

АСТРОНОМИЧЕСКИЕ И КОСМОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОБЛЕМЫ ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЖИЗНИ

© 2023 г. М. Я. Маров^{1,*}

¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

*E-mail: marovmail@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.05.2023 г.

После доработки 17.07.2023 г.

Принята к публикации 17.07.2023 г.

Кратко рассмотрены фундаментальные свойства известной формы жизни, включая основополагающие представления о химической эволюции вещества и свойствах живой материи, основой которой служат биогеохимия и молекулярная биология. Обсуждаются концепции, лежащие в основе современного понимания происхождения жизни исходя из химической и биологической эволюции. Кратко затронуты основы астробиологии и интригующая проблема существования внеземного разума и поиска жизни во Вселенной.

Ключевые слова: астрономия, биогеохимия, молекулярная биология, абиогенез, панспермия, эволюция, астробиология, внеземной разум

DOI: 10.31857/S0004629923080078, EDN: HMMESR

1. ВВЕДЕНИЕ

Обсуждаемая тема чрезвычайно обширна и по своему содержанию является междисциплинарной. Она относится к самым фундаментальным направлениям современного естествознания и напрямую связана с астрономией и космохимией, поскольку мы изучаем не только ключевые проблемы происхождения жизни и ее физико-химические свойства, но и возможности ее зарождения в различных условиях космической природной среды и на разных объектах Вселенной. Это современное сравнительно молодое направление исследований, объединившее прежде всего астрономию и биологию, получило название “астробиология”.

Астробиология, которую вначале называли биоастрономией, изучает происхождение, распространение и эволюцию жизни на Земле, в Солнечной системе и во Вселенной, включая проблему существования внеземного разума. Стремительный прогресс биологии и астрофизики, в том числе открытие внесолнечных планетных систем, поставил этот раздел астрономических исследований на новую научную основу. Современные наземные и космические инструменты открыли уникальные возможности наблюдений структуры и свойств таких космических объектов, как молекулярные облака, окологвездные газопылевые протопланетные диски, которые следует считать колыбелями жизни и в кото-

рых протекают начальные космохимические процессы, ответственные за ее истоки.

Последующие процессы, приводящие к зарождению живой материи, исключительно сложны и многообразны. В соответствии с фундаментальными принципами термодинамики, в основе циклических процессов энерго- и массообмена на живой планете лежат биогеохимические функции, и они считаются ответственными за происхождение, поддержание и распространение жизни. Наличие жизни создает новую оболочку планеты — биосферу, пронизывающую, согласно В.И. Вернадскому, все остальные оболочки: верхнюю часть коры (литосферу), гидросферу и атмосферу. В свою очередь, основой биосферы служат биотические циклы, включающие в себя процессы биогеохимической эволюции и трансформации органического вещества.

Жизнь, по определению В.И. Вернадского, “это могучая геологическая сила нашей планеты, формирующая облик Земли и создающая ее в образе живой планеты” [1]. Вернадский полагал, что добиогенная стадия эволюции неживого (косного, по его определению) вещества на Земле произошла очень быстро и что уже в самую раннюю геологическую эпоху, в архее, могли появиться миллионы открытых систем на основе образования разнообразных макромолекул — предшественников высокомолекулярных протеинов и нуклеотидов. Эти системы, как правило, были способны оставаться в течение некоторого



Рис. 1. Схематическое изображение фундаментальных свойств жизни.

времени в состоянии динамического равновесия с окружающей их средой и не изменяться, как это следует из характера и парагенезиса минералов. Высокая степень внутренней организации некоторых из этих систем привела к появлению устойчивых метаболических процессов и примитивной репликации, которые послужили основой возникновения биосферы, охватывающей, как уже говорилось, все другие оболочки планеты.

К ключевым вопросам, лежащим в основе астрономических аспектов проблемы происхождения жизни, следует отнести следующие:

— Что такое жизнь, что предопределяет ее возникновение?

— Каковы необходимые природные условия на планете для предбиологической эволюции вещества, приводящей к зарождению жизни?

— На какой, помимо известной нам водно-углеродной основе, в принципе возможно зарождение и существование жизни?

— Что выделило Землю среди других планет Солнечной системы для возникновения жизни и развития интеллекта?

— Существует ли примитивная жизнь на Марсе, в подповерхностных океанах галилеевых спутников Юпитера (Европе, Ганимеде), спутнике Сатурна Энцеладе, и каковы были пути возникновения и эволюции первичной углеводородной среды на Титане?

— Какова вероятность локального (*in situ*) возникновения жизни на планете на основе биохимических процессов (абиогенеза) по сравнению с глобальным источником — приносом “семян жизни” извне (панспермия)?

— Каковы перспективы развития возникшей жизни до интеллектуального уровня и обнаружения внеземных цивилизаций (проблема SETI, Search for Extraterrestrial Intelligence)?

Эти критерии являются основополагающими при рассмотрении вопросов зарождения и распространения (пролиферации) жизни и вероятности ее обнаружения за пределами собственной планеты. Попробуем обсудить эти актуальные вопросы с акцентом на ключевые астрономические и биохимические проблемы.

2. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ЖИЗНИ. ХИМИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ

Для жизни необходимы жидкая вода, наличие биогенных элементов и доступные источники свободной энергии. К фундаментальным свойствам жизни относятся: потребление энергии и природных веществ, репликация (воспроизводство), выделение отходов, активный биоминеральный обмен и эволюция (рис. 1). Согласно Вернадскому, “Жизнь состоит в значительной мере в извлечении из окружающей среды определенных химических элементов, проведении их через соединения или жидкости организма и их выделении вновь в окружающую среду, нередко в виде новых соединений” [2].

Основной вопрос, который мы задаем, касаясь проблемы зарождения жизни: как начался процесс перехода от предбиотической химии к возникновению процессов метаболизма, репликации и передаче генетической информации, поскольку в современном понимании жизнь определяют как функциональную систему, спо-

собную перерабатывать и передавать информацию на молекулярном уровне. Одна из характерных основ жизни — функциональная упорядоченность (самоорганизация).

Возникновению жизни и формированию биосферы предшествует химическая эволюция вещества в космосе и на планете, имеющая важные следствия для последующих процессов биогеохимической и биологической природы, включая упорядочение и самоорганизацию. В межзвездной среде, особенно в областях гигантских межзвездных молекулярных облаков, обнаружено большое разнообразие органических соединений, многие из которых имеют довольно сложный химический состав (см. табл. 1 [3]). В них содержатся азот, кислород и биологически важный углерод. Особенно много (до 10%) его связано в полициклических ароматических углеводородах (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH), сосредоточенных, преимущественно, в молекулярных облаках, где они образуют сложные углеродные цепи и решетки типа фуллеренов, а при низких температурах (~10 K) захватываются ледяными оболочками пылевых частиц облака. Ледяные мантии состоят из H_2O с примесью метанола (CH_3OH), CO_2 , CO^1 и NH_3 , а через процессы фотоллиза они функционально связаны с образованием кетонов, метила, алкоголя, карбоксильных групп и других сложных органических соединений. Измерения с высоким спектральным и пространственным разрешением сетью высокочувствительных наземных радиотелескопов ALMA (Atacama Large Millimeter Array [4]) выявили наличие многих сложных молекул, важных с точки зрения предбиогенной химии. Среди них молекулы формальдегида (H_2CO), этанола ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$), гликольальдегида (CH_2OHCHO), этиленгликоля ($((\text{CH}_2\text{OH})_2)$), метилформиата (метилового эфира муравьиной кислоты CH_3OCHO), диметилэфира (CH_3OCH_3), а также много других соединений, включая обогащенные дейтерием. Особый интерес вызывают молекулы, содержащие пептидные связи, и простые сахара, а также метиламин, являющийся предшественником простейшей аминокислоты — глицина. По оценкам, общее число органических молекул, содержащих до 40 атомов, достигает нескольких сотен. Все это указывает на чрезвычайно богатую предбиогенную химию межзвездной среды, особенно молекулярных облаков и окрестностей молодых звезд, что расширяет перспективы обнаружения в их планетных системах признаков жизни.

¹ Заметим, что CO считается наилучшим индикатором переноса массы вещества в протопланетном диске. В этом качестве этот компонент используется, в частности, в наблюдениях ALMA и служит для оценки массового содержания пыли и газа.

Наряду с органическим синтезом, возникновению жизни могут способствовать широкая космическая распространенность необходимых ингредиентов и тот факт, что метаболически (дыхание, питание) жизнь обладает большим разнообразием и приспособляемостью. Вместе с тем жизнь способна существовать лишь в ограниченном диапазоне условий природной среды, несмотря на высокую выживаемость микроорганизмов. Иными словами, сам космос налагает сильные ограничения на условия возникновения жизни, прежде всего на параметры небесного тела, на котором могла бы зародиться жизнь, что ограничивает вероятность ее обнаружения и признаков воздействия на природную среду.

3. ОСНОВЫ БИОГЕОХИМИИ

Согласно законам термодинамики, основой жизни служат *биогеохимическая энергия* живого вещества и стремление системы достичь минимума свободной энергии. Эти принципы заложены в исходных геохимических процессах на Земле и, вероятно, в обобщающих космохимических процессах на других телах во Вселенной. Вернадский допускал, что сам космос является источником жизни, возникшей вслед за образованием Вселенной. Он писал: "...Жизнь есть такая же вечная черта строения космоса, какой является атом и его совокупности" [1]. Оставляя в стороне это спорное утверждение, согласимся с другим его утверждением относительно взаимосвязи форм жизни, как целостного космопланетарного явления в масштабах биосферы. Эта взаимосвязь определяет химизм, миграцию и дифференциацию химических элементов и отдельных изотопов на основе особых разнородных биогеохимических функций и биогеохимических циклов — систем незамкнутых и необратимых круговоротов веществ в биосфере и других оболочках Земли. Непрерывно идущая биогенная миграция атомов в коровом слое Земли, вызываемая геохимической энергией живого вещества, приводит к изменению в них атомных и изотопных соотношений элементов. При этом неполная обратимость (незамкнутость) является одним из важнейших свойств биогеохимических циклов, имеющая планетарное значение. Эти циклы пронизывают все живое в биосфере как глобальной экосистеме, причем их важнейшим компонентом являются трофические связи (пищевые цепочки).

К биогеохимическим функциям (циклам), как к основе жизни, относятся:

- метаболизм и дыхание (все организмы);
- газообмен с участием $\text{N}_2\text{—O}_2\text{—CO}_2\text{—CH}_4\text{—H}_2\text{—NH}_3\text{—H}_2\text{S}$ (все организмы);
- кислородная функция (фотосинтез), присущая хлорофильным растениям;

Таблица 1. Некоторые молекулы, обнаруженные в межзвездной среде (числами полужирного начертания 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				C ₆ H ₅ CN
NH	CCS						
CH	C ₃						
CH ⁺	MgNC						
CN	H ₃ ⁺						
CO							
CS							
C ₂							
SiC							

- окислительно-восстановительная функция (превращение веществ и энергии в процессе жизнедеятельности);

- бактерии, ответственные за оксигенизацию биосферы;

- автотрофная функция (хемосинтез);

- концентрационная функция (накопление определенных химических элементов в одно- и многоклеточных организмах);

- кальциевая функция (накопление солей Са бактериями, мхами, водорослями, морскими организмами);

- регуляционная функция (разрушение органических соединений бактериями и грибами).

Главную роль в этих процессах играют микроорганизмы как самая мощная биогенная планетарная геологическая сила, самое мощное проявление живого вещества [5].

Происхождение жизни обусловлено ключевыми процессами биохимической эволюции – появлением молекулярных механизмов организа-

ции биосистем, образованием цепочек нуклеотидов и аминокислот. Они служат, соответственно, информационной (ДНК и РНК) и функциональной (протеины) основами жизни. Условия появления жизни тесно связаны с геологией и геохимией. «Геология позволяет сейчас научно ставить вопрос о начале биосферы, геохимия научно точно определяет условия, каким должна удовлетворять жизнь для того, чтобы могла создаться биосфера, а биогеохимия определяет геохимические процессы в биосфере, протекающие при участии живых организмов. “Живое вещество, так же, как и биосфера, обладает своей особой организованностью и может быть рассматриваемо как закономерно выраженная *функция биосферы*”» [6, 7].

Возникшие первичные примитивные организмы могли потреблять основные органические вещества в виде мономеров из небιологических источников, как это происходит сейчас в глубинной биосфере Земли. Сценарий начальных этапов возникновения биосферы с участием и последо-

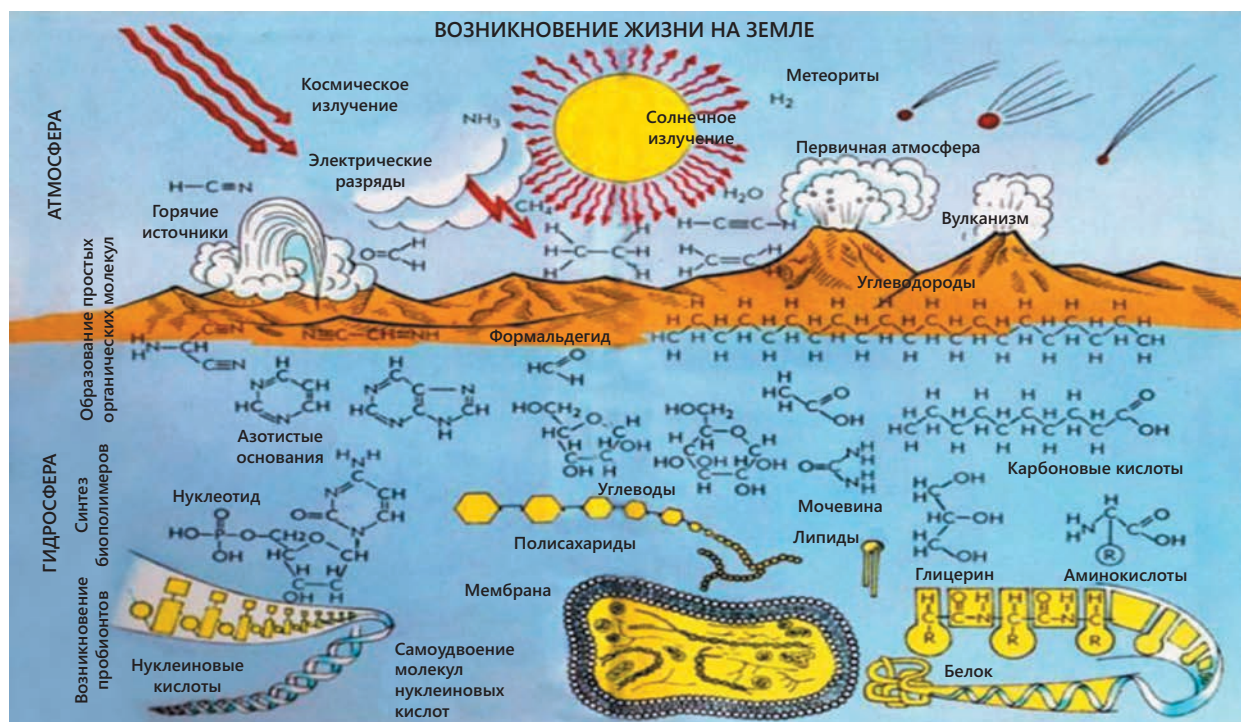


Рис. 2. Предбиологическая эволюция органических соединений на Земле в раннем архее, предшествующая образованию биосферы. © Википедия

вательным усложнением простейших органических соединений показан на рис. 2.

