



Астрономические аспекты проблемы происхождения жизни

Михаил Маров

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН

Тема, которую мы собираемся обсудить, чрезвычайно обширна и по своему содержанию является междисциплинарной. Она относится к самым фундаментальным направлениям современного естествознания и напрямую связана с астрономией, поскольку мы изучаем не только ключевые проблемы происхождения жизни и ее физико-химические свойства, но и возможности ее зарождения в различных условиях окружающей природной среды и на разных объектах Вселенной. Это сравнительно молодое направление астрономических исследований получило название «*астробиология*». Мы кратко рассмотрим фундаментальные свойства известных нам форм жизни, включая основополагающие представления о химической эволюции вещества и структуре живой материи, в основе которых лежит молекулярная биология, обсудим концепции, лежащие в основе современного понимания происхождения жизни и биологической эволюции, и, наконец, кратко коснемся интригующей проблемы внеземного разума и поиска жизни во Вселенной (об организации поиска жизни во Вселенной см. также лекцию Г.М. Рудницкого).

Итак, что же такое астробиология или, как ее иногда называют, биоастрономия? Это новое междисциплинарное направление исследований, которое изучает происхождение, распространение и эволюцию жизни на Земле, в Солнечной системе и во Вселенной. Стремительный прогресс биологии и астрофизики, включая такое важное открытие, как обнаружение внесолнечных планетных систем, поставил это направление исследований на новую научную основу.

Ключевые вопросы, лежащие в основе астрономических аспектов проблемы происхождения жизни, таковы:

- Что такое жизнь, как она возникла и эволюционировала?
- Каковы необходимые природные условия на планете для предбиологической эволюции, приводящей к зарождению жизни?
- Что выделило Землю среди других планет Солнечной системы для возникновения жизни и развития интеллекта?
- Существует ли примитивная жизнь на Марсе и Европе и какой была эволюция органического вещества на Титане?
- Какова вероятность локального (*in situ*) возникновения жизни на планете по сравнению с ее приносом извне (гипотеза панспермии)?
- Каковы перспективы обнаружения внеземных цивилизаций (проблема SETI)?

Проблемы возникновения жизни и возможности существования неземного разума волновали человечество с незапамятных времен. Известный греческий философ Эпикур еще в 300 г. до н. э. писал: «Существует бесконечное число миров, похожих и не похожих на наш мир... Мы должны верить, что во всех этих мирах есть живые существа, планеты и все то, что мы видим в нашем мире». Китайский философ Тенг Му (960-1027) утверждал: «Земля и небо велики, но во всем космосе они не более, чем зернышко риса... Весь космос можно сравнить с деревом, а землю и небо с одним из его фруктов. Космос — это королевство, а земля и небо — один из его жителей. На дереве много фруктов, а в королевстве много жителей. Неразумно предполагать, что кроме земли и неба, которые мы видим, нет

других небес и других земель!». В средние века столь же оптимистично высказывался Джордано Бруно, у которого в работе «De L'infinito Universo e Mondi» (1584) мы находим такие слова «Существует бесконечное число солнц и вращающихся вокруг них земель, точно так же, как семь планет нашей системы. Мы видим только солнца, потому что это самые большие светящиеся тела, а их планеты остаются невидимыми для нас, поскольку они значительно меньше и не светятся. Бессчетные миры во вселенной столь же пригодны для обитания, как наша Земля». Более скептически относился к перспективе обнаружения высокоразвитой жизни на планетах Солнечной системы Галилео Галилей, который утверждал: «Я считаю ложным и заслуживающим осуждения мнение о существовании живых существ на Юпитере, Венере, Сатурне или Луне, если понимать под этими существами животных, подобных нашим и, в частности, людей» (цит. по С. Beichman, «What new telescopes can tell us about other worlds»).

Список высказываний выдающихся философов и астрономов можно было бы продолжить, причем противоречивость суждений особенно велика, когда речь идет о существовании жизни и внеземного разума во Вселенной. И это не случайно, поскольку в отличие от твердо установленных фактов о возможности обнаружения лишь самых примитивных форм жизни (или палеожизни) в пределах Солнечной системы, современная наука пока не в состоянии ответить на вопрос о том, существуют ли очаги высокоразвитой жизни в бескрайних просторах космоса.

Фундаментальные свойства жизни. Химическая эволюция

Для жизни необходима жидкая вода, наличие биогенных элементов и доступные источники свободной энергии. К фундаментальным свойствам жизни относятся: потребление энергии и природных веществ, репликация (воспроизведение), выделение отходов, активный биоминеральный обмен и эволюция. Основной вопрос, который мы задаем, занимаясь проблемой зарождения жизни, — как начался процесс перехода от предбиотической химии к возникновению процессов метаболизма, репликации и передаче генетической информации, поскольку жизнь определяют как функциональную систему, способную перерабатывать и передавать информацию на молекулярном уровне.

К перечисленным свойствам, отличающим живую материю от неживой, следует добавить,



Рис. 1. Схематическое изображение основных свойств жизни.

что жизнь способна существовать лишь в ограниченном диапазоне условий природной среды. Иными словами, изначально накладываются достаточно жесткие ограничения на механические и термодинамические параметры небесного тела, на котором может возникнуть жизнь.

Планета, пригодная для обитания, должна отвечать вполне определенным критериям, среди которых, в первую очередь, выделим следующие:

- умеренный размер и умеренная масса, поскольку большая планета аккрецирует вещество, превращаясь в газовый гигант, а малая теряет атмосферу;
- температура и давление, обеспечивающие наличие жидкой воды, которая отсутствует на очень холодной или очень горячей планете;
- наличие атмосферы и ее благоприятный химический состав, исключающий агрессивные примеси;
- радиальное расстояние от родительской звезды, в пределах которого возможны благоприятные климатические условия;
- ограниченная зона расположения относительно родительской звезды, т.к. близкая планета захватывается в приливный резонанс.

С другой стороны, следует указать и на ряд благоприятных обстоятельств для возникновения, поддержания и обнаружения жизни:

- жизнь на Земле способна существовать в крайне суровых условиях окружающей среды;
- необходимые ингредиенты широко распространены;
- метаболически (дыхание, питание) жизнь обладает большим разнообразием и приспособляемостью.

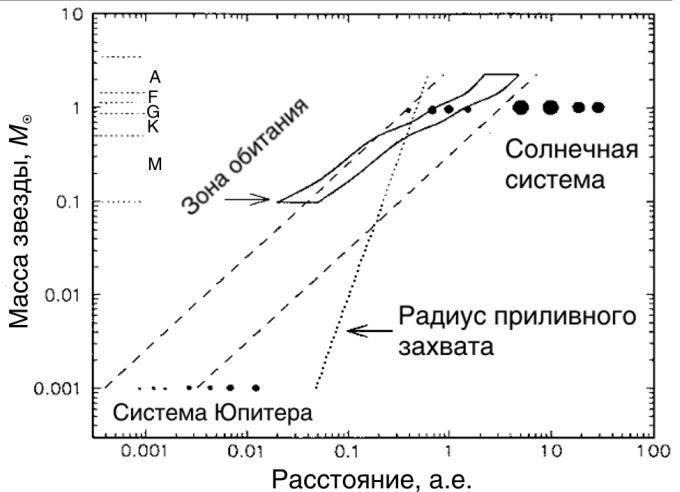


Рис. 2. Зона обитания на планетах в окрестности родительской звезды. По вертикальной оси — спектральный класс и масса звезды в масштабах Солнца, по горизонтальной оси — расстояние в а.е. Штриховые кривые — предельные ограничения для планет в зависимости от класса звезды и радиального расстояния, пунктирная линия — зона захвата в приливной резонанс. В зоне обитания находятся три планеты Солнечной системы — Венера, Земля, Марс.

К этому добавим, что воздействие жизни на природную среду весьма заметно и поддается обнаружению извне, что важно иметь в виду при планировании экспериментов по обнаружению жизни.

Область в космосе, внутри которой планета теоретически может поддерживать климат, благоприятный для зарождения и существования жизни, показана на рис. 2. Но на самом деле зона обитания существенно уже. В пределах Солнечной системы она находится вблизи орбиты Земли, далеко не доходя до орбиты Венеры и лишь приближаясь к орбите Марса (рис. 3). Ограничением для Венеры служит необратимый парниковый эффект, развиваю-



Рис. 3. Зона обитания в окрестности Земли.

щийся с приближением планеты к Солнцу и повышающий температуру у ее поверхности до 475°C, а давление до 90 атм. Иная ситуация у Марса, на котором, судя по геологическим формациям, ранее существовали благоприятные климатические условия с обилием воды на поверхности, которые катастрофически изменились примерно 3,9 млрд. лет тому назад, оставив безводную пустынную поверхность и разреженную атмосферу, в которой могут конденсироваться парниковые газы. Но, так или иначе, у нас есть свидетельства того, что зона возможного обитания в Солнечной системе простирается до Марса.

