

К 150-летию со дня рождения В.И. Вернадского

УДК 550.7

В.М. ШЕСТОПАЛОВ, А.Н. МАКАРЕНКО

Научно-инженерный центр радиогидрогеоэкологических
полигонных исследований НАНУ, Киев

ЖИЗНЬ — ПРОИЗВОДНАЯ КОСМОСА, ЗЕМЛИ И ОКЕАНА

Живое зародилось на границе моря и суши
из ила под воздействием небесного огня.

Анаксимандр

Твари Земли являются созданием
сложного космического процесса,
необходимой и закономерной частью
стройного космического механизма,
в котором, как мы знаем, нет случайности.

В.И. Вернадский

Жизнь на Земле возникла в приливно-отливной зоне на стыке моря и суши в ходе эволюции органического вещества под воздействием космических ионизирующих излучений, в холодных, близких к промерзанию условиях. Холодная среда, а также мощные лунные приливы и выположенные ландшафты способствовали концентрации органики в пределах приливно-отливной зоны (латерали) первичного океана. Источниками органического вещества могли быть вулканические извержения и выпадение (аккреция) межпланетной пыли. Интенсивность ионизирующих излучений, поступление органики и ряд других факторов имели максимумы, примерно соответствующие времени 3,8–4,1 млрд лет назад, что соответствует также и биологическим данным о времени зарождения жизни. По-видимому, существовала особая эпоха максимальной вероятности возникновения жизни, когда способствующие этому факторы действовали с максимальной силой. Это относится как к Земле, так и, возможно (в более широком временном диапазоне), к другим местам во Вселенной.

Ключевые слова: биогенез, внешние условия биогенеза, приливно-радиационная гипотеза происхождения жизни

Введение

В. И. Вернадский, рассматривая проблемы происхождения жизни в своем учении о биосфере [1, 2], указывал на то, что **проблема начала жизни есть прежде всего проблема создания соответствующей**

© ШЕСТОПАЛОВ В.М., МАКАРЕНКО А.Н., 2013

среды, особо обращая внимание на вероятную роль в биогенезе космического вещества и космических излучений, трансформирующих это вещество, а также водного фактора. В настоящей работе мы попытаемся развить эти его идеи в свете новых данных, накопившихся к настоящему времени.

Биосфера Земли является одним из ключевых факторов, оказывающих влияние на геологические процессы, происходящие на поверхности нашей планеты. В то же время и сама она является порождением процессов, происходивших в окружающей среде во время ее образования, в том числе и геологических. Также Земля не является замкнутой системой и всегда была подвержена разнообразным влияниям внешних сил. Развитие всех этих средообразующих процессов, приведших, возможно, в конечном итоге к образованию жизни, имело свои особенности в пространстве и времени. Мы их рассмотрим.

Нас будет интересовать промежуток времени начиная от образования Земли и до 3,8 млрд лет назад, которому соответствует обнаружение древнейших следов жизни на планете, прежде всего заключительная часть этого временного диапазона. Древнейшие осадочные породы 3,8-миллиардолетнего возраста содержат углерод, обогащенный легким изотопом ^{12}C по отношению к ^{13}C в сравнении с углеродом заведомо неорганической природы. Именно такие аномалии свойственны живым организмам, и поэтому их принято рассматривать как следы древнейшей клеточной жизни [3]. Анализ эволюции рибонуклеиновых кислот (РНК), которые являются изначальной формой молекул наследственности, также дает возраст генетического кода $3,8 \pm 0,6 \cdot 10^9$ лет [4]. Очевидно, что геохимические данные и данные молекулярной биологии согласуются друг с другом относительно времени появления жизни. Что же такого особенного происходило тогда на Земле?

В данной работе мы попытаемся на основании, в первую очередь, геологических данных реконструировать условия, в которых происходил биогенез, наметить ключевые особенности среды, приведшие к нему, определить примерное время и место зарождения жизни.

В каком месте на Земле возникла жизнь? Наша планета обладает рядом ключевых особенностей, которые зачастую отсутствуют у других планет Солнечной системы, и уже поэтому они могут иметь отношение к появлению жизни на ней и могут служить в определенной мере указанием на место, время и основные факторы, способствовавшие этому.

1. Земля — планета, на поверхности которой присутствует жидкая водная оболочка. Для возникновения и функционирования жизни необходима жидкая вода — совершенный растворитель с уникальными свойствами. Важная особенность — вода хоть и преобладает, но не покрывает поверхность земного шара целиком, оставляя место для суши.

2. Земля — планета, которой свойственна высокая внутренняя активность, сопровождающаяся активной тектоникой, вулканизмом и дегазацией недр.

3. Практически доказано, что как гидросфера, так и атмосфера на Земле являются продуктом дегазации недр (в отличие, например, от атмосфер планет-гигантов). Отсюда, в частности, следует, что объем гидросферы в ходе эволюции земного шара возрастал от практически нулевого до нынешнего своего значения. То же можно сказать, с определенными поправками, о росте массы атмосферы.

4. На рис. 1 и 2 приведены гипсографическая кривая и кривая частот встречаемости высот и глубин. Гипсографическая кривая дает осредненный профиль поверхности планеты. Кривая частоты встречаемости высот и глубин показывает распространенность высот и глубин на ней. Видно четко выраженное бимодальное распределение.

Нижний максимум на кривой частоты встречаемости высот и глубин соответствует обширным пологим участкам дна ложа океана. Верхний максимум соответствует равнинным участкам материковой коры, выположенным активными экзогенными процессами (денудацией и аккумуляцией осадков).

Наблюдаемый в настоящее время профиль поверхности с его бимодальностью частоты распространенности значений высот и глубин — следствие длительной эволюции земной коры.

Согласно теории тектоники плит континентальный сегмент коры имеет вторичную природу, разрастаясь в зонах субдукции в ходе земной истории. Поэтому столь же вторичен верхний, континентальный, пик в рассматриваемом распределении. Относительно же нижнего, океанического, пика можно предположить древнее его происхождение уже в самом начале истории Земли.

5. Очевидно (рис. 2), что существовала эпоха, относящаяся к самым ранним этапам эволюции Земли, когда уровень океана соответствовал нижнему, «океаническому» пику кривой встречаемости высот и глубин. Этой эпохе соответствовала береговая линия максимально возможной на то время ширины и протяженности.

6. Вещество биосферы довольно неравномерно распределено в пространстве,

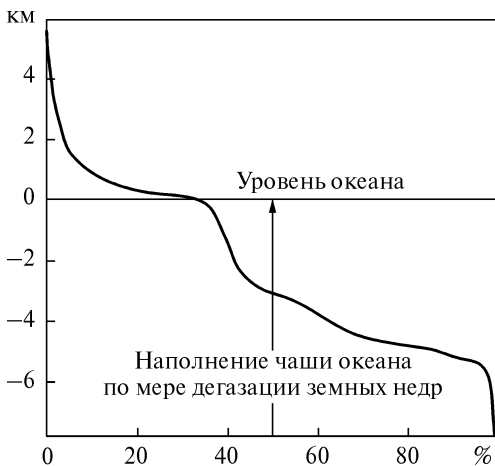


Рис. 1. Гипсографическая кривая для Земли — осредненный профиль поверхности планеты (по оси ординат показаны интервалы высот и глубин, по оси абсцисс — отвечающие этим интервалам площади, величина каждой последующей, нижележащей площади суммируется с предыдущей) [5]

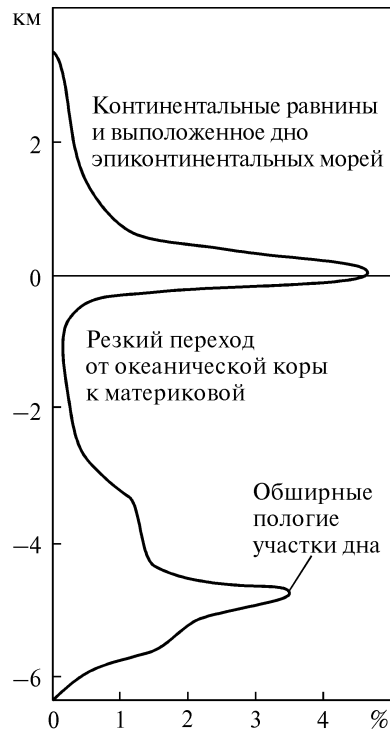


Рис. 2. Кривая частоты встречаемости высот и глубин для Земли — дает поинтервальное (здесь — через каждые 200 м) значение распространения каждой из высот и глубин в отдельности [5]

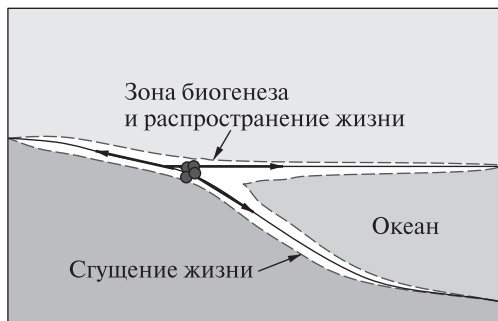


Рис. 3. Возникновение и распространение жизни на стыке геосфер

образовавшихся исключительно на литорали древних морей, т.е. большую часть времени своего существования, как минимум с 3,5 по 0,7 млрд лет тому назад, большая часть вещества биосферы была сосредоточена на узкой полосе на стыке моря и суши.