Основной вопрос зарождения жизни — переход от абиогенной химии к процессам метаболизма, репликации и передачи генетической информации. В качестве вероятных механизмов такого перехода рассматривают абиогенез и панспермию. Под абиогенезом понимают возникновение жизни из неорганического вещества, в противоположность биогенезу: все живое от живого (*omne vivum ex vivo*). Согласно принципу итальянского натуралиста XVII столетия Франческо Реди, абиогенез предполагает возникновение особой формы материи из косного вещества в ранние геологические эпохи. Вернадский считал вполне закономерным абиогенное появление многообразных живых форм “в процессе геологического круговорота веществ” из неорганических веществ, приводящего к совокупности многих видов, морфологически принадлежащих к разным классам организмов и раннему появлению биоценозов” [6, 7], хотя последующий эволюционный процесс был длительным. В качестве вероятных источников предбиотических соединений последователи этой идеи называют опаринский “первичный бульон”, дарвиновские теплые пруды, лагуны, приведшие к возникновению биоты, и глубоководные вулканические жерла — подводные горячие источники (vents), в ко-

торых могли появиться самые ранние формы жизни — гипертермофильные микробы.

Занос жизни на Землю извне путем панспермии — переносом “семян жизни” из межзвездной (межпланетной) среды — представляется нам, наряду с абиогенезом, вполне возможным. Этот механизм, предложенный шведским физхимиком С. Аррениусом в самом конце XIX в., предполагает, что блуждавшие в течение миллионов лет в космосе и занесенные на Землю организмы нашли на ее поверхности условия, благоприятные для развития жизни или, по крайней мере, стимулирования абиогенеза. Возникшие на начальной стадии первичные примитивные организмы могли потреблять основные органические вещества в виде мономеров из небиологических источников, как это происходит сейчас в глубинной биосфере Земли путем хемосинтеза. Идею о возможности сочетания абиогенеза и панспермии в процессах возникновения жизни разделял Вернадский. Синергизм этих двух подходов показан на рис. 3.

К сожалению, мы пока далеки от понимания основ зарождения и устойчивого функционирования живой системы. Очевидно, эти процессы происходили на молекулярном уровне в общей эволюционной “стреле времени” (по Пригожину). При этом новые изомерные формы образовывались из достаточно крупных структурированных молекулярных комплексов, генерация



Рис. 3. Синергизм локального (абиогенез) и глобального (панспермия) источников происхождения жизни. © Википедия

которых вероятно имела в своей основе детерминированный характер [8]. Одновременно происходила генерация отрицательной энтропии при выполнении в целом для всей системы второго начала термодинамики.

Есть вполне определенное понимание того, что природа наделила основные классы углеродсодержащих органических соединений стремлением к функциональному упорядочению через селективный катализ и самовоспроизведению, и в этом состоит основная парадигма жизни. Первичное упорядочение в состоянии динамического равновесия (гомеостаза) создают цепочки нуклеотидов и цепочки аминокислот — пептидов, соединенных амидными связями, образующими белки. При этом цепочки нуклеотидов обеспечивают самовоспроизведение (репликацию) и передачу наследственной информации, как основное свойство живой материи, а цепочки аминокислот формируют биологические структуры — универсально построенные организмы, способные к бесконечному разнообразию (биоразнообразию).

Как видим, уникальными свойствами органических соединений, необходимых для возникновения и эволюции жизни, является их способность к функциональному упорядочению. В мире органических соединений такое упорядочение обусловлено уникальными свойствами соединений углерода. Только на основе углерода могут образовываться сложные биополимерные структуры, создаваться упорядочение через селективный (ферментативный) катализ и функция репликации. Это утверждение следует считать основной парадигмой происхождения жизни. Поэтому встречающиеся иногда рассуждения о возможности существования жизни на основе, например, кремния вряд ли следует считать обос-

нованными. По нашему мнению, если существует жизнь во Вселенной, то молекулярно она, вероятно, построена примерно аналогичным образом, как на Земле, — на основе углерода, его соединений и воды и на принципах, обеспечивающих белково-нуклеотидную форму функционирования. К этому добавим, что существование живых систем обеспечивается наличием флуктуаций отрицательной энтропии в отсутствие химического равновесия системы, несовместимого с понятием жизни. Еще одним фундаментальным свойством жизни является наличие диссимметрии — однонаправленной ориентировки биологических молекул-изомеров молекул (L-аминокислот и D-сахаров), известная как хиральность. Причина ее возникновения остается до конца непонятой.

4. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ 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 служат молекулярная биология и биогеохимия, важнейших положений которых мы здесь очень кратко коснемся [9].

Основа живых организмов — 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, вме-

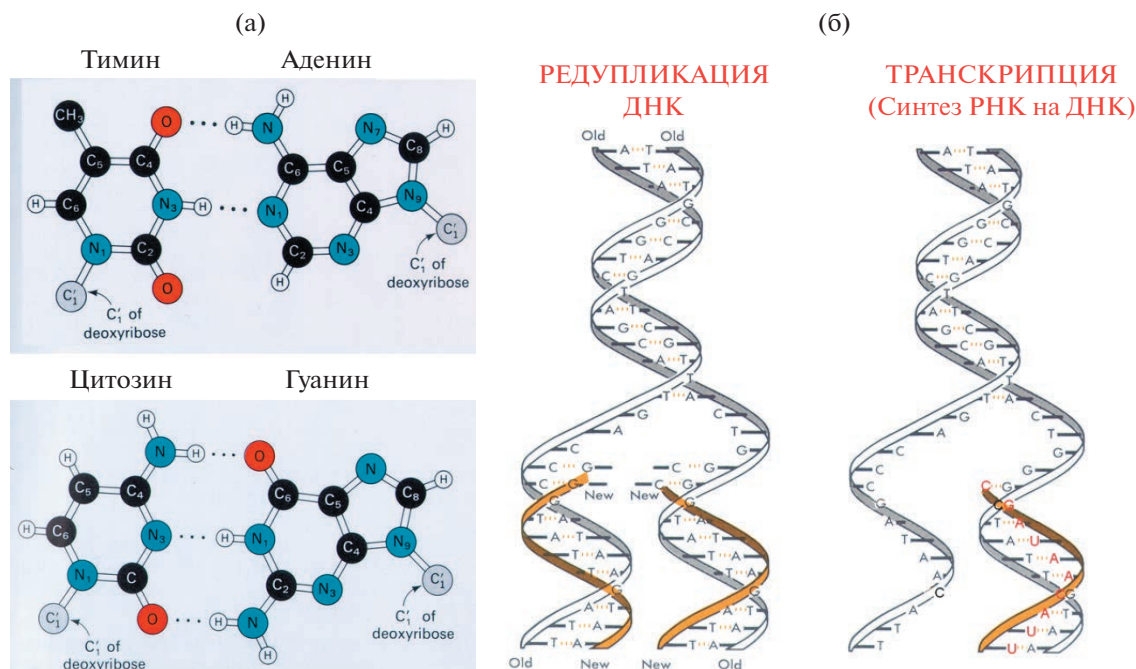


Рис. 4. а) Нуклеотиды, образующие комплиментарные пары на основе водородных связей. б) Полинуклеотидные цепи со свойствами редупликации (воспроизводства) и транскрипции (синтеза РНК на основе ДНК).

сте с молекулами сахара и фосфатной группы, азотистыми основаниями. Это аденин (А), гуанин (G), цитозин (C) и тимин (Т) в ДНК или урацил (U) в РНК. Цепочки нуклеотидов и аминокислот образуют, соответственно, длинные полинуклеотидные цепи и пептиды, участвующие в биосинтезе белков. Азотистые основания нуклеотидов аденин, гуанин, цитозин и тимин (урацил) образуют комплиментарные пары на основе водородных связей (Т–А, С–G и т.д.). Такие структуры, показанные на рис. 4, обладающие чрезвычайно плотной трехмерной упаковкой, обеспечивают получение точных копий (*реplik*) нуклеотидной цепи, необходимых для синтеза белков и служат информационной основой жизни на молекулярном уровне.

Белки (протеины) — 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, в том числе редупликации (воспроизводства) и транскрипции (синтеза РНК на основе ДНК) (рис. 4).

Свойства белка определяются нуклеотидной последовательностью кодирующего его гена в соответствии с выработанными природой правилами — генетическим кодом, имеющим детерминированную природу. Каждая аминокислота имеет нуклеотидный символ, которым служит нуклеотидный триплет (кодон). Каждый смысловой ко-

дон придает определенное свойство одной аминокислоте, обеспечивая тем самым программирование 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 (наследственного) материала в живой системе на клеточном уровне служит геном, который для большинства организмов состоит из молекул ДНК, а сами размеры геномов в зависимости от сложности организмов отличаются на несколько порядков. Но геном некоторых вирусов состоит из РНК, как, например, геном вируса HIV1, вызывающего СПИД. Соматические клетки высших млекопитающих и человека содержат 23 пары хромосом — 22 пары телных хромосом (аутосом) и одну пару половых хромосом X и Y (гаметов), находящихся в клеточном ядре, — причем каждая клетка обладает множеством содержащихся в митохондриях (органеллах эукариотических клеток) копий митохондриальной ДНК (мДНК). Эти молекулы преобразуют химическую энергию пищи в доступную для потребляемой клетками форму, такую, например, как аденозинтрифосфат (АТФ), к которой мы еще вернемся при обсуждении путей зарождения жизни. Двадцать две аутосомы, половые хромосомы, митохондриальная ДНК человека содержат в совокупности примерно 3.1 млрд. пар оснований.

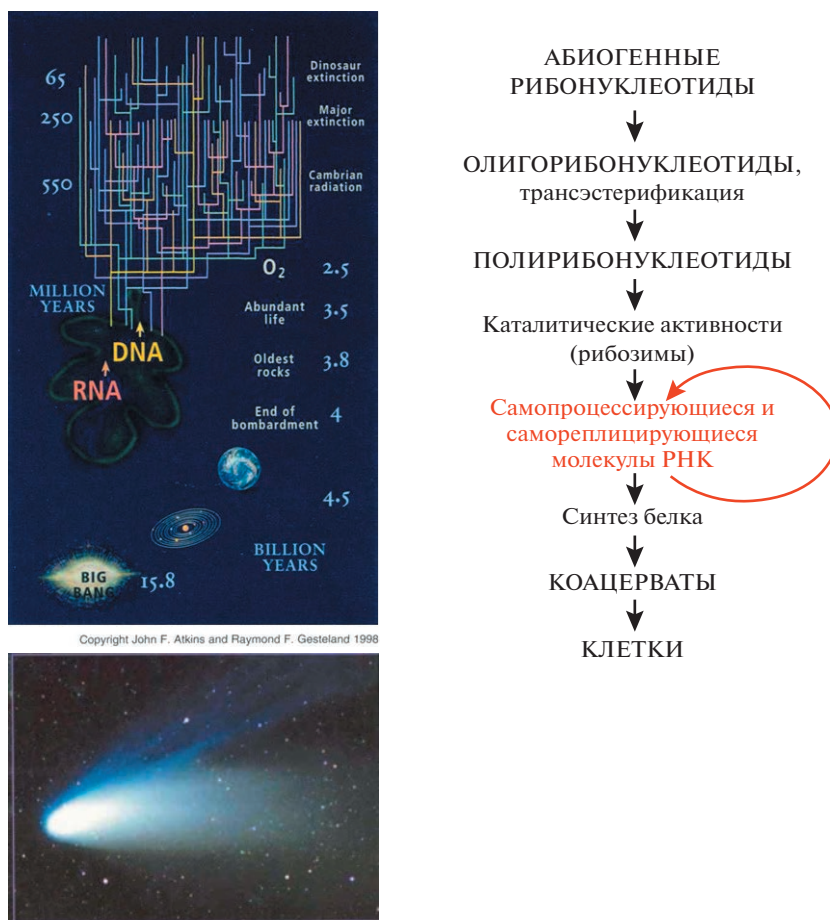


Рис. 5. Концепции древнего мира РНК как одна из гипотез происхождения жизни. © А.С. Спирин. Слева внизу — комета, ядро которой может служить хранилищем РНК.

5. 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. Абстрагируясь от теологических воззрений, это *древний мир РНК* и *последовательное упорядочение*. Автор склоняется к концепции упорядочения, которая в наибольшей степени отвечает его мировоззрению.

Представление о том, что прообразом жизни был древний мир РНК [10], как основа эволюции первичной биосферы, разделяется многими известными исследователями, среди которых К.Р. Вуз, Л. Оргел, В. Гилберт, А.С. Спирин. Аргументами в пользу данной концепции служат уникальные свойства этой молекулы (трехмерно-го гетерополимера), определяемые последовательностью оснований РНК вдоль нити и характером скручивания (рис. 5). Действительно, ансамбли молекул РНК выполняют функции ассимиляции, метаболизма, репликации. Важно

подчеркнуть, что РНК могут содержать также генетическую информацию или служить временной копией генетической информации. Для этого используется короткоживущая промежуточная молекула (m-РНК), несущая первичную информацию о производстве специфического белка и обеспечивающая копирование клеточного генома ДНК.

Вообще РНК способны выполнять многие базовые функции ДНК, участвуя в процессе синтеза белка (*рибосомы*). К ним относятся: кодирование — программирование синтеза биополимеров линейной последовательностью полинуклеотидов; репликация — строгое копирование генетического материала; свертывание 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), т.е. обеспечивает перенос других молекул, необходимых для протекания ря-

да 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 спецификацией, 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 нуклеиновых кислот в структурные параметры белков и как он сформировался в процессе эволюции.

