



Жизнь и нежить в Солнечной системе

О жизни и нежити

Согласно известному определению, жизнь — это одна из форм существования материи, закономерно возникающая при определенных условиях в процессе ее развития. При этом живые организмы отличаются от неживых объектов обменом веществ, раздражимостью, способностью к размножению, росту, развитию, к различным формам движения и приспособляемостью к окружающей среде. Нежить представляет собой фантастические формы жизни, которые встречаются в преданиях, как старинных, так и вполне современных, вроде рассказов бывалых охотников, рыболовов, специалистов по ксенобиологии, уфологии и прочих достойных людей. Смелость утверждать, что оные формы жизни суть фантазии и ничего более, появляется главным образом у других достойных людей, высоко поднявших знамя борьбы со лженаукой, а остальным для того, чтобы сделать правильный вывод, явно не хватает экспериментальных данных.

Если же использовать научный подход, предложенный еще Рене Декартом в «Рассуждениях о методе» (см. «Химию и жизнь», 1980, № 9), согласно которому всякое знание должно допускать экспериментальную проверку, то следует разобраться, а в какие, собственно, виды может воплощаться эта специфическая форма материи. Для простоты исключим из рассмотрения загадочные энергетиче-

ские фантомы, плазменные формы жизни и прочие разумные кристаллы или океаны, которых фантасты за столетие бурного развития жанра наплодили в немалом количестве, и сосредоточимся на способах организации живых существ из привычных нам молекул. Различные формы такой нежити (а как еще назвать существа, наличие которых не доказано экспериментально?) следует искать уже не в изустных преданиях, а в весьма многочисленных научных статьях и книгах. Многие великие ученые задумывались о том, какой может быть жизнь на ближних к нам планетах и совсем уж далеких мирах. И достигли немалого прогресса в понимании химических основ жизни. Например, Айзек Азимов в своей знаменитой книге «Вид с высоты» еще сорок лет назад сформулировал, пожалуй, все основные возможности.

С тех пор ситуация несколько изменилась: после полетов космических кораблей ко многим планетам Солнечной системы разговоры об инопланетной нежити можно вести, опираясь на прочный фундамент научных фактов.

Энергия жизни

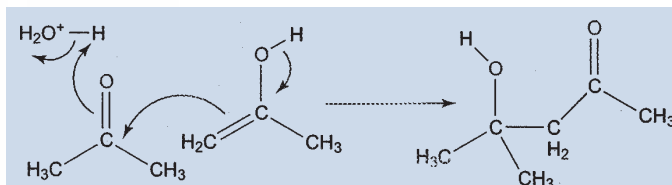
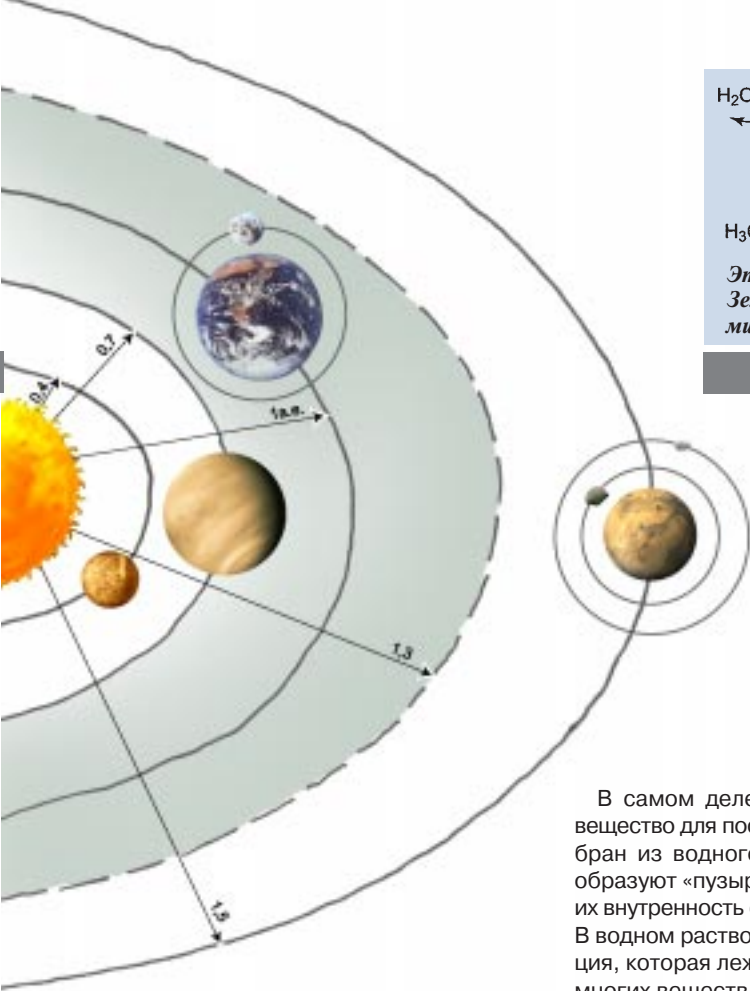
Итак, очевидно, что живой организм есть образование, помещенное в неравновесную среду, через которое проходят потоки энергии и вещества. А оно, это образование, энергию и вещество рассеивает, то есть часть затрачивает на