Важным астрономическим аспектом при рассмотрении проблемы происхождения жизни является химическая эволюция вещества в космосе и ее возможные следствия. В межзвездной среде активно происходит органический синтез, и этот процесс занимает всего около 1000 лет. Особенно эффективно синтез протекает в межзвездных газопылевых молекулярных облаках, где этому способствуют турбулентность и испарение частиц. В молекулярных облаках найдено большое количество углеводородов (составных частей полициклических ароматических углеводородов, РАН), из которых простейшим является бензол. Около 70 аминокислот было обнаружено в

метеоритах Марчисон и Мюррей, что свидетельствует в пользу модели внеземного происхождения предшественников биомолекул. В табл. 1 приведен перечень обнаруженных в космической среде молекул, некоторые из которых имеют довольно сложный химический состав.

Основы молекулярной биологии

При изучении проблемы происхождения жизни и возможности ее обнаружения во Вселенной важно понимать, как она построена у нас на Земле. Основой такого понимания служит молекулярная биология, важнейших положений которой мы здесь очень кратко коснемся.

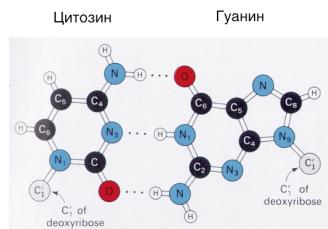
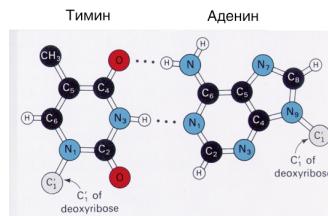
Основа живых организмов — это биополимеры: нуклеиновые кислоты (ДНК и РНК) и протеины (**белки**). Биополимеры представляют собой длинные цепочки, состоящие из различных мономерных звеньев (мономеров). Нуклеиновые кислоты образованы четырьмя видами мономеров (**нуклеотидов**), а белки — двадцатью видами мономеров (**аминокислот**). Нуклеотиды отличаются входящими в их состав азотистыми основаниями. Это аденин (A), гуанин (G), цитозин (C) и тимин (T). Цепочки нуклеотидов и аминокислот образуют, соответственно, полинуклеотидные цепи и пептиды. Азотистые основания нуклеотидов аденин, гуанин, цитозин и тимин образуют комплементарные пары на основе водородных связей (T-A, C-G и т. д.). Такие структуры, показанные на рис. 4, обладающие чрезвычайно плотной трехмерной упаковкой, обеспечивают получение точных копий (**реплик**) нуклеотидной цепи необходимых для синтеза белков.

Табл. 1. Некоторые молекулы, обнаруженные в межзвездной среде (числами в ячейках с фоном обозначено количество атомов в молекуле)

2	3	4	5	6	7	8	9
H ₂	H ₂ O	NH ₃	SiH ₄	CH ₃ OH	CH ₃ CHO	CHOOCH ₃	CH ₃ CH ₂ OH
OH	H ₂ S	H ₃ O ⁺ ?	CH ₄	NH ₂ CHO	CH ₃ NH ₂	CH ₃ CCCN	(CH ₃) ₂ O
SO	SO ₂	H ₂ CO	CHOOH	CH ₃ CN	CH ₃ CCH		CH ₃ CH ₂ CN
SO ⁺	N ₂ H ⁺	H ₂ CS	HC≡CCN	CH ₃ NC	CH ₂ CHCN		H(C≡C) ₃ CN
SiO	HNO	HNCO	CH ₂ NH	CH ³ SH	H(C≡C) ₂ CN		H(C≡C) ₂ CH ₃
SiS	SiH ₂ ?	HNCS	NH ₂ CN	C ₅ H	C ₆ H		
NO	HCN	CCCN	H ₂ CCO	HC ₂ CHO			
NS	HNC	HCO ₂ ⁺	C ₄ H	CH ₂ ≡CH ₂			
HCl	HCO	CCCH	C ₃ H ₂	H ₂ CCCC			11
NaCl	HCO ⁺	C-CCCH	CH ₂ CN				H(C≡C) ₄ CN
KCl	OCS	CCCO	C ₅				
AlCl	CCH	CCCS	SiC ₄				
AlF	HCS ⁺	HCCH	H ₂ CCC				
PN	SiCC	HCNH ⁺	HCCNC				13
SiN	CCO	HCCN	HNCCC				H(C≡C) ₅ CN?
NH	CCS						
CH	C ₃						
CH ⁺	MgNC						
CN	H ₃ ⁺						
CO							
CS							
C ₂							
SiC							

Белки — это функциональная основа жизни: они обеспечивают построение клеток и протекание биохимических реакций, а ДНК и РНК — ее информационная основа: они управляют параметрами белков. ДНК и РНК обладают замечательными свойствами, соответственно, редупликации (воспроизведения) и транскрипции (синтеза РНК на основе ДНК).

Свойства белка определяются нуклеотидной последовательностью кодирующего его гена в соответствии с выработанными природой правилами — генетическим кодом. Каждая аминокислота имеет нуклеотидный символ, которым служит нуклеотидный триплет (кодон). Каждый смысловой кодон придает определенное свойство одной аминокислоте, обеспечивая тем самым програм-



Двойная спираль ДНК

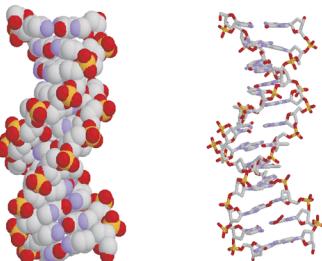


Рис. 4. Слева — комплементарные пары, образующие полинуклеотидные цепи. Справа — структура двойной спирали ДНК.

мирование синтеза белков. Всего существует $4^3 = 64$ различных кодонов (61 — смысловых и 3 — стоп). Таким образом, биологическое разнообразие может в принципе характеризоваться невообразимо громадным числом 20^{61} .

Каталогом генетического материала в живой системе служит геном, который для большинства организмов состоит из молекул ДНК. Но геном некоторых вирусов состоит из РНК, как, например, геном вируса HIV1, вызывающего СПИД.

Современные концепции происхождения жизни

Среди разнообразных концептуальных подходов к проблеме происхождения жизни мы выделим две основные гипотезы (наиболее обоснованные и заслуживающие, на наш взгляд, наибольшего внимания): это *древний мир РНК* и *последовательное упорядочение*. При этом сам автор склоняется к концепции

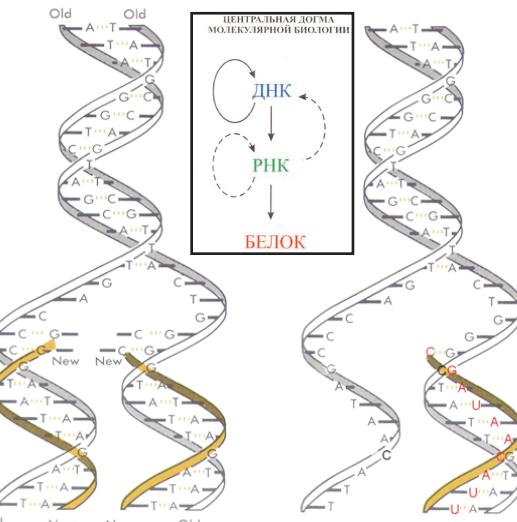


Рис. 5. Функции редупликации ДНК и транскрипции РНК. На вставке — схема синтеза белка с участием ДНК и РНК.

упорядочения, которая в наибольшей степени отвечает его научному мировоззрению.

Представление о том, что прообразом жизни был древний мир РНК, как основа эволюции первичной биосфера, разделяется многими исследователями (К.Р. Вуз, Л. Оргел, В. Гилберт, А.С. Спирин). Аргументами в пользу данной концепции служат уникальные свойства этой молекулы (трехмерного гетерополимера), определяемые последовательностью оснований РНК вдоль нити и характером скручивания. Действительно, ансамбли молекул РНК выполняют функции ассимиляции, метаболизма, репликации. Важно подчеркнуть, что РНК могут содержать генетическую информацию или служить временной копией генетической информации. Для этого использо-

зуется короткоживущая промежуточная молекула (*m*-РНК), несущая первичную информацию о производстве специфического белка и обеспечивающая копирование клеточного генома ДНК.

Как видим, РНК способны выполнять многие базовые функции ДНК, участвуя в процессе синтеза белка (*рибосомы*). Это: кодирование — программирование синтеза биополимеров линейной последовательностью полинуклеотидов; репликация — строгое копирование генетического материала; самосвертывание линейных полинуклеотидов в уникальные компактные конфигурации (3D структуры); распознавание — специфическое взаимодействие с другими макромолекулами; каталитические функции. К этому перечню следует добавить, что молекула РНК обладает транспортными свойствами (*t*-РНК), то есть обеспечивает перенос других молекул, необходимых для протекания ряда биологических реакций и синтеза белков. Каждая из 20 существующих молекул *t*-РНК способна присоединяться лишь к одной из 20 аминокислот, которую она приносит к определенной рибосоме и вместе с нею встраивается в цепочку синтезируемого белка, в соответствии со спецификой, содержащейся в промежуточной молекуле *m*-РНК.

