Рене Хеллер

АСТРОНОМИЯ

ЛУЧШЕ, ЧЕМ ЗЕМЛЯ

Лучшими из миров во всей Вселенной могут оказаться планеты, совершенно непохожие на нашу

Illustration by Ron Miller

Огромная каменная сверхпригодная для жизни планета, которая обращается вокруг звезды меньше Солнца, может оказаться как похожей на Землю, так и совершенно иной: ее ландшафт скорее всего будет сглаженным из-за большей силы тяжести, а растения будут не зелеными, а темными, лучше поглощающими тусклый свет звезды

ОБ АВТОРЕ

Рене Хеллер (Rene Heller) — доктор наук, работающий в Институте происхождения Университета Макмастера в провинции Онтарио, Канада, и участник Канадской астробиологической обучающей программы. Занимается исследованием процесса образования экзопланет, вопросами их обнаружения, эволюции орбит и обитаемости. Неофициально признан лучшим в мире поваром немецкого происхождения — специалистом по приготовлению рисового пудинга.

Живем ли мы на лучшей в мире планете? Немецкий философ и математик Готфрид Вильгельм Лейбниц считал именно так: в 1710 г. он писал, что наша планета со всеми ее изъянами — самое прекрасное место на свете. Мысль Лейбница открыто высмеяли как ненаучную: его упрекали в том, что он принимает желаемое за действительное. Наиболее отличился в этом французский писатель Вольтер в своей философской повести «Кандид, или Оптимизм». Но Лейбница поддерживала по меньшей мере одна группа ученых — астрономы, которые на протяжении многих десятилетий изучали пространство за пределами Солнечной системы и рассматривали Землю как золотой стандарт.

Поскольку обитатели Земли — единственная известная нам форма жизни, это дает некоторые основания считать нашу планету эталоном при поисках жизни где-либо еще, например в наиболее сходных с земными областях на Марсе или спутнике Юпитера Европе, на котором есть вода. Однако с открытием потенциально обитаемых планет, обращающихся вокруг других звезд (их называют экзопланетами), этот геоцентрический подход вызывает сомнение.

За последние 20 с небольшим лет астрономы открыли более 1,8 тыс. экзопланет, а согласно статистике, в нашей Галактике их не менее 100 млрд. Из миров, обнаруженных к настоящему времени, лишь немногие чем-то напоминают Землю. Они отличаются от нашей планеты параметрами орбит, размерами, составом и строением, а кроме того обращаются вокруг самых разнообразных звезд, в том числе существенно меньших по размеру и значительно уступающих по светимости нашему Солнцу. Многообразие свойств экзопланет наводит на мысль, что Земля действительно может быть не лучшим местом для жизни. Условия на некоторых экзопланетах, существенно отличающихся от нашей, могут способствовать формированию и поддержанию стабильной биосферы. И, возможно, именно на них следует искать внеземную и внесолнечную жизнь.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Астрономы занимаются поисками похожих на Землю планет, обращающихся вокруг подобных нашему Солнцу звезд.
- Обнаружение похожих на Землю планет находится на пределе современных технических возможностей.
- Обнаружить крупные сверхземли, обращающиеся вокруг небольших звезд, легче, к тому же они, возможно, представляют собой планеты наиболее распространенного типа.
- Согласно новейшим гипотезам, такие системы — наряду с массивными спутниками газовых планет-гигантов — могут быть сверхпригодными для жизни, т.е. более пригодными, чем наша планета.

Несовершенная планета

Конечно, у нашей планеты множество достоинств, благодаря которым она представляется идеальным местом для существования жизни. Земля обращается вокруг звезды среднего возраста, которая стабильно сияет на протяжении миллиардов лет, создав условия для зарождения и поддержания жизни. Значительную часть поверхности планеты занимают океаны, что объясняется тем, что она движется вокруг Солнца в пределах так называемой зоны жизни, узкой полосы, где излучение звезды не слишком велико, но и не очень слабо. На планетах, находящихся ближе к Солнцу, вода превращается в пар, а дальше — в лед. Кроме того, у Земли подходящий для жизни размер: она достаточно велика, чтобы благодаря гравитации удерживать стабильную атмосферу, но достаточно мала, чтобы под действием той же гравитации плотный, непроницаемый для света покров не окутал планету. Поддержанию жизни благоприятствуют размеры Земли и ее твердое состояние, а также регулирующая климат тектоника плит и магнитное поле, которое защищает биосферу от опасной космической радиации.