Кандидат
физико-математических наук
С.М.Комаров

свои нужды, а часть пропускает без изменения. Источников же энергии в неравновесном мире может быть несколько. Прежде всего — это излучение звезд, радиоактивный распад и космические лучи. Если первые два действуют на планетах, то последний наиболее актуален для межзвездных просторов. В конце концов кто сказал, что жизнь в межзвездных облаках пыли и газа невозможна? Органические вещества там есть во вполне заметных количествах, а что плотность вещества чрезвычайно мала и, стало быть, химические реакции происходят очень редко, то это скорее свидетельствует о растянутости процесса во времени, а не о его невозможности.

Что же касается первых двух источников энергии, то с жизнью вокруг них все проще: поверхность планеты Земля, покрытая буйной растительностью, которая купается в лучах Солнца, у каждого из нас перед глазами, а разнообразную жизнь вокруг черных курильщиков неоднократно наблюдали океанологи. С курильщиками, кстати, связана одна из оригинальных моделей панспермии. Представим себе планету земного типа. В ее ядре имеется достаточно много радиоактивных элементов (доставшихся в наследство от сверхновой), чтобы обеспечить жидкую магму и соответственно жидкий океан. Если эту планету гравитационное поле выбросит за пределы планетной системы, то именно вокруг черных курильщиков сохранится высокоорганизованная жизнь, которая сможет долго блуждать на «космическом корабле» планеты по просторам галактики. Кроме этих источников энергии есть еще один, речь о котором пойдет дальше.

Как бы то ни было, энергия тем или иным способом воплощается в химические вещества сложного строения. На поверхности нашей планеты эти вещества из углекислого газа и воды синтезируют растения, утилизируя солнечный свет с помощью фотосинтеза. В основе биоценоза черных курильщиков находятся хемотрофы — бактерии, которые получают энергию для синтеза нужных им веществ за счет окисления таких реакционно способных неорганических соединений, как водород, сероводород, оксиды двухвалентного железа или аммиак: они в изобилии выходят из жерла подводного вулкана. Ну а когда потом



Эта реакция — одна из ключевых в метаболизме жителей Земли. И возможно, гипотетических обитателей других миров с жидкой водой



РАССЛЕДОВАНИЕ

Пояс жизни находится рядом с планетами земной группы

В самом деле, липиды — идеальное вещество для построения клеточных мембран из водного раствора: они в воде образуют «пузырьки», надежно защищая их внутренность от внешних воздействий. В водном растворе прекрасно идет реакция, которая лежит в основе биосинтеза многих веществ, а именно превращения карбонильной группы C=O и слияния двух коротких молекул в одну длинную с общим углеродным скелетом. Цепочки ДНК в воде становятся теми самыми полианионами, которые благодаря периодически расположенным зарядам одного и того же знака не перепутываются, а комплиментарные участки при этом объединяются водородными связями в единую молекулу-спираль. При температуре жидкой воды не разрываются связи внутри углеродного скелета. Вдобавок вода обладает уникальным свойством, которого нет у других растворителей: при замерзании ее плотность уменьшается. Только в водоеме лед плавает над жидкостью, давая возможность жизни спастись от замораживания. Аммиачное или этановое (о ко-

кто-нибудь поедает эти растения или бактерии, получается пищевая цепь, что приводит к многообразной жизни. Помимо энергии, которая запасена в питательных веществах, живому существу нужно еще нагреть свое тело до такой температуры, чтобы в нем шли необходимые химические реакции. Делать это можно двумя способами. Либо получать тепло от того же источника энергии, откуда берутся вещества: от звезды или внутренностей планеты. Либо, как это делает венец творения и его ближайшие родственники на эволюционном древе, — только за счет разложения потребленных веществ, созданных другими организмами. Скорее всего, такая же схема рассеяния потока энергии будет верна и для всякой иной жизни. Если она, конечно, существует.