В свою очередь, каталитические РНК (*рибозимы*) участвуют, наряду со стандартными белковыми катализаторами (*энзимами*), в синтезе белка, что обеспечивает выбор определенных межмолекулярных реакций и уменьшает энергии, необходимые для их протекания. Помимо этого, рибозимы обеспечивают правильную расстановку связей между нуклеотидами в

цепочке в процессе сращивания молекул *m*-РНК. Только после этого они будут аккуратно считаны рибосомой в процессе синтеза белка. Таким образом, рибосомные молекулы РНК (*r*-РНК) играют важнейшую роль в синтезе белка, поскольку они образуют структурное ядро рибосомы, состоящее более чем из 50 различных белков и нескольких *r*-РНК. Рибосома как бы «полагается» на каталитические функции *r*-РНК при синтезе белков. Считывая информацию, закодированную в *m*-РНК, она «узнает», какой белок нужно создать. Тем не менее, до сих пор до конца непонятно, как работает чрезвычайно сложный механизм декодирования генетической информации нукleinовых кислот в структурные параметры белков и как он сформировался в процессе эволюции.

Из сказанного следует, что РНК, будучи рабочим инструментом клеточного производства, могли быть прототипами живых систем. Однако возникновение мира РНК и его эволюция до первых высокоорганизованных организмов — бактерий — за крайне малое время (примерно в первые полмиллиарда лет истории Земли) маловероятны, что признают и сторонники концепции. Снять это противоречие позволяет гипотеза о зарождении и начальной эволюции ансамблей молекул РНК в космической среде, в первую очередь на кометах. Затем эти молекулы попадали на Землю в ходе интенсивной астероидно-кометной бомбардировки. Иными словами, с древним миром РНК связывают возможность внеземного происхождения жизни. Эту гипотезу мы рассмотрим подробнее в разделе,

посвященном связи биологической эволюции с астрономическими факторами.

Альтернативой концепции древнего мира РНК служит концепция последовательного упорядочения в процессах возникновения и ранней эволюции живой материи. В своей первоначальной форме она предложена академиком Э.М. Галимовым, рассматрившим упорядочение (и стремление к упорядочению) как химическую основу жизни. В рамках этой концепции, в которой молекулы РНК с их основными функциями также играют важную роль, зарождение жизни представляется как непрерывный процесс упорядочения в открытой стационарной системе, которая в отличие от консервативной (гамильтоновой) системы, сохраняющей энергию, является диссипативно-информационной системой, обмениваясь с окружающей средой энергией и информацией. Такая система состоит из предбиотических органических соединений, возникших в процессе химической эволюции и, возможно, имевших космическое происхождение, как отмечалось выше. В ней идут сопряженные химические реакции и производится, наряду с положительной, отрицательная энтропия, что является непременным условием возникновения структурной организации (упорядочения) в хаотической среде. В системе поддерживается энергия выше некоторого минимального уровня при непременном выполнении пригожинского условия минимума производства энтропии.

Химическое упорядочение (ограничение числа партнеров в реакции, числа механизмов и путей взаимодействия) эффективно осуществляется путем селективного катализа с

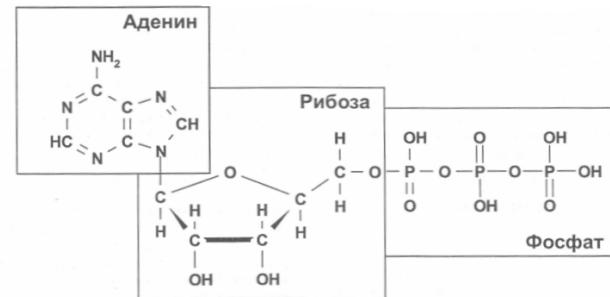


Рис. 6. Молекула аденоциантифосфата (АТФ).

участием биохимических катализаторов — ферментов, представляющих собою пептидные цепочки, свернутые в трехмерные структуры и обладающие чрезвычайно высокой активностью. Согласно Галимову, «в природе нет органических соединений, более эффективно осуществляющих упорядочение посредством селективного катализа, чем пептиды».

При этом ключевую роль играет молекула аденоциантифосфата (АТФ), состоящая из аденина, рибозы и фосфатной группы. Она поглощает солнечную энергию и передает ее в сопряженную химическую систему, а универсальным посредником, обеспечивающим сопряжение, является вода (реакция гидролиза). Привлекательно то обстоятельство, что АТФ синтезируется на основе простых молекул — цианистого водорода HCN и формальдегида HCHO, широко распространенных в космосе.

Исходя из данной концепции, способность к упорядочению через селективный катализ и способность к самовоспроизведению — два важнейших свойства биоорганических соединений, необходимые для возникновения и эволюции жизни. Первичное упорядочение соз-

дают цепочки нуклеотидов и аминокислот. Как мы видели, на цепочках аминокислот формируются универсально построенные биологические структуры, способные к бесконечному разнообразию, а цепочки нуклеотидов обеспечивают самовоспроизведение (репликацию), как основное свойство живой материи. Другими словами, природа разделила между двумя классами органических соединений стремление к упорядочению через селективный катализ и способность к самовоспроизведению.

Особого внимания заслуживает тот факт, что в мире органических соединений упорядочение обусловлено уникальными свойствами соединений углерода. Только на основе углерода могут создаваться сложные биополимерные структуры, обеспечиваться упорядочение через селективный (ферментативный) катализ и функция самовоспроизведения. Это утверждение следует считать основной парадигмой происхождения жизни. Поэтому встречающиеся иногда рассуждения о возможности существования жизни, основой которой служит, например, кремний, следует считать необоснованными. Если во Вселенной существует жизнь, то молекулярно она, вероятно, построена примерно аналогичным образом, как на Земле, то есть на основе углерода и его соединений и на принципах, обеспечивающих белково-нуклеотидную форму функционирования.

Рассмотренная концепция возникновения и структурной организации живой материи через упорядочение представляется нам наиболее обоснованной. Однако в отличие от Галимова, рассматривающего упорядочение

как линейный процесс, мы полагаем, что накопление изменений происходит в сильно нелинейной системе, что приводит к развитию неустойчивостей, возникновению бифуркаций (скаков) и последовательным переходам системы в качественно новое состояние. На математическом языке такому процессу отвечает ветвление (качественное изменение) решений при определенных критических значениях параметров. Каждому новому состоянию (самоорганизации) системы отвечают иная совокупность и взаимодействие молекулярных комплексов. Другими словами, нарастающая упорядоченность исходной хаотической системы состоит в последовательности бифуркаций от появления примитивных полимерных структур и развития универсальной катализитической функции пептидов до возникновения нуклеотидных последовательностей, участвующих в синтезе белка, и генетического кода.

С развиваемых нами позиций стохастической динамики такие события есть не что иное, как порождение и следствие локальной неустойчивости в нелинейной хаотической диссипативной системе с большим числом степеней свободы, а последовательность изменения состояний (эволюция) системы приводит к возникновению самоорганизации. В других терминах, следуя подходу А.Г. Башкирова, можно говорить о «фазовом переходе упорядочения», отвечающем переходу от обычной термостатистики Гиббса к термостатистике Ренни, в рамках которой энтропию следует рассматривать в качестве потенциала, движущего систему в состояние наибольшей упорядоченности. В этом случае, в отличие от клас-

ической статистической термодинамики Больцмана-Гиббса, обеспечивается принцип максимума энтропии для информационной энтропии Ренъи, которой соответствует степенное (фрактальное) распределение. При этом устраняется противоречие между вторым началом термодинамики и стремлением системы к самоорганизации, что мы и связываем с возникновением и ранней эволюцией жизни.

Дополнительно подчеркнем, что реализация модели последовательного упорядочения для перехода к новому уровню самоорганизации требует наличия обратной связи, которая является ее важным свойством. Необходима также восстановительная среда в условиях раздельного существования атмосферы и гидросферы для обеспечения доступности и подвижности фосфатов, что в целом не противоречит существующим представлениям о природных условиях на Земле в период, с которым связывают возникновение первых примитивных форм жизни.

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ

Формирование биополимеров, способных к катализу и репликации, включает появление посредника между структурой пептидов и нуклеотидов типа упомянутой выше транспортной РНК (t-РНК) и формирование генетического кода. Возникновение кода завершает этап предбиологической эволюции, и начинается собственно биологическая эволюция (эволюция жизни). Фундаментальным свойством жизни является *хиральность* – односторонняя ориентировка биологических молекул (L-аминокислот и D-сахаров),

причина возникновения которой остается до конца не понятой.