7. Земля — единственная планета Солнечной системы, обладающая спутником, сопоставимым по размерам с ней самой. Отношение массы Луны к массе Земли велико по сравнению с аналогичными величинами для спутников других планет. Причем масса Луны — достаточно велика, чтобы вызывать заметные приливные явления в океане, и, в то же время, достаточно мала для того, чтобы приливное торможение затормозило вращение Земли настолько, чтобы суточные перепады температур выходили за пределы, допустимые для существования жизни. Луна также оказывает стабилизирующее воздействие на ось вращения Земли, обеспечивая тем самым благоприятные климатические условия для развития жизни. Моделирование, выполненное для Земли, показывает, что угол наклона ее оси вращения без Луны изменялся бы в больших пределах — от 0 до 85° [6].

Отмеченные особенности нашей планеты и распределения жизни на ней позволяют предположить, что жизнь возникла там же, где затем и пребывала большую часть времени — в приливно-отливной (латеральной) зоне, на стыке трех стихий — суши, моря и воздуха (рис. 3), а не где-то в глубинах океана, в горячих источниках, в облачных каплях, в космосе или где-либо еще, как это зачастую предполагается.

Определенный намек на образование жизни в латеральной зоне содержится в элементном составе живого вещества. Известно, что обогащенность биосферы микроэлементами примерно соответствует обогащенности ими морской воды, что обычно используется в качестве доказательства океанического происхождения жизни. В то же время в отношении макроэлементов — углерода, азота, серы, — которые являются основным строительным материалом живой материи, био-сфера обогащена относительно морской воды на несколько порядков и более близка к предполагаемому составу древней атмосферы. Исходя из этого обстоятельства высказывалось предположение о зарождении жизни в тонком слое воды на поверхности океана [7]. Однако обогащенность растворенными газами еще более высока в тонком слое воды приливно-отливной зоны, поскольку она там не размещивается водой из обедненных газами подстилающих слоев океанских глубин.

концентрируясь к побережью как со стороны моря, так и со стороны суши, и образуя три отдельных сгущения жизни — в поверхностном слое вод морей и океанов, на их дне и на поверхности суши.

Те же особенности пространственного распределения живого вещества, в еще более ярко выраженном виде, были свойственны древней биосфере. Строматолиты, образованные наиболее многочисленными древними скоплениями клеток, найдены в породах,

Таким образом можно предположить, что жизнь возникла в пределах океанического ложа, на берегах частично заполнившего его океана, может быть, в эпоху, когда океаническая береговая линия была максимально протяженной (соответствовала нижнему максимуму на кривой частот встречаемости высот и глубин). Почему именно там? Какие условия этому сопутствовали?

Условия окружающей среды, в которых происходил биогенез. *Солнечное электромагнитное излучение.* Ионизирующие излучения различной природы (как электромагнитное, так и корпускулярные) давно признаны в качестве одного из важных мутагенных факторов, способных трансформировать молекулы наследственности, и, таким образом, приводить к их эволюционированию. Интересно в связи с этим рассмотреть, каков был радиационный фон на поверхности Земли на начальных этапах ее развития.

События на ранней Земле происходили на фоне сверхактивного раннего Солнца [8]: интенсивность потоков солнечного ветра превышала современную в 100—10000 раз, а интенсивность жестких электромагнитных излучений — в 10—1000 раз (в том числе в ультрафиолетовом диапазоне в 10 раз; в жестком ультрафиолетовом — в 100 раз; в рентгеновском — в 1000 раз). Причиной этого был высокий уровень магнитной активности, вызванной быстрым вращением (в 10 раз быстрее, чем сейчас) и относительно низкой температурой раннего Солнца (~70 % от нынешней).

Есть важное биохимическое свидетельство присутствия мощных потоков ионизирующих излучений (в частности ультрафиолетового излучения Солнца) на стадии биогенеза, так и их важной роли в зарождении жизни.

Группа биофизиков из Оснабрюкского университета (Германия) разработала компьютерную модель, воспроизводящую эффекты, оказываемые ультрафиолетовым излучением на устойчивость различных органических соединений [9]. Результаты исследований показали особую устойчивость к ультрафиолету азотистых оснований РНК — цитозина, гуанина, аденина и урацила. Именно эта устойчивость «кирпичиков» обеспечивает устойчивость нуклеотидных звеньев во всей цепочке РНК. То есть молекулы нуклеиновых кислот попросту оказались победителями в естественном отборе возможных носителей кода на устойчивость к ультрафиолету. Отсюда, в частности, следует важнейшая роль ультрафиолетового излучения в числе факторов, обеспечивших появление генетического кода (т.е., фактически, жизни) в известной нам форме нуклеиновых кислот, а не каких-нибудь иных соединений.

В работе [10] уже экспериментально было показано, что в смеси органических веществ, в которой идут реакции синтеза нуклеозидов и нуклеотидов, образуются самые разнообразные их варианты, как те, которые используются живыми существами, так и «неправильные», не встречающиеся в живых организмах и лишь мешающие синтезу «правильных». Облучение же смеси ультрафиолетом приводит к селективному разрушению «мусорных» молекул. Причем начинает происходить также и дополнительный синтез других необходимых молекул, образование которых не шло без воздействия УФ-излучения.

Фотохимические реакции могли играть существенную роль в синтезе первичных молекул жизни. Известны многочисленные успешные опыты по синтезу органических молекул под воздействием ультрафиолета. Также, возможно, важна



Рис. 4. Зависимость скорости звездообразования от времени [11], по данным [12] и [13]

была роль ультрафиолетовых лучей как фактора отбора. Уже сам факт, что молекулы нуклеиновых кислот в клетках имеют линейную структуру или замкнуты в кольца, может говорить о значительной роли ультрафиолетового излучения на этапе образования первых молекул — носителей наследственности. Известно, что наиболее уязвимы к квантам УФ-излучения именно места ветвления; даже если квант попадает в линейный участок, обрыв происходит, как правило, не в этом месте, избыточная энергия передается по цепочке и высвобождается при обрыве молекулы на месте ее ветвления.

Между тем, УФ-лучи интенсивно поглощаются атмосферой, и следы их влияния на генетический код могут свидетельствовать о низкой плотности атмосферы во времена возникновения жизни. Если принять, что атмосфера тогда имела низкую плотность, а озоновый экран отсутствовал вовсе, что естественно, так как в атмосфере отсутствовал свободный кислород, то интенсивность облучения земной поверхности ультрафиолетом при условии потока его от Солнца, сопоставимого с нынешним, вследствие прозрачности древней атмосферы должна была быть примерно на два порядка выше. К этому следует добавить, что согласно солнечным моделям поток УФ-излучения от Солнца был все-таки выше современного на порядок [8]. Таким образом получаем интенсивность УФ-излучения у земной поверхности примерно на три порядка более высокую, чем современная.

Галактические космические лучи (ГКЛ). На ранних стадиях своей истории земная поверхность подвергалась воздействию мощных потоков космических лучей, которые являются важным для эволюции жизни мутагенным фактором.

Они способствуют образованию органических веществ в галактических газопылевых облаках. ГКЛ также оказывают влияние на климат на нашей планете.

Производство космических лучей в Галактике пропорционально интенсивности звездообразования, так как ГКЛ образуются преимущественно при взрывах сверхновых — завершающем этапе эволюции наиболее массивных (и короткоживущих) звезд Галактики. Солнечная система образовалась на пике крупнейшей вспышки звездообразования (см. рис. 4), произошедшей примерно 3—7 млрд лет назад. Исходя из данных рис. 4 можно предположить, что в эпоху биогенеза интенсивность ГКЛ в окрестностях Солнечной системы была примерно в 4 раза выше современной.

Гигантская метеоритная бомбардировка. Планеты Солнечной системы прошли через кратковременную стадию гигантской метеоритной бомбардировки

продолжительностью около 300 млн лет, в ходе которой, в частности, сформировались главные детали рельефа лунной поверхности — лунные ударные бассейны, или «моря» — темные пятна, которые видны на поверхности этой планеты в лунную ночь. Все 15 главных лунных бассейнов образовались в узком временном промежутке примерно 4,1—3,8 млрд лет назад. Первый и крупнейший в Солнечной системе лунный бассейн Айткен образовался 4,1 млрд лет назад, последним 3,8 млрд лет назад образовалось Море Восточное. В промежутке между этими событиями возникли все остальные лунные бассейны. Следы этой метеоритной бомбардировки найдены не только на Луне, но и на поверхностях Марса, Меркурия, астероиде Веста, спутниках планет-гигантов и, отчасти, на Земле.

Поток кратерообразующего материала в окрестностях Земли и Луны в это время был в 30 раз выше, чем за всю остальную историю этих планет (за исключением времени их образования). Подсчитано [14], что в ходе гигантской метеоритной бомбардировки на лунной поверхности возникло свыше 9000 кратеров диаметром более 16 км, а 76 из них имеют диаметр между 181 и 1440 км. Для промежутка времени между 4,1—3,8 млрд лет назад интенсивность производства кратеров более 16 км в диаметре на Луне составляла $6,13 \cdot 10^{-13}$ км² год⁻¹. Оценки применительно к Земле дают $9 \cdot 10^{-13}$ км² год⁻¹ при диаметре кратеров больше 18 км. Сравнивая с интенсивностью производства кратеров на Земле в настоящее время ($3,6 \cdot 10^{-15}$ км² год⁻¹ при диаметре больше 20 км) находят, что интенсивность кратерообразования в эпоху гигантской метеоритной бомбардировки была примерно в 100—500 раз выше, чем сейчас, при том, что наша эпоха также отличается высокой скоростью кратерообразования. Это уникальное по интенсивности событие имеет также названия: «лунный катаклизм», «метеоритный катаклизм», «заключительная катастрофическая метеоритная бомбардировка».

