



КРАСНАЯ ЗЕМЛЯ, ЗЕЛЕНАЯ ЗЕМЛЯ, СИНЯЯ ЗЕМЛЯ. Звезды спектрального класса *M* (красные карлики) светят слабо, поэтому растения на земледобных планетах вблизи них должны быть черными, чтобы поглощать как можно больше света (*первая панель*). Молодые *M*-звезды опалют поверхность планет ультрафиолетовыми вспышками, поэтому там организмы должны быть водными (*вторая панель*). Наше Солнце относится к классу *G* (*третья панель*). А вблизи звезд класса *F* растения получают слишком много света и должны отражать значительную его часть (*четвертая панель*)

Нэнси Цзян

цвет растений НА ДРУГИХ ПЛАНЕТАХ

Зеленые человечки уже устарели. На планетах у иных звезд растения могут быть красными, синими и даже черными

Поиски внеземной жизни больше не являются прерогативой научной фантастики или охотников за НЛО. Возможно, современные технологии еще не достигли требуемого уровня, однако с их помощью мы уже способны

обнаружить физические и химические проявления фундаментальных процессов, лежащих в основе живого. Астрономы открыли более 200 планет, обращающихся вокруг звезд вне Солнечной системы. Пока мы не можем дать однозначный от-

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

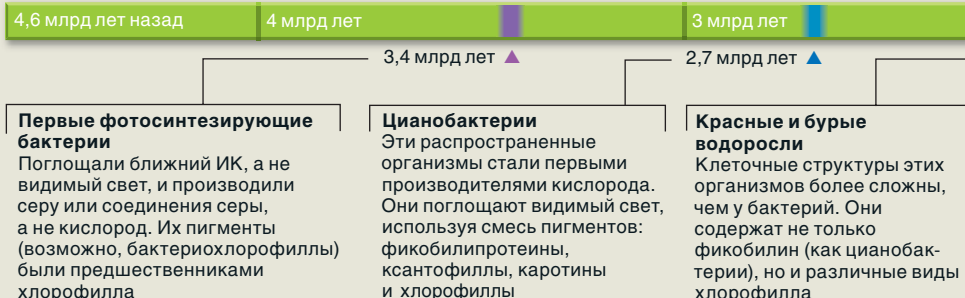
- Какого цвета могут быть внеземные растения? С научной точки зрения это отнюдь не праздный вопрос, так как цвет поверхности планеты может указать нам, есть ли на ней жизнь, а точнее – живые организмы, усваивающие энергию света своей звезды путем фотосинтеза.
- Фотосинтез приспособлен к спектру того света, который попадает на организм. Фактически это спектр излучения родительской звезды, частично поглощенного в атмосфере планеты и, для водных существ, в жидкой воде.
- Свет любой длины волны, от темно-фиолетового до инфракрасного, может поддерживать фотосинтез. Вблизи звезд более горячих и молодых, чем наше Солнце, растения должны усваивать голубой свет, а сами будут иметь окраску от зеленой до желтой и красной. Планеты, обращающиеся вокруг более холодных звезд, таких как красные карлики, получают меньше видимого света, и растения на них, вынужденные поглощать как можно больше излучения, окажутся черными.

ЭВОЛЮЦИЯ ФОТОСИНТЕЗА НА ЗЕМЛЕ

Фотосинтез возник в истории Земли рано. Скорость его появления позволяет предположить, что это не было счастливым случаем, и он может возникнуть и на других планетах. Выделяя газы, организмы меняли условия освещенности, от которых сами зависят, и поэтому должны были менять свой цвет

▼ Формирование Земли

Первые геологические свидетельства наличия кислорода в атмосфере (2,4–2,3 млрд лет) ▼



вет о вероятности существования на них жизни, но это лишь вопрос времени. В июле 2007 г., проанализировав звездный свет, прошедший сквозь атмосферу экзопланеты, астрономы подтвердили наличие на ней воды. Сейчас разрабатываются телескопы, которые позволят искать следы жизни на планетах типа Земли по их спектрам.