Биологическая эволюция понимается как кумулятивные изменения во времени. Непрерывно нарастающее упорядочение (включая предшественников РНК) привело к тому, что на Земле примерно 3,8 млрд. лет тому назад появились первые живые организмы – бактерии – со сложными молекулярными аппаратами наследственности, белкового синтеза, энергообеспечения и обмена веществ. Возникновение первичных живых систем (прокариотов, эукариотов) сопровождалось эволюцией на уровне клеток, организмов, экосистем и формированием биосфера. При этом процессы упорядочения неизбежно сопровождались процессами разупорядочения и хаотизации. В конкурентных процессах упорядочения-разупорядочения (деградации) решающую роль играл дарвиновский естественный отбор. Таким образом, мы подчеркиваем важнейшую роль дарвинизма в биологической эволюции, но не на ранних этапах становления жизни и развития молекулярных механизмов самоорганизации биологических систем. С этих позиций молекулярная биология, биохимическая генетика и дарвинизм не противоречивы, а взаимодополняющим образом лежат в основе современной теории эволюции.

Развитием дарвинизма может служить концепция «конвариантной редупликации», предложенная Н.В. Тимофеевым-Ресовским, в основе которой лежит идея о матричном воспроизведении и тиражировании разных вариантов наследственных текстов, в том числе подверженных мутации, и эти варианты «предлагаются» природе на выбор. Соответ-

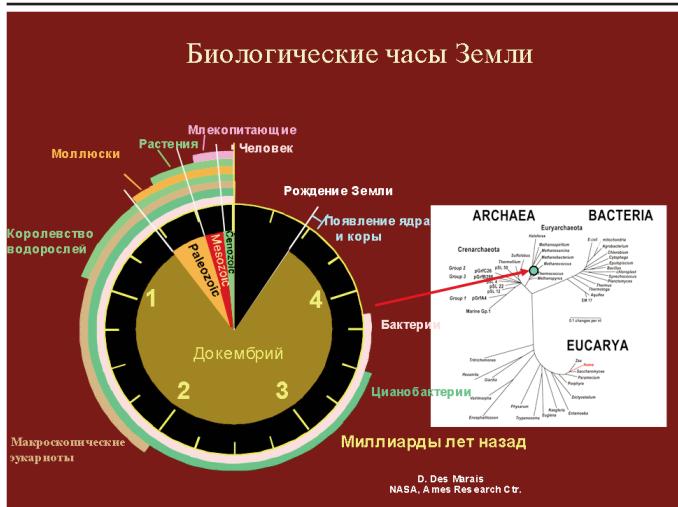


Рис. 7. Эволюция жизни на Земле.

ственno, матричный механизм изменчивости и наследственности связывается с естественным отбором и теорией эволюции.

С дарвиновским естественным отбором связана эволюция жизни на Земле, схематично показанная на рис. 7 и известная в литературе как биологические часы Земли. Как видим, в течение первых трех миллиардов лет существовал только постепенно усложнявшийся мир бактерий. Первые водоросли и моллюски появились около 1-0,5 млрд. лет тому назад, а млекопитающие — лишь в последние 100 млн. лет. Появление разумных существ, возникновение и упадок человеческих цивилизаций — лишь миг в истории Земли.

Связь биологических изменений с астрономическими факторами

Одна из наиболее актуальных и интригующих проблем современного естествознания — выбор между альтернативными моделями зарождения жизни и биосфера непосредственно на

Земле или с участием внешнего (космического) источника. Исторически в качестве возможных источников происхождения жизни на Земле назывались опаринский первичный «суп» (лужи, лагуны), в котором возникали все более сложные молекулы (предбиотические соединения), или дарвиновские теплые пруды, приведшие к возникновению биоты, а также глубоководные вулканические жерла (подводные горячие источники), в которых могли появиться самые ранние формы жизни — гипертермофильные микробы. Свен Арренius еще в конце XIX в. предложил в качестве альтернативы занос жизни из межзвездной среды, и эта идея получила название *гипотезы панспермии*.

На современном уровне знаний ни один из перечисленных источников, с теми или иными модификациями, не может быть отвергнут. В последнее время проблема происхождения жизни связывается также с транспортом вещества внутри и вне пределов Солнечной системы и миграционно-столкновительными процессами, ключевую роль в которых играют кометы, углисто-хондритовые астероиды и частицы межпланетной пыли. Все они рассматриваются как вероятные переносчики предбиотического или даже биотического вещества из зоны Главного пояса астероидов (находящегося между орбитами Марса и Юпитера) и транснептунового пояса Койпера на ранней стадии эволюции Солнечной системы.

В согласии с этим механизмом находится рассмотренная выше концепция древнего мира РНК, связывающая появление жизни с периодом интенсивной бомбардировки Земли астероидами и кометами на рубеже около

4 млрд. лет назад. Действительно, в ядрах комет и углистых хондритах содержатся большие объемы жидкой воды и органические вещества, а их пористая структура удобна для роста и развития колоний РНК и микроорганизмов. Схематически процесс возникновения жизни, порожденный внешним источником РНК, и ее эволюция от абиогенных рибонуклеотидов до коацерватов и клеток показан на рис. 8.

Как видим, углистые хондриты дают ключ к отысканию источников внеземного органического вещества: в них содержится химически связанная вода (в среднем до 10%), и вероятно, что их родительские тела (гидросиликаты) образовывались в водной среде. Соотношение углерода в кометах и углистых хондритах 10:1 (углистые хондриты недополучили углерод), но летучая органика метеоритов могла быть потеряна на более поздних стадиях при соударениях астероидов.

Ключевая роль в зарождении жизни принадлежит воде: без нее не могли образоваться РНК и ее структуры, без нее невозможно создать никакие молекулы нукleinовых кислот. Как показали наши модельные расчеты, миграция малых тел в Солнечной системе и кометно-астероидная бомбардировка могли обеспечить значительный приток летучих (воды, азота, углерода), предбиотической органики и, возможно, РНК на Землю и другие планеты земной группы. В частности, Земля за счет экзогенного источника могла получить количество воды, сопоставимое с объемом земных океанов (около $2 \cdot 10^{24}$ г).

Другой аспект связи биологических изменений с астрономическими факторами — это

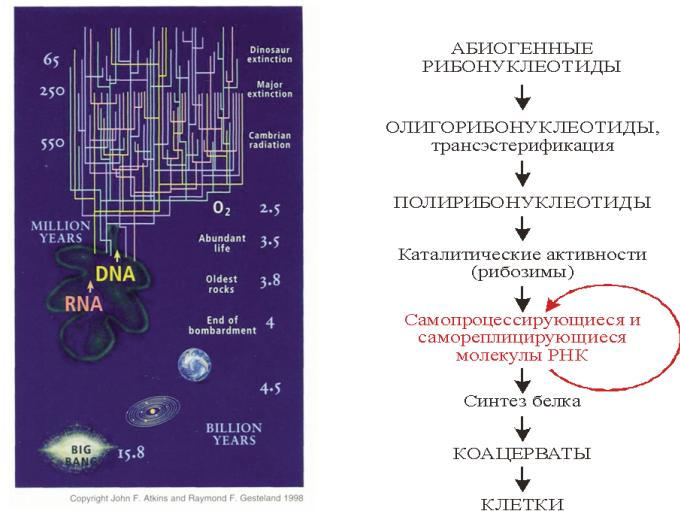


Рис. 8. Слева — происхождение жизни и ее связь с процессами во Вселенной. Справа — схема эволюции в рамках концепции древнего мира РНК

непосредственные последствия бомбардировок планет (в первую очередь, конечно, Земли) астероидами и кометами. Эти последствия могли быть катастрофическими при соударениях с Землей крупных (километровых и более) тел, которые, несомненно, приводили к громадным биосферным изменениям (см. также лекцию Б.М. Шустова). Действительно, существуют убедительные свидетельства того, что периодические биологические изменения в истории Земли имели космическую природу. Хорошо известным примером такой связи является падение астероида размером примерно 10 км на полуострове Юкатан в Мексике, произошедшее около 65 млн. лет тому назад (Чиксулуб). К этому же времени относят исчезновение на Земле древних рептилий (динозавров). Выдвинуто предположение, что выявленные долгопериодические вариации в массовом исчезновении морских

