

I. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЖИЗНИ. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ И БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ

1

Гипотеза земного абиогенеза в свете данных палеонтологии, молекулярной биологии и анализа химического состава молекул РНК

В. А. Анисимов

Краткое введение в проблему

Идея внеземного абиогенеза (панспермии) в той или иной форме известна еще со времен античности, но в более или менее современном виде она была предложена шведским ученым С. Аррениусом (Arrhenius 1907) в начале XX в., и с тех пор вплоть до настоящего времени она является предметом неутрачивающих споров биологов, палеонтологов, астрофизиков и даже философов (Шкловский 1962; Crick 1981; Розанов 1996; McKay *et al.* 1996; Еськов 2000; Hoover 2008; Joseph 2009 и т. д.). Одной из причин ее ожесточенной критики, возможно, является психологическое неприятие многими исследователями того факта, что жизнь могла зародиться где-то в другом месте Вселенной, а не на кажущейся нам столь прекрасной и подходящей для жизни родной планете. Человечество в своей основной массе вообще антропоцентрично. Не исключено, что корни этого явления лежат в самой генетической природе человечества, так как любовь к соотечественникам, к своей малой и большой родине является важным психологическим мотивом, способствующим при определенных условиях выживанию человечества как вида. Возможно, похожими причинами объясняется и то яростное сопротивление, которое оказывается и многим другим теориям, посягающим на психологически комфортный антропоцентризм. Не здесь ли лежат истоки того, с каким трудом человечество отказывалось от модели, помещающей Землю в центр Вселенной, с каким гневом многие до сих пор воспринимают утверждение современной науки об общем предке людей и обезьян? По указанным причинам очень важным свойством теорий земного и внеземного абиогенеза можно

считать их фальсифицируемость (по К. Попперу). Достаточно часто приходится сталкиваться с мнением, что земной абиогенез не нуждается в подтверждающих эту теорию фактах, так как является так называемой нуль-гипотезой. Это не более чем заблуждение. В качестве нуль-гипотезы в классическом понимании этого термина принято рассматривать априорное предположение об отсутствии связи между исследуемыми величинами или фактами. Таким образом, применительно к вопросу зарождения жизни в качестве нуль-гипотезы нужно рассматривать как раз гипотезу о том, что между фактом наличия жизни на данной конкретной планете (например, Земле) в данное конкретное время и местом ее зарождения нет никакой связи. Другими словами, с точки зрения рассмотрения нуль-гипотезы, в подтверждении нуждается как раз теория земного абиогенеза! К сожалению, аргументы, которые в настоящее время пытаются выдвинуть в защиту своих воззрений как сторонники, так и противники земного абиогенеза, в большинстве своем невозможно использовать для прямой фальсификации рассматриваемых гипотез. Так, например, даже если каким-либо образом удастся надежно доказать, что хотя бы некоторые из предполагаемых отпечатков бактерий в метеоритах являются подлинными и не связаны с процессом загрязнения вещества метеорита представителями земной биоты, этот факт все равно нельзя будет рассматривать в качестве надежного подтверждения гипотезы внеземного абиогенеза, так как ее сторонникам нужно будет еще доказать, что эти бактерии не погибли сразу же, как только попали во враждебную им земную биосферу, где, возможно, уже успешно процветали независимо зародившиеся на Земле бактерии.

С данной точки зрения представляется интересным и важным поиск таких методов фальсификации рассматриваемых конкурирующих гипотез, которые были бы основаны на объективных данных, а не на субъективном мнении «экспертов», защищающих ту или иную теорию. В свете этого обстоятельства несомненный интерес представляют результаты молекулярных исследований древнейших земных микроорганизмов и их предполагаемого общего предка – LUCA (сокращенное от английского *Last Universal Common Ancestor* – последний универсальный общий предок), а также анализ особенностей химического состава РНК, считающихся первыми самовоспроизводящимися полимерными органическими молекулами. Отметим, что в последние годы именно молекулярные исследования ДНК человека внесли существенный вклад в улучшение понимания нами истории эволюции человечества (наличие эффекта бутылочного горлышка, время отделения ветви *Homo sapiens* от ныне живущих человекообразных обезьян, времена разделения различных эволюционных веток гоминид, включая разделение наших предков и неандертальцев, и т. д.) и процесса его расселения по планете. Этот метод можно назвать своеобразными «молекулярными раскопками», так как его сущность за-

ключается в изучении истории развития таксонов и следов важнейших событий, произошедших на этом пути, основанных на «отпечатках», которые эти события оставили в ДНК и других органических молекулах земных организмов.

Оценка вероятности земного абиогенеза на основе прямой оценки возраста LUCA

Несмотря на очевидный прогресс в увеличении эффективности и надежности так называемого метода молекулярных часов, достигнутый за последние 10–15 лет, большинство исследователей с очень большой осторожностью относятся к попыткам восстановить возраст LUCA по молекулярным данным. На это, конечно, имеются свои причины. Чем дальше во времени мы пытаемся заглянуть, тем меньше у нас материалов для исследования (палеонтологических и геологических данных, пригодных для калибровки молекулярных часов, белков и рРНК, которые можно использовать для оценки степени расхождения ветвей эволюционного дерева), тем ниже, соответственно, степень достоверности полученных данных. В то же время вопрос о возрасте LUCA настолько важен для исследования проблемы, которой посвящена настоящая статья, что не коснуться его мы не можем.