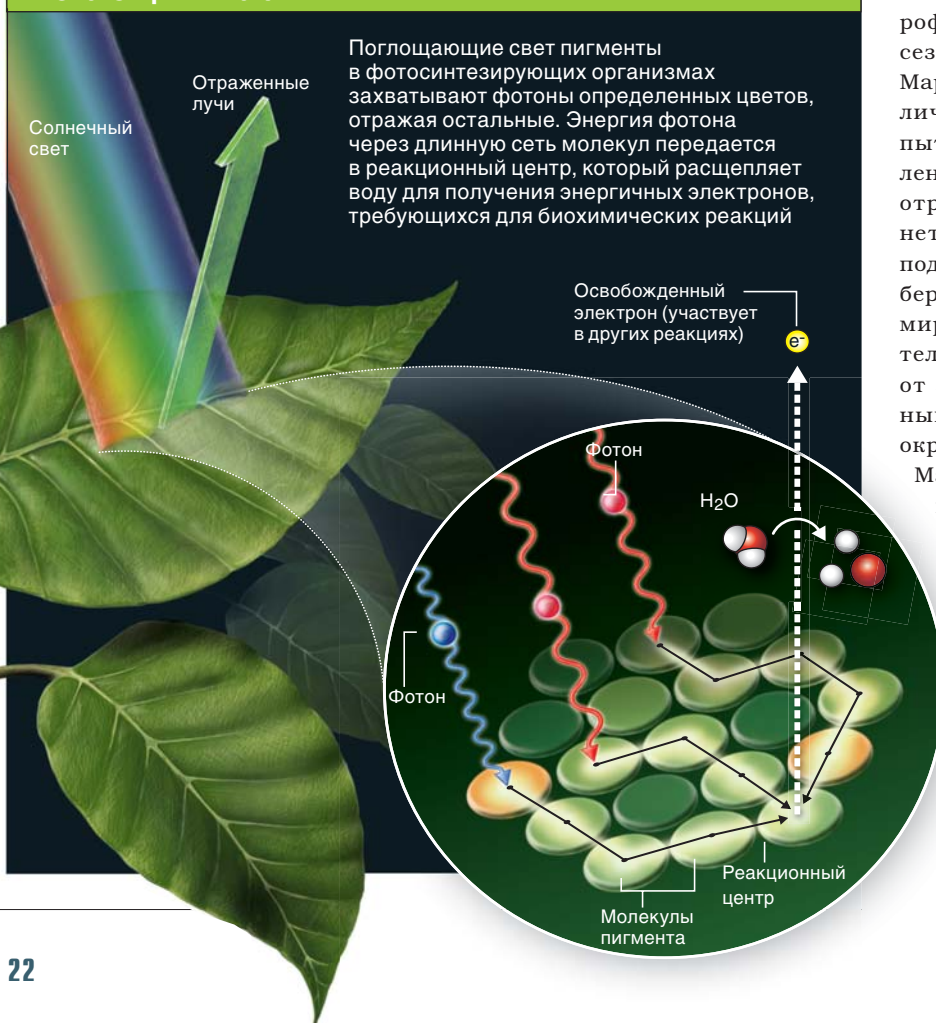
Одним из важных факторов, влияющих на спектр отраженного планетой света, может быть процесс фотосинтеза. Но возможно ли это в других мирах? Вполне! На Земле фотосинтез служит основой практически для всего живого. Несмотря на то что некоторые организмы и научились жить при повышенной температуре в среде метана и в океан-

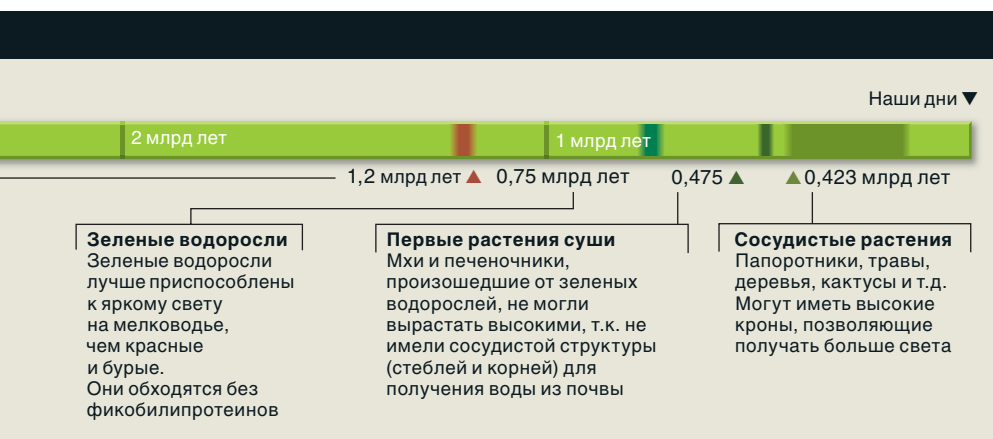
ских гидротермальных источниках, богатством экосистем на поверхности нашей планеты мы обязаны именно солнечному свету.

С одной стороны, в процессе фотосинтеза возникает кислород, который вместе с образующимся из него озоном можно обнаружить в атмосфере планеты. С другой стороны, цвет планеты может говорить о наличии на ее поверхности особых пигментов, таких как хлорофилл. Почти век назад, заметив сезонное потемнение поверхности Марса, астрономы заподозрили наличие на нем растений. Были попытки обнаружить признаки зеленых растений в спектре света, отраженного от поверхности планеты. Но сомнительность этого подхода увидел даже писатель Герберт Уэллс, который в своей «Воине миров» заметил: «Очевидно, растительное царство Марса, в отличие от земного, где преобладает зеленый цвет, имеет кроваво-красную окраску». Сейчас мы знаем, что на Марсе нет растений, а возникновение более темных участков на поверхности связано с пылевыми бурями. Сам Уэллс был убежден, что цвет Марса не в последнюю очередь определяется покрывающими его поверхность растениями.

Даже на Земле фотосинтезирующие организмы не ограничиваются зеленым цветом: некоторые растения имеют красные листья, а различные

ПОГЛОЩЕНИЕ ЛУЧЕЙ





водоросли и фотосинтезирующие бактерии переливаются всеми цветами радуги. А пурпурные бактерии кроме видимого света используют инфракрасное излучение Солнца. Так что же будет преобладать на других планетах? И как мы можем это увидеть? Ответ зависит от механизмов, с помощью которых инопланетный фотосинтез усваивает свет своей звезды, отличающийся по характеру излучения от Солнца. Кроме того, иной состав атмосферы также влияет на спектральный состав падающего на поверхность планеты излучения.

Выращивая свет

Чтобы представить, каким будет фотосинтез в других мирах, необходимо для начала понять, как растения осуществляют его на Земле. Энергетический спектр солнечного света имеет пик в сине-зеленой области, что заставило ученых долго ломать голову, почему же растения не поглощают наиболее доступный зеленый свет, а напротив — отражают его? Оказалось, что процесс фотосинтеза зависит не столько от общего количества солнечной энергии, сколько от энергии отдельных фотонов и числа фотонов, составляющих свет.