Однако чем глубже ученые исследуют способность нашей планеты к поддержанию жизни, тем яснее становится, что она для этого не очень-то подходит. Сегодня относительно большая часть ее территории остается безжизненной — вспомним о засушливых пустынях, скудных питательными веществами глубинах океанов и скованных мерзлотой полярных областях. К тому же обитаемость Земли со временем меняется. Так, в течение большей части каменноугольного периода, примерно 350–300 млн лет назад, атмосфера планеты была теплее, в ней содержалось больше паров воды и кислорода, чем сейчас. В морях процветали ракообразные, рыбы и кораллы, континенты были покрыты пышными лесами, а насекомые и другие наземные существа достигали огромных размеров. Земля каменноугольного периода была способна обеспечить существование значительно большего количества биомассы, чем в наши дни, а это означает, что сегодня она менее обитаема, чем в древние времена.

Далее: мы знаем, что в будущем Земля станет еще менее пригодной для жизни. Примерно через 5 млрд лет Солнце израсходует свое водородное топливо, в его недрах начнется превращение гелия в углерод, ядро сожмется, а внешние слои расширятся — наша звезда превратится в красный гигант, который испепелит Землю. Однако жизнь на Земле угаснет задолго до этого. По мере того как Солнце сжигает водород, температура его ядра постепенно возрастает, что сопровождается медленным увеличением светимости — примерно на 10% за миллиард лет. Это означает, что зона жизни со временем отодвигается все дальше от нашего светила и в конце концов окажется за пределами орбиты Земли. Что еще хуже, согласно недавно проведенным расчетам, Земля находится не в середине этой зоны, а вблизи ее внутреннего края, уже приближаясь к границе перегрева.

Следовательно, в течение примерно полумиллиарда лет наше Солнце будет светить так ярко, что климат на Земле будет становиться все более неустойчивым, представляющим угрозу существованию сложных многоклеточных форм жизни. Примерно через 1,75 млрд лет наша планета нагреется настолько, что ее океаны испарятся, исключив существование любых, даже простейших форм жизни. Фактически времена расцвета жизни на Земле миновали, и биосфера быстро движется к исчезновению. Все говорит о том, что уже сейчас наша планета обитаема лишь в самой малой степени.

В поисках пригодного для жизни мира

В 2012 г. я впервые задумался над тем, как могут выглядеть миры, более пригодные для жизни; в то время я занимался поисками признаков жизни на массивных спутниках газовых планет-гигантов. Обращающийся вокруг Юпитера Ганимед — самый крупный спутник во всей Солнечной системе, масса которого составляет всего 2,5% массы Земли, — слишком мал, чтобы стабильно удерживать атмосферу, подобную той, что окружает нашу планету. Но я понимал, что в других планетных системах могут существовать спутники, сравнимые по массе с Землей, которые обращаются вокруг газовых гигантов и находятся в пределах зоны жизни своих звезд, и их атмосфера может быть похожа на земную.

Такие массивные экзоспутники могут оказаться пригодными для жизни благодаря наличию разнообразных источников энергии, необходимых для существования биосферы. В отличие от Земли, жизнь на которой почти целиком зависит от Солнца, сверхпригодные экзоспутники могут получать свет и тепло, испускаемые и отражаемые от их ближайших планет-гигантов, и даже существовать за счет создаваемого этими планетами гравитационного поля. На спутник, обращающийся вокруг гигантской планеты, действуют периодические приливные силы, которые деформируют его то в одном, то в другом направлении, порождая трение, которое нагревает спутник изнутри. Возможно, именно под действием этого приливного нагрева под поверхностью Европы, спутника Юпитера, и Энцелада, спутника Сатурна, образовались океаны. Это говорит о том, что разнообразие источников энергии может оказаться палкой о двух концах для массивных экзоспутников, поскольку даже незначительное нарушение равновесия между перекрывающимися источниками энергии способно превратить мир в непригодный для обитания.