Из всего сказанного следует, что РНК, будучи рабочим инструментом клеточного производства, могли быть прототипами живых систем (рис. 5). Однако, как показали оценки потребных времен на шкале преобразования органического вещества, возникновение мира РНК и его эволюция до первых высокоорганизованных организмов — бактерий примерно в первые полмиллиарда лет истории Земли крайне маловероятно, что признают сами сторонники данной концепции. Снять это противоречие позволяет гипотеза о зарождении и начальной эволюции ансамблей молекул РНК в космической среде, в первую очередь в ядрах комет. Попадая на Землю в ходе широко распространенных процессов миграции и соударений, эти молекулы обретают среду, стимулирующую их дальнейшую эволюцию. Иными словами, с древним миром РНК напрямую связана концепция панспермии — 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 следую-

щей вслед за хаотическим состоянием стадии эволюции живой материи — стадии молекулярного мира [8]. В своей первоначальной форме она предложена Э.М. Галимовым [11, 12], рассмотревшим упорядочение (или 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 внутреннюю 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, как отмечалось выше, космическое происхождение. В ней идут сопряженные химические реакции и производится, наряду с положительной, отрицательная энтропия (неэнтропия), что является непременным условием возникновения структурной организации (упорядочения) в хаотической среде. В такой системе поддерживается энергия выше некоторого минимального уровня, при непременном выполнении пригожинского условия минимума производства энтропии [13].

Химическое упорядочение (ограничение числа партнеров в реакции, числа механизмов и путей взаимодействия) эффективно осуществляется путем селективного катализа с участием биохимических катализаторов — ферментов, представляющих собою пептидные цепочки, свернутые в плотные трехмерные структуры и обладающие чрезвычайно высокой активностью. Согласно Галимову, “в природе нет органических соединений, более эффективно осуществляющих упорядочение посредством селективного катализа, чем пептиды” [11]. Исходя из данной концепции, ключевую роль играет упомянутая в контексте клеточного преобразования энергии молекула аденозинтрифосфата (АТФ), состоящая из аденина, рибозы и фосфатной группы (рис. 6). Она поглощает солнечную энергию и передает ее в сопряженную химическую систему, а универсальным посредником, обеспечивающим сопряжение, является вода (реакция гидролиза). Привлекательным обстоятельством является то, что АТФ синтезируется на основе простых молекул — цианистого водорода HCN и формальдегида H₂CO, широко распространенных в космосе.

Возникновение порядка из хаоса (самоорганизация) — удивительное свойство неживой материи, широко распространенное в природе. Оно наблюдается на больших и малых масштабах в структуре галактик, в фракталах и структуре кристаллов, в турбулентных течениях и др. Способность к упорядочению через селективный катализ

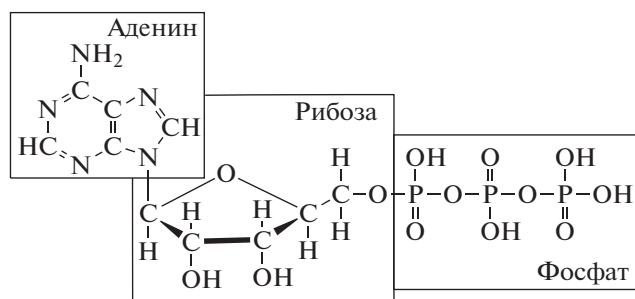


Рис. 6. Молекула аденозинтрифосфата (АТФ).

и способность к самовоспроизведению — два важнейших свойства биоорганических соединений, необходимые для возникновения и эволюции жизни. Первичное упорядочение создают 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 стремление к упорядочению через селективный катализ и способность к самовоспроизведению между двумя классами органических соединений. Вновь подчеркнем, что в мире органических соединений упорядочение обусловлено уникальными свойствами соединений углерода, на основе которых могут создаваться сложные биополимерные структуры².

Рассмотренная концепция возникновения и структурной организации живой материи через последовательное упорядочение (усложнение) представляется нам на сегодня наиболее обоснованной. Накопление изменений происходит в сильно нелинейной системе, что приводит к развитию неустойчивостей, возникновению бифуркаций и 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 каталитической функции пептидов до возникновения нуклеотидных последовательностей, участвующих в синтезе белка, и генетического кода.

² Все живые организмы Земли содержат суммарно 550 миллиардов тонн углерода из примерно 3.6 триллионов тонн биомассы.

С 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 [14], можно говорить о “фазовом переходе упорядочения”, отвечающем переходу от обычной термостатистики Гиббса к термостатистике Реньи, в рамках которой энтропию следует рассматривать в качестве потенциала, движущего систему в состояние наибольшей упорядоченности [15]. В этом случае, в отличие от классической статистической термодинамики Больцмана–Гиббса, обеспечивается принцип максимума энтропии для информационной энтропии Реньи, 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.

Подчеркнем, что реализация модели последовательного упорядочения (и возникновения “островков упорядоченности из первичного хаоса” [16]) для перехода к новому уровню самоорганизации требует наличия обратной связи, которая является ее важным свойством. Наличие отрицательной обратной связи необходимо для существования биосферы. Требуется 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.

6. ПРЕДБИОЛОГИЧЕСКАЯ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ

Как уже говорилось, Вернадский полагал, что первичные очаги жизни и биосфера Земли возникли в самую раннюю геологическую эпоху (хадейское событие). Предбиологическая эволюция происходила очень быстро, и “поле жизни” оставалось со времени архейской эры в целом неизменным, на что указывают характер и парагенезис минералов (биоминералов) в биосфере. В детритных цирконах с возрастом 4.1 млрд. лет был найден легкий изотоп углерода, что связывают с биологическим фракционированием.

Исходя из рассмотренных выше основополагающих биогеохимических процессов, предполагают, что уже в раннем археозое на основе первичных высокомолекулярных белковых и нуклеотидных соединений могли возникнуть

миллионы открытых диссипативных систем с высокой степенью внутренней организации (минимума свободной энергии) и в состоянии динамического равновесия. Как мы видели, к периоду становления биосферы относится начало матричного синтеза биологически значимых биополимеров, способных к катализу, и липидных пленок.

Рост структурно-функционального упорядочения обеспечил появление абиогенных рибонуклеотидов, безъядерных предшественников клеток — коацерватов — и биосинтез белков из аминокислот (“биологической машины” — рибосомы). Ключевую роль в функционировании этой машины играли процессы трансляции — синтез полипептидов на матричной (м-РНК) с участием транспортной РНК (т-РНК), а также процессы клеточного метаболизма, репликации и начало формирования генетического кода. За абиогенным синтезом органических соединений и матричным синтезом органических макромолекул последовало формирование аппарата метаболизма и репликации, предшествовавшего появлению и развитию прокариотов и эукариотов и их экологической экспансии.

Вслед за Вернадским современные исследователи считают, что простейшие организмы — эобионты (эобактерии) появились на Земле 4.25 млрд. лет тому назад, а возникновение механизма фотосинтеза у прокариотных протобионтов относят к периоду 4—3.5 млрд. лет назад. При этом огромный вклад в биогеохимические процессы в биосфере внесли цианобактерии: они первыми в мире прокариотов освоили кислородный фотосинтез и обеспечили кислородную функцию (оксигенизацию) биосферы. На протяжении последующих миллиардов лет биологической эволюции происходили процессы формирования лика Земли, в которых ключевая роль принадлежала биогенной миграции атомов в биосфере и одновременно происходило изменение организмов во времени, в котором основную роль стал играть естественный отбор — дарвинизм.

Мы видели, что начало процессу создания “морфологически различных наследственных рядов”, развитию молекулярных механизмов самоорганизации биологических систем и появлению сложных организмов из простых предков было положено на этапе предбиологической эволюции. Этап предбиологической эволюции завершается с возникновением генетического кода, после чего начинается биологическая эволюция (эволюция жизни). Первичные живые организмы — бактерии (прокариоты, эукариоты) обладали сложным молекулярным аппаратом белкового синтеза, наследственности, энергообеспечения и обмена веществ. Возникновение этих первых жи-

вых систем сопровождалось эволюцией на уровне клеток, организмов, экосистем и формированием биосферы.

В основе ее функционирования лежат процессы фотосинтеза двух типов (анаэробный и аэробный), обеспечивающие питание биологических организмов путем преобразования энергии солнечного света. Другим механизмом служат процессы автотрофного питания — хемосинтез — на основе реакций окисления неорганических соединений. Последний составляет основу глубинной биосферы Земли — подземной высокотемпературной экосистемы, функционирующей на основе активных микробиологических процессов. Населяющие ее многоклеточные эукариоты приспособились к экстремальным условиям на глубине до нескольких километров — анаэробной среде, высоким температурам (~100°C) и давлениям (сотни атм). Бактериальная жизнь в этих условиях неожиданно оказалась весьма богатой и разнообразной: ее составляют гетеротрофные и автотрофные бактерии, в основном, метаногены, археи и зубактерии. В отличие от основополагающего процесса, фотосинтеза, контролирующего жизнь на поверхности, эти бактерии (хемолитоавтотрофы) получают энергию за счет окисления неорганических веществ. Общая биомасса глубинных бактерий сопоставима с поверхностной биомассой Земли. Вероятно, эти микробные сообщества образовались из поверхностных одноклеточных микроорганизмов в результате медленной эволюции, и их геном может быть сопоставим с геномом гидротермальных микробов (см., напр., [17]).

Биологическая эволюция понимается как кумулятивные изменения во времени. По современным представлениям непрерывно нарастающее упорядочение (включая предшественников РНК) привело к тому, что на Земле примерно 3.8 млрд. лет 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 биосферы. При этом процессы упорядочения неизбежно сопровождались процессами разупорядочения и хаотизации. В конкурентных процессах упорядочения-разупорядочения (деградации) решающую роль играл дарвиновский естественный отбор. Таким образом, следует подчеркнуть 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 противоречивым, а взаимодопол-

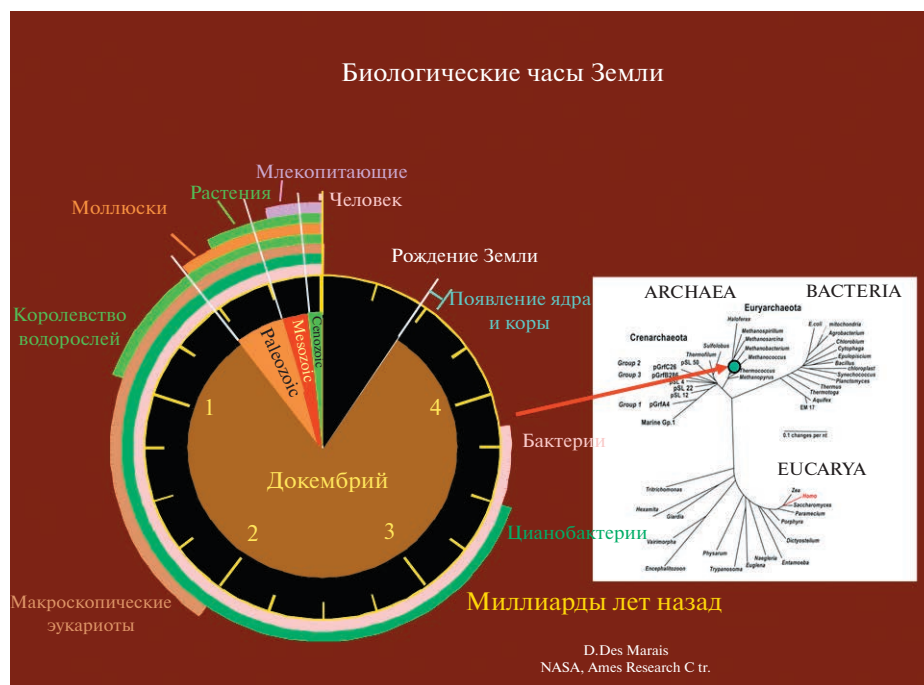


Рис. 7. Эволюция жизни на Земле (“Биологические часы Земли”). Справа — эволюция микробных сообществ от примитивных прокариотов до обладающих ядром эукариотов, входящих в клетки более сложных организмов.

няющим образом лежат в основе современной теории эволюции.

Развитием дарвинизма может служить концепция “конвариантной редупликации”, предложенная Н.В. Тимофеевым-Ресовским [18], 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. Соответственно, 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.

7. СВЯЗЬ С АСТРОНОМИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ

Зарождение и существование жизни на Земле, как и на любой другой планете, пригодной для обитания, нельзя рассматривать в отрыве от ее

космического окружения. Это касается, в первую очередь, положения звездной системы в галактике и нахождения планеты в окрестности родительской звезды. Не менее важным является наличие в межзвездной среде, особенно в гигантских молекулярных облаках, большого числа сложных органических соединений, о чем говорилось в разделе, посвященном химической эволюции (см. табл. 1). Они могли войти в состав протопланетных дисков и послужить основой последующих процессов, связанных с формированием биотической среды на планете.

В окраинных областях Галактики металличность звезд низка, и это препятствует образованию каменных планет земного типа. С другой стороны, ближе к центру Галактики, где процесс звездообразования интенсивен, металличность высока, но высока и частота взрывов сверхновых; и это приводит к невозможности устойчивого развития сложных форм жизни на планетах. Согласно модельным расчетам галактической эволюции [19], галактическая зона обитаемости, где возможно существование жизни земного типа, ограничена кольцом радиальной протяженности от 7 до 9 кпк от центра Галактики; в котором находятся звезды, сформировавшиеся 8–4 млрд лет назад (рис. 8). В этой кольцеобразной области сосредоточено большинство (75%) звезд, у которых могут существовать планеты, на которых возможна жизнь, и эти звезды старше Солнца в среднем

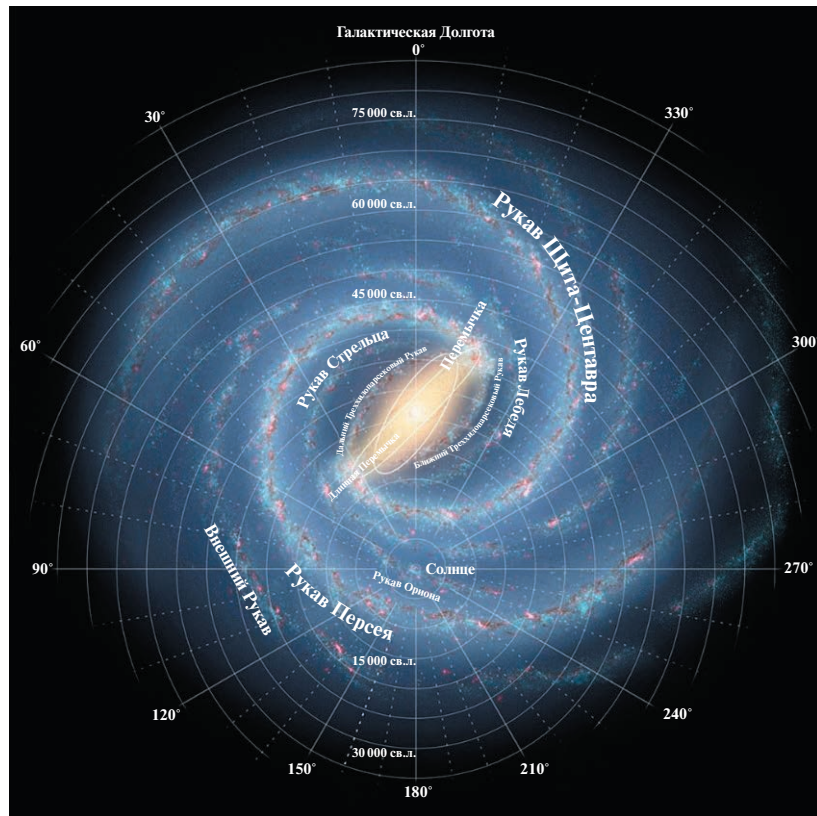


Рис. 8. Положение Солнечной системы в Галактике.