Каждый синий фотон несет больше энергии, чем красный, но Солнце преимущественно излучает красные. Растения используют синие фотоны из-за их качества, а красные — из-за их количества. Длина волны зеленого света лежит

как раз между красным и синим, но зеленые фотоны не отличаются ни доступностью, ни энергией, поэтому растения их не используют.

В процессе фотосинтеза для фиксации одного атома углерода (полученного из углекислого газа, CO_2) в молекуле сахара требуется не менее восьми фотонов, а для расщепления водород-кислородной связи

в молекуле воды (H_2O) — всего один. При этом появляется свободный электрон, необходимый для дальнейшей реакции. Всего же для образования одной молекулы кислорода (O_2) нужно разорвать четыре таких связи. Для второй реакции образования молекулы сахара требуется еще как минимум четыре фотона. Надо отметить, что фотон должен обладать некоторой минимальной энергией, чтобы принять участие в фотосинтезе.

То, каким образом растения усваивают солнечный свет — поистине одно из чудес природы. Фотосинтетические пигменты не встречаются в виде отдельных молекул. Они образуют кластеры, состоящие как бы из множества антенн, каждая из которых настроена на восприятие фотонов определенной длины волны. Хлорофилл в основном поглощает красный и синий свет, а каротиноидные пигменты, придающие осенней листве красный

ПРИЗНАКИ ЖИЗНИ

Вещества, которые помимо цвета растений могут быть признаком наличия жизни

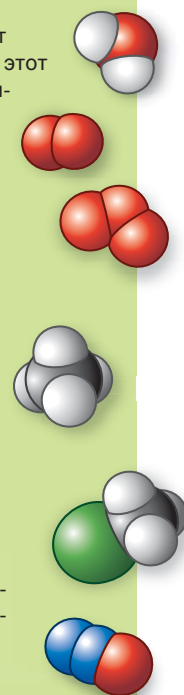
Кислород (O_2) и вода (H_2O). Даже на безжизненной планете свет родительской звезды, разрушая молекулы водяного пара, приводит к образованию небольшого количества кислорода в атмосфере. Но этот газ быстро растворяется в воде, а также окисляет породы и вулканические газы. Поэтому, если на планете с жидкой водой замечено много кислорода, значит, его производят дополнительные источники, скорее всего — фотосинтез

Озон (O_3). В стратосфере Земли ультрафиолет разрушает молекулы кислорода, которые, соединяясь, образуют озон. Вместе с жидкой водой озон — важный индикатор жизни. В то время как кислород заметен в видимом диапазоне спектра, озон виден в инфракрасных лучах, что проще обнаружить при помощи некоторых телескопов

Метан (CH_4) плюс кислород, или сезонные циклы. Сочетание кислорода и метана трудно получить без фотосинтеза. Верным признаком жизни служат также сезонные колебания концентрации метана. А на мертвой планете концентрация метана почти постоянна: она лишь медленно уменьшается по мере того как солнечный свет расщепляет молекулы

Хлорметан (CH_3Cl). На Земле этот газ образуется при горении растений (в основном при лесных пожарах) и под воздействием солнечного света на планктон и хлор в морской воде. Окисление его разрушает. Но относительно слабое излучение М-звезд может позволить этому газу накопиться в количестве, доступном для регистрации

Закаись азота (N_2O). При гниении организмов выделяется азот в форме оксида. Небиологические источники этого газа ничтожны

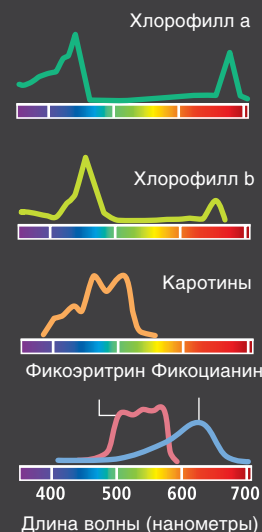


ПРОХОЖДЕНИЕ ЗВЕЗДНОГО СВЕТА

Цвет растений зависит от спектра звездного света, который астрономы легко могут наблюдать, и поглощения света воздухом и водой, которое автор и ее коллеги смоделировали, основываясь на вероятном составе атмосферы и свойствах жизни

Фотосинтетические пигменты поглощают свет в различных диапазонах спектра. Земные растения на суше используют хлорофилл *a* и *b* и смесь каротинов. Водоросли и цианеи используют фикобилипротеины и кантофиллы

Относительное поглощение



СВЕТ ЗВЕЗДЫ

Вне атмосферы планеты звездный свет имеет характерный спектр. В целом он определяется температурой поверхности звезды, но в нем есть несколько провалов из-за поглощения в атмосфере звезды

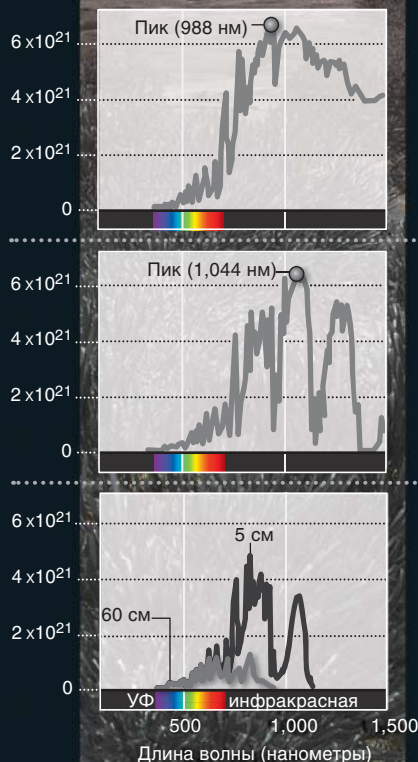
У ПОВЕРХНОСТИ

Атмосферные газы поглощают свет звезды, сдвигая в нем максимум цвета и создавая полосы поглощения — области пониженной интенсивности. Эти полосы хорошо известны для Земли (случай звезды класса *G*)