Земля и сверхземли

ПРЕИМУЩЕСТВА СВЕРХЗЕМЕЛЬ КАК МЕСТ СУЩЕСТВОВАНИЯ ЖИЗНИ

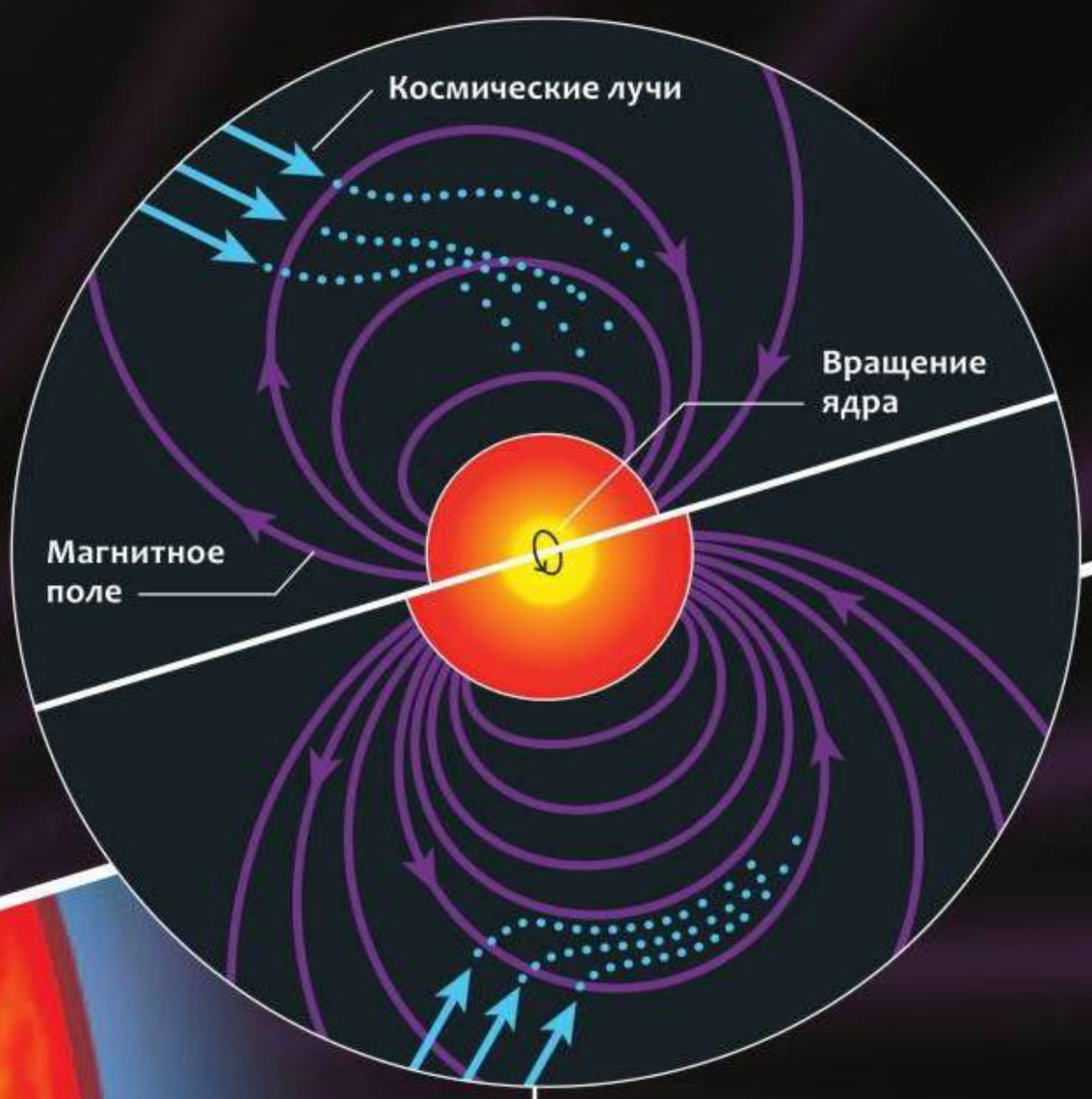
Астрономы ищут признаки жизни в окрестности других звезд, обращая особое внимание на сверхземли — планеты, до десяти раз раз более массивные, чем наша, но меньшие, чем газовые гиганты, и, по-видимому, твердые. Особый интерес представляют сверхземли, в два раза превышающие Землю по массе, поскольку они обладают рядом особенностей, делающих их потенциально сверхпригодными для жизни, т.е. более «дружественными», чем наша планета.