на ≈ 1 млрд лет. Отсюда следует, что пик возникновения жизни в Галактике пройден [19, 20].

Планета, пригодная для обитания, должна отвечать вполне определенным критериям, среди которых, в первую очередь, выделим следующие (рис. 9):

- принадлежность к звезде высокой металличности, находящейся в благоприятной галактической зоне на достаточном удалении от галактического центра с умеренным числом взрывов сверхновых, чтобы избежать воздействия жесткой радиации, но вместе с тем способствовать фрагментации молекулярных облаков;
- оптимальные размер и масса, поскольку большая планета активно аккрецирует окружающее вещество, превращаясь в газовый гигант, а малая планета теряет свою газовую оболочку — атмосферу;
- ограниченная зона расположения относительно родительской звезды, так как близкая планета захватывается в приливный резонанс, препятствующий возникновению жизни;
- радиальное расстояние от родительской звезды, в пределах которого возможны благоприятные климатические условия, т.е. температура и давление, обеспечивающие наличие жидкой во-

ды, которая отсутствует на очень холодной или очень горячей планете;

- благоприятный химический состав атмосферы, исключающий наличие агрессивных примесей.

Совокупности перечисленных критериев удивительным образом отвечает Земля, находящаяся в наиболее пригодной для обитаемости зоне в окрестности Солнца (рис. 10), а само Солнце расположено в рукаве Ориона на расстоянии ~ 8 кпк от центра Млечного пути. Очевидно, подобные области существуют и для экзопланет, а зоны их расположения зависят от спектрального класса звезды. Зона обитаемости — благоприятного климата — довольно узкая. В пределах Солнечной системы она находится в окрестности орбиты Земли, далеко не доходя до орбиты Венеры и лишь приближаясь к орбите Марса (рис. 10). Ограничением для Венеры служит необратимый парниковый эффект, развивающийся с приближением планеты к Солнцу и повышающий температуру у ее поверхности до 475°C , а давление углекислой атмосферы до 90 атм. Иная ситуация на Марсе, на котором, судя по остаточным геологическим формам рельефа, ранее существовали благоприятные климатические условия с обилием воды на поверхности, которые катастрофически измени-

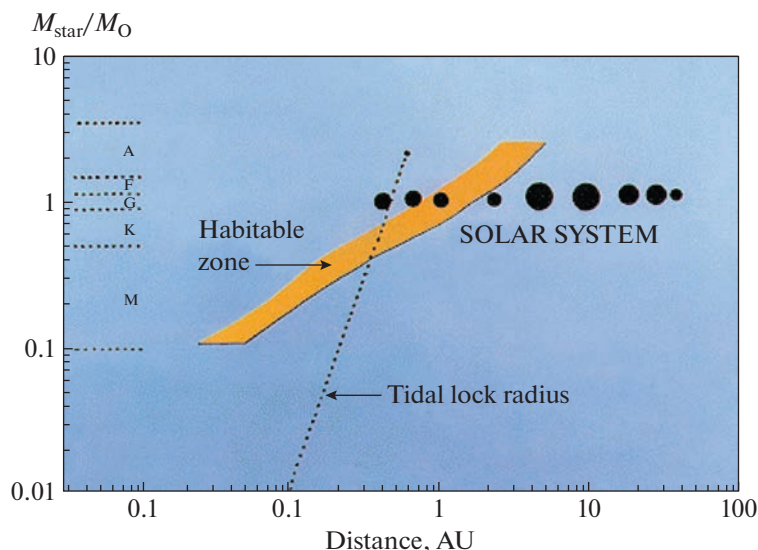


Рис. 9. Планеты, пригодные для жизни, в окрестности родительской звезды. По вертикальной оси — спектральный класс и масса звезды в массах Солнца, по горизонтальной оси — расстояние от планеты до звезды в а.е. Штриховые кривые — предельные ограничения для планет в зависимости от класса звезды и радиального расстояния, пунктирная линия — зона захвата в приливной резонанс. Желтая полоса — область, пригодная для существования жизни. В Солнечной системе в нее попадают Земля и частично Марс. © ISU



Рис. 10. Зона обитаемости в окрестности Солнца.

лись примерно 3.8–3.6 млрд. лет тому назад, оставив безводную пустынную поверхность и разреженную атмосферу. Но, так или иначе, свидетельства в пользу существования на Марсе благоприятного палеоклимата подкрепляют представления о зоне обитаемости в Солнечной системе, простирающейся вплоть до марсианской орбиты.

В Солнечной системе (и, вероятно, в других планетных системах) важная роль принадлежит миграционным процессам транспорта вещества астероидов углисто-хондритового состава и комет из внешних областей в зону внутренних планет. Такой транспорт и ударная бомбардировка рассматриваются в качестве вероятного переносчика предбиотического и/или биотического ве-

щества из транснептуновых областей, включая пояс Койпера, на ранней стадии эволюции Солнечной системы, и лежит в основе гипотезы панспермии. В метеоритах Мерчисон и Мюррей, содержащих около 2% (по весу) органического углерода, было найдено свыше 75 аминокислот, что свидетельствует в пользу предположения о внеземном происхождении предшественников биомолекул. Действительно, как показал анализ вещества метеоритов, в них содержатся соединения, которые ранее были обнаружены в космических породах, включая гуанин, аденин и урацил.

В согласии с миграционным механизмом находится рассмотренная выше концепция древнего мира РНК, связывающая появление жизни с

периодом интенсивной бомбардировки Земли (Large Heavy Bombardment, LHB) астероидами и кометами около 4 млрд. лет назад. Действительно, в ядрах комет и углистых хондритах содержатся большие объемы водяного льда 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 ко-ацерватов и клеток показаны на рис. 5.

Как видим, углистые хондриты дают ключ к отысканию источников внеземного органического вещества: в них содержится химически связанная вода (в среднем до 10–15%), и вероятно, что их родительские тела (гидросиликаты) образовывались в водной среде. Соотношение углерода в кометах и углистых хондритах 10:1 (углистые хондриты вероятно недополучили углерод), но летучая органика метеоритов могла быть потеряна на более поздних стадиях при взаимных соударениях астероидов.

Ключевая роль в зарождении жизни принадлежит воде: без нее не могли образоваться РНК и ее структуры, без нее невозможно создать никакие молекулы нуклеиновых кислот. Как показали наши модельные расчеты (см., напр., [21, 22]), миграция малых тел в Солнечной системе и кометно-астероидная бомбардировка могли обеспечить значительный приток летучих (воды, азота, углерода), предбиотической органики и, возможно, даже РНК на Землю и другие планеты земной группы. В частности, Земля за счет экзогенного источника могла получить количество воды, сопоставимое с современным объемом земных океанов (около 2×10^{24} г) и этот же источник мог обеспечить образование предполагаемых древних океанов на Венере и Марсе [23].

Говоря о связи биологических процессов с экзогенными источниками, надо иметь в виду, что соударения астероидов и комет с планетами, наряду с позитивным фактором приноса вещества из межпланетной или даже межзвездной среды, расширяющим перспективы зарождения жизни, могли иметь для жизни и катастрофические последствия. В истории Земли выпадения крупных (километровых и более) тел периодически приводили к громадным биосферным изменениям, подобным космическому событию Чиксулуб – падению астероида размером примерно 10 км на полуострове Юкатан в Мексике, произошедшему около 66 млн. лет тому назад (на рубеже мела и кайнозоя) и оставившего кратер диаметром около 180 км и первоначальной глубиной около 20 км. Энерговыделение составило громадную величину – не менее 100 тератонн в тротиловом эквиваленте.

Кратер, с которым связана крупная гравитационная аномалия, обогащен иридием, что характерно для пород внеземного происхождения (и, вероятно, других металлов платиновой группы, связанных с железом во внутренних оболочках Земли вследствие процессов дифференциации недр). К этому же времени относят исчезновение на Земле древних рептилий, в частности, динозавров. Интересно, что рептилии возможно имели шанс стать в процессе эволюции более высокоорганизованными существами, что могло воспрепятствовать появлению человека.

Выдвинуто предположение, что выявленные долгопериодические вариации в массовом исчезновении морских организмов были вызваны забросом внутрь Солнечной системы многочисленных комет из облака Оорта вследствие периодических возмущений, связанных с движением Солнечной системы в Галактике (рис. 11). 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 полупериодом около 30 млн. лет.

Очевидно, полному исчезновению жизни на Земле вследствие подобных катастрофических воздействий на биосферу препятствовали высокая устойчивость и приспособляемость жизни. На рис. 12 показаны примеры такой приспособляемости к экстремальным и даже агрессивным условиям окружающей среды на Земле. 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. 12 показан гидротермальный источник на дне Красного моря, в котором обнаружены микроорганизмы, существующие при температуре около 120°C.

8. ПЕРСПЕКТИВЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ЖИЗНИ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

К традиционно задаваемому вопросу “Есть ли жизнь на Марсе?” сравнительно недавно добавился еще один вопрос: есть ли жизнь на спутниках Юпитера и Сатурна, что связано с особенностями их внутреннего строения – вероятным существованием подповерхностных глубинных океанов.

Среди планет земной группы Венера находится далеко за пределами зоны обитаемости. Марс продолжает волновать воображение возможно-

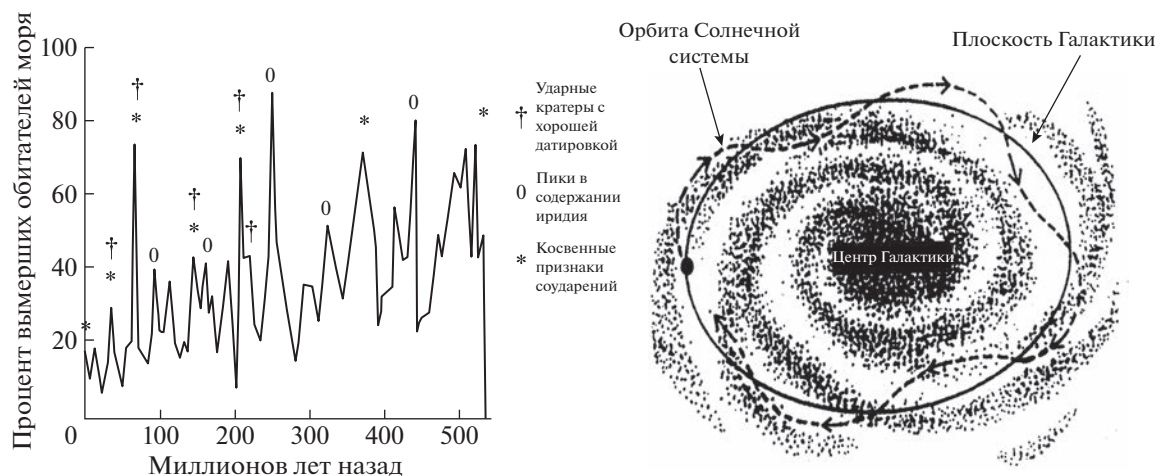


Рис. 11. Слева — массовое исчезновение морских организмов на Земле за последние 540 млн. лет. Эти события коррелируют с ударными кратерами, вещество которых обогащено иридием, что свидетельствует о выпадении космического тела. Справа — схема движения Солнечной системы в Галактике с периодическим пересечением галактической плоскости. © Википедия

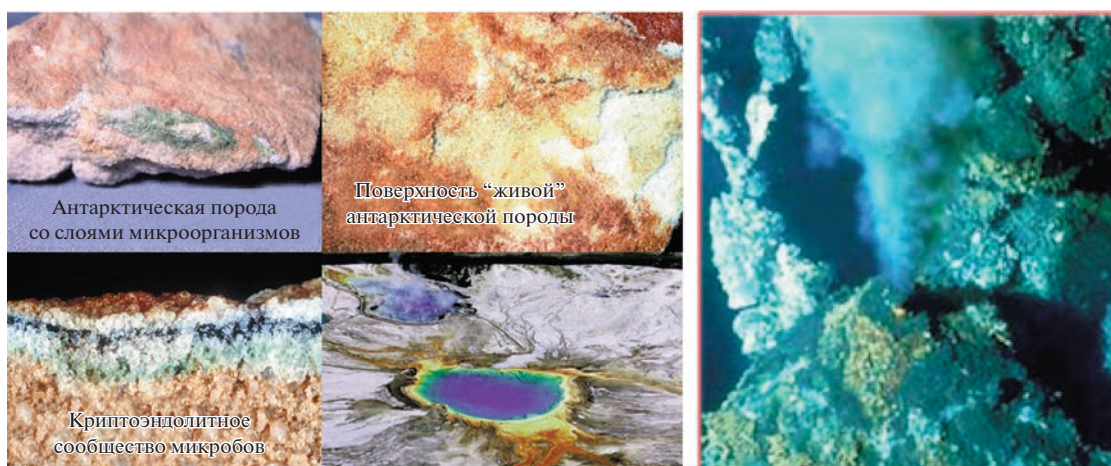


Рис. 12. Приспособляемость земной жизни к экстремальным условиям природной среды. Слева и в центре сверху — колонии микроорганизмов в антарктических породах. В центре внизу — озеро в Канаде с высокой кислотностью (pH 1), в котором существуют микроорганизмы. Справа — гидротермальный источник на дне Красного моря с температурой ~120°C, в котором обнаружены гипертермофильные микроорганизмы. © NOAA

стью обнаружить следы жизни или палеожизни — ископаемые остатки микроорганизмов (фосилы). Как уже говорилось, Венера находится далеко за пределами зоны обитаемости, что обусловило ее своеобразный климат. Температура и давление на поверхности составляют 475°C и 92 атм, атмосфера на 97% состоит из CO₂, вода практически отсутствует. В атмосфере происходят процессы круговорота серосодержащих и других соединений, обусловленные литосферно-атмосферным взаимодействием и вероятно сохранившемся вулканизмом (рис. 13). С циклами серосодержащих связано образование экзотических сернокислотных облаков Венеры [24]. Сооб-

щалось об обнаружении в них фосфина (фосфористого водорода) в пределах десяти ppb, который может иметь биологическое происхождение [25]. Это привело к предположению о жизни в венерианских облаках. Однако фосфин может иметь и небиологическую (вулканическую) природу, к тому же этот результат не подтвердился последующими измерениями.