ПОД ВОДОЙ

Вода пропускает голубой свет и поглощает красный и инфракрасный свет. Здесь показаны графики для глубин 5 и 60 см (случай звезды класса *M* и планетной атмосферы, в которой мало кислорода)

Плотность потока фотонов на кв. метр в секунду



ТИП ЗВЕЗДЫ: *M* (зрелая)

МАССА*: 0,2

СВЕТИМОСТЬ*: 0,0044

ВРЕМЯ ЖИЗНИ: 500 млрд лет

ОРБИТА МОДЕЛЬНОЙ

ПЛАНЕТЫ:

0,07 астрономической

единицы

*По сравнению с Солнцем

ТИП ЗВЕЗДЫ: *M* (молодая)

МАССА*: 0,5

СВЕТИМОСТЬ*: 0,023

ВРЕМЯ ЖИЗНИ: Вспыхивает

1 млрд лет

Всего: 200 млрд лет

ОРБИТА МОДЕЛЬНОЙ

ПЛАНЕТЫ:

0,16 астрономической единицы

и желтый цвет, воспринимают другой оттенок синего. Вся собранная этими пигментами энергия доставляется к молекуле хлорофилла, находящейся в реакционном центре, где и происходит расщепление воды с образованием кислорода.

Комплекс молекул в реакционном центре может осуществлять химические реакции, только если он получает красные фотоны или эквивалентное количество энергии в какой-то другой форме. Чтобы использовать синие фотоны, пигменты «антенны» превращают их высокую энергию в более низкую, подобно тому как ряд понижающих трансформаторов уменьшает 100 тыс. вольт линии электропередач до 220 вольт стенной розетки. Процесс начинается, когда синий фотон попадает на пигмент, поглощающий синий свет, и передает энергию одному из электронов его молекулы. Когда электрон воз-

вращается в исходное состояние, он испускает эту энергию, но из-за тепловых и колебательных потерь меньше, чем поглотил.

Однако молекула пигмента отдает полученную энергию не в форме фотона, а в форме электрического взаимодействия с другой молекулой пигмента, которая способна поглотить энергию более низкого уровня. В свою очередь второй пигмент выделяет еще меньшее количество энергии, и этот процесс продолжается до тех пор, пока энергия исходного синего фотона не понизится до уровня красного.

Реакционный центр как приемный конец каскада приспособлен к тому, чтобы поглощать доступные фотоны с минимальной энергией. На поверхности нашей планеты красные фотоны — самые многочисленные и при этом обладают самой низкой энергией среди фотонов видимого спектра.

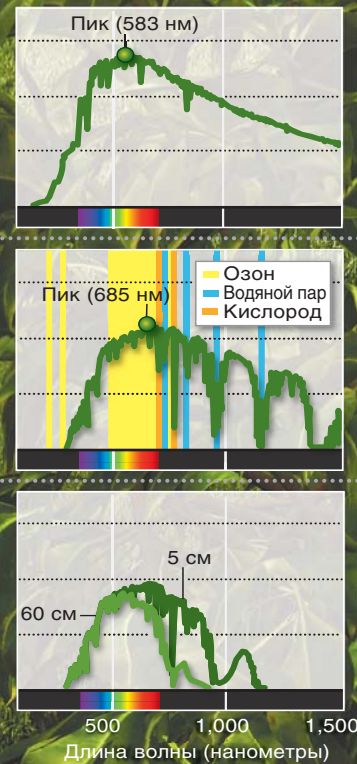
Но для подводных фотосинтезаторов красные фотоны не обязательно должны быть самыми многочисленными. Область света, используемая для фотосинтеза, меняется с глубиной, т.к. вода, растворенные в ней вещества и находящиеся в верхних слоях организмы фильтруют свет. В результате получается четкое расслоение живых форм в соответствии с их набором пигментов. Организмы из более глубоких слоев воды имеют пигменты, настроенные на свет тех цветов, которые не были поглощены слоями, лежащими выше. Например водоросли и цианеи имеют пигменты фикоцианин и фикоэритрин, поглощающие зеленые и желтые фотоны. У аноксигенных (т.е. не производящих кислород) бактерий есть бактериохлорофилл, поглощающий свет дальней красной и ближней инфракрасной (ИК) областей, который только и способен проникать в мрачные водные глубины.

ТИП ЗВЕЗДЫ: G

На графиках показан спектр солнечного света на Земле

ВРЕМЯ ЖИЗНИ: 10 млрд лет

ОРБИТА ЗЕМЛИ:
1 астрономическая единица



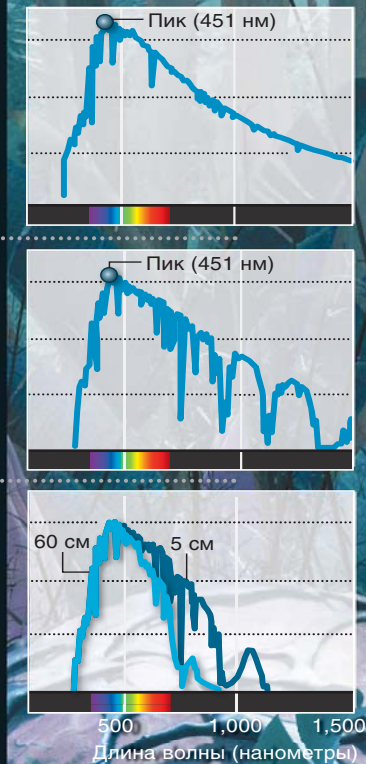
ТИП ЗВЕЗДЫ: F

МАССА*: 1,4

СВЕТИМОСТЬ*: 3,6

ВРЕМЯ ЖИЗНИ: 3 млрд лет

ОРБИТА МОДЕЛЬНОЙ
ПЛАНЕТЫ:
1,69 астрономической единицы



Организмы, приспособившиеся к слабой освещенности, обычно растут медленнее, поскольку им приходится прикладывать больше усилий для поглощения всего доступного им света. На поверхности планеты, где свет в изобилии, растениям было бы невыгодно производить лишние пигменты, поэтому они избирательно используют цвета. Такие же эволюционные принципы должны работать и в других планетных системах.