Жизнь на Земле

Во многих отношениях наша планета представляется оптимальным местом для возникновения и поддержания жизни. Она находится на удачном расстоянии от стабильной звезды среднего возраста, на ней есть глубоководные океаны, покрывающие большую часть поверхности, и обширные континенты, пригодные для жизни. Планета достаточно велика, чтобы стабильно удерживать атмосферу, но и достаточно мала, чтобы на ней не могли накапливаться губительные для жизни газы. Земля относится к категории каменных планет, в ее недрах сохраняется значительное количество тепла для поддержания стабилизирующей климат тектоники плит и защищающего планету магнитного поля.

Жизнь в сверхпригодном мире

Каменная сверхпригодная сверхземля примерно вдвое массивнее нашей планеты; из-за большей силы тяжести окутывающая ее атмосфера плотнее, вследствие интенсивного выветривания горы не слишком высокие, рельеф поверхности плоский. Это скорее всего «островной мир», а не привычный нам мир с глубокими океанами и огромными континентами. Возможно, такая география более благоприятна для жизни, если вспомнить, что разрозненные земные архипелаги — это места наибольшего биологического разнообразия на планете. И все же разгадку тайны сверхпригодности для жизни сверхземли следует искать в недрах самой планеты.



Неспокойное ядро

Каменная сверхземля, вдвое превосходящая по массе нашу планету, содержит значительно больше внутреннего тепла, сохранившегося еще с эпохи формирования и поддерживаемого распадом радиоактивных элементов в мантии. Под действием этого тепла у сверхземли могло образоваться вращающееся расплавленное ядро, подобное тому, что есть у нашей Земли, но произошло это гораздо раньше. Процессы, протекающие в жидком ядре, порождают вокруг планеты мощное магнитное поле, которое защищает ее атмосферу и поверхность от высокоэнергичных космических лучей.

Круговорот углерода

Большое количество конвективного тепла (*оранжевые стрелки*) в недрах сверхземли поддерживает вулканическую деятельность и тектонику плит дольше, чем это происходит на Земле. Эти процессы необходимы для регуляции круговорота углерода на планете и стабилизации климата. При извержении вулканов в атмосферу выбрасывается раскаленный диоксид углерода, который затем вместе с осадками проникает в горные породы. Под действием тектоники плит эти породы опускаются во внутренние слои планеты, откуда диоксид углерода при извержении вулканов снова попадает в атмосферу. Согласно существующим моделям, сверхземли, от двух до пяти раз превышающие по массе нашу планету, могут оказаться слишком большими для поддержания тектоники плит, поэтому планеты, примерно вдвое более массивные, чем Земля, оказываются наиболее подходящими из всех сверхземель кандидатами на роль сверхпригодных для жизни.

Стабильность сияния звезды

Обитаемость планеты — вне зависимости от ее особенностей — определяется прежде всего характеристиками звезды, вокруг которой она обращается. Звезды меньшие нашего Солнца расходуют свое ядерное топливо более экономно и светят значительно дольше, так что у их планет гораздо больше времени для формирования стабильной биосферы. В отличие от Солнца, продолжительность жизни которого оценивается в 10 млрд лет, крошечные тусклые звезды, так называемые *K*-карлики, светят многие десятки миллиардов лет, поддерживая жизнь. Таким образом, маленькие сверхземли, обращающиеся вокруг *K*-карликов в пределах зоны жизни, могут оказаться идеальным местом для процветания жизни.

Illustration by Ron Miller (planets) and Jen Christiansen (inset)

Солнце перестает быть источником жизни?