Гигантская метеоритная бомбардировка не была ограничена лишь выпадением крупных кратерообразующих тел. Так же, как и в наше время, большая часть вещества, поступавшего тогда на планетные поверхности представляла собой богатую органическими веществами космическую пыль.

Прохождение через галактические спиральные рукава. Солнечная Система не стоит на месте относительно спиральной структуры Галактики, а, обращаясь во-круг ее центра, периодически пересекает ее спиральные рукава. Из всех прохождений Солнечной системой фрагментов спиральной структуры наиболее интересны два самых древних и самых «результативных» прохождения галактических сгущений вещества. При первом прохождении протосолнечной туманностью 4,38—4,58 млрд лет назад образовалась Солнечная система и Земля вместе с ней [15]. Примерно 3,8—4,1 млрд лет назад Солнечная система пересекла очередную область повышенной звездной плотности [16]. Гравитационные возмущения кометного облака на окраинах Солнечной системы со стороны проходящих звезд и газопылевых облаков вызвали гигантский кометный ливень, продолжавшийся несколько десятков или сотен млн лет. Кометный поток необычайной силы обрушился на Луну, Землю и другие планеты, вызвав полную переработку их поверхностей.

Последующие прохождения также сопровождалось всплеском бомбардировок планетных поверхностей, однако уже не такой интенсивности. Тем не менее, метеоритные бомбардировки имеют четкую периодичность, и гигантская метеоритная бомбардировка — лишь одно из звеньев этой периодичности [16]. Такая

периодичность не может быть объяснена какими-либо процессами в поясе астероидов и, следовательно, астероиды вряд ли могут быть ответственными за периодические метеоритные катаклизмы. В то же время орбиты малых тел (комет) из внешних окраин Солнечной системы ввиду их слабой гравитационной привязанности к Солнцу очень чувствительны к внешним воздействиям со стороны окружающей Солнечную систему материи. Поэтому любая периодичность в пространственном распределении этой материи на пути следования Солнечной системы будет вызывать периодические возмущения орбит объектов, находящихся на ее окраине (в первую очередь комет из облака Оорта), и усиленное их поступление во внутренние области Солнечной системы.

Особая интенсивность кометных ливней, сопровождающих первые прохождения Солнечной системы через спиральные рукава Галактики, может быть объяснена следующим. Солнечная система образовалась на максимуме звездообразования в Галактике (см. выше). В то время в окружающей Солнечную систему веществе велика еще была доля диффузной материи (как в рассеянном виде, так и в виде плотных газопылевых облаков) по отношению к звездам (ведь звезды образовывались как раз из диффузной материи). А известно, что гравитационное возмущающее действие газопылевых облаков на кометное облако на окраинах Солнечной системы сопоставимо (по причине их протяженности) с возмущениями со стороны звезд даже в нашу эпоху, когда содержание диффузной материи на два порядка превосходит звездную (она почти вся ушла уже на формирование звезд), то есть возмущающие возможности диффузной материи гораздо более велики, и она тогда как раз и преобладала [17]. Также, возможно, было изначально наличие в кометном облаке Оорта объектов, особенно удобных для «вытряхивания», рассеявшихся или выпавших на планетные поверхности в ходе первых прохождений через спиральные рукава Галактики.

Помимо усиленной бомбардировки планетных поверхностей, пребывание в галактическом рукаве сопровождалось сильным разогревом планетных недр и, вероятно, их плавлением [16] и усиленной дегазацией.

Отметим также, что основные источники галактических космических лучей находятся преимущественно в спиральных рукавах Галактики. Это означает, что прохождение через спиральный рукав сопровождалось также и усилением потока частиц космических лучей.

Влияние Луны. Известно, что на ранних стадиях существования Солнечной системы Луна была примерно в 3—10 раза ближе к Земле, чем сейчас. Учитывая, что величина подъема воды во время приливов обратно пропорциональна кубу расстояния между планетами, можно утверждать, что приливы тогда были примерно в 10—1000 раз более мощными, чем сейчас (то есть затапливали большую территорию, может быть в пределах нескольких или нескольких сотен километров вглубь суши, с интервалом в несколько часов, так как скорость вращения Земли и, соответственно, частота приливов были изначально примерно в два и более раза выше нынешней).

Состояние литосферы. Интригующим было поведение самых глубоких планетных недр.

«Около 4 млрд лет назад произошло кардинальное событие в истории Земли, связанное с тем, что тепловая волна, идущая из глубин планеты, достигла верх-

ней мантии, приведя к ее частичному плавлению, о чем свидетельствуют данные по геохимии и изотопии раннеархейских коматиитов и базальтов [18]. Высокая степень плавления архейской астеносферы являлась причиной крупномасштабного ареального толеитового и коматиитового вулканизма. По мере нарастания объема вулканизма наступил момент, когда архейская литосфера, нагруженная тяжелыми коматиитовыми лавами, стала в определенных местах гравитационно неустойчива и начала погружаться в астеносферу. Над зонами погружения или субдукции возникли многочисленные разновозрастные дуги с известково-щелочным вулканизмом. Столкновение этих дуг друг с другом привело к образованию первых небольших протоконтинентов преимущественно тоналитового состава» [19].

Всплеск вулканической активности, приуроченный к этому времени, наблюдался также и в отношении других планет. В частности, 4,1—3,8 млрд лет назад в недрах Луны произошла необычайно мощная вспышка тепловыделения, вызвавшая, вероятно, расплавление ядра у Луны [20].

Именно к эпохе, отстоящей от нас примерно на 4 млрд лет, относят образование сразу нескольких геосфер: формирование океанической коры и, возможно, первых континентов [19, 21, 22]; а также океана в ходе дегазации земных недр [23]. Отметим, что и зарождение биосферы соотносят, как правило, с этой эпохой [3, 4].

Океан. У нас есть определенные основания считать, что жизнь возникла в слое органического вещества приливно-отливной зоны океана. То есть приливно-отливная зона в определенной мере могла играть роль ловушки для органики. Эффективность ее в этом смысле должна была зависеть от протяженности береговой линии, степени выположенности берегов и амплитуды приливов и отливов.

Практически общепризнано, что объем океана рос по мере дегазации земных недр, поэтому на самых ранних стадиях океан занимал очень ограниченную площадь, постепенно заполняя океаническое ложе. Геохимические данные (эволюционные соотношения $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ в осадочной оболочке Земли) дают основания начинать историю океана с эпохи, отстоящей от нас на 4 млрд лет назад [23]: «Любая возможная кривая эволюции массы океана указывает на зарождение океана не ранее 3,9—4,1 млрд лет. 1) Океан образовался отнюдь не сразу после завершения формирования Земли. Первые полмиллиарда лет водная оболочка на Земле была не развита, если существовала вообще. 2) Лишь начиная с раннего архея масса океана стала быстро нарастать и к рубежу 2,0—2,5 млрд лет он сформировался, вероятно, в объеме, близком к современному.»

Вполне очевидно, что поскольку ранее океан отсутствовал, маловероятно, чтобы жизнь зародилась в интервале времени до 4,1 млрд лет назад. По мере заполнения ложа океана длина его береговой линии возрастала, пока не достигла некоторой начальной оптимальной величины. Это произошло при прохождении уровня океанической поверхности через нижний максимум на кривой частот встречаемости высот и глубин (см. рис. 2) на самых ранних стадиях существования океана. *Береговой органический слой (есть основания считать береговую линию зоной накопления органики, о чем далее), занимая на то время максимально возможную площадь, с максимальной эффективностью (в силу своих размеров) выполнял роль химического реактора, осуществлявшего синтез «самовоспроизводящихся молекул».*

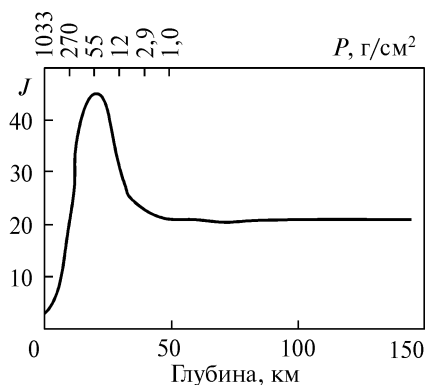


Рис. 5. Высотный ход полной интенсивности J космических лучей в современной атмосфере Земли (число импульсов в одиночном счетчике за 1 с), полученный с помощью ракетных измерений. Каждому значению высоты соответствует значение поверхностной плотности атмосферы P . Полная интенсивность космических лучей имеет максимум на высоте ~ 20 км, затем падает вдвое уже на высоте 50 км и далее остается почти постоянной, равной интенсивности ГКЛ в межпланетном пространстве. Это связано с тем, что в атмосфере происходит размножение частиц за счет их взаимодействий с ядрами атомов воздуха; вторичные частицы, достигнув максимума интенсивности, поглощаются затем по определенному закону [26]

Атмосфера. Существует разделяемое многими мнение, что первичная атмосфера, возможно, была существенно более восстановительной и состояла преимущественно из метаново-аммиачно-сероводородной смеси и лишь 3,5 млрд лет назад стала углекисло-азотной [24]. Считается, что такая высоковосстановительная атмосфера могла возникнуть в условиях дегазации мантии, содержавшей свободное железо [25]. Самородное железо действительно находят в древнейших горных породах, а лунные породы содержат газовые включения с большим процентом водорода, что может быть свидетельством восстановительного характера исходящих из планетных недр газов на начальных этапах их дегазации. Однако вопрос о существовании первичной высоковосстановительной атмосферы остается спорным, и возможно, что атмосфера уже изначально была преимущественно углекисло-азотной, подобной современной атмосфере Марса.