Так же как водные существа приспособились к свету, отфильтрованному водой, обитатели суши адаптировались к свету, отфильтрованному атмосферными газами. В верхней части земной атмосферы самые многочисленные фотоны — желтые, с длиной волны 560–590 нм. Количество фотонов постепенно уменьшается в сторону длинных волн и круто обрывается в сторону коротких. По мере про-

хождения солнечного света сквозь верхние слои атмосферы водяной пар поглощает ИК в нескольких полосах длиннее 700 нм. Кислород дает узкий ряд линий поглощения вблизи 687 и 761 нм. Всем известно, что озон (O₃) в стратосфере активно поглощает ультрафиолет (УФ), но он также немного поглощает и в видимой области спектра.

Итак, наша атмосфера оставляет окна, через которые излучение может достигнуть поверхности планеты. Диапазон видимого излучения ограничен с синей стороны резким

кислорода. Пик количества фотонов сдвинут от желтого к красному (примерно к 685 нм) из-за обширного поглощения озоном в видимой области.

Растения приспособлены к этому спектру, который в основном определяется кислородом. Но нужно помнить, что кислород в атмосфере поставляют сами растения. Когда первые фотосинтезирующие организмы появились на Земле, кислорода в атмосфере было мало, поэтому растения должны были использовать иные пигменты, а не хлорофилл. Только по прошествии времени, когда фотосинтез изменил состав атмосферы, хлорофилл стал оптимальным пигментом.

Надежные ископаемые доказательства фотосинтеза имеют возраст около 3,4 млрд лет, но и в более ранних ископаемых остатках есть признаки протекания данного процесса. Первые фотосинтезирующие организмы должны были быть подводными отчасти потому, что вода — хороший растворитель для биохимических реакций, а также потому, что она обеспечивает защиту от солнечного УФ-излучения, что было важно при отсутствии атмосферного озонового слоя. Такими организмами были подводные бактерии, которые поглощали инфракрасные фотоны. Их химические реакции включали водород, сероводород, железо, но не воду; следовательно, они не выделяли кислород. И только 2,7 млрд лет назад цианобактерии в океанах начали оксигенный фотосинтез с выделением кислорода. Количество кислорода и озоновый слой постепенно увеличивались, позволяя красным и бурым водорослям подниматься к поверхности. А когда для защиты

Прогнозом цвета внеземных растений заняты многие специалисты — от физиологов растений до астрономов и биохимиков

обрывом солнечного спектра в коротковолновой области и поглощением УФ озоном. Красная граница определяется линиями поглощения

от УФ достаточным оказался уровень воды на мелководьях, появились зеленые водоросли. В них было мало фикобилипротенов,



Под лучами F-звезды

и они были лучше приспособлены к яркому свету у поверхности воды. Спустя 2 млрд лет после того как кислород начал накапливаться в атмосфере, потомки зеленых водорослей — растения — появились и на суше.

Растительный мир претерпел значительные изменения — стремительно возросло разнообразие форм: от мхов и печеночников до сосудистых растений с высокими кронами, которые поглощают больше света и приспособлены к разным климатическим зонам. Конические кроны хвойных деревьев эффективно поглощают свет в высоких широтах, где солнце поч-

ти не поднимается над горизонтом. Тенелюбивые растения для защиты от яркого света вырабатывают антоцианин. Зеленый хлорофилл не только хорошо приспособлен к современному составу атмосферы, но и помогает поддерживать его, сохраняя нашу планету зеленой. Не исключено, что следующий шаг эволюции даст преимущество организму, живущему в тени под кронами деревьев и использующему фикобилины для поглощения зеленого и желтого света. Но обитатели верхнего яруса, видимо, так и останутся зелеными.

Раскрашивая мир красным

Занимаясь поиском фотосинтетических пигментов на планетах

в иных звездных системах, астрономам следует помнить, что данные объекты находятся на разных стадиях эволюции. Например, им может встретиться планета, похожая на Землю, скажем, 2 млрд лет назад. Необходимо также учитывать, что инопланетные фотосинтезирующие организмы могут обладать свойствами, не характерными для их земных «родственников». Например, они в состоянии расщеплять молекулы воды, используя фотоны большей длины волны.

На Земле самым «длинноволновым» организмом является пурпурная аноксигенная бактерия, использующая инфракрасное излучение с длиной волны около 1015 нм. Рекордсмены среди оксигенных организмов — морские цианобактерии, поглощающие при 720 нм. Не существует верхнего предела длины волны, который определялся бы законами физики. Просто фотосинтезирующей системе приходится использовать большее число длинноволновых фотонов по сравнению с коротковолновыми.