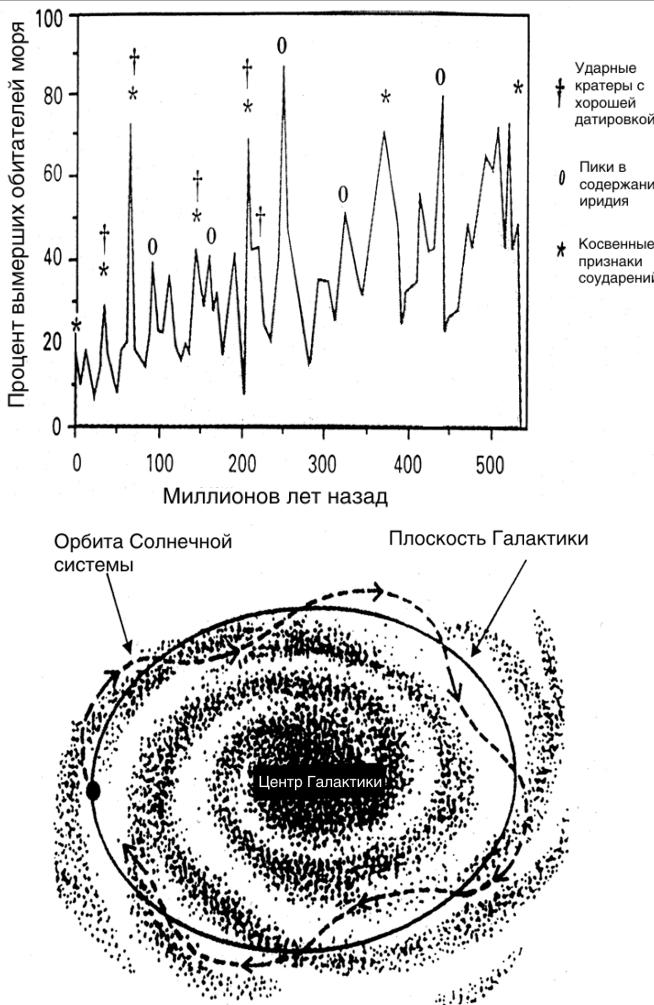


Рис. 9. Вверху — массовое исчезновение морских организмов на Земле за последние 540 млн. лет. Эти события коррелируют с ударными кратерами, вещества которых обогащено иридием, что вместе с другими признаками свидетельствует о выпадении космического тела. Внизу — схема движения Солнечной системы в Галактике

организмов были вызваны забросом внутрь Солнечной системы многочисленных комет из облака Оорта вследствие периодических воз-

мущений, связанных с движением Солнечной системы в Галактике (рис. 9). Между этими событиями обнаруживается вполне определенная корреляция. На инжекцию комет внутрь Солнечной системы влияют также галактические приливы и возмущения в движении ближайших звезд. При этом наибольшие возмущения возникают при пересечении Солнцем галактической плоскости с полуperiодом около 30 млн. лет.

Очевидно, полному исчезновению жизни на Земле вследствие подобных катастрофических воздействий на биосферу препятствовала высокая устойчивость и приспособляемость жизни. На рис. 10 показаны примеры такой приспособляемости к экстремальным и даже агрессивным условиям окружающей среды. На левой панели рис. 10 показаны «живые» антарктические породы с колониями микроорганизмов, развивающихся при крайне низких температурах, а в правом нижнем углу показано озеро с очень высокой соленостью воды (рН порядка 1-2), в котором тем не менее существуют микроорганизмы. На правой панели рис. 10 показан гидротермальный источник на дне Красного моря, в котором обнаружены микроорганизмы, существующие при температуре около 120°C.

Перспективы обнаружения жизни в Солнечной системе

К традиционно задаваемому вопросу «Есть ли жизнь на Марсе?» в конце прошлого столетия добавился еще один вопрос: есть ли жизнь на одном из галилеевых спутников Юпитера — Европе. По существу это, по-видимому, единственные объекты в Солнечной системе, на

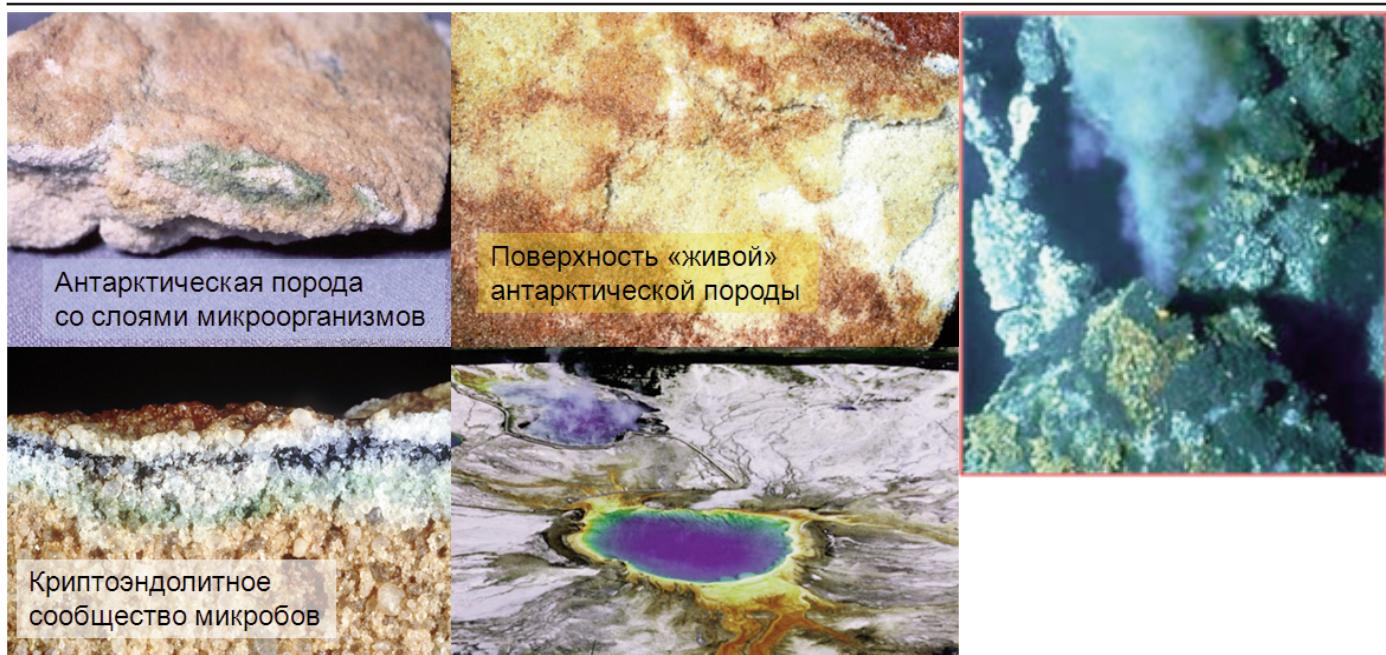


Рис. 10. Слева и в центре вверху — колонии микроорганизмов в антарктических породах. В центре внизу — озеро с очень высокой соленостью воды в Канаде, в котором существуют микроорганизмы. Справа — гидротермальный источник на дне Красного моря с температурой 120°С, в котором обнаружены микроорганизмы. © NOAA

которых могла возникнуть примитивная жизнь, возможно, сохранившаяся до нашего времени, с учетом приведенных в предыдущем разделе примеров высокой приспособляемости живых существ к суровым условиям природной среды. Привлекает к себе внимание также спутник Сатурна Титан, на котором помимо метана обнаружено семейство других углеводородов и органических соединений, которые, вообще говоря, могли послужить прообразами организации более сложных структур. К сожалению, результаты космических исследований, включая попытки прямого обнаружения органики и жизни на Марсе в середине 1970-х гг. при помощи космических аппаратов «Викинг», оказались отрицатель-

ными, хотя их нельзя считать однозначными из-за ограничений использовавшихся экспериментальных методов. Мы уже говорили о том, что Марс находится на краю зоны обитания, что благоприятствует возникновению на нем жизни практически одновременно или даже раньше земной (или раньше ее заноса на Землю вследствие транспорта вещества в Солнечной системе?). Могла ли сохраниться жизнь в ее примитивных формах, скажем, в приповерхностных слоях после упоминавшегося ранее катастрофического изменения климата примерно 3,9 млрд. лет тому назад? Есть ли надежда найти там, по крайней мере, следы палеожизни?