Первые попытки определения возраста LUCA по молекулярным часам были предприняты почти сразу же после изобретения этого метода и давали вполне совместимые с гипотезой земного абиогенеза результаты времени расхождения архей и зубактерий в 3–4 млрд лет назад (Feng *et al.* 1997). Однако по мере усовершенствования и увеличения точности этого метода время существования LUCA постепенно все больше отодвигалось в прошлое, смещаясь от архей к преархею. Из всей изученной автором литературы последняя по времени публикация по этой проблеме относится к 2003 г. (Sheridan *et al.* 2003), причем в ней сделана попытка оценить *минимально возможный* возраст LUCA, исходя из анализа нуклеотидной последовательности «малой» субъединицы рРНК (16S rRNA) у различных бактерий. При этом авторы получили значение нижней границы этого возраста в 4,29 млрд лет. Следует отметить, что авторы данной работы использовали для калибровки молекулярных часов данные о находке древнейших биомаркеров цианобактерий в породах возрастом 2,65 млрд лет, которые недавно были признаны позднейшими загрязнениями (Rasmussen *et al.* 2008). Однако этот факт не влияет на результаты наших расчетов, так как они основаны на более надежной калибровке из статьи Батистуцци и др. (Battistuzzi *et al.* 2004). В указанной работе на основе анализа эволюции тщательно выделенных авторами (на предмет минимизации вероятности их горизонтального переноса) 32 общих генов у 72 различных видов было построено филогенетическое дерево, отражающее эволюцию исследуемых видов, и оценено время разделения его

основных ветвей, включая наиболее древние из них. На основе интеграции данных из двух указанных работ, а также с учетом того факта, что в первой из них оценивалось лишь минимально возможное время появления LUCA, можно попытаться уточнить датировку его появления. Для этого надо вначале «синхронизовать» молекулярные часы, основанные на скорости эволюции рНК и белков, а потом откалибровать их по более достоверно установленным часам, использовавшимся в работе Батистуцци и др. (Battistuzzi *et al.* 2004), для которых, к тому же, авторами вычислены соответствующие доверительные интервалы. В этом случае можно будет использовать калиброванные молекулярные часы из этой работы для корректировки абсолютного возраста LUCA, вычисленного в работе Шеридана и др. (Sheridan *et al.* 2003).

С точки зрения проводимого исследования нас, естественно, интересуют времена расхождения наиболее древних ветвей филогенетического дерева. С учетом этого обстоятельства для анализа были выбраны все точки ветвления, которые по молекулярным часам эволюции белков соответствуют времени расхождения более чем в 3 млрд лет. Всего таких точек набралось 8. Сводная таблица, полученная путем интеграции филогенетического дерева из работы Батистуцци и др. (Battistuzzi *et al.* 2004) и дерева из работы Шеридана и др. (*Ibid.*), приведена в Табл. 1. Как видно из этой таблицы, хронология эволюционных событий, получаемая двумя указанными методами, достаточно близка. Если, как это принято при обработке экспериментальных данных, отбросить минимальное и максимальное значения в выборке, то соотношение времен оставшихся 6 событий концентрируется в достаточно узком интервале – от 1,10 до 1,20. Среднее увеличение времени эволюционных событий по «белковым» молекулярным часам по сравнению с рибосомными по 8 точкам составляет величину 1,14. Сам факт различия в оценках абсолютных времен событий объясняется также тем, что, как уже было упомянуто выше, в работе Шеридана и др. (Sheridan *et al.* 2003) оценивалось не наиболее вероятное, а минимально возможное время событий, что, естественно, работало на «омоложение» датировок. Следует отметить, что самая существенная разница в датировках разными методами наблюдается для времени разделения групп архебактерий *Archaeoglobus* и *Thermoplasma*; это объясняется тем, что для истории расхождения данных ветвей в рассматриваемых методах получились разные ветви филогенетических деревьев. Однако чтобы исключить факт субъективизма при обработке данных, это событие наравне с другими тоже учитывалось при оценке конечного результата.

Таким образом, зная средний коэффициент «омоложения» событий при использовании рибосомных часов, можно оценить и время, когда начали расходиться ветви архебактерий и зубактерий по более точным «белковым» часам. Для этого нужно умножить время жизни LUCA, полу-

ченное в работе Шеридана и др. (Sheridan *et al.* 2003), на вычисленный выше коэффициент «омоложения». В результате получим:

$$T_{\text{LUCA-Prot}} = 1,14 \cdot T_{\text{LUCA-rRNA}} = 4,89 \text{ млрд лет.}$$

Таблица 1. Время разделения некоторых групп бактерий по результатам анализа эволюции их рРНК и наиболее древних белков

Вершины ветвления филогенического дерева в соответствии с обозначениями, принятыми в работе Батистуцци и др. (Battistuzzi <i>et al.</i> 2004)	Оценка минимального времени события по молекулярным часам на основе эволюции рРНК	Оценка времени события по молекулярным часам на основе анализа эволюции белков	Отношение оценок времени ветвления дерева, полученное разными методами
Euryarchaeota/ Crenarchaeota (P)	3,46	4,11	1,19
Aquifex/Другие эубактерии (K)	3,46	3,98	1,15
Methanococcus/ Methanopyrus (O)	2,97	3,78	1,27
Thermotoga/Другие эубактерии (J)	3,30	3,64	1,10
Archeoglobus/ Methanococcus (N)	2,97	3,57	1,20
Chlamidia/ Cyanobacteria (I)	2,70	3,19	1,18
Archeoglobus/ Thermoplasma (M)	3,33	3,08	0,92
Mycoplasma/ Cyanobacteria (H)	2,65	3,05	1,15

В рамках исследования проблемы, которой посвящена данная статья, нам важно оценить вероятность того, что LUCA существовал еще до формирования Земли. Для этого нужно знать оценки погрешностей датировок, приведенных в работе Батистуцци и др. (Battistuzzi *et al.* 2004). Сами авторы указанной статьи приводят доверительные интервалы для 95 % вероятности попадания в них рассматриваемого события. Интересующая нас нижняя граница интервала в среднем (по 8 точкам) отстоит от оцениваемой даты на 19 %, что в предположении нормального распределения ошибки и оценке возраста Земли в 4,54 млрд лет приводит к оценке вероятности внеземного абиогенеза порядка 75 %. Следует подчеркнуть, что это оценка снизу, так как она предполагает нереально быструю, с характерным масштабом времени не более нескольких десятков миллионов лет эволюцию от так называемого первичного органического бульона до весьма сложного организма, имевшего, по некоторым данным

(Ouzounis *et al.* 2006), более 1000 генов. Также можно отметить, что эволюционный сценарий, при котором первым ветвлением эволюционного дерева было разделение эубактерий и архебактерий, хоть и является в настоящее время наиболее общепринятым, но тем не менее принимается отнюдь не всеми исследователями. В частности, Гупта (Gupta 2001), Лейк и его группа (Lake *et al.* 2009; Skophammer *et al.* 2006), Кавальер-Смит (Cavalier-Smith 2006) и ряд других ученых считают архей более поздней ветвью, отделившейся от бацилл или актинобактерий.