Ограничивающим фактором служит не разнообразие пигментов, а спектр света, достигающего поверхности планеты, который в свою очередь зависит от типа звезды. Астрономы классифицируют звезды на основании их цвета, зависящего от их температуры, размера и возраста. Далеко не все звезды существуют достаточно долго для того, чтобы на соседних с ними планетах могла возникнуть и развиваться жизнь. Долгоживущими являются звезды (в порядке уменьшения их температуры) спектральных классов F, G, K и M. Солнце относится к классу G. Звезды класса F больше и ярче Солнца, они горят, излучая более яркий голубой свет и сгорают примерно за 2 млрд лет. Звезды классов K и M меньше в диаметре, более тусклые, они краснее и относятся к категории долгоживущих.

Вокруг каждой звезды существует так называемая «зона жизни» — диапазон орбит, находясь на которых, планеты имеют температуру, необходимую для существования

жидкой воды. В Солнечной системе такой зоной является кольцо, ограниченное орбитами Марса и Земли. У горячих *F*-звезд зона жизни находится дальше от звезды, а у более холодных *K*- и *M*-звезд она ближе. Планеты, находящиеся в зоне жизни *F*-, *G*- и *K*-звезд, получают примерно столько же видимого света, сколько Земля получает от Солнца. Вполне вероятно, что на них могла возникнуть жизнь на основе такого же окислительного фотосинтеза, что и на Земле, хотя цвет пигментов может быть сдвинут в пределах видимого диапазона.

Звезды *M*-типа, так называемые красные карлики, представляют особый интерес для ученых, поскольку это наиболее распространенный тип звезд в нашей Галактике. Они излучают заметно меньше видимого света, чем Солнце: пик интенсивности в их спектре приходится на ближний ИК. Джон Равен (John Raven), биолог из Университета Данди в Шотландии, и Рэй Уолстенкрофт (Ray Wolstencroft), астроном Королевской обсерватории в Эдинбурге, предположили, что окислительный фотосинтез теоретически возможен и при использовании фотонов ближнего ИК. При этом организм придется использовать три или даже четыре ИК-фотона, чтобы разорвать молекулу воды, тогда как земные растения используют всего два фотона, которые можно уподобить ступеням ракеты, сообщаящим энергию электрону для осуществления химической реакции.

Молодые *M*-звезды демонстрируют мощные УФ-вспышки, губительного действия которых можно избежать только под водой. Но водные толщи поглощают и прочие части спектра, поэтому находящимся на глубине организмам будет катастрофически не хватать света. Если так, то фотосинтез на этих планетах может и не развиваться. По мере старения *M*-звезды уменьшается количество испускаемого ультрафиолета, на поздних стадиях эволюции его становится меньше, чем испускает наше Солнце. В этот период необходимость в защитном

озоновом слое отсутствует, и жизнь на поверхности планет может процветать, даже если она не производит кислород.

Таким образом, астрономам следует рассматривать четыре возможных сценария в зависимости от типа и возраста звезды.

Анаэробная океаническая жизнь. Звезда в планетной системе молодая, любого типа. Организмы могут не вырабатывать кислород. Атмосфера может состоять из других газов, таких как метан.

Аэробная океаническая жизнь. Звезда уже не молодая, любого типа. С момента возникновения окислительного фотосинтеза прошло достаточно времени для накопления кислорода в атмосфере.

Аэробная сухопутная жизнь. Звезда зрелая, любого типа. Суша покрыта растениями. Жизнь на Земле находится как раз на этой стадии.

Анаэробная сухопутная жизнь. Тусклая *M*-звезда со слабым УФ-излучением. Растения покрывают сушу, но могут и не производить кислород.

Естественно, проявления фотосинтезирующих организмов в каждом из этих случаев будут различными. Опыт съемки нашей планеты со спутников говорит о том, что заметить жизнь в глубинах океана с помощью телескопа невозможно: два первых сценария не обещают нам

цветовых признаков жизни. Единственный шанс ее обнаружить — это поиск атмосферных газов органического происхождения. Поэтому исследователям, применяющим цветовые методы поиска инопланетной жизни, придется сосредоточиться на изучении сухопутных растений с окислительным фотосинтезом на планетах вблизи *F*-, *G*- и *K*-звезд, либо на планетах *M*-звезд, но уже с другим типом фотосинтеза.

Черный — это новый зеленый

Вне зависимости от особенностей планеты фотосинтетические пигменты должны удовлетворять тем же требованиям, что и на Земле: поглощать фотоны с наименьшей длиной волны (высокоэнергичные), с наибольшей длиной волны (которые использует реакционный центр) или наиболее доступные. Чтобы понять, как тип звезды определяет цвет растений, пришлось

Растения на планетах вблизи тусклых звезд вынуждены поглощать весь спектр видимого и инфракрасного света, поэтому они могут показаться нам черными

объединить усилия исследователей разных специальностей.

Мартин Коэн (Martin Cohen), астроном из Калифорнийского университета в Беркли, собрал данные об *F*-звезде (сигма Волопаса), *K*-звезде (эпсилон Эридана), активно вспыхивающей *M*-звезде (*AD* Льва) и гипотетической спокойной *M*-звезде с температурой 3100 К. Астроном Антигона Сегура (Antigona Segura) из Национального автономного университета в Мехико прове-

ОБ АВТОРЕ

Нэнси Цзян (Nancy Y. Kiang) — биометеоролог из Годдардовского института космических исследований NASA в Нью-Йорке. Она специализируется в компьютерном моделировании взаимодействия экосистем с атмосферой, которое помогает управлять климатом. Кроме того, как член Виртуальной планетной лаборатории, входящей в Институт астробиологии NASA, она изучает возможности обнаружения жизни на других планетах. А еще она снимает кино: ее короткометражный фильм «Единство» показывали на фестивале.