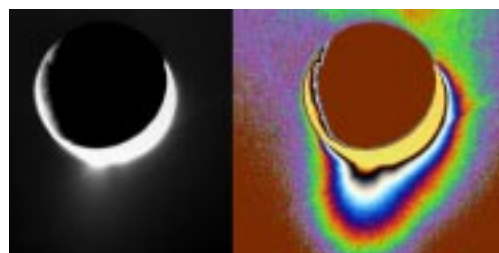
Растворитель жизни

Разобравшись с потоком энергии, посмотрим на поток вещества, который проходит сквозь организм в результате каскада химических реакций. А в какой среде могут проходить все эти химические реакции? Вопрос далеко не праздный, ведь от этого зависит, из каких молекул будут построены живые организмы. У нас на Земле основа жизни — жидкая вода, полярный растворитель. И многие ученые не без основания считают, что именно она сделала нас такими, какие мы есть.

тором речь пойдет ниже) озеро промерзает до дна — чтобы в нем зародилась жизнь, окружающая температура не должна падать ниже точки замерзания.

Соответственно в планетной системе появляется пояс жизни земного типа: зона, где вода может существовать в жидком состоянии. Положение его границ зависит от мощности излучения звезды. Если планета находится слишком близко, на ней так жарко, что вся вода испаряется. Если слишком холодно — она замерзает. Метод приблизительного расчета границ пояса предложил в 50-х годах XX века ученый из США Сушу Хуан. Суть его такова. Поток энергии на поверхность планеты пропорционален светимости звезды и обратно пропорционален квадрату расстояния до нее. Сама же планета излучает тепло, энергия которого по закону Стефана – Больцмана пропорциональна четвертой степени ее температуры. Баланс энергий для температур планеты 273 и 373К (плавление и кипение воды при атмосферном давлении) дает в Солнечной системе положение границ на расстояниях 0,7 и 1,3 астрономических единиц от Солнца. То есть Земля находится посередине пояса, а Марс — за его пределами. Орбита Венеры проходит как раз по границе пояса жизни, однако жидкой воды на ней нет: в расчете не учтена облачность и парниковый эффект.

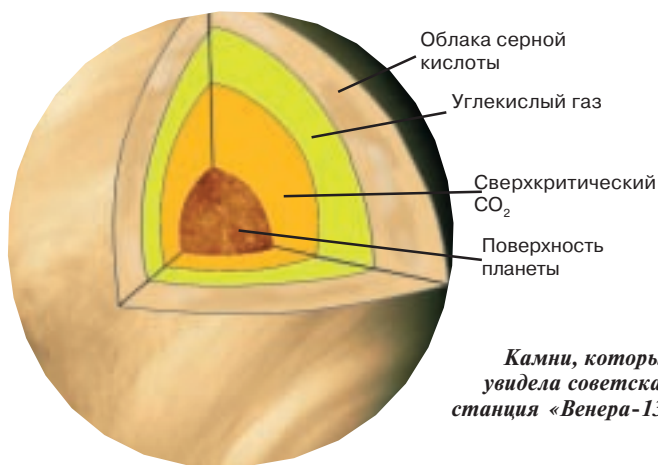
Другой эффект, который не принял во внимание Сушу Хуан, обеспечивает существование океанов под ледяной корой на спутниках крупных планет. Если они расположены далеко от звезды,



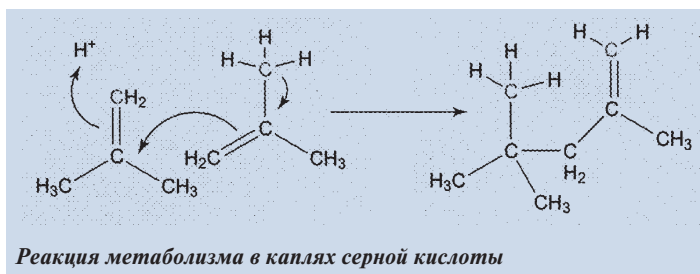
Мощные гейзеры часто пробивают ледяную кору Энцелада — это обнаружил пролетавший мимо аппарат «Кассини»