Оценка вероятности земного абиогенеза на основе экстраполяции кривой роста минимального размера генома в прошлое

Другим важным источником информации по исследуемой проблеме может быть обнаруженная в ряде работ последних лет (Sharov 2006; Марков и др. 2010; 2011) зависимость увеличения минимально избыточного размера генома у таксонов, традиционно считающихся этапами прогрессивной эволюции биоты. Существование подобной закономерности, приводящей как минимум к экспоненциальному закону роста минимальной длины генома от времени, позволяет предпринять попытку экстраполировать указанную кривую в прошлое в надежде получить оценку времени, когда могли появиться первые «осмысленные» ДНК (или иРНК), имеющие размер, сравнимый с размерами современных микроРНК и иРНК простейших белков (десятки нуклеотидов). Результатом подобной экстраполяции (см. Рис. 1) является вывод о том, что первые «осмысленные» полинуклеотиды, начавшие накапливать информацию о внешней среде и использовать ее для сохранения порождающих их автокаталитических процессов, не могли появиться позже, чем 8 млрд лет назад. Естественно, указанный срок практически полностью исключает возможность земного абиогенеза, поэтому для того чтобы оценить объективную вероятность этой гипотезы, нам нужно получить оценку того, что сам метод экстраполяции в данном случае дает резко некорректные результаты. Попробуем оценить вероятность некорректности рассматриваемой экстраполяции исходя из самых общих соображений.

Интуитивно очевидно, что любая экстраполяция тем менее надежна, чем на больший период времени (по сравнению с интервалом времени, на котором данные известны) она осуществляется. Теория вероятностей позволяет нам получить объективную оценку этих интуитивных представлений. Из так называемого правила Лапласа (Laplace 1814) следует, что если мы ничего не знаем о причинах порождения некоторой последовательности событий, кроме того, что одно из двух взаимоисключающих событий произошло N раз подряд, а другое – ни разу, то вероятность того, что указанное событие произойдет и в следующий раз, может быть оценена по формуле:

$$P_{\text{next}} = (N + 1)/(N + 2). \quad (1)$$

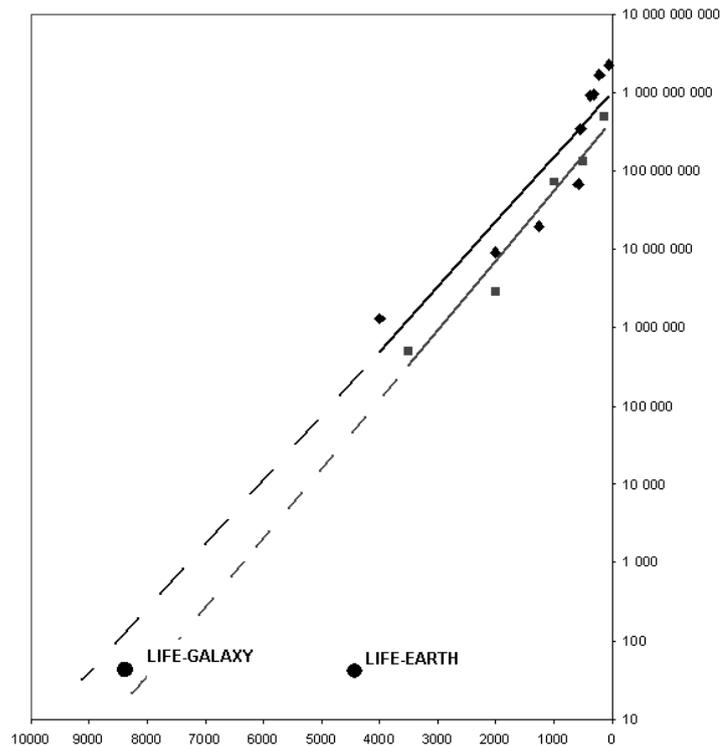


Рис. 1. Экстраполяция графиков зависимости минимальной длины генома от времени в экспоненциальном приближении, полученных в работах Шарова (Sharov 2006) и Маркова (Марков и др. 2010, 2011), в прошлое. По оси абсцисс отложено время в миллионах лет, по оси ординат в логарифмическом масштабе – минимальный размер генома (в количестве нуклеотидных пар). Серыми квадратами и черными ромбами показаны точки зависимости, полученные соответственно в данных работах. Черная и серая прямые линии являются аппроксимацией данной зависимости. Экстраполяция прямых в прошлое показана пунктиром. Кругами в нижней части графика условно показаны моменты времени возникновения жизни, предполагаемые гипотезами земного (LIFE-EARTH) и внеземного (LIFE-GALAXY) абиогенеза

В нашем случае в качестве «событий» можно рассматривать факт соответствия закона роста минимальной длины генома на определенном промежутке времени полученной в работах Шарова и Маркова (Sharov 2006;

Марков и др. 2010; 2011) зависимости. В качестве единицы длины удобнее всего взять длину предполагаемого участка экстраполяции. Учитывая, что возраст Земли T_{Earth} оценивается в 4,54 млрд лет, а первые достоверные отпечатки прокариотических клеток в слоях архея датируются возрастом T_{proc} порядка 3,5 млрд лет (Schopf *et al.* 2002), получим, что продолжительность интересующего нас временного интервала T_{extr} составляет: $T_{\text{Earth}} - T_{\text{proc}} = 1,04$ млрд лет. Тогда количество произошедших за период наблюдений событий N_{exp} равно: $T_{\text{proc}}/T_{\text{extr}} = 3,36$. Соответственно, подставляя в формулу (1) вместо N его конкретное значение N_{exp} , получим оценку вероятности того, что на участке экстраполяции наблюдаемый характер зависимости не изменится, равную 81 %.