СУДЬБА ОБИТАЕМЫХ ПЛАНЕТ

За время существования человечества зона жизни звезды остается неизменной. Но звезды светят на протяжении миллиардов лет, и с течением времени эта зона отдаляется от них, оставляя обитаемые миры за пределами своей внутренней границы. Сегодня Земля находится вблизи внутреннего края зоны жизни Солнца, и примерно через 1,75 млрд лет на нашей планете станет слишком жарко, чтобы вода могла находиться в жидком состоянии. Маленькие звезды светят тусклее и дольше, чем Солнце, их зоны жизни отдаляются от светила в течение десятков миллиардов лет, что потенциально продлевает время существования жизни на их планетах.

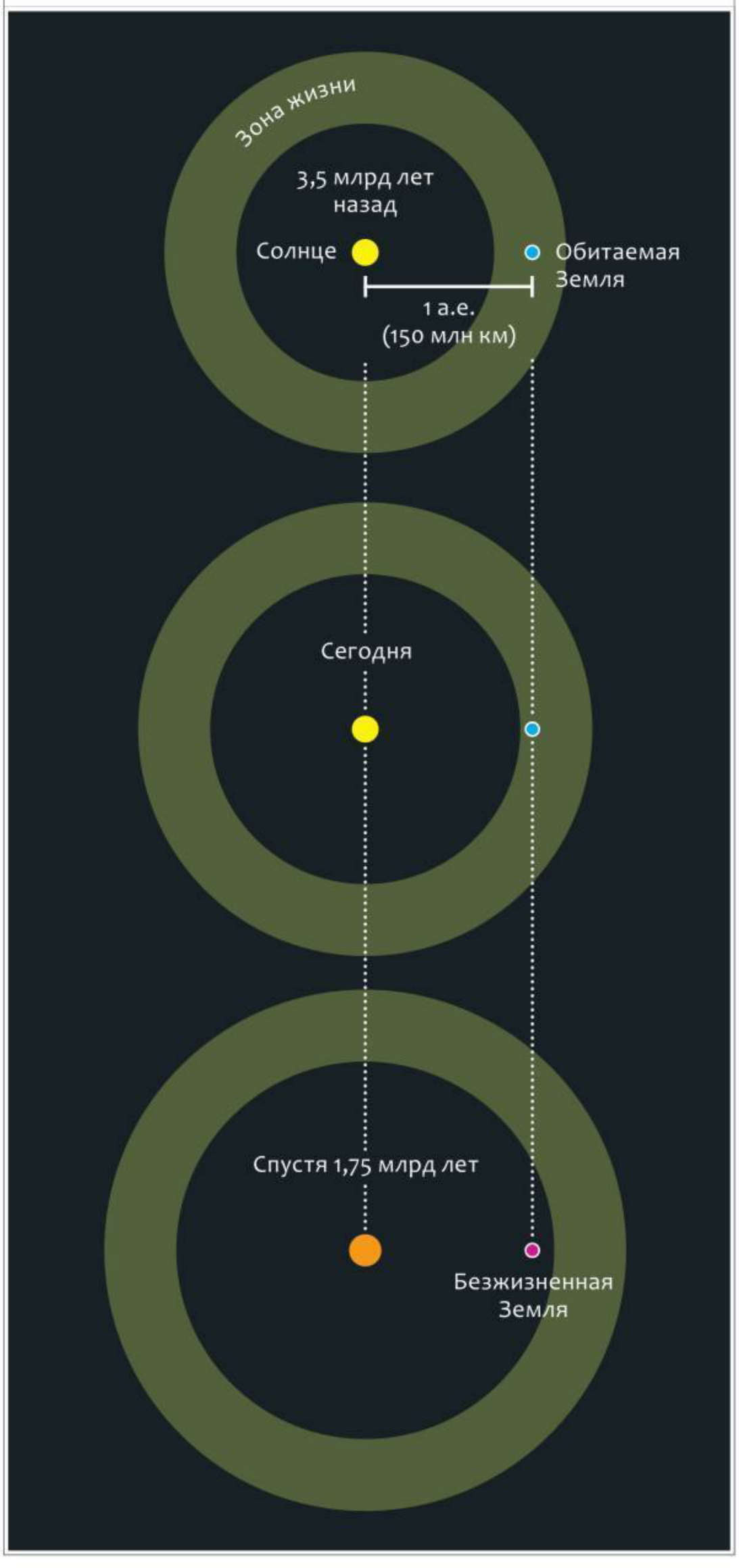


Illustration by Jen Christiansen

Пока с достоверностью не обнаружено ни одного экзоспутника — ни обитаемого, ни безжизненного, но рано или поздно это случится. Свидетельство тому — архивные данные, полученные с помощью обсерваторий, например принадлежащего *NASA* космического телескопа «Кеплер». Сегодня о существовании таких объектов и наличии жизни на них можно говорить лишь гипотетически.