С противоположной стороны на краю зоны обитаемости находится Марс. Такое расположение благоприятствует возникновению на нем жизни практически одновременно или даже раньше земной, и нельзя исключить, что она могла сохраниться в приповерхностных слоях после

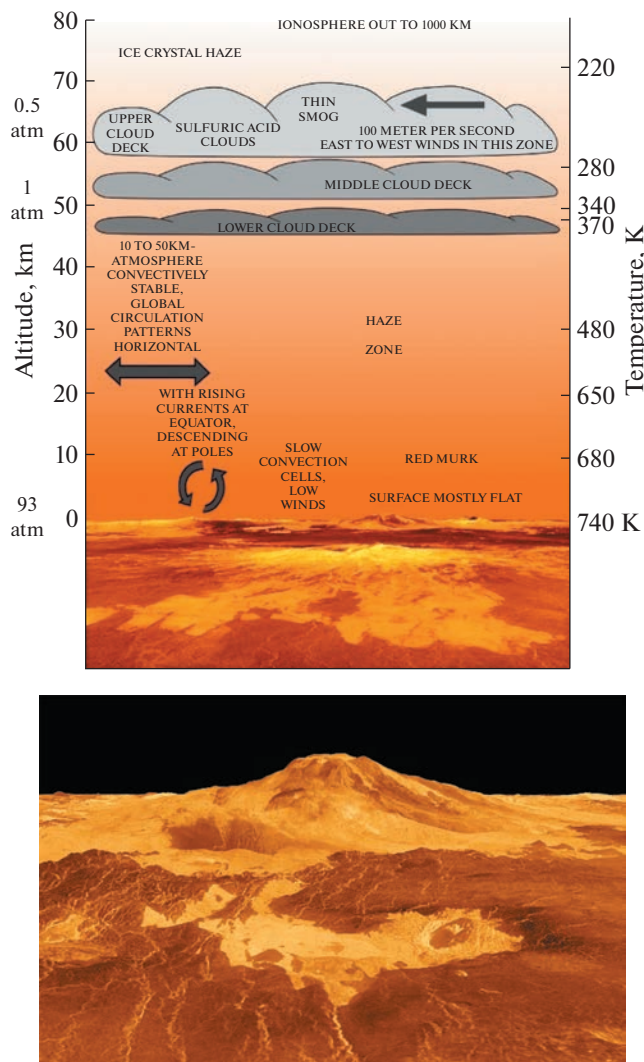


Рис. 13. Вверху — строение атмосферы Венеры и циклы серосодержащих, с которыми связано образование сернокислотных облаков Венеры. Внизу — гора Маат вулканического происхождения, свидетельство активной вулканической активности на Венере.

катастрофического изменения климата на рубеже ~3.7 млрд. лет назад или в глубинной биосфере. О благоприятном климате, существовавшем до этого периода, свидетельствуют геологические формы рельефа, сохранившие следы водных потоков и водно-гляциологической эрозии [24]. Примеры характерных геологических структур, образованных при участии воды, а также русла высохших рек и ледяное озеро на дне кратера поперечником в несколько десятков километров показаны на рис. 14. Там же показаны результаты измерений тепловых нейтронов по данным дистанционных измерений со спутника “Mars Odyssey” и марсохода “Curiosity”, дающие содержание воды в подповерхностном слое [26—

29], а также спектр гематита, содержащегося в марсианской породе, — окисла железа Fe_2O_3 , образующегося в присутствии воды. Наконец, показаны изображения слоистых пород с высокой концентрацией сульфатов, солей хлора и брома, напоминающих осадочные породы на океаническом ложе Земли и свидетельствующие о существовании на Марсе древних водных бассейнов. Все эти детали встречаются в различных областях на пустынных областях марсианских равнин (рис. 14).

Сенсацией стало сообщение группы американских исследователей в конце 1990-х гг. о найденных следах палеожизни в антарктических метеоритах, выброшенных с Марса и занесенных на Землю [30]. В одном из таких метеоритов, ALH 84001, были обнаружены идентичность морфологической структуры окаменелым ископаемым бактериям и наличие магнетитов в карбонатах, образование которых связывалось с бактериями и рассматривалось в качестве биомаркеров (рис. 15). 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 вероятнее всего является ошибочным.

Потенциальные глубинные океаны на спутниках Юпитера и Сатурна представляют особый интерес для астробиологии. В системе Юпитера их образование, как и вулканизм на Ио, обусловлены наличием орбитального резонанса Лапласа в системе трех галилеевых спутников. Океаны глубиной до 100 км, подверженные приливному разогреву, предполагаются на Европе и Ганиমেде [24]. Особенно большой интерес вызывает Европа (рис. 16), о водном океане которой глубиной 50—100 км под ледяным панцирем толщиной 10—15 км свидетельствует анализ особенностей морфологии удивительно сглаженной поверхности, а также выбивающиеся сквозь трещины водяные гейзеры. Из-за диссипации приливной энергии океан может быть теплым, а обнаружение у Европы заметного магнитного поля указывает на то, что он еще и соленый. В такой вполне благоприятной среде могла зародиться жизнь, обнаружение которой становится одной из наиболее актуальных задач будущих космических миссий.

С приливными эффектами связана высокая активность совсем небольшого (~500 км) спутника Сатурна Энцелада, на котором обнаружены извергающиеся с поверхности в вакуум водяные гейзеры — плюмы, — что вероятно так же обусловлено обширными внутренними резервуарами воды (рис. 16). С точки зрения химической эволюции вещества в Солнечной системе и возможности подробного изучения состояния и свойств предбиотической органики огромное внимание

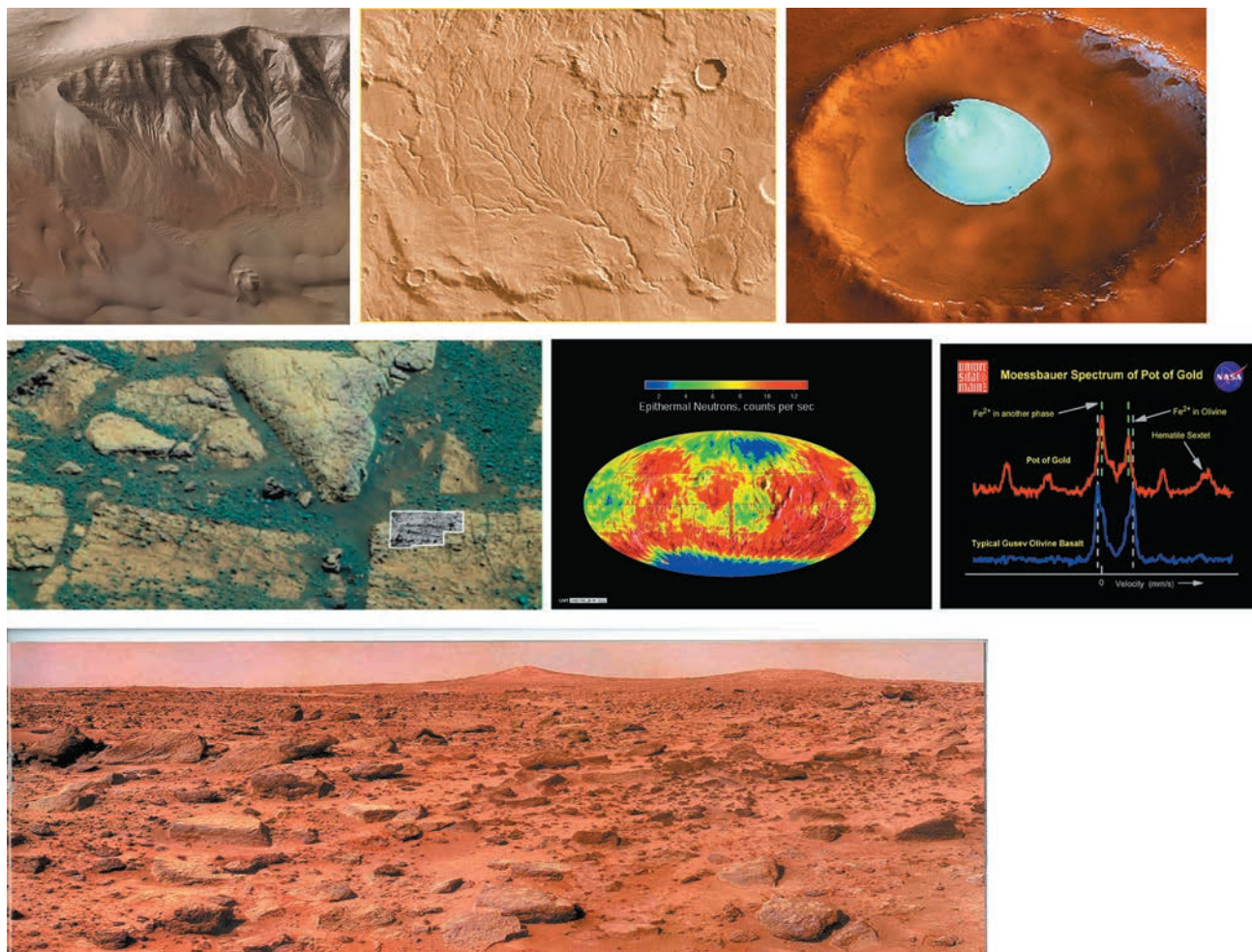


Рис. 14. Свидетельства наличия воды и древнего океана на Марсе. Верхний ряд: склон каньона, образованный с участием потоков воды; русла высохших рек; ледяное озеро на дне марсианского кратера. Средний ряд: слоистые породы, содержащие соли галогенов — вероятных следов древних океанов; распределение воды в поверхностном (~1 м) слое по данным нейтронного мониторинга от фиолетового (максимум) до оранжевого (минимум), и спектр гематита в марсианской породе; нижний ряд — поверхность Марса в современную эпоху. © NASA, ESA, DLR, FU Berlin.

привлекает второй по размеру (после Ганимеда) спутник Сатурна Титан [24]. На его поверхности обнаружены озера метана, этана и других непредельных углеводородов, которые могли послужить основой более сложных органических соединений. Круговорот метана с испарением в атмосферу и последующим обратным выпадением на поверхность практически аналогичен круговороту воды на Земле, с которым непосредственно связано происхождение биосферы (рис. 16).

По-видимому, перечисленные объекты — единственные, в Солнечной системе, на которых могла возникнуть примитивная жизнь, возможно, сохранившаяся до нашего времени. К сожалению, результаты космических исследований пока оказались отрицательными, но их нельзя считать однозначными из-за ограничений использовавшихся экспериментальных методов.

9. ПЕРСПЕКТИВЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ЖИЗНИ НА ЭКЗОПЛАНЕТАХ

Проблемы происхождения жизни и возможности ее обнаружения, естественно, далеко выходят за пределы, ограниченные Землей и Солнечной системой. Именно поэтому мы говорим о симбиозе биологии и астрономии. Открытие экзопланет на рубеже прошлого и нынешнего столетий стало одним из крупнейших событий в астрономии и открыло новые перспективы в астробиологии. Всего за четверть века было открыто около 5000 экзопланет самого различного типа, примерно две трети которых принадлежат планетным системам, и этот процесс стремительно нарастает. Это позволяет изучать пути эволюции планетных систем по аналогии с эволюцией звезд на диаграмме Герцшпрунга—Рассела. Одновременно повышаются шансы обнаружения призна-

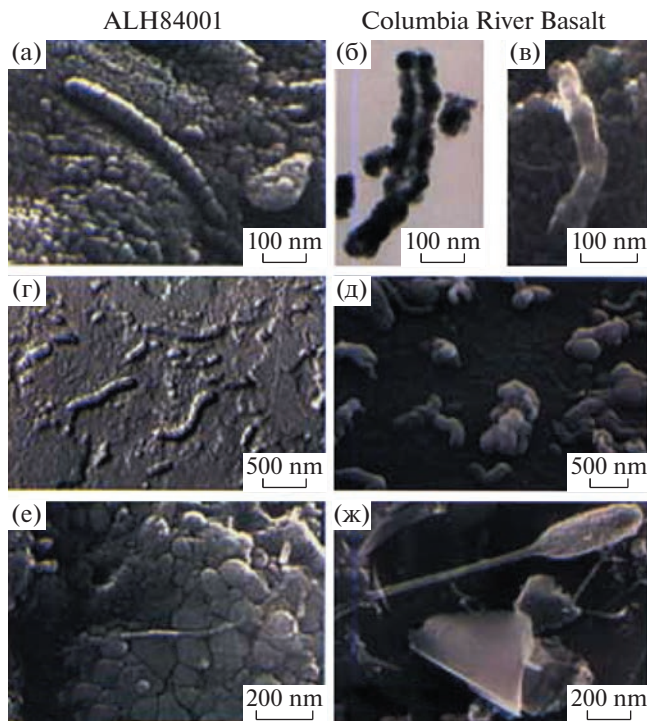


Рис. 15. Структуры микроокаменелостей в метеорите ALH 8004, первоначально ошибочно отождествленные с микробными фоссилами. © McKay

ков внеземной жизни с учетом обсуждавшихся выше критериев пригодности планеты для обитаемости.

Первые внесолнечные планеты были обнаружены с использованием метода доплеровской спектроскопии (радиальных скоростей), 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, 2.8 и 0.09 м/с. Более эффективным оказался фотометрический (“затменный”) метод, в основе которого лежит регистрация ослабления света родительской звезды при прохождении планеты по ее диску. Прямая регистрация излучаемого планетой света проблематична: планета земного типа в пределах 1 а.е. излучает в ИК диапазоне в $\sim 10^6$ раз слабее родительской звезды. К тому же пылевой фон может быть в несколько сотен раз ярче самой планеты. Использование “затменного” метода стало возможным благодаря созданию высокочувствительных детекторов на базе самых передовых технологий. Достигнутая точность фотометрии составляет

$\sim 10^{-5}$, что открывает возможность регистрации вариаций яркости звезды на уровне десятков-сотен фотонов. Примерно такой точностью обладал запущенный весной 2009 г. космический аппарат “Кеплер” (NASA) с телескопом диаметром 90 см, с задачей обнаружения в выбранном участке небесной сферы в созвездии Лебедя ($10^\circ \times 10^\circ$) внесолнечных планет, в первую очередь, планет земного типа в зоне обитаемости, и изучения распределения планетных масс и общей архитектуры планетных систем. На очереди использование еще более эффективного для поиска небольших планет астрометрического метода и космических телескопов-интерферометров. Это позволит достигнуть точности порядка одной микросекунды дуги (для сравнения Земля на расстоянии 10 пк создает амплитуду 0.3 микросекунды дуги).