Мощные потоки заряженных частиц солнечного ветра и УФ-радиации разогревали верхние слои атмосферы Земли и планет и приводили к их диссипации в космическое пространство. Первичные атмосферы планет земной группы по видимому попросту частично «выкипали», и мощность их удерживалась на достаточно низком уровне. Некоторая обедненность земной атмосферы легкими благородными газами по отношению к тяжелым и сходная ситуация с изотопным составом атмосферы могут быть свидетельствами этого процесса диссипации газов в космическое пространство.

Современная атмосфера Земли является достаточно надежным щитом от внешних влияний. Благодаря наличию озонового слоя жизнь на Земле защищена от губительного влияния ультрафиолетового излучения Солнца. Признано, что озоновый экран отсутствовал в разреженной и лишенной кислорода атмосфере ранней Земли, и атмосфера была прозрачной для ультрафиолетовых лучей.

Современная атмосфера в значительной мере защищает нас и от космических лучей. Но на ранних этапах она могла играть роль усилителя их потока. Интенсивность ГКЛ у земной поверхности зависит от параметров атмосферы. Из наблюдений известно, что существует диапазон поверхностной плотности атмосферы (5—270 г/см², рис. 5), при котором атмосфера играет роль усилителя (происходит их размножение, когда одна высокоэнергичная частица может произвести целый каскад вторичных частиц). При поверхностной плотности атмосферы 55 г/см² интенсивность ГКЛ повышается в сравнении с исходной более чем в два

раза, превышая наблюдаемую у поверхности примерно на порядок. Поэтому есть определенные основания думать, что воздействие ГКЛ на органическое вещество было наиболее интенсивным, скорее всего, когда поверхностная плотность атмосферы достигла именно этого значения, ведь атмосфера прирастала постепенно. С учетом более высокой интенсивности ГКЛ в Галактике в целом, можно предполагать, что интенсивность ГКЛ у земной поверхности в эпоху биогенеза превышала современную примерно в 40 раз.

Поскольку мы полагаем, что жизнь возникла на самых ранних стадиях существования океана, естественно, что ее появление было возможным после создания в ранней разреженной атмосфере таких термодинамических условий, которые допускают существование воды в жидком виде. Как известно, жидкая вода может существовать начиная с давления 4,6 мм рт. ст. при температуре порядка 0 °С. Вероятно, при близких термодинамических условиях и произошло зарождение жизни. Поскольку основным компонентом атмосферы, по-видимому, был углекислый газ, хорошо растворимый в жидкой воде, и водная среда первичного океана изначально играла роль регулятора его содержания в атмосфере, можно ожидать, что плотность атмосферы удерживалась на этом или близких уровнях достаточно длительное время. Таким образом поддерживалась высокая чувствительность среды к космическим излучениям.

Температурные условия. Приток тепла от Солнца на начальных этапах земной истории, согласно существующим астрофизическим моделям солнечной эволюции, составлял порядка 70 % от нынешнего. Парниковый эффект практически отсутствовал ввиду слабости атмосферы. Поток эндогенного тепла, поступающий ныне на поверхность из внутренних частей нашей планеты, в тысячи раз слабее солнечной радиации. Даже если учесть, что в ходе ранней истории Земли он был на порядок или два выше, им все равно можно пренебречь. Так же, как и сейчас, земная поверхность обогревалась практически исключительно солнечным теплом и потому была достаточно холодной и, может быть, покрыта ледниками.

Существуют биохимические доказательства того, что жизнь возникла в холодных условиях. В этом плане интересны исследования С. Миллера и М. Леви [27], которые выдерживали в течение нескольких месяцев стерильные растворы оснований РНК (аденин, гуанин, цитозин, урацил) при температуре от 0 °С до 100 °С. В кипящей воде эти соединения разлагались, но с разной скоростью. Период полураспада аденина и гуанина составил 1 год, урацила — 19 лет, цитозина — 19 суток. В то же время при температуре, близкой к нулевой, периоды полураспада были оценены тысячами и миллионами лет, что вполне достаточно для образования из них самых сложных цепочек РНК. Отсюда авторы делают вывод о возникновении жизни в холодной, близкой к промерзанию среде.

Н. Гальтье и др. [28] путем компьютерного моделирования устойчивости РНК в условиях разных температур также пришли к выводу, что жизнь на Земле возникла при низких температурах.

Молекулы наследственности современных организмов сохранили в своем строении информацию о температурных условиях, в которых формировались их предопредки. Установлено, что в РНК, молекулы которых представляют собой цепочку последовательно связанных между собой четырех разновидностей

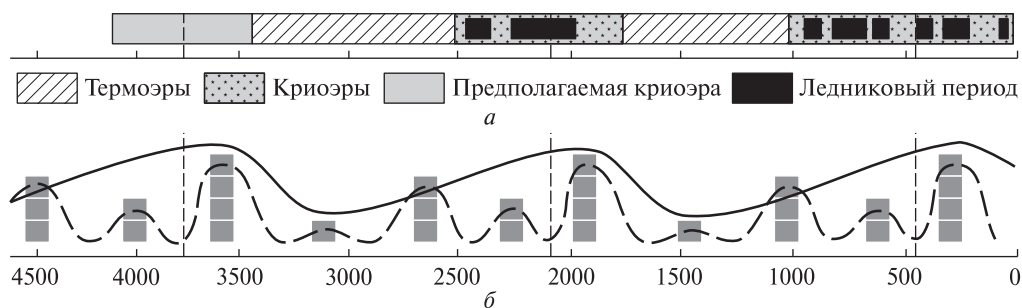


Рис. 6. Связь криоэры с асимметричностью распределения вещества в Галактике: *а* — изменения климата в ходе земной истории [31—34]; *б* — прохождение через спиральные рукава

нуклеотидов, термоустойчивость связей между одними типами нуклеотидов выше по сравнению с другими. Существует достаточно четкая зависимость относительной распространенности этих связей в новообразованных фрагментах геномных последовательностей от температур окружающей среды, господствовавших в эпоху, соответствующую образованию этих новых генов. Также и аминокислоты, которые входят в состав белков, имеют разную термотолерантность, и в разные эпохи образуются гены, кодирующие белки с разным аминокислотным составом. Авторы работы [29] на основании этих двух независимых биологических палеотермометров попытались реконструировать температурные условия, в которых существовали гипотетические предки царств бактерий, архей и эукариот (мы относимся к эукариотам). Выяснилось, что предки бактерий, предки архей, а также общий предок бактерий и эукариот были термофилами или гипертермофилами (обитали при температурах 50—80 °С). В то же время наш общий предок существовал в условиях относительно прохладной окружающей среды, возможно близких к современным. Если учесть, что первые следы архей и бактерий относятся к архейскому эону, начало которого совпадает и с первыми следами жизни вообще (и в начале и середине которого, по данным изотопной термометрии, действительно господствовали очень высокие температуры), то можно предположить, что прохладные условия соответствуют времени, непосредственно предшествующему архею (вероятной эпохе биогенеза).

Изотопный состав кислорода, содержащегося в древнейших зернах минерала циркона возрастом 4,0—4,4 млрд лет, тоже свидетельствует о прохладных, богатых влагой условиях, царивших на поверхности ранней Земли [30].

Наконец существуют определенные астрогеологические свидетельства того, что в эпоху зарождения жизни господствовал в целом холодный климат. Известно, что в истории Земли были и похолодания, и потепления климата. В самом общем случае выделяют теплые термоэры и холодные криоэры (см. рис. 6, *а*). В основе этого подразделения лежат преимущественно литологические данные, а также данные изотопной палеотермометрии. В этом смысле об эпохе биогенеза известно мало, поскольку практически не сохранилось пород, которые ей соответствуют. Однако видна некоторая периодичность в чередовании криоэры и термоэры. Согласно этой периодичности эпоха биогенеза предположительно приходится на криоэру.

Если бы мы могли знать природу периодичности в изменениях климата, мы могли бы более уверенно судить о климате интересующей нас эпохи. В настоящее

время получила значительную популярность галактическая теория климата, развиваемая многими исследователями и успешно объясняющая колебания климата на разных временных масштабах воздействием потока частиц галактических космических лучей, приходящих к нам из окружающего галактического пространства, на земную атмосферу. Эти частицы ионизируют атмосферу, способствуют формированию в ней ядер конденсации и, соответственно, облачности и общему похолоданию климата. Частицы космических лучей распределены в Галактике неравномерно, повторяя, в целом, распределение вещества в ней, которое, в свою очередь, отличается значительной неоднородностью. Используя ряд астрогеологических данных [16], мы реконструировали распределение вещества в Галактике по ходу движения Солнечной системы относительно галактической спиральной структуры (рис. 6, б). Галактика имеет четырехрукавную структуру, и вещество в ней распределено в значительной мере асимметрично, концентрируясь преимущественно с одной стороны. Более насыщенная веществом сторона Галактики содержит также и больше частиц космических лучей. Как можно видеть из сопоставления рис. 6, а и 6, б, криоэрам соответствуют прохождения через более плотную, насыщенную космическими лучами сторону Галактики. Эпоха биогенеза как раз соответствует одному из таких прохождений. С одной стороны увеличившийся поток космических лучей привел к похолоданию климата, с другой стороны эти частицы способствуют синтезу органических веществ и являются важным мутагенным фактором.