С другой стороны, не исключено, что сверхпригодные для жизни планеты уже находятся в нашем каталоге экзопланет и космических тел, претендующих на этот статус. Все первые экзопланеты, открытые в середине 1990-х гг., оказались газовыми гигантами, сравнимыми по массе с Юпитером, которые обращаются слишком близко к своим звездам, чтобы на них могла зародиться жизнь. Но по мере совершенствования техники поиска стали обнаруживаться существенно меньшие планеты, которые движутся по удаленным и более подходящим для жизни орбитам. Большинство планет, открытых в последние несколько лет, так называемые сверхземли, до десяти раз превышают нашу планету по массе, их диаметры варьируют от диаметра Земли до диаметра Нептуна. С виду они практически ничем не отличаются от тех, что обращаются вокруг других звезд, однако вокруг Солнца не движется ни одной, похожей на них, что делает Солнечную систему уникальной.

Вероятно, многие из самых крупных и массивных сверхземель окутаны толстой плотной атмосферой, отчего они похожи скорее на мини-Юпитеры, чем на огромного размера Землю. Но некоторые самые маленькие из этих миров вдвое больше Земли и, по-видимому, имеют такой же состав, как Земля, т.е. они железокаменные. А если они движутся вокруг своих звезд в пределах зоны жизни, то на их поверхности в изобилии присутствует вода в жидком состоянии. Теперь мы знаем, что некоторое число потенциально твердых сверхземель обращается вокруг так называемых *M*-карликов и *K*-карликов — звезд, меньших по размерам, не таких ярких и гораздо более старых, чем наше Солнце. Как показали результаты моделирования, выполненного недавно мною совместно с коллегой Джоном Армстронгом (John Armstrong), физиком из Университета Вебера, отчасти по причине большой продолжительности жизни их крохотных звезд эти огромные земли представляются наиболее вероятными кандидатами на роль сверхпригодных для жизни миров.

Преимущества долголетия

Моя работа началась с осознания того, что долгоживущая звезда-хозяин — это основополагающий элемент условий для жизни; в конце концов, маловероятно, что биосфера планеты переживет гибель звезды. Нашему Солнцу 4,6 млрд

лет, и оно находится примерно в середине своего жизненного пути. Если бы Солнце было немного меньше по размеру, оно представляло бы собой гораздо более долгоживущий *K*-карлик. Такие карлики обладают меньшим суммарным запасом ядерного топлива, чем более массивные звезды, но они используют его более экономно, что продлевает их жизнь. *K*-карлики среднего возраста, которых мы наблюдаем сегодня, на миллиарды лет старше Солнца и будут продолжать светить еще миллиарды лет после того, как наша звезда погаснет. Таким образом, у любой биосферы их потенциальных планет гораздо больше времени для эволюции и достижения биоразнообразия.

Свет *K*-карлика кажется более красным, чем исходящий от Солнца, потому что максимум эффективности в его спектре сдвинут в сторону инфракрасного диапазона, однако это не должно препятствовать фотосинтезу. *M*-карлики меньше по размеру, они более экономно расходуют водородное топливо и могут стабильно светить еще сотни миллиардов лет, но этот свет так слаб, что их зоны жизни располагаются очень близко к звезде, поэтому движущиеся вокруг них планеты подвержены воздействию звездных вспышек и других опасных явлений. Отличаясь большей длительностью эволюции, чем наше Солнце, но не такие тусклые, как *M*-карлики, *K*-карлики, возможно, наиболее благоприятны для возникновения и процветания рядом с ними жизни.