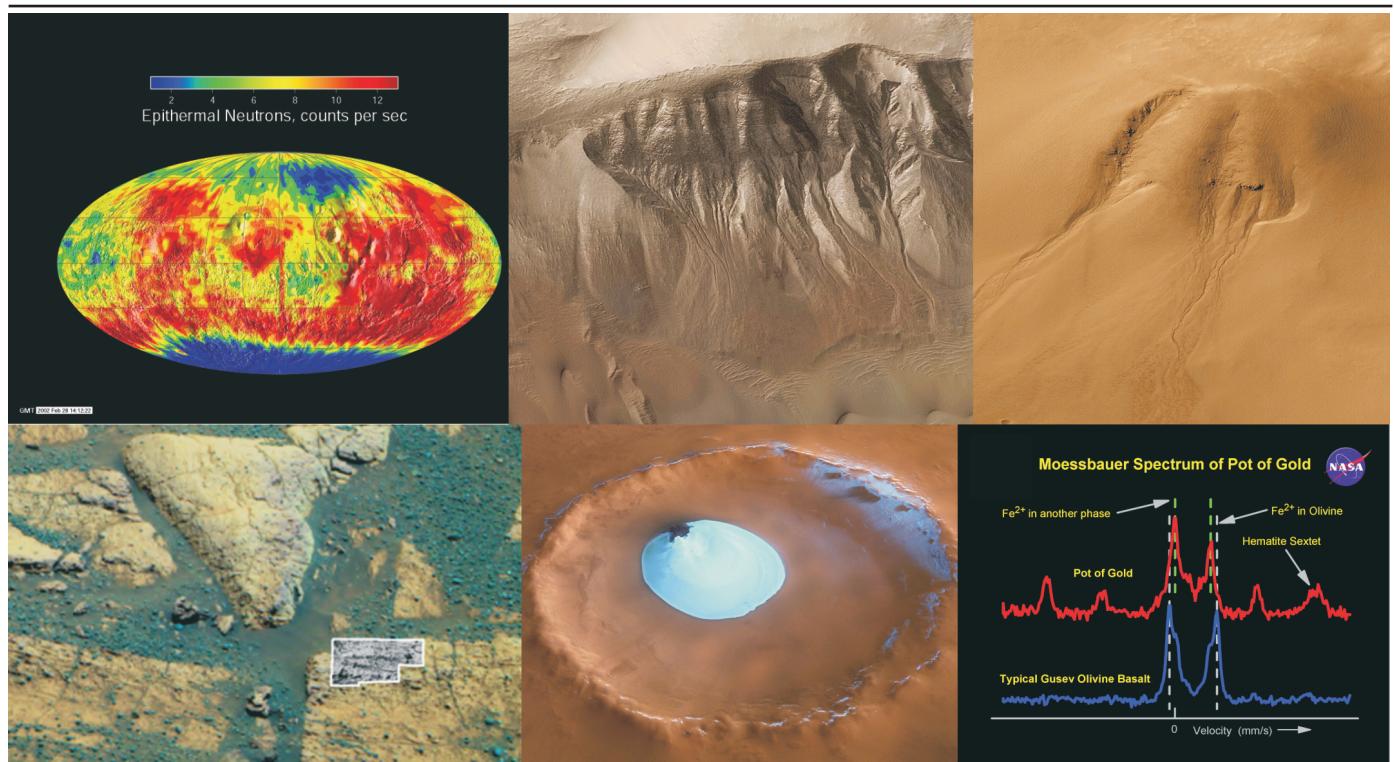


Рис. 11. Свидетельства наличия воды и древнего океана на Марсе. В левом верхнем углу – распределение воды в приповерхностном слое по данным нейтронного мониторинга; вверху в центре и справа – примеры геологических структур, образованных с участием воды; внизу слева – породы, несущие следы древнего водного бассейна; внизу в центре – ледяное озеро внутри марсианского кратера; внизу справа – спектр породы с признаками гематита. © NASA, ESA, DLR, FU Berlin

Ранее подчеркивалось, что необходимым условием возникновения жизни является наличие воды. Данные космических исследований позволяют утверждать, что вода не только была в изобилии на раннем Марсе, но и в значительных объемах сохранилась до нашего времени в приповерхностном слое (особенно в полярных областях) и, вероятно, на больших глубинах. Это, несомненно, служит обнадеживающим обстоятельством для продолжения усилий по поиску марсианской биоты. На рис. 11 приведены результаты, свидетельст-

вующие о наличии воды, среди которых данные измерений спектров тепловых нейтронов, дающие распределение водяного льда в приповерхностном слое на глубине до 1 м; характерные геологические структуры, образованные при участии воды; отождествление в спектрах марсианских пород гематита, образующегося в присутствии воды. На этом же рисунке показаны слоистые породы, напоминающие осадочные породы на мелководье, с высокой концентрацией сульфатов, солей хлора и брома,

свидетельствующие о существовании на Марсе древних водных бассейнов.

Сенсацией стало сообщение группы американских исследователей в конце 1990-х гг. о найденных следах палеожизни в антарктических метеоритах, с высокой вероятностью выброшенных с Марса и занесенных на Землю. На рис. 12 показан антарктический метеорит марсианского происхождения ALH 84001, в котором была обнаружена идентичность морфологической структуры окаменелым

ископаемым бактериям и наличие магнетитов в карбонатах, образование которых связывалось с бактериями и рассматривалось в качестве биомаркеров. Однако более полный анализ привел к выводу, что подобные образования, как и их земные аналоги, допускают небиологическую интерпретацию, и поэтому вывод об обнаружении марсианской палеожизни не является убедительным и в настоящее время больше не рассматривается.

Возможность обнаружить признаки жизни на Европе стала активно обсуждаться после того, как начались исследования при помощи космических аппаратов. Анализ особенностей морфологии поверхности Европы на снимках высокого разрешения (рис. 13) принес свидетельства того, что под ее ледяным панцирем толщиной 10-15 км предположительно находится водный океан глубиной 50-100 км. Из-за диссипации приливной энергии в системе галилеевых спутников он может быть теплым, а обнаружение у Европы заметного магнитного поля указывает, что он еще и соленый. В такой вполне благоприятной среде могла зародиться жизнь, обнаружение которой становится одной из актуальных задач будущих космических миссий.

С точки зрения химической эволюции вещества в Солнечной системе и возможности подробного изучения состояния и свойств предбиотической органики огромное внимание привлекает Титан. На его поверхности (рис. 14) обнаружены озера метана, этана и других углеводородов, а круговорот метана с испарением в атмосферу и последующим обратным выпадением на поверхность практически аналогичен круговороту воды на Земле,

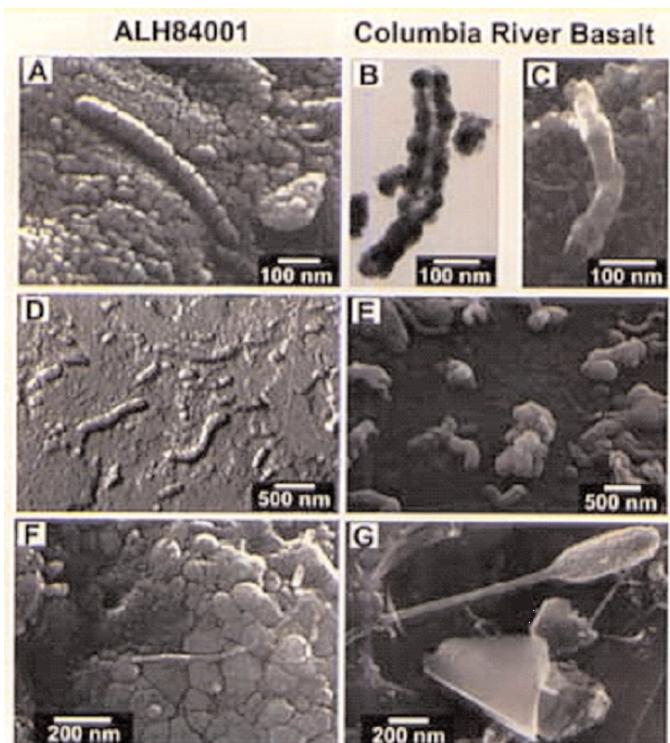


Рис. 12. Фрагменты структуры антарктического метеорита ALH84001, в котором были найдены образования, напоминающие ископаемые бактерии, в сравнении с фрагментами базальтовой породы из бассейна реки Колумбии.



Рис. 13. Европа (слева вверху) и фрагменты морфологии ее поверхности на снимках среднего (внизу) и высокого (справа вверху) разрешения.

с которым непосредственно связано происхождение биосферы.

Внесолнечные планеты. Поиск внеземного разума (SETI)

Проблемы происхождения жизни и возможности ее обнаружения, естественно, далеко выходят за пределы, ограниченные Землей и Солнечной системой. Именно поэтому мы обращаемся к астрономии и говорим о симбиозе биологии и астрономии. Выше назывались критерии, характеризующие пригодность планеты для возникновения и развития жизни. Теперь мы коснемся вопроса о том, есть ли такие планеты, как их обнаружить и какие перспективы ожидают астрономов на этом пути, в совсем недавно возникшем увлекательном разделе астрономии — поиске экзопланет.

В отличие от звездных популяций и их эволюции, пути которой прослеживаются на диаграмме Герцшпрунга-Рессела в зависимости от массы и светимости звезды, мы до недавнего времени имели лишь один пример планетной системы — Солнечную систему. Но за последнее десятилетие открыто около 400 планет (в том числе 36 планетных систем) у других звезд нашей Галактики в пределах примерно 10 пк. Почти все они обнаружены с использованием метода доплеровской спектрометрии (см. также лекцию В.Г. Сурдина), т. е. измерений смещения линий в спектре звезды из-за периодического смещения барицентра системы при наличии планеты. К сожалению, достигнутая предельная точность метода (около 2 м/с) не позволяет обнаруживать планеты земного типа. Для сравнения, скорость смещения барицентра системы «Солнце-планета» под действием притяжения Юпитера, Сатурна и Земли составляет, соответственно, 13 м/с, 2,8 м/с и 0,09 м/с.