Под ледяным панцирем Европы также вполне может скрываться океан жидкой воды





Камни, которые увидела советская станция «Венера-13»



Обладая фантазией, на Венере можно найти две области жизни: сернокислые облака и море сверхкритического флюида

энергии ее излучения не хватает для того, чтобы растопить воду. Но эту энергию можно получить от планеты-гиганта за счет действия приливных сил либо ядерных реакций, которые протекают внутри твердого ядра. И в том и в другом случае под многокилометровой корой из твердого льда должен быть океан жидкой воды. На Энцеладе, одном из спутников Сатурна, существование такого океана доказано: корабль «Кассини» зафиксировал водяные гейзеры, которые прорывают ледяную кору. У спутника Юпитера Европы тоже есть ледяная кора, однако гейзеров нет, поэтому о существовании жидкого океана в глубинах планеты ученые пытаются судить по косвенным данным, например моделируя формы ударных кратеров или изучая трещины в ледяной коре.

Будет ли иная жизнь, возникающая в воде, похожа на нашу, земную, точно сказать не может никто. Тут вероятны три точки зрения. Согласно первой, исходя из общих соображений, получается, что она будет точно такой же — построенной из белков и липидов с геномом, хранимым в РНК или ДНК. Потому что, если бы она могла быть другой, мы бы нашли ее и на нашей планете. А так, где бы жизнь ни существовала: в кислой реке, щелочном озере, при наличии кислорода, при полном его отсутствии, при солнечном свете, в глубинах земли, словом, везде, жизнь встречается в одной форме. Ну может быть, в двух, если признать вирусы особой формой жизни, основанной не на ДНК, а на РНК.

Другая точка зрения гласит: все, что ни случилось на Земле, — лишь одна из многих возможностей. Просто в силу случайного стечения обстоятельств именно эта форма возникла первой. Или первой стала эволюционировать и поглотила все остальные, не оставив от них и следа. На другой планете случайность могла бы повернуть процесс и в другую сторону, и тогда был бы другой состав аминокислот или другой полимер служил бы для передачи наследствен-

ной информации.

Согласно же третьей точке зрения, Земля — уникальное место. Жизнь зародилась только на ней, и нигде больше она невозможна. Правомочность первых двух мнений удастся подтвердить или опровергнуть в случае, если в каком-то богатом жидкой водой мире удастся встретить живых существ. С третьей точкой зрения труднее: сколько бы мы ни искали, отрицательные результаты несколько ее не подтверждают. Единственное, что дадут бесплодные поиски, — сужение области параметров, которые необходимы для возникновения жизни, похожей на нашу.

Жизнь за ближним пределом

За ближним пределом, то есть ближе к Солнцу, в нашей системе расположены две планеты: Меркурий и Венера. На Меркурии жидкости если и могут существовать, то лишь на солнечной стороне, где поверхность в среднем нагревается до 620К. И жидкости эти весьма специфические, вроде расплавленного свинца, олова или селена, воспетого тем же Азимовым в рассказах о роботах. А жидкой серы, в которой он же надеялся найти меркурианскую жизнь на основе фторуглеродов, там на самом деле нет.

Идея о жидкой сере как колыбели жизни лишь на первый взгляд кажется утопической. Температура плавления серы не так уж и велика — 385–391К, а

«Вояджер» разглядел на поверхности Ио много жидкой серы



самый знаменитый фторуглерод — тефлон $(-CF_2CF_2-)_n$ плавится при 600К, а разлагается при 688К. Есть и дугая возможность — органосилоксаны, полимеры, составленные из атомов кремния и кислорода с углеводородными функциональными группами. Многие из них, обладая температурой кипения в 400–550К тоже вполне выдерживают высокие температуры. И фторуглероды, и силоксаны в принципе способны давать весьма сложные и протяженные молекулярные структуры, без которых невозможно представить живое существо.