Сегодня некоторые из этих звезд-долгожителей могут оказаться гаванью для твердых планет типа «сверхземля», которые на несколько миллиардов лет старше Солнечной системы. Возможно, жизнь зародилась в этих планетных системах задолго до появления нашего Солнца, процветая и развиваясь в течение миллиардов лет до того, как в первобытном океане юной Земли, похожем на горячий бульон, появилась первая органическая молекула. Что меня особенно вдохновляет, так это потенциальная способность биосферы древних миров видоизменять окружающую среду таким образом, что это приводит к дальнейшему улучшению условий для жизни, как это было с Землей. Особенно показательным примером тому служит произошедшая в самом начале протерозоя, около 2,4 млрд лет назад, кислородная революция, результатом которой стало появление в атмосфере Земли значительного количества свободного кислорода. Возможно, кислород начали вырабатывать океанические водоросли, что со временем привело к развитию более энергоемкого метаболизма, позволившего живым существам обзавестись более крупными, прочными и подвижными телами. Это достижение стало решающим шагом к выходу жизни из океана на сушу и постепенному распространению ее по всем континентам. Если инопланетные биосферы прошли подобный путь, мы вправе ожидать, что на планетах, обращающихся вокруг звезд-долгожителей, с возрастом жизнь стала немного более разнообразной.

Для сохранения сверхпригодности для жизни планетам, обращающимся вокруг звезд-долгожителей, необходимо обладать большей, чем у Земли, массой. Это должно предотвратить две катастрофы, с наибольшей вероятностью поджидающие каменные планеты на пути к старости. Если бы наша Земля располагалась в зоне жизни маленького K-карлика, ее внутренняя часть остыла бы задолго до смерти звезды, что исключило бы существование жизни. Под действием внутреннего тепла планеты извергаются вулканы и движутся тектонические плиты; благодаря этому происходит пополнение атмосферы диоксидом углерода — газом, вызывающим парниковый эффект. При отсутствии этих факторов содержание в атмосфере CO_2 неуклонно снижалось бы по мере того, как дожди вымывают этот газ из воздуха и он фиксируется в горных породах. В конце концов CO_2-зависимый парниковый эффект исчерпал бы себя и повысилась вероятность превращения планеты подобной Земле в необитаемый «снежный ком», где вся вода на поверхности находится в твердом состоянии.

Помимо резкого ослабления парникового эффекта охлаждение внутренних слоев стареющих горных пород может привести к исчезновению защищающего планету магнитного поля. Последнее образуется в результате вращения и конвекции вещества, составляющего раскаленное жидкое металлическое ядро, играющее роль ротора динамо-машины. Ядро находится в жидком состоянии благодаря теплу, сохранившемуся еще с эпохи формирования планеты и пополняемому распадом радиоактивных элементов. Как только запас внутреннего тепла твердой планеты иссякнет, ее ядро затвердеет, динамо-машина остановится, магнитный щит рухнет и космическая радиация и звездные вспышки начнут разрушать верхние слои атмосферы, обнажая поверхность планеты. Скорее всего, значительная часть атмосферы старых похожих на Землю планет уже рассеялась в космическом пространстве, и высокоэнергетическое излучение уничтожило все живое, что было на планете.

Твердые сверхземли, более чем вдвое превышающие по размеру нашу планету, стареют медленнее, чем Земля, поскольку сохраняют внутреннее тепло намного дольше. Однако планеты от трех до пяти раз массивнее Земли могут оказаться слишком большими, чтобы на них была возможна тектоника плит, поскольку давление и вязкость (внутреннее трение) в их мантии настолько велики, что они препятствуют образованию необходимых направленных от центра к периферии конвективных тепловых потоков. На твердых планетах, лишь вдвое более массивных, чем Земля, стабильная тектоника плит, геологические циклы и магнитное поле

должны сохраняться на несколько миллиардов лет дольше, чем это произойдет на Земле. Диаметр таких планет, вероятно, будет примерно на 25% больше земного, так что в распоряжении живых организмов окажется примерно на 56% больше территории, чем в мире, где живем мы.