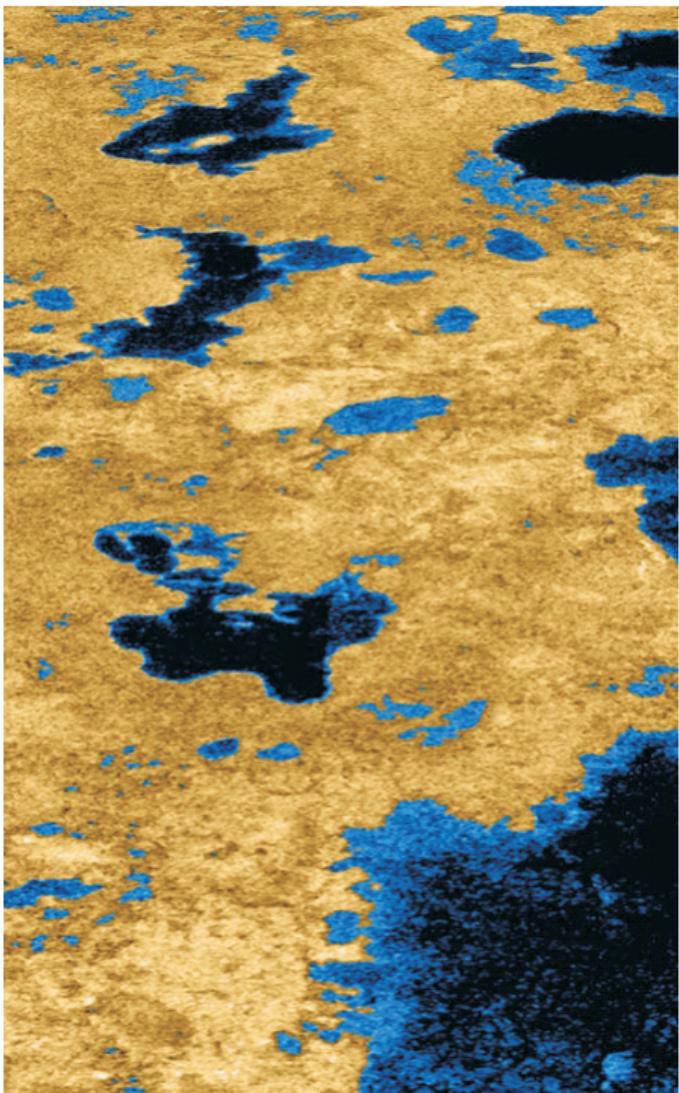


Рис. 14. Озера метана на поверхности Титана.

В самое последнее время начал применяться фотометрический метод, в основе которого лежит регистрация ослабления света родительской звезды при прохождении планеты по ее диску. Прямая регистрация отра-



Рис. 15. Космический телескоп «Кеплер».

женного планетой света проблематична: планета земного типа в пределах 1 а. е. на длине волны 10 мкм излучает в 10^6 - 10^9 раз слабее родительской звезды. К тому же пылевой фон может быть почти в 300 раз ярче планеты. Использование «затменного» метода стало возможным благодаря созданию на базе самых передовых технологий высокочувствительных детекторов. Достигнутая точность фотометрии составляет 10^{-5} , то есть речь идет о возможности регистрации вариаций яркости звезды на уровне десятков-сотен фотонов. Именно такой точностью обладает запущенный весной 2009 г. космический аппарат «Кеплер» (NASA) с телескопом диаметром 90 см (рис. 15), задачей которого является обнаружение в выбранном участке небесной сферы ($10^\circ \times 10^\circ$) планет типа Земли (в первую очередь, в «зоне обитания»), изучение распределения планетных масс и общей архитектуры планетных систем. На очереди использование еще более эффективного для поиска небольших планет

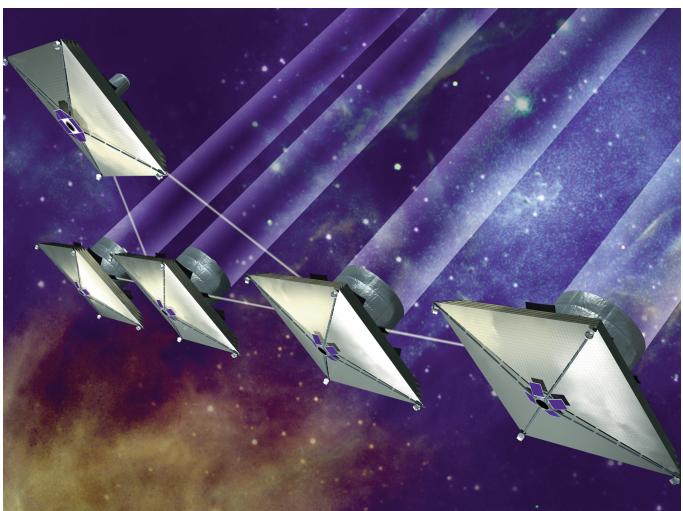


Рис. 16. Космический телескоп-интерферометр *Terrestrial Planet Finder* (проект). © NASA

астрометрического метода, особенно с использованием космических телескопов-интерферометров (рис. 16). Интерферометрический метод позволит достигнуть точности порядка одной микросекунды дуги (для сравнения Земля на расстоянии 10 пк создает амплитуду 0,3 микросекунды дуги).

Пока же из-за инструментальных ограничений обнаружено лишь несколько планет, близких по своим размерам к Земле. Подавляющее большинство открытых планет — это массивные большие планеты типа Юпитера, многие из которых находятся на близких к звезде орbitах. Они получили название «hot Jupiters» — «горячие Юпитеры». Температуры их внешних газовых оболочек достигают 1000–1500 К. При таких температурах могут конденсироваться только некоторые тугоплавкие элементы. Поэтому говорить о возможности существования на них жизни не приходится. Заметим, что по наблюдениям очень трудно

выявить различие между крупной внесолнечной планетой и коричневым карликом. Массы некоторых открытых внесолнечных планет приближаются к порогу массы, необходимой для термоядернойдейтериевой реакции ($0.013 M_{\odot}$).

В создании конфигураций планетных систем важная роль, несомненно, принадлежит стохастической динамике. Компьютерное моделирование свидетельствует, в частности, о важной роли приливной и столкновительной эволюции при формировании планетной системы. Стохастическая динамика приводит к крайней чувствительности конфигурации планетной системы к начальным условиям, включая гравитационную неустойчивость. Такой подход делает уязвимым предположение о частом рождении устойчивых планетных конфигураций типа Солнечной системы и остро ставит вопрос о том, не является ли она уникальной в смысле устойчивости. На рис. 17 показана гипотетическая планетная система у звезды HD 189733 в сравнении с Солнечной

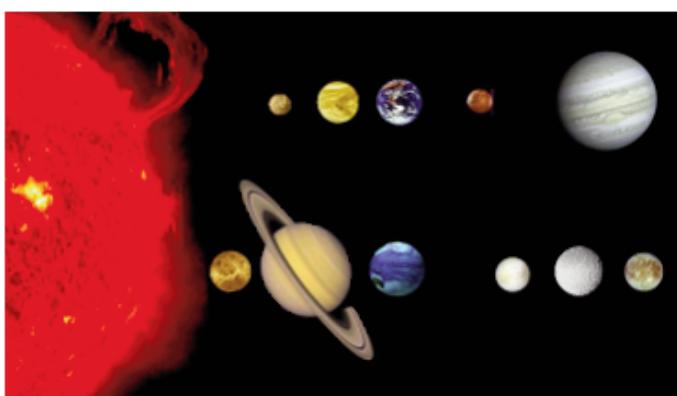


Рис. 17. Сопоставление Солнечной системы с гипотетической планетной системой у звезды HD 189733 (рисунок художника).

системой. В атмосфере известной (но, возможно, не единственной) планеты этой звезды обнаружены вода и метан, что вызывает к ней повышенный интерес. Однако в показанной конфигурации, при наличии планеты-гиганта типа Сатурна вблизи звезды, система может быть неустойчивой, по крайней мере, на временном интервале, необходимом для зарождения жизни на одной из планет.

Зарождение и эволюция внеземного разума — гораздо более сложный и уязвимый путь развития жизни. Поэтому нам кажется вполне обоснованным представление о том, что переход от примитивной к более высокоорганизованной жизни столь же маловероятен, как и сам процесс возникновения живого из неживого. На пути к возникновению интеллекта может возникнуть множество препятствий. В их числе одним из решающих, несомненно, является время. Но можно назвать и астрономические факторы. Так, например, рептилии (динозавры) на Земле в принципе имели шанс стать более высокоразвитыми существами (если бы не исчезли 65 млн. лет назад вследствие упомянутой выше катастрофы), что могло затруднить или даже воспрепятствовать появлению приматов и человека. Но если даже допустить, что возникшая где-то во Вселенной жизнь развилась до уровня интеллекта, ее подстерегает множество опасностей, обусловленных неизбежными, как показывает земной опыт, внутренними противоречиями. Другими словами, социально-экономические и политические проблемы могут оказаться критичными в процессе возникновения и эволюции разумной жизни и техногенной цивилизации на других небесных телах.