ИСКАТЕЛИ ПЛАНЕТ

Европейское космическое агентство (ESA) планирует в ближайшие 10 лет запустить аппарат «Дарвин» для изучения спектров экзопланет земного типа. «Искатель землеподобных планет» NASA будет делать то же самое, если агентство получит финансирование. Аппараты *COROT*, запущенный ESA в декабре 2006 г., и «Кеплер», намеченный NASA к запуску в 2009 г., созданы для поиска слабого уменьшения блеска звезд при прохождении перед ними планет земного типа. Аппарат *NASA SIM* будет искать слабые колебания звезд под влиянием планет



ИСКАТЕЛЬ ЗЕМЛЕПОДОБНЫХ ПЛАНЕТ

ла компьютерное моделирование поведения землеподобных планет в зоне жизни вокруг этих звезд. Используя модели Александра Павлова из Аризонского университета и Джеймса Кастинга (James Kasting) из Пенсильванского университета, Сегура изучила взаимодействие излучения звезд с вероятными компонентами атмосфер планет (полагая, что вулканы на них выбрасывают те же газы, что и на Земле), пытаясь выяснить химический состав атмосфер как лишенных кислорода, так и с его содержанием, близким к земному.

Используя результаты Сегура, физик из Лондонского университетского колледжа Джованна Тинетти (Giovanna Tinetti) рассчитала поглощение излучения в атмосферах планет с помощью модели Дэвида Криспа (David Crisp) из Лаборатории реактивного движения

в Пасадене (Калифорния), применявшейся для оценки освещения солнечных панелей марсоходов. Интерпретация этих вычислений потребовала совместных усилий пяти специалистов: микробиолога Джанет Сиферт (Janet Siefert) из Университета Райса, биохимиков Роберта Бланкеншипа (Robert Blankenship) из Вашингтонского университета в Сент-Луисе и Говинджи (Govindjee) из Иллинойского университета в гг. Эрдана и Шампейн, планетолога Виктории Медоуз (Victoria Meadows) из Университета штата Вашингтон и меня — биометеоролога из Годдардовского института космических исследований NASA.

Мы пришли к выводу, что вблизи звезд класса *F* поверхности планет преимущественно достигают голубые лучи с пиком на 451 нм. Около *K*-звезд пик находится на 667 нм, это красная область спектра, что напоминает ситуацию на Земле. При этом важную роль играет озон, делая свет *F*-звезд более голубым, а свет *K*-звезд более красным, чем он есть на самом деле. Получается, что пригодное для фотосинтеза излучение в данном случае лежит в видимой области спектра, как и на Земле.

Таким образом, растения на планетах вблизи *F*- и *K*-звезд могут иметь почти тот же цвет, что и земные. Но у *F*-звезд поток богатых энергией голубых фотонов слишком интенсивен, поэтому растения должны хотя бы частично их отражать, используя экранирующие пигменты наподобие антоцианина, что придаст растениям голубоватую окраску. Впрочем, они могут использовать для фотосинтеза только голубые фотоны. В этом случае отражаться должен весь свет в диапазоне от зеленого до красного. Это приведет к характерному голубому обрыву в спектре отраженного света, что несложно будет заметить с помощью телескопа.

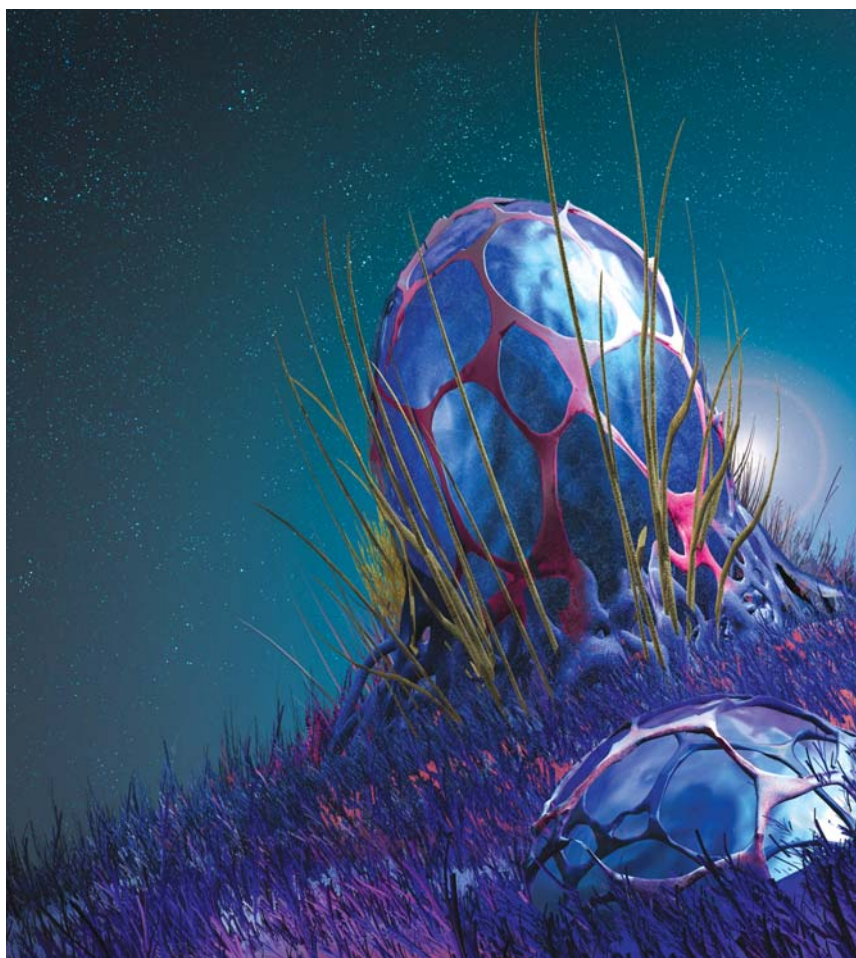
Широкий диапазон температур у звезд класса *M* предполагает разнообразие цвета их планет. Обращаясь вокруг спокойной *M*-звезды, планета получает вдвое мень-

ше энергии, чем Земля от Солнца. И хотя для жизни этого, в принципе, достаточно — это раз в 60 больше, чем требуется тенелюбивым растениям на Земле, — большинство фотонов, идущих от этих звезд, относятся к ближней ИК-области спектра. Но эволюция должна способствовать появлению разнообразных пигментов, способных воспринимать весь спектр видимого и инфракрасного света. Поглощающие практически все излучение растения могут выглядеть даже черными.