Следует отметить, что предложенный метод оценки корректности экстраполяции достаточно консервативен. Например, можно воспользоваться аналогией с экстраполяцией другой известной зависимости – кривой роста народонаселения Земли, полученной в работе Форстера (Foerster *et al.* 1960). Эта аналогия представляется тем более уместной, что, по всей видимости, причины роста в обоих случаях обуславливаются одним и тем же главным фактором – положительной обратной связью между значением функции, хорошо коррелирующим с количеством накопленной системой информации, и скоростью ее роста, поддерживающегося увеличивающимся объемом информации в системе (Марков и др. 2010; 2011). В указанной выше работе анализировались данные о народонаселении Земли начиная со времен Римской империи до начала 60-х гг. прошлого века, причем на основании более позднего исследования фактической численности населения в доисторические времена (Chesnais 1992) можно прийти к выводу, что аппроксимация, предложенная в упомянутой статье, дает погрешность оценки населения менее полутора порядков на всем протяжении кривой даже при ее продлении в прошлое на интервал времени, в 20 раз превышающий длительность интервала, по которому была осуществлена экстраполяция. В то же время для того, чтобы выводы об оценке времени начала процесса эволюции ДНК (или РНК) были неверными, отклонение в оценке минимального размера генома на промежутке времени экстраполяции, осуществляемой менее чем на треть интервала с известными данными, должно соответствовать его уменьшению с нескольких сотен тысяч нуклеотидных оснований до нескольких десятков нуклеотидных оснований, то есть достигать четырех порядков величины.

В дополнение к вышеизложенному нужно отметить, что часть исследователей (Martin 1999; Woese 2000) считает, что LUCA представлял собой не изолированный организм в современном понимании смысла этого слова, а скорее некое тесное сообщество организмов с полупроницаемыми мембранами, что могло бы означать существенно более важную, чем сегодня, роль горизонтального переноса генов и соответственно более быстрый рост длины ДНК. Однако, с точки зрения автора, система не может

реально усложняться быстрее, чем это объективно позволяет уже достигнутый ею уровень сложности ее организации. Ведь «дополнительные» гены отнюдь не приводят автоматически к улучшению жизнеспособности системы, для этого их нужно еще уметь встроить в уже существующую генную сеть, не нарушив при этом логики работы ее компонент. Другими словами, система должна уметь отличать потенциально полезные ей генетические «зерна» от ненужных и даже потенциально вредных генетических «плевел», она должна «знать», как правильно обращаться с новыми генами. В противном случае от этих генов ей будет не больше пользы, чем дикарю от найденных им на свалке запчастей от «боинга». Да и с точки зрения экономии энергии системе должно быть выгоднее оставлять нужные ей гены при себе, чем отпускать их наружу, где они могут без всякой пользы просто разрушиться во внешней среде. Таким образом, вряд ли длина ДНК в преемнике росла существенно быстрее, чем это следует из аппроксимации обсуждаемой зависимости, даже если предположить, что межвидовые различия были размыты и горизонтальный перенос генов между организмами был тогда широко распространен.

Оценка вероятности земного абиогенеза на основе анализа химического состава молекул РНК

Важным и, на наш взгляд, пока недооцененным источником информации об условиях, в которых зарождалась жизнь, может служить анализ химического состава первых органических молекул. В настоящее время наиболее общепринятой является теория первичности так называемого «РНК-мира». В соответствии с ней на первых этапах своего развития жизнь существовала в виде сообщества или неких колоний молекул РНК, которые выполняли одновременно как каталитические функции, так и функции саморепликации. При этом представляется логичным предположить, что соотношение количества химических элементов, характерное для среды, в которой возникла жизнь, должно было в значительной степени отразиться и на химическом составе первых органических молекул, в частности молекул РНК, и в силу известного эволюционного консерватизма природы в отношении метаболических процессов самого нижнего уровня (Галимов 2001) в общих чертах сохраниться до наших дней. Как известно, молекула РНК представляет полинуклеотид, в состав которого входят стандартные химические структуры, состоящие из остатка ортофосфорной кислоты, рибозы и одного из четырех азотистых оснований: аденина, гуанина, цитозина и урацила. Химические формулы, описывающие состав указанных молекул, выглядят следующим образом: остаток ортофосфорной кислоты – PO_4 ; рибоза – $\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_5$; аденин – $\text{C}_5\text{H}_5\text{N}_5$; гуанин – $\text{C}_5\text{H}_5\text{N}_5\text{O}$; цитозин – $\text{C}_4\text{H}_5\text{N}_3\text{O}$; урацил – $\text{C}_4\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_2$.

Таким образом, в нулевом приближении, предполагая примерно равную частоту встречаемости всех азотистых оснований в молекулах РНК,

можно оценить процентное содержание атомов различных химических элементов, содержащееся в 4-х выбранных наугад фрагментах ее линейной структуры: водород – 37,8 %; кислород – 25,6 %; углерод – 24,4 %; азот – 9,6 %; фосфор – 2,6 %.