Жидкая сера, отсутствующая на Меркурии, имеется на совсем другой планете. Это спутник Юпитера Ио. Хотя она лежит далеко за холодным пределом пояса жидкой воды, Ио оказалась очень горячей планетой. Как впервые установили пролетевшие в 1979 году мимо Юпитера «Вояджеры», ее поверхность буквально усыпана серными вулканами. Расплавленная сера образует озера глубиной в несколько километров и протяженные потоки. Очевидно, вулкан извергает из недр планеты отнюдь не чистую серу или ее диоксид, а раствор сложного состава, в котором обязательно присутствуют кремний, кислород, всевозможные металлы, а может быть, и тот же углерод. В этом случае по мере остывания магмы (а ее температура на Ио превышает 1770К при средней температуре поверхности планеты 130К) появляется принципиальная возможность возникновения из этих компонентов сложных химических соединений, в том числе тех, которые Азимов упоминал в качестве основы для жизни. В целом гипотетический биоценоз на Ио должен напоминать тот, что складывается вокруг черного курильщика.

Со следующей горячей планетой, Венерой, все обстоит не столь прозаично, как с Меркурием. Многие ученые и писатели воспели в своих трудах жизнь на этой покрытой непроницаемыми облаками и, стало быть, дождливой планете.

После того как на Венере в 1975 году

побывали советские автоматические станции «Венера-9» и «Венера-10», стало ясно, что с многовековой мечтой найти на этой планете жизнь, подобную нашей (а размышлениями на эту тему занимались многие ученые, от М.В.Ломоносова до Сванте Аррениуса), можно покончить: телекамера передала вторую, после Луны, безжизненную панораму. Давление в 100 атмосфер и температуру 740К могут выдержать только камни. Что касается колыбели жизни — жидкого растворителя, то тут не все просто. Во-первых, углекислый газ, из которого на 95% состоит атмосфера Венеры, в этих условиях может оказаться уже не газом, но и не жидкостью, а пребывать в четвертом состоянии вещества — сверхкритическом (считая в ряду твердое—жидкое—газ—сверхкритический флюид—плазма), в которое он переходит при 75,5 атм и 305К. То есть стать полярным и очень сильным растворителем. Его плотность при венерианском давлении и температуре оказывается в двенадцать раз меньше, чем плотность воды и в сто раз больше плотности земного воздуха. Кроме того, в высокогорных областях температура поверхности на десятки градусов меньше, чем в низинах.

Очень интересная зона находится на той высоте, где сверхкритический флюид из-за уменьшения давления становится газом. В этой области должны быть сильные неоднородности (при опытах на Земле в момент фазового перехода наблюдается потемнение газа), а, кроме того, из флюида выпадают растворенные вещества. Сверхкритический CO_2 неплохо растворяет как фторуглероды, так и кремнийорганические полимеры. Вряд ли кто-нибудь досконально исследовал особенности взаимодействия столь сильно нагретого сверхкритического CO_2 с горными породами, да не в микроскопических объемах экспериментальной кюветы, а в геологических масштабах пространства и времени. Поэтому вопрос: «А не может ли в этих условиях получиться силоксановая или фторопластовая жизнь?» — остается открытым.

Второй жидкий растворитель на Венере расположен в более приятной области — в верхних слоях атмосферы, где есть сернистые облака. Серная кислота — тоже полярный растворитель, только, в отличие от воды, очень кислый. В нем группа $\text{C}=\text{C}$ проявляет те же свойства основания, что и группа $\text{C}=\text{O}$ в воде. Результат возможной реакции оказывается тем же — соединением двух



Марс — сухой и холодный снаружи, но, возможно, слегка мокрый внутри



РАССЛЕДОВАНИЕ

простых молекул углеводорода в сложную, и это может лежать в основе метаболизма.

Кстати, эта гипотеза ведет к очень важному практически ценному выводу: доставлять на Землю образцы атмосферы Венеры нежелательно, мало ли какую нежить можно оттуда занести. Во всяком случае, это надо делать с серьезными мерами предосторожности: ведь в отличие от фторопластовой нежити, которая не сможет существовать на холодной Земле, обитатели сернистых облаков будут построены из схожих органических молекул.

Жизнь за дальним пределом

Ближайшая к нам планета, которая расположена за дальним пределом пояса жизни, — это Марс. О непростой истории поиска на нем жизни земного типа мы подробно рассказывали (см., например, «Химию и жизнь», 1998, № 7). От этой планеты вряд ли можно ожидать какой-то экзотической нежити. Изю всех жидкостей там была и есть только вода. Раньше — в виде океанов, сейчас — в виде тонких пленок на камнях в районе экватора, густых туманов в лощинах и где-то под поверхностью планеты в виде чрезвычайно соленых растворов, которые время от времени прорываются наружу (см. «Химию и жизнь», 2003, № 11). Значит, жизнь должна быть органической, белковой. Собственно, именно в рамках этой гипотезы возможна трактовка одного из интереснейших результатов, который получил европейский корабль «Марс-экспресс», а именно обнаружение в атмосфере планеты повышенного содержания метана как раз над той экваториальной областью, где ранее были зафиксированы большие объемы воды или льда.