Отметим, что значительно более быстрое вращение Земли, а также слабая атмосфера способствовали интенсивным перепадам температур, что, как считается, ускорило синтез органических веществ.

Химические условия окружающей среды. В настоящее время не вызывает сомнений восстановительный характер среды в условиях ранней Земли (на протяжении первых 2,5 млрд лет земной истории). Свидетельством этого является присутствие в древних обломочных осадках таких минералов, как пирит и уранит, которые термодинамически нестабильны в современной окислительной обстановке. Также широко распространены среди древнейших осадочных пород полосчатые железистые кварциты, для образования которых необходимы были бескислородные восстановительные условия окружающей среды.

Океанические воды, вероятно, были несколько кислее современных по причине более высокого парциального давления углекислого газа в тогдешней атмосфере.

В пределах прибрежной зоны эти условия могли значительно варьировать.

Как известно, нуклеиновые кислоты, помимо широко распространенных углерода, кислорода, водорода и азота, содержат в себе также менее распространенный фосфор. Главным фосфорсодержащим минералом на Земле является апатит, встречающийся в основном в составе фосфоритов. Существуют значительные параллели между структурой кристаллической решетки апатитов и структурой молекул нуклеиновых кислот, что позволяет рассматривать этот минерал как вероятную подложку, структурирующую матрицу при первичном абиогенном синтезе нуклеиновых кислот [35—39].

Современные фосфориты образуются, главным образом, у побережий в результате химического осаждения фосфата кальция при подъеме (апвеллинге) глю-

бинных богатых фосфором океанических вод на шельф. Можно предположить, что и во времена биогенеза существовало подобное явление, сопровождающееся образованием фосфоритовых илов, песков, галек с возможным последующим синтезом на них первичных молекул жизни. И в наше время морская биота сосредоточена в значительной мере в зонах апвеллинга, так, возможно, было и на начальных этапах истории биосферы, свидетельством чего могут быть, например, строматолитовые фосфориты. Таким образом, не исключено, что и в условиях прибрежной зоны океана существовали отдельные ее сегменты, более благоприятные для зарождения жизни.

Органика. Обычно в качестве наиболее вероятных называют два источника органики — привнос органического вещества с микрометеоритами из космоса и синтез органики в пепловых столбах вулканических извержений.

Несколько слов о природе космического органического вещества. К настоящему времени в составе межзвездных облаков обнаружены десятки различных типов органических молекул, в числе которых встречаются и достаточно сложные, важные предшественники жизни, такие, как формальдегид, некоторые сахара и аминокислоты. Предполагается присутствие и еще более сложных молекул. До нескольких процентов таких веществ входит в состав межзвездной пыли. Важнейшими факторами, приводившими к синтезу органических молекул, были ГКЛ и, отчасти, УФ-излучение ионизированного космическими лучами водорода [40, 41].

Также большое значение имело наличие твердой фазы, в роли которой выступали зерна минералов межзвездной космической пыли, на поверхности которых эти реакции, собственно говоря, и происходили.

После выделения протосолнечной (и далее протопланетной) туманности из межзвездного газопылевого облака или комплекса, синтез органического вещества продолжался под воздействием все тех же факторов, но в условиях значительно более плотной среды. О масштабах синтеза говорит хотя бы такой факт: количество органического вещества, содержащегося в углистых хондритах (вещество которых доминирует среди примитивных остатков протопланетного облака), составляет 1 %. Достаточно сказать, что и сейчас, при всей той активности, которую современная жизнь проявляет при производстве органических веществ, концентрация рассеянного органического вещества в широко распространенных на Земле осадочных горных породах обычно не превышает 1 % (по массе). К примеру, в глинистых породах — 0,9 %, в песчаных — 0,2 %, и лишь в нефтяных и газоконденсатных месторождениях — 5—8 % относительно массы породы-коллектора, а в углях и горючих сланцах — 20—100 %.

Более древняя органика межзвездного происхождения также сохранилась в метеоритном веществе в значительных количествах (насколько об этом можно судить по неравновесному изотопному составу и некоторым другим признакам).

Интересен состав органических веществ в метеоритах. Преобладают разной степени сложности углеводородные молекулы, встречаются также углеводы, аминокислоты, нуклеиновые основания — вещества, которые составляют основу жизни. Вещество СМ2-типа углистого хондрита Мёрчисон содержит свыше ста типов аминокислот против 20, входящих в состав белков земной жизни. Обнаружены также нуклеиновые основания — гуанин, аденин, урацил, пурин,

ксантин, гипоксантин и некоторые другие. Помимо этого в этом же метеорите найдено еще 14 тысяч разнообразных органических соединений [42]. Учитывая небольшое количество исследованного материала, авторы упомянутого исследования предполагают, что в этом метеорите должны содержаться еще и миллионы других органических веществ.

Много углеродсодержащего вещества содержится в недрах комет (до 10 %). В частности, органику содержит межпланетная пыль, источником которой являются разрушающиеся ядра комет (а межпланетная пыль составляет основную долю в оседающем на земную поверхность космическом материале). Состав межпланетной (кометной) пыли идентичен составу некоторых типов метеоритов (углистых хондритов).

Органический материал обычен и для других объектов Солнечной системы. Много его содержится на поверхности Титана — спутника Сатурна (углеводородные реки и озера), на поверхностях планетоидов пояса Койпера на окраинах Солнечной системы, в атмосферах планет-гигантов. Анализ целого ряда марсианских метеоритов разного возраста показал наличие и в них органического вещества (углеводородов) предположительно вулканического происхождения [43]. Вся совокупность имеющихся данных свидетельствует о том, что образование органики в Солнечной системе, в особенности на ранних стадиях развития, было для нее явлением типичным и массовым.

Нерастворимая фракция в органическом веществе космического происхождения составляет 70—99 %. Массированно выпав на поверхность океана, такие частицы в значительной мере могли быть вынесены на побережье, отложившись в виде углеводородных битумоподобных пленок и корок.

Сравнение элементного состава летучей фракции комет с бактериями и млекопитающими показывает их значительное сходство [44], что может служить дополнительным доводом в пользу важной роли кометного вещества в зарождении жизни (как, впрочем, говорить и о возможном участии кометного вещества в формировании ранней атмосферы и гидросферы).

Можно оценить возможный объем органического вещества протобиосферы, из которого был произведен синтез «живых молекул».

Приток вещества из космоса не был равномерен во времени. С наибольшей интенсивностью происходил он в ходе гигантской метеоритной бомбардировки 4,1—3,8 млрд лет назад. Так же, как и в наше время, большую часть этого вещества составляла межпланетная космическая пыль — продукт разрушения комет. Известно, что частицы космической пыли содержат от долей до 90 % вес. органических веществ [45]. Из примерно 30000 тонн космической пыли, выпадающей ежегодно на земную поверхность, около 15 тонн приходится на органические вещества [45]. Можно оценить, каким был поток органики 4,0 млрд лет назад. В то время как в нынешнюю эпоху поток микрометеоритов, аккумулируемых лунной поверхностью, составляет ~ 4 мкм/см²/млн лет, аналогичный поток на заключительных этапах гигантской метеоритной бомбардировки превышал современный в 10^6 раз [46]. Таким образом на земную поверхность ежегодно выпадало около $15 \cdot 10^6$ тонн органических веществ, или 0,03 тонны органического вещества на 1 км² в год. (Для сравнения современная полная годовая продукция органического углерода на квадратный километр по Рили [47] составляет 160 т/км² в среднем

для суши и 340 т/км^2 для вод открытого океана; общая годовая продукция органического углерода в целом для Земли составляет $146 \cdot 10^9 \text{ т}$). Практически вся космическая органика из той, которая когда-либо выпала на земную поверхность, выпала в ходе гигантской метеоритной бомбардировки. Известно, что общая масса микрометеоритного материала, выпавшего на лунную поверхность в ходе гигантской метеоритной бомбардировки, составляет $\sim 5 \cdot 10^{23} \text{ г}$ [46]. Следовательно, на земную поверхность должно было выпасть примерно в 14 раз больше, учитывая соотношение площадей планет, то есть $\sim 7 \cdot 10^{24} \text{ г}$ вещества, в том числе $3,5 \cdot 10^{21} \text{ г}$ органики.

Теперь о вулканической органике. В продуктах вулканических извержений найдено около 200 органических соединений, из них 99,8 % составляют углеводороды. Также найдены аминокислоты, углеводы, основания нуклеиновых кислот. Протеканию реакций способствует огромная суммарная площадь извергаемых частиц пепла, а также значительная ионизация газов в каналах молний, интенсивно образующихся в пепло-газовом облаке.

Оценим объем органики, синтезированный к началу биогенеза вулканической деятельностью. Исходя из формы гипсографической кривой и возможной роли береговой линии в образовании жизни можно предположить, что к эпохе биогенеза из земных недр главным образом в ходе вулканической деятельности выделилась примерно десятая часть от всей существующей в гидросфере воды — $1,6 \cdot 10^{23} \text{ г}$. Используя известное из наблюдений соотношение органических веществ и воды в продуктах вулканических извержений, равное примерно 1:100, получаем около $1,6 \cdot 10^{21} \text{ г}$ органики.