Рассмотрим теперь наиболее вероятный химический состав среды, в которой зарождалась жизнь, с точки зрения двух конкурирующих гипотез – земного и внеземного абиогенеза. Абсолютное большинство гипотез земного абиогенеза предполагает зарождение жизни в водной среде. Однако химический состав Мирового океана архейских и преархейских времен по-прежнему очень плохо известен. Использовать для его оценок химический состав современного океана явно некорректно, так как за миллиарды лет существования Земли он мог значительно измениться под действием как геологических, так и биологических процессов. Однако с астрофизической и геологической точек зрения основная часть всех базовых органических химических элементов¹, присутствовавших в первичном океане (за исключением водорода), даже если она была извлечена из водной среды, должна была остаться либо в верхней коре Земли, либо в ее атмосфере. Действительно, с одной стороны, все базовые химические элементы жизни достаточно легкие, чтобы не «утонуть» в земной мантии подобно тому, как это произошло, например, со значительным количеством железа. С другой стороны, за исключением водорода, молекулы которого быстро «убегают» из атмосферы Земли в космос, остальные базовые химические элементы жизни образуют достаточно тяжелые молекулы, имеющие мало шансов покинуть земную атмосферу. Таким образом, все базовые химические элементы жизни (кроме водорода) на протяжении существования Земли должны были в основном циркулировать между Мировым океаном, верхней частью земной коры и атмосферой, не покидая пределов указанных сред. В соответствии с вышеизложенным можно попробовать грубо оценить химический состав первичного океана следующим образом: усреднить состав сегодняшнего Мирового океана и состав земной коры с одинаковыми весами, а потом учесть состав современной атмосферы с весом, пропорциональным отношению общего количества атомов в атмосфере к общему количеству атомов в Мировом океане. В Таблице 2 на основании данных, взятых из (CRC... 2005) и (NASA... 2007), приведено процентное содержание основных химических элементов жизни в составе земной коры, ее атмосферы и океана по количеству атомов. Исходя из того, что масса Мирового океана примерно в 270 раз больше общей массы атмосферы Земли (NASA... 2007), соотношение средних молекулярных масс воды и воздуха составляет 1:1,6, а соотношение среднего количества атомов в одной молекуле примерно 3:2, получим,

¹ Отметим, что эта формулировка не вполне корректна, так как химические элементы не бывают органическими или неорганическими. – Прим. отв. ред.

что в Мировом океане содержится приблизительно в 650 раз больше атомов, чем в атмосфере. В итоге, интегрируя данные из Табл. 2 с учетом соотношения весов океана, земной коры и атмосферы в пропорции 650:650:1, получим следующую оценку предполагаемого процентного содержания базовых химических элементов жизни в среде ранней (около 4,4–4,0 млрд лет назад) Земли, когда в соответствии с гипотезой земного абиогенеза на ней зарождалась жизнь: водород – 34,8 %; кислород – 47,8 %; углерод – $1,9 \cdot 10^{-2}$ %; азот – $6,1 \cdot 10^{-2}$ %; фосфор – $3,7 \cdot 10^{-2}$ %.

Таблица 2. Процентное содержание базовых органических химических элементов в земной коре, Мировом океане и атмосфере по количеству атомов

	Земная кора	Мировой океан	Атмосфера
Водород	3,0	66,6	2,0
Кислород	62,2	33,3	21,0
Углерод	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
Азот	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$	77,0
Фосфор	$7,3 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	0,0

Теперь оценим распространенность этих же элементов в нашей Галактике в целом. Проще всего это сделать на основании анализа химического состава Солнечной системы, который, с одной стороны, достаточно хорошо изучен, а с другой стороны, считается типичным для нашей Галактики в плане представительства в нем различных химических элементов. На основании различных источников, например (Anders, Grevesse 1989), базовые химические элементы жизни содержатся в Солнечной системе в следующих пропорциях по количеству атомов: водород – 91,0 %; кислород – $7,8 \cdot 10^{-2}$ %; углерод – $3,3 \cdot 10^{-2}$ %; азот – $1,0 \cdot 10^{-2}$ %; фосфор – $3,4 \cdot 10^{-5}$ %.

Любопытно отметить, что если не считать химически пассивных гелия и неона, которые в силу своей инертности абсолютно бесполезны для органической материи, в состав РНК входят, за исключением фосфора, все наиболее распространенные в нашей Галактике химические элементы. Но, как было отмечено выше, молекулярный водород, высвободившийся в результате химических реакций, достаточно быстро улетучивается из атмосферы. По этой причине его нынешнее содержание в атмосфере, гидросфере и литосфере может иметь мало общего с его концентрацией в этих средах на ранних этапах существования нашей планеты. Кроме того, можно отметить, что водород играет в органических молекулах лишь вспомогательную роль. В силу своей одновалентности он может находиться лишь на концах цепочек органических молекул, образуя на них что-то вроде внешней «шубы». Таким образом, атомы водорода лишь *односмысленным образом* «налипают» на оставшиеся свободными одновалент-

ные связи в уже практически сформированном на основе других атомов «скелете» органической молекулы. С этой точки зрения можно считать, что водорода забирается из внешней среды ровно столько, чтобы заполнить все оставшиеся незанятыми терминальные одновалентные связи, но не более того. Соответственно его широкая распространенность в природе должна достаточно слабо влиять на конкретный процент его содержания в органических молекулах. Исходя из этих соображений и вышеприведенных цифр, можно составить матрицы взаимных отношений количества атомов углерода, кислорода и азота вблизи поверхности ранней Земли, в нашей Галактике и в молекулах РНК, а потом вычислить средний десятичный логарифм отклонения этих отношений от принятых за «стандартные» отношения количества элементов для РНК. В результате мы получим значения 1,20 для сравнения матриц РНК – Галактика, и 1,75 для сравнения матриц РНК – Земля. Это говорит о том, что и при анализе химического состава молекул РНК гипотеза панспермии подтверждается лучше (в линейном приближении с соотношением шансов примерно 78 % на 22 %), чем гипотеза земного абиогенеза.

