов: сверху слева — рыба термарцерс (*Thermarces*), сверху справа — крабы битогрея (*Bythograea*), объедающие щупальца вестиментифер, внизу слева — ракообразное мунидопсис (*Munidopsis*), внизу справа — ушастый осьминог (*Grimptoteuthis*).

центральных районах Тихого океана, например, составляет всего несколько десятых грамма на квадратный метр.

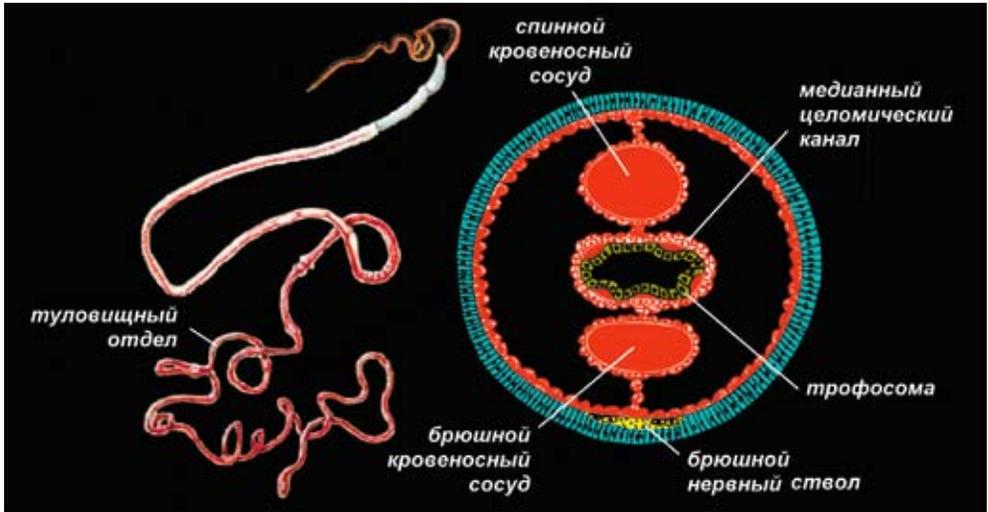
Солнечный свет не может быть источником энергии для гидротермальных сообществ, ведь там царит полная темнота. Источник энергии для гидротермальных сообществ — тектоническая энергия Земли. Из глубин земли поступает поток вулканических газов, в том числе сероводород и двуокись углерода, необходимые для хемосинтеза. Бактерии образуют бактериальные маты, поселяются на поверхности тела червей и ракообразных, а у вестиментифер они обитают внутри клеток трофосомы.

Вестиментиферы занимают в экосистеме гидротермальных оазисов место растений. Они не потребляют органическое вещество, а с помощью хемосинтезирующих бактерий-симбионтов продуцируют его. Таким образом, как это ни парадоксально, вестиментиферы — автотрофные животные. Ракообразные и рыбы объедают щупальца вестиментифер, а если повезёт, то и самих червей, и становятся жертвами осьминогов

и более крупных рыб. Так по пищевым цепям органическое вещество расходуется от чёрных курильщиков в прилегающие районы океанского дна.

Было бы неправильно считать, что все гидротермальные сообщества абсолютно автономны. Окружающая чёрные курильщики придонная вода содержит кислород, а весь свободный кислород в биосфере имеет фотосинтетическое происхождение. На суше его выделяют зелёные растения, а в океане — одноклеточные планктонные водоросли, обитающие в тонком поверхностном слое. Как же кислород попадает на большие глубины? Это происходит у кромки антарктических льдов, где богатая кислородом, очень холодная и солёная вода опускается на самое дно и распространяется на север, промывая самые глубокие впадины Мирового океана (в меньших мас-

* Малахов В. Бескишечные морские черви, нефть, газ и жизнь на других планетах. Часть 2. — «Наука и жизнь» № 3, 2024 г., стр. 54.



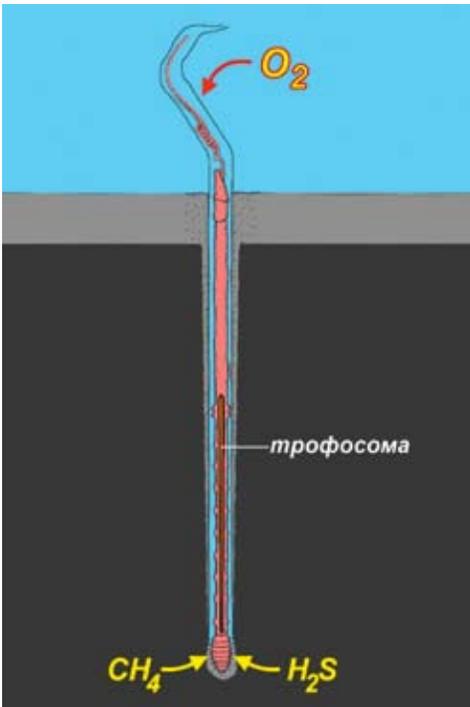
Погонофора сибоглинум, извлечённая из трубки (слева), и поперечный срез через туловищный отдел (справа).

штабах этот процесс протекает у берегов Гренландии).

Однако хемосинтезирующие бактерии могут обходиться и без растворённого в воде кислорода. Необходимый для окисления сульфидов кислород они могут получать

за счёт анаэробного окисления сульфатов и нитратов, которыми богата глубинная вода Мирового океана. В этом случае они оказываются по-настоящему автономными.

Когда выяснилось, что лишённые рта и кишечника вестиментиферы существуют за счёт симбиотических хемоавтотрофных бактерий, естественно возникло предположение, что классические погонофоры питаются сходным образом. Тут и вспомнили, что российский зоолог А. В. Иванов в книге, вышедшей в 1960 году и удостоенной Ленинской премии, описывал загадочный орган, расположенный в туловищном отделе. Иванов назвал его «медианным целомическим каналом» и высказал предположение, что это запасающий орган. Исследование клеток данного органа показало, что в них обитают симбиотические автотрофные бактерии, и, таким образом, медианный целомический канал соответствует трофосоме. Правда, у классических погонофор это могут быть как сероводородокисляющие бактерии, так и метанокисляющие. Задний конец тела погонофор, глубоко погружённый в осадок, поглощает сероводород или метан, растворённые в капиллярной воде между частицами грунта. Кислород поглощается из придонной воды через щупальца.



Поглощение сероводорода, метана и кислорода погонофорами.

Рисунки Владимира Малахова.

(Продолжение следует.)