Жизнь на сверхпригодных сверхземлях

Что может представлять собой сверхпригодная для жизни планета? Благодаря большей гравитации у сверхземли среднего размера должна быть немного более плотная атмосфера, чем у Земли, горы на ней будут формироваться и разрушаться быстрее. Другими словами, на такой планете воздух должен быть относительно более плотным, а рельеф плоским. Если там есть океаны, то благодаря плоскому ландшафту вода объединит многочисленные мелкие моря в несколько бассейнов, усеянных цепочками островов, в отличие от Земли, где глубоководные акватории разделены несколькими огромными континентами. Мы знаем, что биологическое разнообразие в земных океанах наиболее высоко в прибрежном мелководье, поэтому и «островной мир» может оказаться значительно благоприятнее для жизни. Эволюция изолированных островных экосистем может происходить гораздо быстрее, и это тоже должно способствовало большему биоразнообразию.

Конечно, отсутствие крупных континентов в островном мире означает, что в распоряжении сухопутных форм жизни оказывается меньше суши, чем в мире континентальном, что может отрицательно сказаться на обитаемости в целом. Но это необязательно, особенно если учесть, что центральные области континентов вполне могут представлять собой бесплодные пустыни, поскольку они удалены от океанов и до них не доходит влажный морской воздух. Более того, условия на обитаемых частях поверхности планеты существенно зависят от угла наклона ее оси относительно перпендикуляра к плоскости ее орбиты. Например, у Земли этот угол составляет примерно 23,40°, что обусловливает смену времен года и сглаживание разности температур между жаркими экваториальными и холодными полярными областями. По сравнению с Землей островной мир с благоприятным взаимным расположением оси вращения и плоскостью орбиты планеты отличался бы теплым экваториальным поясом, а также относительно теплыми, свободными ото льда полярными областями и благодаря более крупным размерам и большей общей площади поверхности мог бы выгодно отличаться в смысле суммарной площади пригодной для жизни суши от мира с огромными континентами.

Все эти соображения наводят на мысль, что сверхпригодные для жизни планеты скорее всего немного крупнее Земли, а их звезды несколько меньше и тусклее, чем Солнце. Если все сказанное верно, то это настоящая сенсация для астрономов, поскольку в межзвездном пространстве гораздо проще обнаружить и исследовать сверхземли, обращающиеся вокруг небольших звезд, чем двойников нашей системы «Земля — Солнце». Имеющиеся на сегодня статистические данные свидетельствуют о том, что на просторах нашей Галактики сверхземли, обращающиеся вокруг малых звезд, встречаются гораздо чаще, чем аналоги системы «Земля — Солнце». Похоже, теперь у астрономов появилось намного больше привлекательных мест для поисков жизни, чем это было ранее.

Здесь стоит вспомнить об обнаружении с помощью космического телескопа «Кеплер» экзопланеты *Kepler-186f* (о ее открытии было объявлено 17 апреля 2014 г). Эта предположительно каменная планета диаметром на 11% больше земного обращается вокруг *M*-карлика, находясь в пределах зоны жизни. Вероятно, ей уже несколько миллиардов лет, и, возможно, она даже старше Земли. *Kepler-186f* находится от нас на расстоянии около 500 световых лет, что сегодня и в ближайшем будущем выходит за пределы наблюдений, которые могли бы уточнить прогнозы о ее обитаемости. Пока нам известно одно: она может быть сверхпригодным для жизни островным миром.

Существуют ряд проектов, которые помогут обнаружить ближайшие к нам потенциально сверхпригодные планеты, обращающиеся вокруг небольших звезд. Самый перспективный из них — миссия *PLATO (PLAnetary Transits and Oscillations of stars)* Европейского космического агентства, запуск которого намечен на 2024 г. Такие находящиеся недалеко от нас системы могут стать основной мишенью для Космического телескопа «Джеймс Уэбб» — обсерватории, которую планируется запустить в 2018 г. Ее основная задача — поиск признаков жизни в атмосферах небольшого числа предположительно обитаемых планет. Если повезет, то в скором времени мы сможем указать место на небе, где предположительно существуют более совершенные миры. ■

Перевод: С.Э. Шафрановский

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Валенсия Д., Сасселов Д. Планеты, на которых возможна жизнь // ВМН, № 10, 2010.
- Лемоник М. Заря в далеких небесах // ВМН, № 9, 2013.
- Биллингс Л. Поиски жизни на спутниках экзопланет // ВМН, № 3, 2014.
- Больше о сверхпригодных для жизни сверхземлях см. по адресу: ScientificAmerican.com/jan2015/heller