Маленькая фиолетовая точка

История развития жизни на Земле показывает, что ранние морские фотосинтезирующие организмы на планетах вблизи звезд классов *F*, *G* и *K* могли бы жить в первичной бескислородной атмосфере и развить систему оксигенного фотосинтеза, что позже привело бы к появлению наземных растений. Со звездами класса *M* ситуация сложнее. Результаты наших вычислений свидетельствуют о том, что оптимальное место для фотосинтезаторов находится на 9 м под водой: слой такой глубины задерживает губительный ультрафиолет, но пропускает достаточно видимого света. Конечно, мы не заметим эти организмы в наши телескопы, но именно они могли бы стать основой сухопутной жизни. В принципе, на планетах вблизи *M*-звезд растительная жизнь, используя различные пигменты, может быть почти столь же разнообразной, как и на Земле.

Но позволят ли будущие космические телескопы увидеть следы жизни на этих планетах? Ответ зависит от того, каково будет соотношение водной поверхности и суши на планете. В телескопы первого поколения планеты будут выглядеть как точки, о детальном изучении их поверхности не может быть речи. Все, что ученые получают — это суммарный спектр отраженного света. На основе своих вычислений Тинетти утверждает, что для идентификации растений по этому спектру не менее 20% поверхности планеты



должны быть сушей, покрытой растениями и не закрытой облаками. С другой стороны, чем больше площадь морей, тем больше кислорода выделяют в атмосферу морские фотосинтезаторы. Поэтому чем ярче выражены пигментные биоиндикаторы, тем сложнее заметить кислородные биоиндикаторы, и наоборот. Астрономы смогут обнаружить либо те, либо другие, но не оба сразу.

Если космический телескоп зафиксирует темную полосу в спектре отраженного света какой-либо планеты, и эта полоса будет соответствовать одному из предсказанных цветов, то сидящий за монитором телескопа человек окажется первым, кто увидит следы живого на других планетах. Конечно, необходимо будет исключить все прочие интерпретации: например планета может быть покрыта цветными минералами. Сейчас мы ожидаем,

что цвет растений на других планетах ограничивается зеленым, желтым и оранжевым. К сожалению, сказать что-либо точнее мы пока не можем. На Земле растения имеют характерную окраску благодаря хлорофиллу, что позволяет нам замечать с искусственных спутников области, покрытые растениями или водорослями. Будут ли растения на других планетах иметь столь же характерные свойства, мы пока не знаем.

Наличие жизни на других планетах — настоящей жизни, а не только ископаемых останков или микробов, с трудом выживающих в экстремальных условиях, — может быть обнаружено в самом ближайшем будущем. Но какие из звезд мы должны изучать в первую очередь? Сможем ли мы зарегистрировать спектры планет, расположенных близко к звездам, что особенно

актуально в случае *M*-звезд? В каких диапазонах и с каким разрешением должны наблюдать наши телескопы? Понимание основ фотосинтеза поможет нам создать новые приборы и интерпретировать полученные данные. Проблемы такой сложности могут быть решены только на стыке различных наук. Пока мы находимся лишь в начале пути. Сама возможность поиска внеземной жизни зависит от того, насколько глубоко мы понимаем основы жизни здесь, на Земле. ■

Перевод: А.В. Сурдина

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Spectral Signatures of Photosynthesis II: Coevolution with Other stars and the atmosphere on Extrasolar Worlds. Nancy Y. Kiang, Antígona Segura, Giovanna Tinetti, Govindjee, Robert E. Blankenship, Martin Cohen, Janet Siefert, David Crisp and Victoria S. Meadows in *Astrobiology*, Special Issue on M Stars, Vol. 7, No. 1, pages 252–274; February 1, 2007. http://pubs.giss.nasa.gov/docs/2007/2007_Kiang_etal_2.pdf
- Water Vapour in the Atmosphere of a Transiting Extrasolar Planet. Giovanna Tinetti, Alfred Vidal-Madjar, Mao-Chang Liang, Jean-Philippe Beaulieu, Yuk Yung, Sean Carey, Robert J. Barber, Jonathan Tennyson, Ignasi Ribas, Nicole Allard, Gilda E. Ballester, David K. Sing and Franck Selsis in *Nature*, Vol. 448, pages 169–171; July 12, 2007. www.arxiv.org/abs/0707.3064
- Виртуальная планетная лаборатория: <http://vpl.astro.washington.edu>
- Журнал *Astrobiology*: www.astrobio.net
- Тихов Г.А. Шестьдесят лет у телескопа. М.: Детгиз, 1959.
- Голдсмит Д., Оуэн Т. Поиски жизни во Вселенной. М.: Мир, 1983.
- Проблема поиска жизни во Вселенной. М.: Наука, 1986.
- Шкловский И.С. Вселенная, жизнь, разум. М.: Экология и жизнь, 2006.
- Джонс Б.У. Жизнь в Солнечной системе и за ее пределами. М.: Мир, 2007.