Примеры экзопланет, открытых КА “Кеплер”, показаны на рис. 17. Свойства наиболее характерных тел со ссылками на первоисточники результатов наблюдений подробно обсуждаются в монографии М.Я. Марова и И.И. Шевченко [31], в которой приведены ссылки на первоисточники — основы обсуждаемых в этом разделе результатов. Большинство открытых к настоящему времени экзопланет — планеты, получившие названия сверхземли и мининептуны, с радиусами в 3–4 раза больше земного, что, вероятно, отражает реально существующее в Галактике распределение планет по размерам (рис. 18). Среди них значительную долю составляют массивные суперюпитеры, некоторые из которых находятся на орбитах, очень близких к родительской звезде, поэтому температуры их газовых оболочек, вероятно, с примесью паров тугоплавких элементов (силикатов, металлов) достигают 1500–2000 К. Их называют “горячие юпитеры” (hot Jupiters). Конечно, говорить о возможности существования на них жизни не приходится, как, впрочем, существуют серьезные ограничения для ее возникновения на мининептунах и сверхземлях. Статистика открытых экзопланет приведена на рис. 18.

Пока из-за инструментальных ограничений обнаружено немного планет, близких по своим размерам к Земле. К сожалению, среди открытых землеподобных планет большая часть находится в “горячей” зоне, близкой к родительской звезде. Так, например, планета Kepler-78b, которая превышает Землю по размеру только на 80%, обращается вокруг подобной Солнцу звезды на расстоянии всего двух ее радиусов. Заметим, кстати, что такое расположение маломассивного тела предоставляет уникальную возможность одновременно использовать методы транзита и лучевых скоростей и тем самым определить среднюю плотность планеты. Оказалось, что плотность Kepler-78b составляет ~ 5.5 г/см³, что идентично

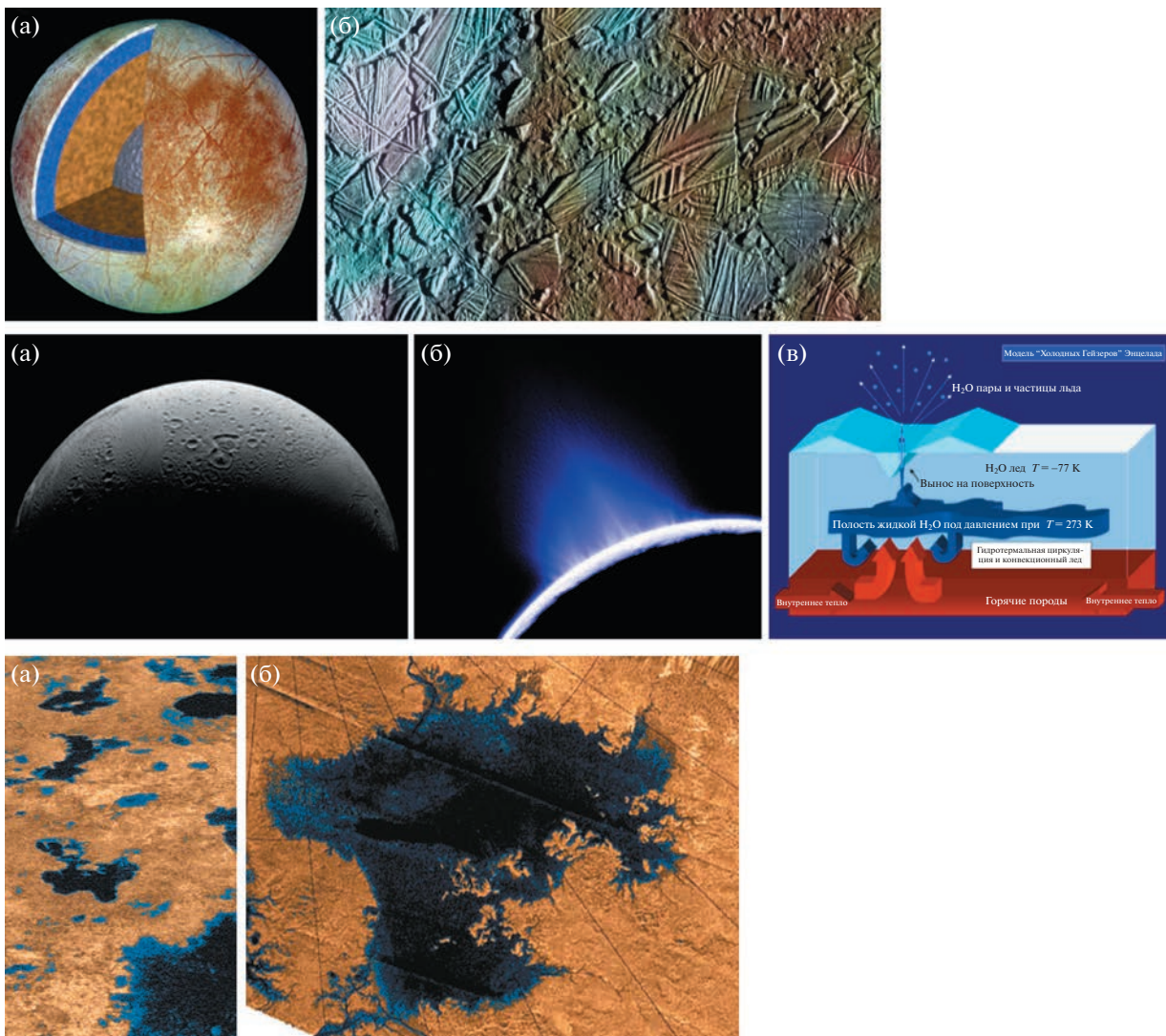


Рис. 16. Модели водных резервуаров и органики на спутниках Юпитера и Сатурна. Верхний ряд: галилеев спутник Юпитера Европа, модель внутреннего строения с глубинным океаном (а) и сглаженная ледяная поверхность спутника (б). Средний ряд: спутник Сатурна Энцелад (а), водяные гейзеры — плюмы с поверхности Энцелада (б); модель его внутреннего строения (в). Нижний ряд: метановые озера на поверхности Титана (а), море Лигеи (б). © NASA

плотности Земли. Таким образом, эта планета, состоящая из горных пород, по своим природным свойствам прямая противоположность Земле, и ее ландшафт может выглядеть так, как показано в изображении художника на рис. 19.

То же самое можно сказать о пяти планетах вокруг солнцеподобной звезды Kepler-444, удаленной от нас на 117 св. лет. Эти скальные горячие планеты, одна из которых похожа по размерам на Меркурий, другая на Венеру, а остальные три на Марс, обращаются вокруг своей звезды с периодами в пределах 10 земных суток. Они, однако, привлекают к себе особое внимание. Дело в том, что по вариациям блеска звезды удалось определить скорость акустических волн в ее недрах и тем самым оценить соотношение водорода и гелия —

ключевого параметра при суждении о продолжительности звездной эволюции. На основании этих оценок был сделан вывод, что возраст Kepler-444, а значит, и ее планетной системы, составляет 11.2 млрд. лет, т.е. они образовались вскоре после рождения Вселенной, возраст которой составляет 13.7 млрд. лет. Если допустить, что на других подобных планетах, но с более благоприятными климатическими условиями, могла возникнуть жизнь и ничто не помешало ее эволюции, трудно даже вообразить, как далеко вперед от Земли такая жизнь ушла бы в своем развитии.

Из открытых землеподобных планет, находящиеся в зонах обитаемости, большой интерес представляют близкие по размерам Венере и Земле планеты Kepler 20e ($R = 0.87R_E$) и Kepler 20f

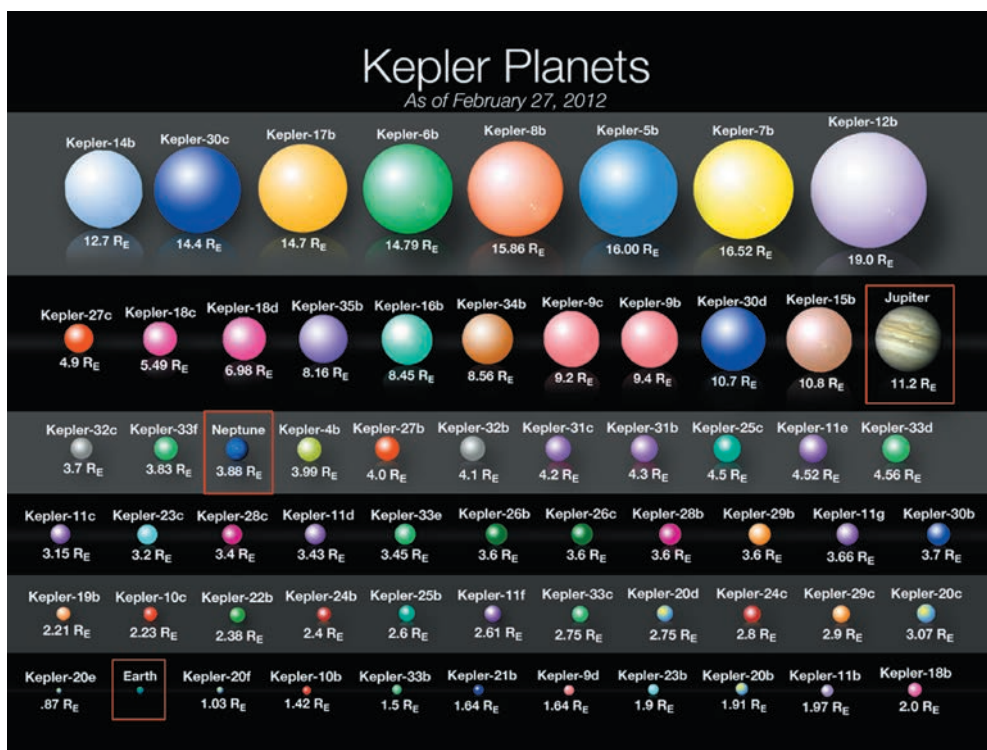


Рис. 17. Примеры типов экзопланет, открытых космическим аппаратом “Kepler”. © Ames Research Center, NASA

($R = 1.03R_E$). Другой самой близкой к Земле по климатическим условиям оказалась планета Kepler 22b ($R = 2.38 \pm 0.13R_E$) с равновесной температурой 262 К и периодом обращения 289.86 дней. Ее размер более чем вдвое превышает земной. Привлекает к себе внимание экзопланета Kepler-452b, находящаяся на расстоянии от Земли 1400 св. лет и обращающаяся вокруг солнцеподобной звезды на расстоянии лишь на 5% дальше, чем Земля, с периодом 385 дней.

Особый интерес вызывают планеты у красных карликов М-класса, примером которых служит обнаруженная на расстоянии 42 св. лет от Солнца планета с периодом обращения ~ 200 земных суток у красного карлика HD 40307. К этому типу относятся также две из пяти планет в созвездии Лебедя на расстоянии около 500 св. лет от Солнца — Kepler-186f и Kepler-438b, — которые лишь на $\sim 10\%$ больше Земли. При светимости звезды в 25 раз меньше солнечной эти планеты, находящиеся в пределах 0.4 а.е. от звезды, оказываются в зоне обитаемости и могут содержать воду. Вода и метан обнаружены в атмосфере планеты у звезды HD 189733, что может создавать сильный парниковый эффект. Такие планеты могут быть окутаны плотными облаками из водяных капель и/или кристаллов, а некоторые даже состоять наполовину из воды или иметь сплошной океан на поверхности. Планеты Kepler 20e и Kepler 20f

были названы кузинами Земли, имеющими максимальный на сегодняшний день так называемый индекс подобия Земле (Earth Similarity Index, ESI).

Следует, однако, учитывать наблюдаемую чрезвычайно высокую активность звезд этого класса, с часто повторяющимися вспышками и выбросами плазмы типа корональных выбросов массы, по мощности на порядок превосходящими солнечные. Они способны срывать атмосферу планеты, даже обладающую сильным магнитным полем, не говоря уже о катастрофическом воздействии звездной радиации. Неблагоприятными для жизни могут быть сильнее ветра в атмосфере, подобные обнаруженным на экзопланете HD 189733b при помощи спектрографа HARPS на обсерватории Ла-Силла в Чили. Их скорость достигает нескольких километров в секунду, что в десятки раз сильнее земных ураганов. Вряд ли в таких условиях на планете, даже очень похожей на Землю, возможна жизнь.

Крупным событием стало обнаружение системы из семи планет Trappist-1 у красного карлика спектрального класса M8 V с поверхностной температурой ~ 4000 К и светимостью почти в 2000 раз меньше светимости Солнца (рис. 20). Все эти планеты близки по размерам к Земле ($\sim 0.7 R_E$) и находятся на соседних орбитах с периодами обращения от единиц до ~ 20 сут в близкой окрест-

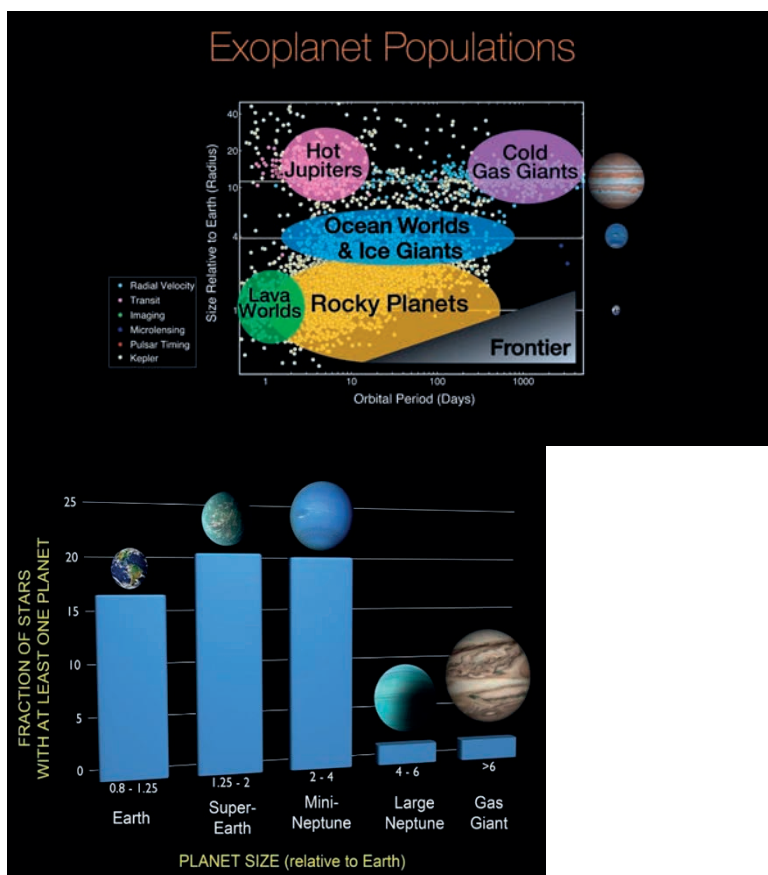


Рис. 18. Вверху — популяции открытых экзопланет, включающие планеты, состоящие из скальных (горных) пород и холодные газовые, водные, ледяные гиганты и горячие юпитеры. Внизу — статистика экзопланет, согласно которой преобладают мининептуны и суперземли. © NASA



Рис. 19. Гипотетический вид поверхности землеподобной планеты в близкой окрестности родительской звезды в изображении художника.