Поскольку метан быстро разрушается под действием ультрафиолета, кто-то или что-то должно его постоянно выделять. На Земле этим, в частности, заняты бактерии и вулканы. На Марсе вулканов нет. Марсианские бактерии пока что проходят по разряду нежити: положи руку на сердце, надо признать, что никаких явных следов даже микроскопической жизни на поверхности этой самой исследованной планеты найти не удалось, как мы ни старались. Однако для того чтобы выделять метан на Марсе, местные бактерии должны быть устроены примерно так же, как наши, земные, что опять же наводит на размышления: не опасно ли доставлять на Землю образцы марсианского грунта.

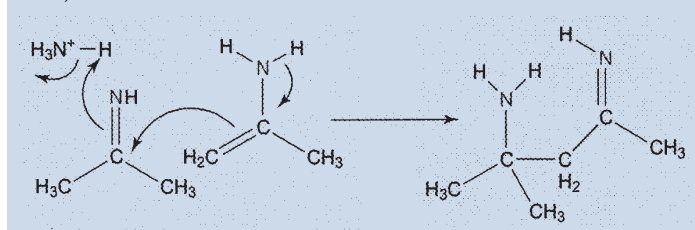
В глубь гигантов

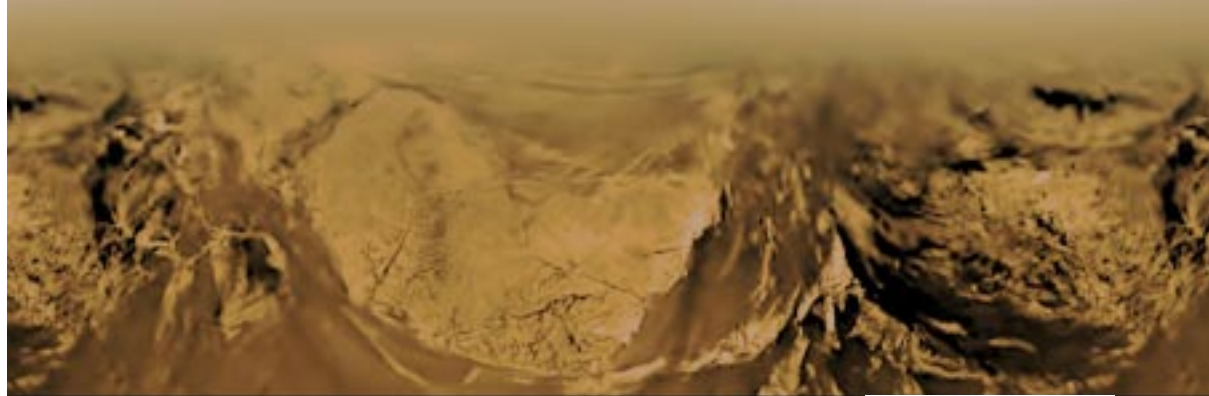
В поисках других растворителей следует отправиться к самой большой планете системы — к Юпитеру, у которого должны быть облака жидкого аммиака. Это вещество при атмосферном давлении становится жидким в интервале температур 194–240К и 196–371 при 60 атм. Поскольку на той глубине, где давление достигает 8 атм., уже тепло — 300К, жидким аммиак будет только в верхнем слое облаков. То есть получаем холодный мир. Зато сам аммиак — такой же полярный растворитель, как вода, только более щелочной: кислотность NH_4^+ на порядок ниже, а основность NH_2^- на пятнадцать порядков выше, нежели у их водяных аналогов. Поэтому в аммиаке идут совсем другие реакции, но и здесь можно подобрать аналог упомянутой выше реакции,



Если на Юпитере и есть жизнь, то она, скорее всего, существует в его облаках, а в качестве растворителя служит жидкий аммиак

Реакция метаболизма в жидком аммиаке





без которой нереален метаболизм органических веществ. Это будет реакция группы $C=N$, которая тоже дает возможность построить цепочку углеводородного полимера.