Если говорить о качественном анализе приведенных выше данных, то можно констатировать, что взаимные отношения количества кислорода, углерода и азота в молекуле РНК хорошо согласуются с соотношением количества этих элементов в Солнечной системе и Галактике вообще. В обоих случаях диапазон изменения отношений взаимной распространенности этих элементов заключен в достаточно узком по астрофизическим меркам интервале – от 1 до 10, причем порядок следования распространенности внутри этой группы элементов один и тот же (в порядке убывания количества – кислород, углерод, азот). С другой стороны, очень важную роль в метаболических процессах самого нижнего уровня играет фосфор, которого в Галактике относительно мало – примерно на 3 порядка меньше, чем кислорода, углерода и азота. С этой точки зрения земной абиогенез выглядит предпочтительнее, так как распространенность фосфора на Земле сравнима с распространенностью углерода и азота. Однако здесь нужно также учитывать, что практически весь фосфор в породах земной коры находится в очень высокой степени окисления, и по этой причине в настоящее время он недоступен земным организмам². Вопрос о возможных механизмах его источников в доступной для биоты форме во времена архея и преархея, включая доставку метеоритами умеренно окисленных пород, содержащих фосфор, в настоящее время обсуждается (Schwartz 2006). Слабым местом гипотезы земного абиогенеза является относительно низкая распространенность на Земле основного «элемента

² Это, видимо, ошибка, так как в земных организмах фосфор присутствует только в одной форме – сильно окисленной, а именно в форме фосфата (PO_4^{2-}), и в такой же форме он в основном присутствует в земной коре. – *Прим. отв. ред.*

жизни» – углерода. Он является здесь самым редким из рассматриваемых нами химических элементов, уступая азоту примерно в три раза, а кислороду – около трех порядков.

Любопытно отметить, что в составе используемых земными организмами аминокислот фосфор не встречается; это может косвенно свидетельствовать о более позднем возникновении каталитических комплексов на основе белков, возникших уже в другой среде, имевшей, по-видимому, низкую концентрацию фосфора.

Заключение

Усредняя приведенные выше вероятности, получим, что по состоянию на сегодняшний день, с точки зрения автора, гипотеза панспермии как минимум в пять раз более вероятна, чем гипотеза земного абиогенеза, хотя эта оценка может и измениться в ту или иную сторону, если удастся предложить дополнительные методы ее фальсификации.

За пределами данной статьи оказались многие интересные и дискуссионные темы. Например, с точки зрения автора, заслуживает внимательного и всестороннего рассмотрения та неожиданно значительная роль, которую играет во внутриклеточных метаболических процессах такой элемент, как селен. Располагаясь в периодической системе элементов Менделеева на один ряд ниже серы, он обладает очень схожими с ней физико-химическими свойствами, однако в отличие от последней чрезвычайно редко встречается на Земле. Тем не менее он настолько важен для внутриклеточного метаболизма, что даже входит в состав одной из стандартных биологических аминокислот – селеноцистеина. Кроме того, можно отметить, что в практически единственном на сегодняшний день эксперименте (Huber, Wachtershauser 1997), в котором на основании естественных небиологических процессов удалось воспроизвести один из древнейших биологических процессов метаболизма – ацетатный цикл, в качестве катализатора реакции использовался как раз селен. Эти факты позволяют высказать предположение, что среда, в которой зарождалась жизнь, была обогащена селеном. Это так же хорошо согласуется с предположением М. Федонкина (Fedonkin 2009) о том, что на начальных этапах предбиологической эволюции существенную роль могли играть достаточно «тяжелые» химические элементы, обладающие благодаря увеличенным радиусам их атомов меньшей энергией активации различных химических реакций.

Так же любопытны последние данные о температуре окружающей среды, к которой были адаптированы древнейшие организмы. Например, в недавно опубликованной работе (Boussau *et al.* 2008), посвященной исследованию оптимальной температуры роста LUCA, авторы приходят к выводу о том, что вопреки широко распространенному мнению он от-

нюдь не был термофилом. В качестве одного из предполагаемых объяснений этого факта авторы рассматривают гипотезу панспермии, хотя возможны и другие варианты: скажем, пересмотр температуры океана в преархее в сторону существенного ее понижения, чему в последнее время тоже находят некоторые геологические подтверждения (Hren *et al.* 2009). С другой стороны, данные молекулярных исследований подтверждают постепенную и независимую адаптацию ко все более низким температурам у архей и зубактерий (Boussau *et al.* 2008; Gaucher *et al.* 2008). На первый взгляд, выводы указанных выше исследований противоречат друг другу, однако их можно примирить, если, например, предположить, что археи появились на Земле позже, чем полагает большинство ученых, интересующихся историей эволюции бактерий. В этом случае после появления архей-метаногенов, наполнивших атмосферу Земли метаном, продуцирующим парниковый эффект, температура Мирового океана могла существенно повыситься, вынуждая все жившие в то время бактерии сначала адаптироваться к более высоким температурам, а потом, по мере уменьшения со временем вулканической активности и появления метанотрофных бактерий, вновь в своей основной массе постепенно вернуться к мезофильному образу жизни.

Также представляют интерес работы последних лет, посвященные исследованию реконструированного генома LUCA. Например, в соответствии с ними LUCA уже имел гены для осуществления всех основных видов клеточного дыхания, свойственных современным организмам, включая цепочку кислородного дыхания (Castresana, Moreira 1999). Этот факт противоречит как большинству современных теорий об эволюции ранней Земли, не предполагающих наличия у нее окислительной атмосферы, так и геологическим данным, фиксирующим первые следы наличия некоторого незначительного количества свободного кислорода в окружающей среде лишь в породах возрастом не более 2,7–2,8 млрд лет (Frei *et al.* 2009). Некоторые авторы (см., например: Fedonkin 2009) высказывают предположение, что элементы цепочки клеточного кислородного дыхания могли понадобиться первым земным организмам для нейтрализации растворенного в воде кислорода, который в дневное время мог образовываться в результате фотодиссоциации молекул воды под действием ультрафиолетового излучения Солнца. Также вполне реалистичным выглядит предположение о существовании уже в архее бактерий, извлекающих молекулярный кислород из содержащих его веществ. Например, недавно был открыт вид анаэробных бактерий *Methylomirabilis oxufera*, способных извлекать кислород из растворенных в воде нитритов (Ettwig *et al.* 2010). Однако если рассматривать вариант панспермии, нельзя исключать и того, что до попадания на древнюю Землю LUCA мог существовать в среде, насыщенной весьма ощутимым количеством свободного кислорода, в которой цепочка кислородного дыхания могла оказаться ему весьма кстати.