Таким образом, получаем суммарную массу добиосферной органики в поверхностном слое земной коры равной примерно $5 \cdot 10^{21} \text{ г}$. Для сравнения нынешняя сухая масса живого вещества составляет порядка 10^{18} г , количество органического углерода в осадочных породах земной коры $\sim 10^{22} \text{ г}$, а углерода в целом — примерно $5 \cdot 10^{22} \text{ г}$. Конечно, большая часть добиосферной органики подверглась безвозвратному захоронению, и лишь некоторая часть ее приняла участие в процессах биогенеза. Можно заметить, что основным источником органики, по-видимому, было все же выпадение космической пыли. Поэтому вряд ли случайным является давно отмечаемый факт, что наибольшее сходство элементный состав живого вещества имеет с летучей фракцией комет.

Если упрощенно пренебречь ударным перемешиванием вещества на земной поверхности и допустить относительно спокойные большую часть времени условия осаждения на земную поверхность микрометеоритного материала и дегазирующейся из земных недр воды и углекислоты и пренебречь вкладом вещества комет, можно предположить существование в то время окутывающего земную поверхность многометрового мерзлотного слоя из смеси водно-углекислого льда, реголита, космической пыли и частиц вулканического пепла. В ходе таяния этого слоя обогащенная углекислотой и «кислыми дымами» вода извлекала из первобытного грунта органику, образуя достаточно насыщенный раствор органических веществ. Значительная часть этих веществ была слабо растворима и пребывала в виде эмульсии или взвеси. Попадая в первичный океан, часть органических веществ могла быть вынесена к берегу, формируя в прибрежной зоне еще более концентрированный органический слой.

Естественно, все эти цифры носят лишь оценочный характер. Наши значения могут быть заниженными, поскольку базируются на данных о современных вулканических эманациях, состоящих, в основном, из паров воды и углекислоты. Совсем не факт, что так было всегда. Если все же существовала высоковосстановительная атмосфера, содержащая в больших количествах H_2 , CH_4 , NH_3 , H_2S , следовало бы ожидать и гораздо большего содержания органики в продуктах вулканических извержений. Отсутствие свободного кислорода также играло значительную роль, поскольку в ходе современных извержений значительная часть образующихся органических веществ, по-видимому, попросту выгорает. Наши значения могут быть также и завышенными, поскольку не были учтены неизбежные потери органического вещества, связанные с погребением его в осадочных отложениях. Тем не менее, в рамках излагаемой здесь гипотезы возникновения жизни кажется возможным реконструировать количественно физические условия, в которых это произошло.

Отметим также, что не только микрометеоритный источник органики имеет космическую природу, но и повышенная интенсивность вулканического источника органики, пусть и опосредованно, была вызвана космическими факторами [16]. Выше отмечалась роль ионизирующих космических излучений. Особо следует отметить уникальную для земной истории активизацию всех этих факторов на стадии гигантской метеоритной бомбардировки и примерное совпадение с этим временем первых следов жизни на Земле.

Общая схема биогенеза. Попытаемся реконструировать события, которые предшествовали и сопутствовали появлению жизни.

4,1—3,8 млрд лет назад произошел мощный всплеск метеоритной бомбардировки, а также мощный всплеск внутренней активности Земли. Интенсивность ионизирующих излучений значительно, возможно на порядки, превышала нынешнюю.

Начавшийся 4,1—3,8 млрд лет назад быстрый разогрев планеты под воздействием внутренних источников тепла привел к активной дегазации ее недр. Огромные массы выделявшихся в ходе извержений вулканов газов образовали еще очень слабую атмосферу. Большая часть же их вымерзала и в виде инея из H_2O и CO_2 и других газов оседала на земной поверхности и постепенно перемешивалась с реголитом. В целом, картина была очень похожа на условия, существующие в районе современных полярных шапок Марса.

Точно так же вместе с изверженными вулканами газами выпадали и накапливались на земной поверхности органические вещества. Факт присутствия органики в продуктах вулканических извержений давно известен. Аккреция богатой органикой межпланетной пыли на ранней Земле также дала значительный вклад в накопление на земной поверхности больших количеств добиологического органического материала.

Когда парциальное давление углекислого газа превысило некоторый уровень, достаточный для разогрева поверхности до температуры плавления воды в результате парникового эффекта или, может быть, таких внешних воздействий, как падения метеоритов, поверхностный водонасыщенный слой начал подтаивать, и бурные потоки «газированной» и насыщенной кислотами воды понеслись по мерзлым склонам в низины, унося с собой среди прочего и органический

материал. Таяние мерзлотного слоя должно было сопровождаться усилением парникового эффекта, что еще больше повысило температуру его поверхности, т.е. процесс шел по принципу положительной обратной связи, и, значит, достаточно быстро, лавинообразно. Значительная часть скопившейся до этого в результате оседания космической пыли, падения метеоритов и вулканической деятельности массы органических веществ были смыты таким образом в первичный океан, где частично безвозвратно осела на дно, частично растворилась, а частично образовала тонкую «бульонную» пленку на поверхности океана и со временем была вынесена на побережье. (Подобные процессы выноса происходят, например, и ныне при разливе нефти в море. Аналогичный пример — формирование «береговых аномалий» на побережьях водоемов в ходе послеаварийных выпадений радиоактивных частиц. Еще нагляднее весенние лужи, окруженные желтой каймой пылицы растений).

Приливы значительно способствовали выносу и удержанию органических веществ в приливно-отливной зоне океана. Каждый квадратный метр приливно-отливной зоны мог удержать (адсорбировать) определенную порцию органических веществ. Остальное уносилось в море. Общее количество удерживаемой органики, таким образом, было пропорционально: а) протяженности береговой линии, которая сильно изменялась в ходе наполнения чаши океана и достигла оптимальных значений при заполнении водой равнинного океанического ложа, чему соответствует прохождение нижнего максимума на кривой частоты встречаемости высот и глубин (рис. 2) и б) ширине приливно-отливной зоны.

Поскольку растительность отсутствовала, происходила усиленная эрозия рыхлого реголитового грунта и формирование специфических выположенных амфибиальных берегов — «ни суша, ни море». Изрезанные эрозией пологие берега еще более увеличивали общую протяженность береговой линии. Обилие мелких узких бухточек повышало силу приливов, а также и без того пространственные размеры приливно-отливной зоны первичного океана. (Даже сейчас, при нынешних уровнях приливов, на пологих участках береговой линии ширина приливно-отливной зоны может достигать нескольких километров.)

Пологие берега способствовали образованию множества мелких замкнутых бассейнов в литоральной зоне во время отлива, дополнительно увеличивая границу между морем и сушей. Учитывая низкую плотность атмосферы, можно предположить, что вода в них стремительно высыхала, что способствовало налипанию органических пленок по периметру этих водоемов. Отметим, что Ч. Дарвин, избегавший открыто высказываться по вопросам происхождения жизни, в частной переписке тем не менее высказал предположение, что жизнь могла зародиться в маленьком пруду на берегу моря. Литоральные лужи (отливные лужи, или «лужи Дарвина»), а речь идет именно о них, были хорошо ему знакомы со времен студенческой практики, — там он собирал материал для своих коллекций. Современные литоральные лужи показаны на рис. 7.

Об экспериментальных подтверждениях возникновения жизни на литорали. В работе [49], посвященной опытной реконструкции наиболее вероятных внешних условий биогенеза, было найдено: самые сложные органические соединения образуются на твердой поверхности в тонкой пленке воды, насыщенной органическим веществом, при быстром падении температуры и последующем внезап-



Рис. 7. Литоральные лужи (Печенгский район, Мурманская обл., РФ)

ном облучении ультрафиолетом. При этом авторы считают, что такие условия должны были создаваться в горячих источниках. Мы же считаем, что это описание соответствует скорее условиям приливно-отливной зоны. Твердая поверхность, пленка воды, насыщенная органическим веществом, резкие падения температур ночью (почти лунных масштабов в условиях низкого атмосферного давления), всплеск ультрафиолетового излучения на рассвете, — все это соответствует берегам древнего океана.

Таким образом приливно-отливная зона океана на некоторое, в геологическом смысле достаточно короткое, время превратилась в зону высокой концентрации органики. Возможно, следы завершительных этапов существования этой первичной литоральной зоны высокой концентрации органических веществ сохранились в древнейших остатках осадочных пород, сформированных под воздействием древних приливов. По крайней мере именно так выглядят «отпечатки» древнейшего прилива, обнаруженные недавно австралийскими и американскими геофизиками в 3,2-миллиардолетнего возраста песчаниках Южной Африки, — они сохранили сформированную приливными течениями слоистость в виде темных, богатых углеродом, и светлых участков [50].

Органическое вещество, находящееся в этой зоне, подвергалось воздействию высоких доз ионизирующей радиации (космические лучи, ультрафиолет), что сопровождалось структурными изменениями в органических молекулах, их распадом при поглощении энергии ионизирующих излучений и последующим взаимодействием обломков (свободных радикалов и ионов) друг с другом с образованием

все новых и новых форм органических соединений. Мощные приливы, «размазывая» органику тонким слоем в приливно-отливной зоне, способствовали увеличению удельных доз радиации, приходящихся на единицу массы органического вещества, что особо существенно в случае ультрафиолета.

Иногда приводят сравнение: вероятность возникновения жизни подобна вероятности того, что набор типографского шрифта, сброшенный с крыши небоскреба, сложится в страницу романа «Война и мир». Эта вероятность не равна нулю — для достижения успешного результата всего лишь нужно одновременно сбрасывать как можно большее число наборов типографского шрифта (количество органики должно быть очень большим) и делать эти броски как можно чаще (т.е. темпы перебора вариантов сочленения молекул должны быть предельно интенсивными).