ности звезды. Их периоды кратны друг другу и находятся в резонансе. Три планеты расположены в зоне обитаемости с равновесной температурой ~ 300 К и у них могут быть вода на поверхности и атмосфера, возможность удержания которой ставится, однако, под сомнение с учетом упомянутой высокой активности родительской звезды. Тем не менее, по крайней мере, на какой-либо из этих планет не исключается наличие жизни, и система Trappist-1 рассматривается как перспективная для ее обнаружения.

Приведенные примеры свидетельствуют о том, что наибольшим числом экзопланетных систем обладают маломассивные звезды позднего спектрального класса. Является ли с этой точки зрения Земля, находящаяся в планетной системе у звезды G-класса, исключением? Ответ на этот вопрос следует, очевидно, искать в решении общих эволюционных проблем звездно-планетной космогонии, включая различие между крупной внесолнечной планетой (газовым сверхгигантом) и коричневым карликом на пороге массы, отвечающим термоядерной дейтериевой реакции (0.013).

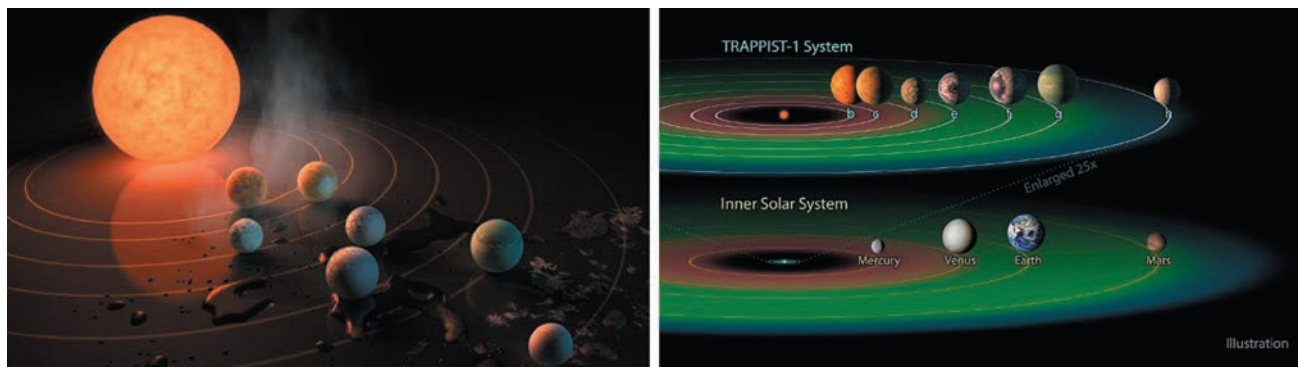


Рис. 20. Система из семи планет у красного карлика Trappist -1 (а) и ее сопоставление с расположением и размерами планет земной группы в Солнечной системе (б). © NASA

Примером может служить недавнее открытие двух землеподобных планет в зоне обитаемости у звезды Тигардена. Однако эту звезду, находящуюся в 4 пк от Солнца, с массой около ~ 0.08 солнечной, скорее следует классифицировать, как объект, промежуточный между звездой и коричневым карликом.

Помимо самих планет, заслуживает внимания потенциальная обитаемость их спутников лунных размеров — экзолун. Возможность их образования в протопланетных дисках показана в серии массовых численных экспериментов с учетом статистики ударных взаимодействий и фрагментации на поздних этапах формирования землеподобных планет у звезд солнечного типа. При этом вероятность образования экзолун выше у двойных, чем у одиночных звезд: планеты в системах как Р-типа, так и S-типа, могут обладать спутниками внутри своих сфер Хилла. Вместе с тем следует подчеркнуть, что планеты с компонентами сравнимых масс (как в случае системы Земля—Луна) — довольно редкий феномен и с космогонической точки зрения маловероятен, хотя сами спутники могут быть больше Луны. Данные численного моделирования свидетельствуют, например, о том, что у суперюпитеров могут формироваться спутники размером с Землю. Поскольку все известные циркумбинарные планеты являются гигантами, размеры их экзолун могут быть также велики. Условия потенциальной обитаемости экзолун определяются орбитальной устойчивостью, параметрами инсоляции и приливного нагрева, а магнитное экранирование может быть обеспечено протяженной магнитосферой самой планеты. Предельными случаями считается обращение спутника либо на удаленной орбите, отвечающей границе устойчивости (на пределе сферы Хилла), либо, наоборот, на орбите, близкой к планете, вблизи порога приливной синхронизации. Ограничения на возможную обитаемость планет и их спутников в двойных системах нала-

гают и ряд других обстоятельств. Так, например, у находящейся в зоне обитаемости планеты-гиганта Kepler-47c может быть потенциально обитаемый спутник земного типа; однако, в условиях циркумбинарной системы его климат подвержен сильным колебаниям, так что условия обитаемости экзолун в двойных системах должны быть сильно модифицированы.

Подводя итоги обсуждения актуальной проблемы обнаружения признаков жизни на экзопланетах (экзолунах), следует говорить о совокупности астрономических и космохимических факторов, обеспечивающих подходящие условия (неуязвимость) планеты в данной области космического пространства и одновременно формирующих благоприятную для жизни природную среду. Земля служит примером их идеального сочетания. Можно было бы думать, что с учетом громадного числа и огромного разнообразия планетных систем и наличия землеподобных планет, наша планета не является уникальным космическим оазисом. На самом деле ситуация гораздо сложнее, и формальный статистический подход, позволяющий считать Землю “типичной” обитаемой планетой, совершенно не оправдан. Но есть и ряд отличных от Земли и благоприятных для возникновения жизни астрономических факторов. Помимо расширения зоны обитаемости и “долговечности” планеты у красных карликов, сюда можно отнести, например, большую площадь поверхности у сверхземель. Важную роль может играть кратность родительской звезды: как показал совместный анализ условий обитаемости экзопланетных систем одиночных и кратных звезд, ряд условий может удовлетворяться на циркумбинарных планетах у двойных звезд главной последовательности с большей вероятностью, чем на Земле, где эти условия возможно возникли достаточно случайно.

Вполне вероятно, что возникновению жизни на Земле способствовала сама архитектура Сол-



Рис. 21. Сопоставление Солнечной системы с гипотетической планетной системой у звезды HD 189733 (рисунок художника).

нечной системы, на которую не похожи конфигурации ни одной из экзопланетных систем. В их формировании важная роль принадлежит процессам гравитационную неустойчивости, приливной и столкновительной эволюции в протопланетном диске, что подтверждают результаты компьютерного моделирования с использованием методов стохастической динамики. Они свидетельствуют о крайней чувствительности конфигурации планетной системы к начальным условиям, определяемым параметрами диска. В рамках такого подхода ставится под сомнение предположение о частом рождении устойчивых планетных конфигураций типа Солнечной системы, что делает ее уникальной. На рис. 21 показана гипотетическая планетная система у звезды HD 189733 в сравнении с Солнечной системой. В показанной конфигурации, при наличии планеты-гиганта типа Сатурна вблизи звезды, система оказывается неустойчивой, по крайней мере, на временном интервале, необходимом для зарождения жизни на одной из землеподобных (или близких к ним) планет.

Как видим, многие обстоятельства, к сожалению, препятствуют оптимистическим ожиданиям обнаружить жизнь, в своей основе похожую на земную. Ключевым остается вопрос о том, существуют ли на экзопланетах формы жизни на другой химической основе и/или других принципах, с высокой приспособляемостью и устойчивостью к экстремальным природным условиям. Выполняются ли рассмотренные выше принципы формирования молекулярного мира [8]? Хотя ответа на этот вопрос пока нет, можно, тем не менее, еще раз повторить высказанное утверждение о

том, что углерод, составляющий основу органических соединений и способный образовывать разветвленные полимерные цепи, и вода являются самой подходящей комбинацией для процессов, биосинтеза и основой биоразнообразия. К этому добавим, что образование сложных органических соединений в космосе и на планетах с учетом механизмов миграции и транспорта вещества является универсальным и его, вероятно, следует рассматривать, как некую парадигму в представлениях о жизни во Вселенной.

10. ПОИСК ВНЕЗЕМНЫХ ЦИВИЛИЗАЦИЙ (SETI). СВЯЗЬ С НООСФЕРОЙ

Развитие жизни от примитивного состояния до рождения интеллекта, как высшей формы эволюции материи — чрезвычайно сложный и во многом уязвимый процесс. Вполне обоснованно можно предположить, что усложнение и рост степени организации жизни происходят далеко не на всех планетах, на которых возникла жизнь. На Земле такой переход произошел в процессе биологической эволюции и в условиях, способствовавших дарвиновскому естественному отбору, но сами эти процессы вряд ли можно считать универсальными.

Вернадский рассматривал появление человеческого разума как вполне естественный путь эволюции. Он писал: “Человек и человечество в биосфере — это закономерная часть ее живого вещества и ее организованности”. Научная мысль и быт человечества — проявление этого процесса. “Научная мысль социального человечества — это новая геологическая сила в биосфере и одно из

повторяющихся в истории планеты геохимических проявлений, выходящих своей причиной за пределы земной коры”. И далее: “Под влиянием научной мысли и человеческого труда биосфера переходит в новое состояние — в ноосферу” [1, 32]. Под ноосферой он понимал новую фазу эволюции биосферы и новый геологический фактор, небывалый по мощности и общности. И это было в середине прошлого столетия. Современные технологии обеспечили начало атомной и космической эры, овладение новыми источниками энергии, расшифровку генома, широкое внедрение информационных технологий и небывалый рост коммуникаций, “опутав” мир паутиной Интернета. Создана мощная техносфера, порожденная человеческой мыслью — ноосферой.

Вернадский отводил огромную роль “движению научной мысли ... и его значению в геологической истории биосферы”. Он отмечал, что особый смысл приобрел взрыв научного творчества в XX столетии, что означает одновременно изменение понимания основ реальности, “вселенскость и действенное, социальное понимание науки”, определяющей само существование цивилизации. Следуя своим гуманистическим воззрениям, он говорил об “ответственности каждого отдельного человека и одновременно объединении усилий всех людей в решении глобальных проблем”. “Человек, — писал он, — впервые реально понял, что он житель планеты и может — должен — мыслить и действовать в новом аспекте, не только в аспекте отдельной личности, семьи или рода, государств или их союзов, но в планетарном аспекте” [32]. Он призывал к тому, чтобы эти изменения сознательно направлялись человеческой мыслью, и только тогда биосфера превратится в *необходимую для процветания человека ноосферу*. К сожалению, на современном историческом этапе, с учетом обострения сырьевых, экологических и — главное — политических и социально-экономических проблем эти мысли не открывают перед человечеством новые перспективы, а скорее приобретают утопический характер. Вместе с утратой гармонии человека с природой растет опасность самоуничтожения.

В современных условиях само понятие ноосферы обретает новый смысл и естественным образом расширяется на одну из ключевых проблем астрономии и астробиологии — поиск внеземных цивилизаций (Search for ExtraTerrestrial Intelligence, SETI) [33].

Проблема возможности существования неземного разума волновала человечество с незапамятных времен. Представитель знаменитой афинской философской школы 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

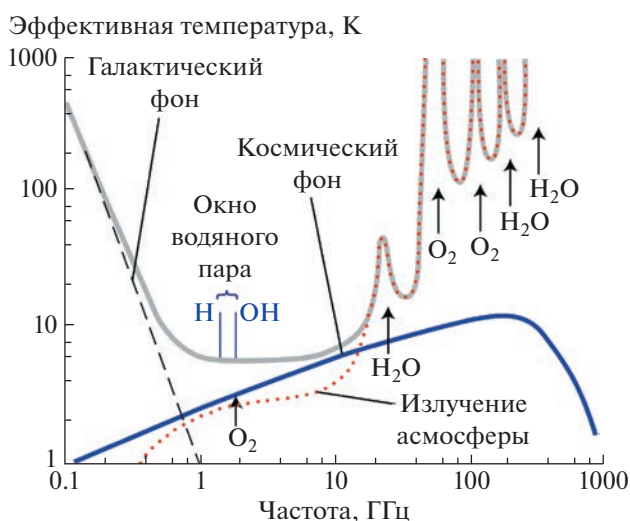


Рис. 22. Оптимальное окно частот для межзвездной связи для наземных радиотелескопов — приблизительно от 1 до 10 ГГц. На частотах ниже 1 ГГц высок тепловой фон газа в Галактике, на частотах выше 10 ГГц — тепловое излучение молекул газа в атмосфере Земли. В качестве универсальной физической величины выделено окно прозрачности водяного пара на частоте около 1420 МГц (длина волны 21.1 см), соответствующей метастабильному переходу между подуровнями сверхтонкой структуры атома водорода. Позднее, после обнаружения космического источника мазерного радиоизлучения в линии гидроксила OH ($\lambda = 18$ см), эту частоту также отнесли к окну прозрачности H₂O. © Cocconi & Morrison, 1959

существа, планеты и все то, что мы видим в нашем мире”. Китайский философ Тенг Му на рубеже предыдущих тысячелетий 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!”. Эти убеждения развивались в эпоху Возрождения и сохранились до наших дней (цит. по [1]).

К сожалению, это чисто умозрительные суждения, не подкрепленные никакими реальными фактами. Современная наука пока не в состоянии ответить даже на вопрос о том, существуют ли примитивная жизнь в Солнечной системе и тем более в других звездных системах, не говоря уже о разумной жизни. Астрономы приложили немало усилий, чтобы добиться успеха в этом актуальном разделе фундаментальной науки, чтобы вместо преобладающих интуитивного и/или эмоционального подходов поставить изучаемую проблему на строго научную основу. Начиная с пионерской работы Ж. Коккони и Ф. Моррисона [34],

в которой в качестве наиболее подходящего диапазона для межзвездных коммуникаций обособилось использование длины волны линии нейтрального водорода (21 см, 1420 МГц), было предложено много оригинальных проектов и проведено множество наблюдений с использованием все более мощных радиотелескопов и анализаторов сигналов. К сожалению, положительных результатов выполненных работ, обзор которых не входит в нашу задачу, получено не было. Отметим лишь, что в развитие этого направления исследований большой вклад внесли отечественные астрономы В.С. Троицкий, И.С. Шкловский, Н.С. Кардашев [35, 36].