Таким образом, с точки зрения автора, проведенный в данной работе анализ позволяет заключить, что при оценке правдоподобности гипотезы панспермии различными методами она явно лучше согласуется с наблюдаемыми фактами по сравнению с гипотезой земного абиогенеза. В связи с многочисленными сложностями, с которыми сталкиваются попытки вписать в гипотезу земного абиогенеза все новые и новые труднообъяснимые для нее факты, многие исследователи либо начинают перемещать предбиологическую эволюцию на этап формирования Солнечной системы (Snytnikov 2008), либо вынуждены предполагать, что большинство необходимых для жизни химических веществ были доставлены на Землю метеоритами (Pasek 2008). Однако на фоне последних данных о том, что ранний Марс обладал значительными запасами жидкой воды, на спутнике Сатурна Титане зафиксирована большая на 2–3 порядка концентрация углерода, чем она могла теоретически быть на ранней Земле, а также стремительно множасьегося списка планет, открытых вне Солнечной системы, становится все более неочевидным, в чем же заключается уникальность Земли по сравнению с другими, возможно, более подходящими для зарождения жизни планетами? В свое время российский астроном В. С. Троицкий предположил (Троицкий 1981), что жизнь с необходимостью возникает примерно одновременно во всей Вселенной, когда для этого складываются подходящие условия. Ее можно рассматривать как один из очередных этапов самоорганизации материи наподобие того, как до этого одновременно во всей Вселенной возникли элементарные частицы, атомы, молекулы, звезды, галактики и т. д. Если придерживаться этого взгляда на эволюцию Вселенной (так называемая теория «Универсальной истории», хотя на западе чаще используется термин «Big History»), то в свете предложенной А. Д. Пановым (Panov 2005; Панов 2008) модели развития предбиологической эволюции жизнь (или «преджизнь») должна была на первых этапах синхронно эволюционировать на уровне всей Галактики, существенно ускоряя процессы ранней эволюции органических молекул за счет распараллеливания обработки информации и последующего обмена полученной новой информацией различными частями «внутригалактической биоты». Естественным (и, что важно, потенциально проверяемым), следствием этой гипотезы служит постулирование единого генетического кода (возможно, с некоторыми местными «диалектами») у всех биологических систем нашей Галактики.

Резюмируя, можно сказать, что все вышеперечисленное позволяет автору утверждать, что гипотеза внеземного абиогенеза заслуживает серьезного рассмотрения и проведения дальнейших исследований в этом направлении, несмотря на широко распространенное мнение о том, что она «ничего не объясняет».

Библиография

- Галимов Э. М. 2001.** *Феномен жизни: между равновесием и нелинейностью. Происхождение и принципы эволюции.* М.: УРСС.
- Еськов К. Ю. 2000.** *История Земли и жизни на ней.* М.: МИРОС – МАИК Наука/Интерпериодика.
- Марков А. В., Анисимов В. А., Коротаев А. В. 2010.** Гиперэкспоненциальный рост минимального размера генома в эволюционном ряду от прокариот к млекопитающим. *Палеонтологический журнал* 4: 3–14.
- Марков А. В., Анисимов В. А., Коротаев А. В. 2011.** Гиперэкспоненциальный рост минимального размера генома в эволюционном ряду от прокариот к млекопитающим. *Эволюция. Дискуссионные аспекты глобальных эволюционных процессов* / Ред. Л. Е. Гринин, И. В. Ильин, А. В. Коротаев, А. В. Марков, с. 113–154. М.: ЛИБРОКОМ/URSS.
- Панов А. Д. 2008.** *Универсальная эволюция и проблема поиска внеземного разума (SETI).* М.: ЛКИ.
- Розанов А. Ю. 1996.** Цианобактерии и, возможно, низшие грибы в метеоритах. *Соросовский образовательный журнал* 11: 61–65.
- Троицкий В. С. 1981.** К вопросу о населенности Галактики. *Астрономический журнал* 58: 1121–1130.
- Шкловский И. С. 1962.** *Вселенная. Жизнь. Разум.* М.: Изд-во АН СССР.
- Anders E., Grevesse N. 1989.** Abundances of the Elements: Meteoritic and Solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 53 (Jan. 1989): 197–214.
- Arrhenius S. 1907.** Panspermy: The Transmission of Life from Star to Star. *Scientific American* 196.
- Battistuzzi F. U., Feijão A., Hedges S. B. 2004.** A Genomic Timescale of Prokaryote Evolution: Insights into the Origin of Methanogenesis, Phototrophy, and the Colonization of Land. *BMC Evolutionary Biology* 4: 44.
- Boussau B., Blanquart S., Necsulea A., Lartillot N., Gouy M. 2008.** Parallel Adaptations to High Temperatures in the Archaean Eon. *Nature* 456: 942–945.
- Castresana J., Moreira D. 1999.** Respiratory Chains in the Last Common Ancestor of Living Organisms. *Journal of Molecular Evolution* 49: 453–460.
- Cavalier-Smith T. 2006.** Rooting the Tree of Life by Transition Analyses. *Biology Direct* 1: 19.
- Chesnais J.-C. 1992.** *The Demographic Transition: Stages, Patterns, and Economic Implications.* Oxford University Press.
- CRC Handbook of Chemistry and Physics. 2005.** 85th Edition, CRC Press. Boca Raton, Florida (2005). Section 14, Geophysics, Astronomy, and Acoustics; Abundance of Elements in the Earth's Crust and in the Sea.
- Crick F. 1981.** *Life Itself: its Origin and Nature.* New York: Simon and Schuster.
- Ettwig K. F., Butler M. K., Le Paslier D., Pelletier E., Mangenot S., Kuypers M. M., Schreiber F., Dutilh B. E., Johannes Z., de Beer D., Gloerich J., Wessels H.,**