Космические ионизирующие излучения были важнейшим «мутагенным» фактором, обеспечившим непрерывным дроблением и синтезом все новых и новых молекул последовательное «сбрасывание шрифта» столько раз, сколько понадобилось для образования самовоспроизводящихся молекул и молекулярных комплексов. Именно для этого нужна была максимально возможная интенсивность космических излучений, протяженная пологая береговая линия и мощные приливы.

Способность к самовоспроизводству (т.е. возникновение механизма наследственности) резко повысила выживаемость таких молекул. Новые мутации уже теперь самокопирующихся молекул приводили к появлению все более совершенных механизмов их воспроизводства. В протобиосфере, состоявшей из косных органических молекул, зародилась первичная, молекулярная биосфера, нечто, подобное тому, что сейчас принято называть «мир РНК» [51], состоящая из самовоспроизводящихся молекул (точнее следовало бы говорить систем, простейшие из которых представляли, вероятно, просто совокупность самовоспроизводящихся молекул — РНК или чего-нибудь подобного — и достаточного количества строительных блоков — нуклеотидов — и, вероятно, катализаторов (частицы глинистых минералов, белковые молекулы и т.п. в пределах «одной капли»).

Таким образом, на самых ранних стадиях эволюции планеты, одновременно с образованием первичного океана в приливно-отливной зоне вокруг него сформировался пояс повышенной концентрации органических веществ абиогенной, естественно, природы — своеобразная протобиосфера, — обладающий рядом уникальных свойств:

- наличием механизмов концентрации и синтеза органических веществ;
- наличием мощного «мутагенного» фактора, постоянно видоизменяющего эти вещества.

Изменения, происходящие в органических веществах при облучении их ионизирующей радиацией, достаточно хорошо изучены. Для нас важно, что отложившееся органическое вещество содержало некоторое количество нуклеиновых оснований и простейших цепочек нуклеиновых кислот. По крайней мере их находят в продуктах вулканических извержений. Эти и синтезируемые заново нуклеиновые кислоты подвергались радиационно-химическим воздействиям: происходила полимеризация нуклеотидов с образованием полинуклеотидных цепочек, далее следовали разрывы цепочек, устранение ветвлений, отделение

мелких фрагментов и отдельных нуклеотидов, повторное их сцепление, модификация углеводных частей и азотистых оснований их молекул... Установился своеобразный цикл биогенеза, состоящий в последовательном привносе органики в зону биогенеза в ходе приливов и последующих ее экспозиции и преобразовании в ходе отливов. В этом цикле перманентной трансформации молекул под воздействием ионизирующих излучений и возникли, вероятно, первые «живые молекулы».

Когда на Земле возникла биосфера? Изучение истории внешних оболочек Земли, эволюции ее глобального рельефа дает принципиальную возможность датировать время, когда зарождение жизни на Земле было наиболее вероятным.

Если придерживаться предлагаемой нами гипотезы (назовем ее приливно-радиационной) происхождения жизни, предполагающей, что жизнь возникла как результат внешних, внеземных, воздействий, можно предположить, что с наибольшей вероятностью жизнь могла возникнуть в эпохи, когда эти воздействия были максимальными, а Земля наиболее чувствительна к ним.

Под внешними воздействиями здесь понимается прежде всего ионизирующая радиация — ультрафиолетовое излучение Солнца и галактические космические лучи, а также действие лунных приливов и выпадение содержащей органику космической пыли. Под чувствительностью нашей планеты к этим воздействиям подразумевается состояние атмосферы, которая могла трансформировать эти воздействия различным образом, и состояние органического вещества, в отношении которого, собственно, и осуществлялось воздействие.

Интенсивность таких факторов, как ионизирующее электромагнитное излучение Солнца, лунные приливы, была всегда достаточно высокой в течение времени до 3,8 млрд лет назад и постепенно ниспадала. В то же время такие факторы, как ГКЛ, выпадение богатой органикой космической пыли, вулканическая активность (и дегазация) земных недр, термодинамическое состояние атмосферы (возможность существования жидкой воды и усиления потока ГКЛ, температуры, благоприятные для сохранения органических молекул), оптимальный для биогенеза объем океана с протяженными пологими берегами, испытали необычайно резкое и относительно кратковременное усиление. Оно имело, возможно, общие причины, связанные с присутствием Земли в галактическом спиральном рукаве, в промежутке времени примерно 4,1—3,8 млрд лет назад. Поскольку заключительная стадия этого временного промежутка соответствует в том числе и биологическим свидетельствам возникновения жизни, мы склонны считать, что именно в этом временном диапазоне она и возникла. (Очевидно, все-таки, что уникальный по интенсивности всплеск потенциальных биогенетических факторов не просто совпадает с первыми свидетельствами появления жизни, а является причиной ее появления.)

Примечательно следующее. Солнечная система возникла в эпоху максимального звездообразования в Галактике. Именно в это время в ней возникало максимальное количество планет, в том числе и потенциально пригодных для жизни. Тогда же происходило с максимальной интенсивностью производство галактических космических лучей, которые могли быть важным фактором происхождения жизни. Звезды, подобные Солнцу, эволюционируют сходным образом, им всем свойственна ранняя стадия, характеризующаяся высоким уровнем иони-

зирующих излучений. Особенностью развития протопланетных облаков является формирование кометного облака из их остатков на далеких окраинах планетной системы. Эти кометные облака планетных систем были подвержены более интенсивным гравитационным пертурбациям со стороны внешнего окружения (т. к. большей была пропорция диффузной материи, воздействие которой в этом плане более интенсивно). Таким образом обеспечивалось более интенсивное поступление органических веществ во внутренние части планетных систем и на находившиеся там землеподобные планеты. Можно предположить, что не только нашей планете была свойственна особая эпоха максимально вероятного зарождения жизни, но и вся Галактика проходила такую эпоху. А поскольку наша Галактика достаточно типична для Вселенной, то это предположение можно перенести и на всю доступную нам часть Вселенной.

Выводы

Главным источником органического вещества протобиосферы могли быть аккреция межпланетной пыли и вулканические извержения. Эффективность всего процесса зависела от наличия буфера, в котором происходило бы массовое накопление органики, предваряющее собственно стадию биогенеза. Таким буфером мог быть поверхностный мерзлотный слой, насыщенный конденсатом вулканических газов и микрометеоритным веществом, возникший в низкотемпературных условиях ранней Земли. Потепление, вызванное парниковым эффектом растущей атмосферы, или какое-нибудь внешнее воздействие привели к таянию богатого органикой водонасыщенного мерзлого слоя и образованию первичного океана. Этот процесс сопровождался формированием на стыке моря и суши в приливно-отливной зоне слоя, насыщенного органическими веществами. В этом слое под воздействием ионизирующих излучений (ультрафиолетовое излучение Солнца, космические лучи) шли радиохимические реакции, приведшие к образованию первых самовоспроизводящихся молекул («Мир РНК») и их дальнейшему эволюционированию в клеточную жизнь. Поскольку синтез таких молекул в естественных условиях был малоэффективным, его результативность сильно зависела от общей массы органических веществ, участвующих в реакциях, интенсивности излучений и физических размеров (ширины и протяженности) зоны протекания реакций. Размеры этой зоны определялись распределением частот встречаемости высот и глубин земной поверхности, а также мощностью лунных приливов, действовавших на первичный океан. 4,1—3,8 млрд лет назад на Земле сложились уникальные условия, когда интенсивность главных действующих факторов биогенеза (поступление органических веществ, сила лунных приливов, интенсивность космических ионизирующих излучений), а также состояние литосферы, океана и атмосферы были наиболее благоприятными для зарождения жизни. Мы не исключаем, что не только Земле был свойственен ограниченный временной промежуток максимальной вероятности возникновения жизни, но также и вся Галактика (а может быть и Вселенная) проходила через такую ограниченную во времени эпоху биогенеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. — М.: Наука, 1989. — 261 с.
2. Вернадский В.И. Начало и вечность жизни. — М.: Республика, 1989. — 704 с.
3. Schidlowski M.A. A 3,800-million-year isotopic record of life from carbon in sedimentary rocks // Nature. — 1988. — V.333, № 6171. — P. 313—318.
4. Eigen M., Lindemann B.F., Tietze M., et al. How old is the genetic code? Statistical geometry of tRNA provides an answer // Science. — 1989. — V.244, № 4905. — P. 673—679.
5. Нейман В.Б. Сравнительная характеристика гипсографических данных некоторых планет // Земля во Вселенной. — М.: Мысль, 1964. — С. 322—330.
6. Comins N.F. What if the Moon didn't exist? // Universe Classroom. — 1996. — №. 33. — P. 1—4.
7. Banin, A., Navort, J. Origin of life: clues from relations between chemical compositions of living organisms and natural environments // Science. — 1975. — V. 189. — P. 550—551.
8. Güdel M. The Sun in time: activity and environment // The Living Reviews in Solar Physics. — 2007. — V. 4, № 3.
9. Mulikidjanian A.Y., Cherepanov D.A., Galperin M.Y. Survival of the fittest before the beginning of life: selection of the first oligonucleotide-like polymers by UV light // BMC Evolutionary Biology. — 2003. — 3, №12; <http://www.biomedcentral.com/content/pdf/1471-2148-3-12.pdf>
10. Powner M.W., Gerland B., Sutherland J.D. Synthesis of activated pyrimidine ribonucleotides in prebiotically plausible conditions // Nature. — 2009. — V. 459. — P. 239—242.
11. Панов А.Д. Универсальная эволюция и проблема поиска внеземного разума (SETI). — М.: ЛКИ, 2008. — 208 с.
12. Twarog B.A. The chemical evolution of the solar neighborhood. II — The age-metallicity relation and the history of star formation in the galactic disk // Astrophys. J. — 1980. — V. 242, Part 1. — P. 242—259.
13. Meusinger H. Interpretation of the frequency distribution of isochrone ages of nearby F and G stars // Astrophys. and Space Sci. — 1991. — V. 182, № 1. — P. 19—34.
14. Barlow N.G. Estimating the terrestrial crater production rate during the late heavy bombardment period // Abstracts for the International workshop on meteorite impact on the early Earth. Workshop held in Perth, Australia, September 21—22, 1990. — Houston, TX: Lunar and Planetary Institute. — P. 4.
15. Марочник Л.С. Исключительно ли положение Солнечной системы в Галактике? // Природа. — 1982. — № 6. — С. 24—30.
16. Макаренко А.Н. Космический фактор «избыточного» тепловыделения в недрах Земли и планет. Ст. 1. Космические ритмы в геологической летописи // Геол. журн. — 2011. — № 3. — С. 116—130.
17. Hut P., Tremaine S. Have interstellar clouds disrupted the Oort comet cloud? // Astron. J., — 1985. — V. 90. — P. 1548—1557.
18. Конди К. Архейские зеленокаменные пояса. — М.: Мир, 1983. — 390 с.
19. Лобковский Л.И., Котелкин В.Д. Двухъярусная термохимическая модель конвекции мантии и ее геодинамические следствия. // Электрон. научн. журн. Вестн. ОГГГН РАН. — 1999. — № 3.
20. Ранкорн С.К. Древнее магнитное поле Луны // В мире науки. — 1988. — № 2. — С. 18—27.
21. Гудвин А.М. Гигантская метеоритная бомбардировка и развитие континентальной земной коры // В кн.: Ранняя история Земли. Под ред. Б.Уиндли. — М.: Мир, 1980. — С. 87—107.
22. Жарков В.Н. Об истории лунной орбиты. // Астрон. Вестн. — 2000. — Т. 34, № 1. — С. 1—12.
23. Галимов Э.М. О возникновении и эволюции океана по данным об изменениях $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ осадочной оболочки Земли в ходе геологического времени // Доклады АН СССР. — 1988. — Т. 299, № 4. — С. 977—981.
24. Urey H.C. The atmospheres of the planets // In Handbuch d. Physik. — Berlin: Springer, 1969. — P. 363—418.
25. Holland H.D. Model for the evolution of the Earth's atmosphere // In Petrologic Studies, A Volume in Honor of A.F.Buddington. — New York: Geological Society of America, 1962. — P. 447—477.
26. Мирошниченко Л.И. Космические лучи в межпланетном пространстве. — М.: Наука. — 160 с.