Продолжение усилий стимулируется осознанием того факта, что общее число звезд во Вселенной достигает 10^{22} и по оценкам примерно треть из них обладает планетными системами. Это означает что число планет сопоставимо с числом звезд. Как показано в предыдущих разделах, среди них есть землеподобные планеты с подходящими для жизни природными условиями, и даже при относительно небольшой фракции их абсолютное число должно быть огромным, а значит, и ожидаемое число цивилизаций, обладающих ноосферой и способных установить контакт с другими цивилизациями.

Между тем более детальный анализ делает ситуацию менее оптимистичной. Для оценки числа технологически развитых цивилизаций в Галактике можно использовать известную формулу Дрейка в виде мультипликативного соотношения вероятностных критериев:

$$N = n f_p f_c f_i f_e L / T,$$

где n — общее число звезд в Галактике (иногда за n принимают скорость звездообразования); f_p — доля звезд, обладающих планетными системами; f_c — доля планет в планетной системе, пригодных для жизни; f_i — доля планет, на которых возникла жизнь; f_e — доля планет, на которых развилась разумная жизнь; L — средняя продолжительность жизни цивилизации-ноосферы; T — возраст Галактики (~ 10 млрд. лет).

Принимая достаточно произвольно, но, по нашему мнению, вполне рационально, вероятностные значения этих сомножителей, получаем квазиреальную оценку числа N :

$$N \sim 10^{11} \times 0.3 \times 0.1 \times 10^{-3} \times 10^{-3} \times 10^{-1} \times 10^3 / 10^{11} \sim 1.$$

Это означает, что единственная цивилизация, существующая в нашей Галактике, — земная [37]. Однако вероятности, определяющие этот результат (за исключением f_p и f_e), допускают большие отклонения от принятых значений. Большую не-

определенность в эту оценку вносит, в частности, продолжительность существования цивилизации. Принятая величина $L \sim 10^3$ лет представляется весьма оптимистичной, если принять во внимание упомянутые проблемы, с которыми уже столкнулось человечество на Земле.

При том же значении $L \sim 10^3$ лет и с учетом размеров Галактики (100 000 св. лет) времени для установления контактов недостаточно. Диспропорцией между необходимым временем передачи-приема сигнала и временем существования цивилизации можно объяснить отсутствие контактов. Аналогией служат 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 не успевает достичь адресата, не говоря уже об установлении двусторонней связи. При этом мы оставляем в стороне философский вопрос о желании продвинутой цивилизации в силу эгоцентризма установить контакт с себе подобной или отставшей в развитии, скажем, на тысячи лет. Эти вопросы, так же, как и понятие разума, сходства и различия социальных сообществ, подробно обсуждаются в работах [38–40].

Как видим, на пути решения интригующей проблемы обнаружения внеземного разума и установления связи с другими потенциально существующими мирами сохраняются большие неопределенности. От астрономов потребуются еще много усилий, чтобы добиться здесь реального прогресса, используя самые передовые технологии. Сегодня трудно строить прогнозы. Вспомним, однако, что всего лишь несколько десятилетий назад не было крупных оптических и радиоинтерферометров и космических телескопов; не было грандиозного прогресса в познании Вселенной; не были обнаружены внесолнечные планеты; не было ошеломляющих успехов в развитии информационных технологий, биотехнологий, молекулярной биологии и биохимии; и много другого.

Что принесут нам следующие 20, 50, 100 лет? И какое влияние они окажут на перспективу установления межзвездных контактов?

В завершение напомним высказывание известного писателя-фантаста Артура Кларка (цит. по [41]): “...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”.

11. 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 биология, 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 родилась новая научная дисциплина — астробиология, объединившая астрономию и биологию, в рамках которой предпринимаются попытки обнаружить жизнь за пределами Земли.

Мы попытались подойти к этой проблеме, уделяя основное внимание астрономическим и космохимическим аспектам происхождения жизни и формированию биосферы. Этим процессам предшествует химическая эволюция вещества в космосе и на планете, имеющая важные следствия для последующих процессов биогеохимической и биологической природы, включая упорядочение и самоорганизацию. Эти принципы заложены в исходных геохимических и космохимических процессах на Земле и других планетах. Показано, что взаимосвязь форм жизни, как целостного космопланетарного явления в масштабах биосферы определяет химизм, миграцию и дифференциацию химических элементов и отдельных изотопов на основе особых разнородных биогеохимических функций и биогеохимических циклов — систем незамкнутых и необратимых круговоротов веществ в биосфере и других оболочках Земли. При этом неполная обратимость (незамкнутость) является одним из важнейших свойств биогеохимических циклов, имеющая планетарное значение.

Мы опираемся на единственно известный нам биологический механизм земной жизни. Поэтому приведены краткие сведения из молекулярной биологии, включающие информационную и функциональную основы жизни. Обсуждаются современные концепции происхождения жизни, среди которых выделены две основные гипотезы: древний мир РНК и последовательное упорядочение. На основе этих подходов рассмотрены проблемы предбиологической и биологической эволюции, начиная от возникновения первичных бактерий — прокариотов, эукариотов — до млекопитающих и человека на геохронологической шкале, составляющей “биологические часы Земли”. При этом подчеркивается важная роль дарвинизма на этапах биологической эволюции, но

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

Среди астрономических аспектов происхождения жизни основное внимание уделено связи происхождения жизни и биологической эволюции с космическими факторами. Среди них первостепенный интерес представляет синергизм абиогенеза и панспермии. Роль внешнего источника в переносе предбиотического или даже биотического вещества обусловлена наличием миграционно-столкновительных процессов в Солнечной системе и за ее пределами, основную роль в которых играют кометы и астероиды углистохондритового состава из транснептунового пояса на ранних этапах формирования планет. В согласии с этим механизмом находится концепция древнего мира РНК, связывающего появление жизни с периодом интенсивной бомбардировки Земли планетезималями (LHB) около 4 млрд. лет назад. При этом ключевая роль в зарождении жизни принадлежит воде и, как показывают результаты численного моделирования, за счет экзогенного источника Земля могла получить объемы воды и летучих, сопоставимые с земными океанами.

С другой стороны, бомбардировка Земли и планет астероидами и кометами могла иметь катастрофические последствия для зарождения и существования жизни, приводя к громадным биосферным изменениям. Очевидно, полному исчезновению жизни на Земле вследствие подобных катастрофических воздействий на биосферу препятствовал факт ее высокой устойчивости и приспособляемости к экстремальным природным условиям.

Сохраняются надежды обнаружить жизнь в Солнечной системе. Среди наиболее перспективных объектов называют Марс, включая возможное наличие у него глубинной биосферы, галилеевы спутники Юпитера Европу и Ганимед и спутник Сатурна Энцелад, в недрах которых с высокой вероятностью существуют глубинные теплые водные океаны. С точки зрения предбиологической эволюции огромный интерес представляет Титан.

Проблемы происхождения жизни и возможности ее обнаружения, естественно, далеко выходят за пределы Солнечной системы. Поэтому первостепенный интерес представляет возможность обнаружения жизни в окрестности других звезд — на экзопланетах. Большое число (~5000) и разнообразие открытых экзопланет, среди которых найдены землеподобные планеты, находя-

щиеся в благоприятных климатических зонах обитаемости, дают основания для оптимизма. Вместе с тем конфигурации экзопланетных систем у одиночных и двойных звезд сильно отличаются от архитектуры Солнечной системы, что связано с возможными неустойчивостями, а высокая активность родительских звезд может оказаться критической для жизни.

Еще более сложный и уязвимый путь эволюции жизни — рождение интеллекта и возникновение цивилизаций. Поиск внеземных цивилизаций (SETI) — один из наиболее актуальных разделов астрономии, представляющий собой комплексную проблему, решение которой связано с разработкой многоплановой стратегии и использованием самых передовых технологий. Оценки путем многофакторного вероятностного анализа числа технологически развитых цивилизаций, обладающих ноосферой и способных к установлению контактов, не внушают большого оптимизма. Как показывает земной опыт, наиболее критичными для цивилизации могут оказаться социально-экономические и политические проблемы. Поэтому сегодня трудно строить прогнозы, ожидает ли человечество успех в этом чрезвычайно актуальном разделе астрономии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В. И. Вернадский, *Философские мысли натуралиста* (Наука, М., 1988).
2. В. И. Вернадский, Проблемы биогеохимии, вып. 1. Значение биогеохимии для изучения биосферы. М.—Л., 1935.
3. В. А. McGuire, *Astrophys. J. Supp.* **259**, id. 30 (2022).
4. J. T. R. Bae, R. Teague, S. M. Andrews, M. Benisty, et al., *Astrophys. J. Lett.* **934**, L20 (2022).
5. Г. А. Заварзин, *Вестник РАН*, **71**, 988 (2001).
6. В. И. Вернадский, *Биосфера. Избранные сочинения. т. 5* (М., 1960).
7. В. И. Вернадский, *Химическое строение биосферы Земли и ее окружения* (М., 1965).
8. Л. А. Грибов, В. И. Баранов, *От молекул к жизни* (URSS, М., 2012).
9. Дж. Хаггис, Д. Мухи, А. Мюр, К. Робертс, П. Уокер, *Введение в молекулярную биологию* (М.: Мир, 1967).
10. А. С. Спирин, *Вестник РАН* **71**, 320 (2001).
11. Э. М. Галимов, *Феномен жизни. Между равновесием и нелинейностью. Происхождение и принципы эволюции* (М.: Едиториал УРСС, 2001).
12. Э. М. Галимов (ред.) *Проблемы зарождения и эволюции биосферы* (М.: URSS, 2008).
13. И. Пригожин *Конец определенности. Время, хаос и новые законы природы* (R&C Dynamics, Москва-Ижевск, 2001).
14. А. Г. Башкиров, *Теоретическая и математическая физика* **149**, 299 (2006).
15. А. В. Колесниченко, М. Я. Маров, *Астрономический вестник* **53**, 436 (2019).
16. Д. Рюэль *Случайность и хаос* (R&C Dynamics, Москва-Ижевск, 2001).
17. Р. А. Лути, М. Дж. Кенниш, *Обзоры геофизики* **31**, 211 (1993).
18. Н. В. Тимофеев-Ресовский, Н. Н. Воронцов, А. В. Яблоков, *Краткий очерк теории эволюции. 2-е изд.* (М.: Наука, 1978).
19. C. H. Lineweaver, Y. Fenner, and B. K. Gibson, *The galactic habitable zone and the age distribution of complex life in the Milky Way* // *Science* **303**, 5962 (2004).
20. C. Bounama, W. Von Bloh, S. Franck, *How rare is complex life in the Milky Way?* // *Astrobiology*, **7**, 745756 (2007).
21. М. Я. Маров, *Успехи физ. наук* **175**, 668 (2005).
22. М. Ya. Marov and S. I. Ipatov, *Astrophysics and Space Science Library* **261**, 223 (2001).
23. M. Ya. Marov and D. H. Grinspoon. *The Planet Venus* (Yale University Press, New Haven and London, 1998).
24. М. Я. Маров, *Космос. От Солнечной системы вглубь Вселенной. Изд. 3-е* (Физматлит, М., 2021).
25. J. S. Greaves, A. M. S. Richards, W. Bains, P. B. Rimmer, et al., *Nature Astronomy* **5**, 655 (2021).
26. D. Anfinov, A. Kozyrev, M. Litvak, A. Sanin, et al., *Science* **297**, 78 (2002).
27. I. G. Mitrofanov, M. T. Zuber, M. L. Litvak, and N. E. Demidov, *Geophysical Research Letters* **34**, id. L18102 (2007).
28. I. G. Mitrofanov, M. L. Litvak, A. B. Varenikov, Y. N. Bartakov, *Space Science Reviews* **170**, 559 (2012).
29. D. I. Lisov, M. L. Litvak, A. B. Sanin, A. R. Vasavada, *Journal of Geophysical Research: Planets*, **127**, id. e2022JE007327 (2022).
30. D. S. McKay, E. K. Gibson, K. L. Thomas-Keptra, H. Vali, Hojatollah, et al., *Science* **273**, 924 (1996).
31. М. Я. Маров, И. И. Шевченко, *Экзопланеты. Физика. Динамика. Космогония* (Физматлит, М., 2022).
32. V. I. Vernadsky. The Transition from the Biosphere to the Noosphere. Excerpts from “Scientific Thought as a Planetary Phenomenon”. 21st Century Science & Technology, Spring-Summer 2012.
33. М. Я. Маров, *Ноосфера* № 3, 111 (2013).
34. G. Cocconi, P. Morrison, *Nature* **184**, 844 (1959).
35. В. С. Троицкий. Развитие внеземных цивилизаций и физические закономерности. В Сб.: “Проблема поиска внеземных цивилизаций”, с. 5–28 (Наука, М., 1981).
36. Н. С. Кардашев. Стратегия и будущие проекты SETI. В Сб.: “Проблема поиска внеземных цивилизаций”, с. 29–45 (Наука, М., 1981).
37. C. Sagan *Pale Blue Dot* (Random House, NY, 1994).
38. C. B. Cosmovici, S. Bower, D. Werthimer (Eds.) *Astronomical and Biochemical Origins and the Search for Life in the Universe*, Editrice Compositori, 1997.
39. Ch. A. Beichman, in: *The Astronomy Revolution: 400 Years of Exploring the Cosmos*, eds D. G. York, O. Gingerich. Looking for Life, Searching the Solar System (Cambridge University Press, 2005).
40. А. С. Монин, Н. И. Солнцева. *Жизнь и разум* (Наука, М., 2007).
41. М. В. Озеров. *От Гринвича до экватора* (Советский писатель, М, 1984).

ASTRONOMICAL AND COSMOCHEMICAL ASPECTS OF THE LIFE ORIGIN PROBLEM

M. Ya. Marov^a

^aVernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The fundamental properties of a known form of life are briefly considered, including the fundamental ideas about the chemical evolution of matter and the properties of living matter, which are based on biogeochemistry and molecular biology. The concepts underlying the modern understanding of the origin of life based on chemical and biological evolution are discussed. The basics of astrobiology and the intriguing problem of the existence of extraterrestrial intelligence and the search for life in the Universe are briefly touched upon.

Keywords: astronomy, biogeochemistry, molecular biology, abiogenesis, panspermia, evolution, astrobiology, extraterrestrial intelligence