Очень интересное вещество может скрываться и в глубинах планет-гигантов. Это водород, который становится сверхкритическим флюидом при 33,3К и давлении 12,8 атм. О поведении сверхкритического водорода в качестве растворителя известно очень мало, но история изучения сверхкритических флюидов подсказывает, что свойства вещества в этом состоянии способны изменяться неузнаваемо. Главное, чтобы газ успел стать флюидом до того, как он нагрелся до слишком высокой температуры, когда все полимеры распадаются. Похоже, что сверхкритический водород в Юпитере вряд ли может стать колыбелью жизни. Дело в том, что и температура, и давле-



Не исключено, что в районе Сатурна можно встретить и земную жизнь (на Энцеладе), и углеводородную (на Титане), и аммиачную, и сверхкритически-водородную

ние газа в атмосфере растут с удалением от поверхности. И надо, чтобы критическое для перехода давление было достигнуто раньше, чем температура перевалит за приемлемый для жизни предел, например 300К. Согласно расчетам (а в Юпитер пока что смог погрузиться только зонд «Галилео», который достиг глубины 150 км), на той глубине, где температура переваливает за 300К, давления явно не хватает, а ниже становится слишком жарко для углеводородной жизни. Предполагать же кремниевую жизнь в Юпитере не приходится: если кремний в нем и есть, то только в глубоко лежащем твердом ядре. А так — все больше

соединения водорода, углерода и азота.

На меньших гигантах условия более благоприятны: на Сатурне водород должен стать флюидом в том слое атмосферы, где температура не превышает 300К, а на Уране и Нептуне — при 160К.

Жизнь в океане этана

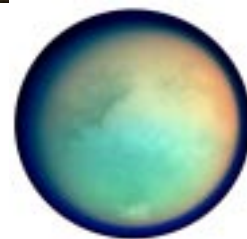
Следующая остановка — у Сатурна. Там есть уникальная планета — Титан. Как показал зонд «Гюйгенс», который аппарат «Кассини» уронил на поверхность Титана в 2005 году, на нем вполне могут быть целые моря из этана, над которыми идут метановые дожди. Их берега укрыты метановым снегом и водяным льдом. Этот необычный мир оказался очень холодным: температура его поверхности 95К. Метан же замерзает при 90К и кипит при 109К, а этан — при 184К.



Метановые облака тщательно скрывают от стороннего наблюдателя детали строения Урана

Если есть жидкость, вполне может быть и жизнь, тем более что углеводороды — отличный растворитель. Более того, химики любят работать именно с такими растворителями (например, с гексаном — температура кипения 342К), поскольку вода со своим нуклеофильным кислородом и кислотным водородом никак не способствует благополучному проведению сложных химических реакций с органическими веществами. Вот какие аргументы приводит профессор Флоридского университета Стивен Беннер (вместе с коллегами он опубликовал в августовском номере «Current Opinion in Chemical Biology» за 2005 год

Титан — единственный спутник, у которого есть атмосфера



свежий обзор по проблеме внеземной жизни, который и вдохновил автора на подготовку этой статьи) в поддержку идеи о зарождении жизни в этановом океане. «Опыт многих химиков говорит, что разнообразие реакций, которые можно проводить с органическими веществами в углеводородах, ничуть не меньше, чем в водном растворе. В воде трудно использовать водородные связи для формирования супрамолекулярных структур. В этане водородные связи могут стать основой формирования структур гипотетической формы жизни; из-за низкой температуры они окажутся значительно крепче, чем в условиях Земли. Углеводороды с полярными группами могут быть углеводородофобными, так, ацетонитрил разделяется с гексаном на две фазы. А разделение на фазы — непременно условие жизни: только так можно изолировать внутреннее пространство организма от внешней среды. Высокая реакционная способность воды приводит к разрушению тех органических веществ, которые не стойки к гидролизу. А в углеводородном океане не придется об этом заботиться, значит, жизненно важные реакции окажутся проще. Отсюда следует неизбежный вывод: если жизнь представляет собой свойство химических реакций, то она должна быть на Титане. Если же ее там нет, то придется признать, что жизнь вовсе не обязательное свойство реакций с участием углеродных молекул в тех условиях, когда эти молекулы стабильны. Это будет означать, либо что жизнь в принципе появляется редко, либо что Земля — исключение из правил. Либо — что жизнь возможна только в воде».

В оформлении статьи использованы фотографии ИКИ РАН, НАСА, ЕКА