- van Alen T., Luesken F., Wu M. L., van de Pas-Schoonen K., Op den Camp H., Janssen-Megens E. M., Francoijs K.-J., Stunnenberg H., Weissenbach J., Jetten M., Strous M. 2010. Nitrite-driven Anaerobic Methane Oxidation by Oxygenic Bacteria. *Nature* 464: 543–548.
- Fedonkin M. A. 2009. Eukaryotization of the Early Biosphere: A Biogeochemical Aspect. *Geochemistry International* 47(13): 1265–1333.
- Feng D.-F., Cho G., Doolittle R. F. 1997. Determining Divergence Times with a Protein Clock: Update and Reevaluation. *Proceedings National Academy Sciences USA* 94, 13 028–13 033.
- Foerster H., Mora P. M., Amio L. W. 1960. Doomsday: Friday, 13 November, A.D. 2026. *Science* 132(3436): 1291–1295.
- Frei R., Gaucher C., Poulton S. W., Canfield D. E. 2009. Fluctuations in Precambrian Atmospheric Oxygenation Recorded by Chromium Isotopes. *Nature* 461: 250–253.
- Gaucher E. A., Govindara J. S., Ganesh O. K. 2008. Palaeotemperature Trend for Precambrian Life Inferred from Resurrected Proteins. *Nature* 451: 704–707.
- Gupta R. S. 2001. The Branching Order and Phylogenetic Placement of Species from Completed Bacterial Genomes, Based on Conserved Indels Found in Various Proteins. *International Microbiology* 4: 187–202.
- Hoover R. B. 2008. Comets, Carbonaceous Meteorites and the Origin of the Biosphere. *Biosphere Origin and Evolution*, pp. 55–68. New York: Springer Verlag.
- Hren M. T., Tice M. M., Chamberlain C. P. 2009. Oxygen and Hydrogen Isotope Evidence for a Temperate Climate 3.42 Billion Years Ago. *Nature* 462: 205–208.
- Huber C., Wachtershauser G. 1997. Activated Acetic Acid by Carbon Fixation on (Fe,Ni)S Under Primordial Conditions. *Science* 276(5310): 245–247.
- Lake J. A., Skophammer R. G., Herbold C. W., Servin J. A. 2009. Genome Beginnings: Rooting the Tree of Life. *Philosophical Transaction of the Royal Society B: Biological Sciences* 364(1527): 2177–2185.
- Joseph R. 2009. Life on Earth Came From Other Planets. *Journal of Cosmology* 1: 1–56.
- Laplace P. S. 1814. *Essai philosophique sur les probabilités*. Paris: Courcier.
- Martin W. 1999. Mosaic Bacterial Chromosomes: a Challenge en Route to a Tree of Genomes. *BioEssays* 21: 99–104.
- McKay D. S., Gibson E. V., Thomas-Keppta K. L., Vali H., Romanek C. S., Clemett S. J., Chillier X. D., Maechling C. R., Zare R. N. 1996. Search for Past Life on Mars: Possible Relic Biogenic Activity in Martian Meteorite ALH84001. *Science* 273(5277): 924–930.
- NASA Earth Fact Sheet. 2007. URL: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html>
- Ouzounis C. A., Kunin V., Darzentas N., Goldovsky L. 2006. A Minimal Estimate for the Gene Content of the Last Universal Common Ancestor – Exobiology from a Terrestrial Perspective. *Research in Microbiology* 157: 57–68.
- Panov A. D. 2005. Scaling Law of the Biological Evolution and the Hypothesis of the Self-consistent Galaxy Origin of Life. *Advances in Space Research* 36: 220–225.

- Pasek M. A. 2008.** Extraterrestrial Flux of Potentially Prebiotic C, N, and P to the Early Earth. *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 38(1): 5–12.
- Rasmussen B., Fletcher I. R., Brocks J. J., Kilburn M. R. 2008.** Reassessing the First Appearance of Eukaryotes and Cyanobacteria. *Nature* 455: 1101–1104.
- Schopf J. W., Kudryavtsev A. B., Agresti D. G., Wdowiak T. J., Czaja A. D. 2002.** Laser-Raman Imagery of Earth's Earliest Fossils. *Nature* 416(6876): 73–6.
- Schwartz A. W. 2006.** Phosphorus in Prebiotic Chemistry. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 361(1474): 1743–1749.
- Sharov A. A. 2006.** Genome Increase as a Clock for the Origin and Evolution of Life. *Biology Direct* 1: 17.
- Sheridan P. P., Freeman K. H., Brenchley J. E. 2003.** Estimated Minimal Divergence Times of the Major Bacterial and Archaeal Phyla. *Geomicrobiology Journal* 20: 1–14.
- Skophammer R. G., Herbold C. W., Rivera M. C., Servin J. A., Lake J. A. 2006.** Evidence that the Root of the Tree of life is not Within the Archaea. *Journal of Molecular Biology Evolution* 23(9): 1648–1651.
- Snytnikov V. N. 2008.** Astrocatalysis Hypothesis for Origin of Life Problem. *Biosphere Origin and Evolution*, pp. 45–53. New York: Springer Verlag.
- Woese C. R. 2000.** Interpreting the Universal Phylogenetic Tree. *Proceedings National Academy Sciences* 97: 8392–8396.

Аннотация

Гипотеза внеземного абиогенеза до сих пор встречается многими учеными с определенным предубеждением. Тем не менее, по мнению автора, при внимательном, непредвзятом рассмотрении она во многих отношениях гораздо лучше согласуется с наблюдательными данными последних лет по сравнению с традиционной гипотезой земного абиогенеза. В статье рассмотрены различные методы исследования проблемы места и времени появления известной нам формы жизни, даются оценки вероятностей конкурирующих гипотез, приводятся факты, которые с трудом можно объяснить в рамках гипотезы земного происхождения жизни. Цель настоящей работы можно определить как проверку степени достоверности гипотезы земного абиогенеза на основе анализа последних результатов оценки возраста древнейших организмов, полученных в рамках метода молекулярных часов, исследования выводов, следующих из закономерности роста минимальной длины ДНК в процессе прогрессивной эволюции, а также анализа особенностей состава химических элементов, из которых состоит РНК. Автор выражает глубокую признательность А. В. Маркову, А. Д. Панову, А. А. Шарову и М. С. Гельфанду за обсуждение затронутых в статье проблем, ценные консультации и критические замечания.

Ключевые слова: происхождение жизни, абиогенез, панспермия, геном, эволюция.