Под этим углом зрения следует, на наш взгляд, рассматривать вопрос о существовании внеземного разума и перспективах установления контактов с гипотетическими цивилизациями. Поиск внеземных цивилизаций, известный как SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence) — это интригующая комплексная проблема, решение которой связано с разработкой многоплановой стратегии и использованием самых передовых технологий.

К сожалению, несмотря на приложенные усилия, огромный прогресс в разработке методов и использовании высококлассных астрономических инструментов, успехов на этом пути пока не достигнуто. Отсутствие внеземной связи можно, прежде всего, объяснить диспропорцией между необходимым временем передачи-приема сигнала и временем существования технологически развитой цивилизации. Аналогией может служить появление и схлопывание пузырей на поверхности лужи во время дождя, если учесть, что расстояние между «пузырями» достигает сотен и тысяч световых лет, и посланный сигнал (даже при прочих благоприятных условиях) не успевает достичь потенциального (и заранее неизвестного) адресата, не говоря уже об установлении двусторонней связи. При этом мы оставляем в стороне сопутствующие вопросы экономического, этического, философского и иного характера, как и вопрос о желании продвинутой цивилизации (например, в силу эгоцентризма) установить контакт с себе подобной или отставшей в развитии, скажем, на тысячи лет.

Так или иначе, перспективы развития SETI трудно оценить в силу ограниченной воз-

можности прогнозов. Вспомним однако, что всего лишь 20 лет назад:

- Не были обнаружены внесолнечные планеты;
- Не было громадных радиотелескопов, 10-метровых оптических телескопов-интерферометров и космических телескопов;
- Не было суперкомпьютеров, информационных технологий, Интернета, мобильных телефонов и др.;
- Не было выращивания стволовых клеток, клонирования и т. д.

Этот список можно продолжить. Но мы ограничимся вопросом: что принесут нам следующие 20 лет? Пятьдесят, сто лет? И в завершение вспомним высказывание Артура Кларка: «...Самая любопытная отрасль науки — исследование космоса... Чем лучше мы будем узнавать Вселенную, тем больше сюрпризов получим от нее. Взять хотя бы вопрос о существовании разумных существ. Не думаю, чтобы эти существа были подобны человеку. Может быть, у них три руки или три глаза — не знаю, на этот вопрос ответит будущее, но то, что они есть в других мирах, несомненно».

Очень хотелось бы разделить оптимизм Кларка, хотя нельзя исключить, как это ни прискорбно, что мы одиноки в бескрайних просторах Вселенной. Тем острее встает вопрос о зарождении жизни и одновременно философский вопрос о происхождении разума на Земле. «...На этот вопрос ответит будущее».

Заключение

Жизнь представляет собой исключительно сложный феномен, поэтому изучение проблемы ее происхождения и эволюции требует

междисциплинарного подхода и привлечения самых передовых современных методов исследований. За последние десятилетия в этом направлении достигнут значительный прогресс, получены впечатляющие результаты, прежде всего, в таких областях биологической науки, как молекулярная генетика и биохимия. Одновременно с этим пришло осознание того, что саму проблему происхождения жизни нельзя рассматривать изолированно, вне связи с многочисленными факторами, существующими в космосе. Так появилась новая научная дисциплина — астробиология, объединившая астрономию и биологию, в рамках которой ищутся такие взаимосвязи и предпринимаются попытки обнаружить жизнь за пределами Земли.

Мы попытались подойти к проблеме возникновения и поиска жизни, опираясь, в первую очередь, на биологический механизм земной жизни. Под этим углом зрения рассмотрены ограничения, накладываемые природными условиями на других планетах, включая экзопланеты, и перспективы обнаружения планет типа Земли, и сохраняющиеся возможности найти примитивную жизнь или ее следы в Солнечной системе. Среди разнообразных концептуальных подходов к проблеме происхождения жизни мы выделили две основные: древний мир РНК и последовательное упорядочение, как наиболее обоснованные и заслуживающие, на наш взгляд, наибольшего внимания. Основываясь на этих критериях, обсуждается проблема биологической эволюции, сопровождающая возникновение жизни. При этом подчеркивается важная роль дарвинизма на этапах биологической эволюции, но

не на ранних этапах становления жизни и развития молекулярных механизмов самоорганизации биологических систем. С этих позиций молекулярная генетика, биохимия и дарвинизм являются взаимодополняющими, лежащими в основе современной теории эволюции.

Среди астрономических аспектов происхождения жизни значительное внимание уделено связи биологической эволюции с космическими факторами. Среди них первостепенный интерес представляет, конечно, выбор между альтернативными моделями зарождения жизни и биосфера непосредственно на Земле или с участием внешнего источника. С учетом современных представлений о важной роли переноса вещества внутри и вне пределов Солнечной системы и миграционно-столкновительных процессов, ключевую роль в которых играют кометы и астероиды углисто-хондритового состава, эти тела рассматриваются как вероятные переносчики предбиотического или даже биотического вещества из Главного пояса астероидов и транснептунового пояса Койпера на ранних этапах формирования планет. В согласии с этим механизмом находится концепция древнего мира РНК, связывающего появление жизни с периодом интенсивной бомбардировки Земли астероидами и кометами на рубеже около 4 млрд. лет назад. С учетом ключевой роли воды в зарождении жизни важно отметить, что за счет кометно-астероидной бомбардировки Земля могла получить значительный приток летучих, в том числе количество воды, сопоставимое с объемом земных океанов.

Другой аспект связи биологических изменений с астрономическими факторами — это

непосредственные следствия бомбардировки планет (и, конечно, в первую очередь, Земли) астероидами и кометами. Они могли иметь катастрофические последствия при соударениях с Землей крупных тел, которые, несомненно, приводили к громадным биосферным изменениям. Очевидно, полному исчезновению жизни на Земле вследствие подобных катастрофических воздействий на биосферу, препятствовал факт ее высокой устойчивости и приспособляемости.

Проблемы происхождения жизни и возможности ее обнаружения, естественно, далеко выходят за пределы Солнечной системы. Проблема симбиоза биологии и астрономии особенно наглядно проявляется при обращении к вопросу о возможности возникновения жизни и ее обнаружения на планетах в окрестности других звезд. Подавляющее большинство открытых до настоящего времени планет — это массивные планеты типа Юпитера, находящиеся на близких к своей звезде орbitах. Необычны и конфигурации открытых планетных систем, которые по законам стохастической динамики могут быть неустойчивыми, в отличие от Солнечной системы. Пока из-за инструментальных ограничений обнаружено лишь несколько планет, похожих по своим размерам на Землю, однако новые методики и инструменты обещают уже в ближайшем будущем значительный прогресс на этом пути.

Еще гораздо более сложный и уязвимый этап развития жизни — это зарождение и эволюция внеземного разума. Вполне обоснованно представление о том, что переход от примитивной к более высокоорганизованной

жизни столь же маловероятен, как и сам процесс возникновения живого из неживого. На пути организации интеллекта может возникнуть множество препятствий, в числе которых решающими, несомненно, являются временной, астрономический и биологический факторы. Как показывает земной опыт, критичными в процессе возникновения цивилизации и эволюции разумной жизни могут оказаться социально-экономические и политические проблемы. Поиск внеземных цивилизаций (SETI) — комплексная проблема, решение которой связано с разработкой многоплановой стратегии и использованием самых передовых технологий. И сегодня невозможно строить прогнозы, ожидает ли человечество успех в этом интригующем разделе астрономии.

Литература

1. Галимов Э.М. Феномен жизни. Между равновесием и нелинейностью. Происхождение и принципы эволюции. М.: Едиториал УРСС. 2001.
2. Спирин А.С. Биосинтез белков, мир РНК и происхождение жизни. Вестник РАН, 2001, т.71, с.320-328.
3. Маров М.Я. Малые тела и некоторые проблемы космогонии. УФН, 2005, т. 175, с.668-678.
4. Галимов Э.М. (ред.). Проблемы зарождения и эволюции биосферы. М.: URSS, 2008.
5. Sagan C. Pale Blue Dot, Random House, NY, 1994.
6. Колесниченко А.В., Маров М.Я. Турбулентность и самоорганизация. Проблемы моделирования космических и природных сред. Изд-во БИНОМ, М.: 2009
7. Cosmovici C.B., Bower S., Werthimer D. (Eds.) Astronomical and Biochemical Origins and the Search for Life in the Universe, Editrice Compositori, 1997.
8. McKay C.P., Davis W.L. Planets and the Origin of Life. In: Encyclopedia of the Solar System, eds. P. Weisman, L.-A. McFadden, and T. Johnson Academic Press, 1999.
9. Looking for Life, Searching the Solar System. Cambridge University Press, 2005.
10. Заварзин Г.А. Становление биосферы. Вестник РАН, 2001, т. 71, с. 988-1001.