27. Miller S., Levy M. The stability of the RNA bases: Implications for the origin of life // Proceedings of the National Academy of Sciences. — 1998. — V. 95, № 14. — P.7933—7938.
28. Galtier N., Tourasse N., Gony M. A Nonhyperthermophilic Common Ancestor to Extant Life Forms // Science. — 1999. — V. 283, № 5399. — P. 220—221.
29. Boussau B., Blanquart S., Necsulea A. et al. Parallel adaptations to high temperatures in the Archaean eon // Nature. — 2008. V. — 456. — P. 942—945.
30. Valley J.W. A Cool Early Earth? // Scientific American. — 2005. — № 10. — P. 58—65.
31. Янг Г. Древнейшие ледниковые периоды в докембрии // В кн. Зимы нашей планеты. Под ред. Б.Джона. — М.: Мир, 1982. — С. 135—164.
32. Джон Б. Ритм, причина и прогноз // В кн. Зимы нашей планеты. Под ред. Б.Джона. — М.: Мир, 1982. — С. 282—298.
33. Kirschvink J.L., Gaidos E.J., Bertani L.E. et al. Paleoproterozoic snowball Earth: Extreme climatic and geochemical global change and its biological consequences // Proc. of Natl Acad. Sci. — 2000. — V. 97 № 4. — P. 1400.
34. Ohmoto H., Felder R.P. Bacterial activity in the warmer sulphate-bearing, Archaean oceans // Nature. — 1987. — V. 328. — P. 244.
35. Кольцов Н.К. Организация клетки. — М.: Биомедгиз, 1936. — 189 с.
36. Чернобровкин В.В., Костецкий Э.Я. Модель механохимического синтеза аperiodических кристаллов — протобиологические системы в сейсмических процессах // Междунар. конф. «Эволюционная биохимия и происхождение жизни». — Ереван, 1978. — С. 12.
37. Костецкий Э.Я., Алексаков С.А. О возможности синтеза нуклеопротеинов на матрице апатита // Докл. АН СССР. — 1981. — Т. 260. — С. 1013—1018.
38. Костецкий Э.Я. Как возникла жизнь // Вестн. Тихоокеан. гос. экон. ун-та. — 2008. — № 1. — С. 79—101.
39. Костецкий Э.Я. О происхождении жизни и возможности формирования протоклеток и их структурных элементов на кристаллах апатита // Журн. эвол. биохим. физиол. — 1999. — Т. 35. — С. 249—256.
40. Chang S. Life in the Universe // Organic Chemical Evolution. Proceedings of a conference held at NASA Ames Research Center Moffett Field, California / Ed. J. Billingham. Washington D.C.: NASA Conference Publication 2156, Scientific and Technical Information Branch, NASA. — 1979. — P. L21—46.
41. Отрощенко В.А., Алексеев В.А., Рябчук В.К. Неравновесные процессы синтеза органического вещества в межзвездных газо-пылевых облаках // Успехи биол. химии. — 2002. — Т. 42. — С. 295—239.
42. Schmitt-Kopplina P., Gabelicab Z., Gougeonc R.D. et al. High molecular diversity of extraterrestrial organic matter in Murchison meteorite revealed 40 years after its fall // Proc. Natl Acad. Sci. USA. — 2010. — V. 107, № 7. — P. 2763—2768.
43. Steele A., McCubbin F.M., Fries M. et al. A reduced organic carbon component in martian basalts // Science. — 2012. — V. 337, № 6091. — P. 212—215.
44. Войткевич Г. В. Возникновение и развитие жизни на Земле. — М.: Наука, 1988. — 144 с.
45. Flynn G.J., Keller L.P., Jacobsen C., Wirick S. An assessment of the amount and types of organic matter contributed to the Earth by interplanetary dust // Advances in Space Res. — 2004. — V. 33, Issue 1. — P. 57—66.
46. Maurette M., Matrajt G., Gounelle M. et al. «Juvenile» KBOs dust and prebiotic chemistry / Frontiers of life. Proc. XIIth Recountres de Blois. — The Gioi Publishers, Hanoi, 2003. — P. 7—22.
47. Мейсон Б. Основы геохимии. — М., Недра, 1971. — 312 с.
48. Литоральные лужи (Печенгский район, Мурманская обл., РФ), <http://www.geolocation.ws/v/P/25032822/-/en>.
49. Флоровская В. Н., Пиковская Ю. И., Раменская М. Е. Предбиологическая эволюция углеродистых веществ на ранней земле. Геологический аспект. — М.: Либроком, 2012. — 224 с.
50. Eriksson K.A., Simpson E.L. Quantifying the oldest tidal record: the 3.2 Ga Moodies Group, Barberton greenstone Belt, South Africa // Geology. — 2000. — V. 28. — P. 831—834.
51. Спириг А.С. Биосинтез белков, мир РНК и происхождение жизни. // Вестн. Рос. Акад. Наук. — 2001. — Т.71, №4. — С. 320—328.

Статья поступила 05.12.2012

В.М. Шестопалов, О.М. Макаренко

ЖИТТЯ — ПОХІДНА КОСМОСУ, ЗЕМЛІ ТА ОКЕАНУ

Життя на Землі виникло в припливно-відливній зоні на стику моря та суходолу при еволюції органічної речовини під впливом космічних іонізуючих випромінювань, у холодних, близьких до промерзання умовах. Холодне середовище, а також потужні місячні припливи та виположені ландшафти сприяли концентрації органіки в межах припливно-відливної зони (латералі) первинного океану. Джерелами органічної речовини могли бути вулканічні виверження і випадіння (акреція) міжпланетного пилу. Інтенсивність іонізуючих випромінювань, надходження органіки і ряд інших факторів мали максимуми, приблизно відповідні часу 3,8—4,1 млрд років тому, що відповідає також і біологічним даним про час зародження життя. Існувала особлива епоха максимальної ймовірності виникнення життя, коли чинники, які цьому сприяли, діяли з максимальною силою. Це відноситься як до Землі, так і, можливо, інших місць у Всесвіті.

Ключові слова: біогенез, зовнішні умови біогенезу, припливно-радіаційна гіпотеза походження життя

V.M. Shestopalov, A.N. Makarenko

LIFE — A DERIVATIVE OF THE COSMOS, EARTH AND OCEAN

Life on the Earth arose in the intertidal region at the junction of land and sea during evolution of organic substance under the influence of cosmic ionizing radiation, in cold conditions close to freezing. Cold environment, as well as strong lunar tides and gentle landscapes contributed to concentration of organics within the intertidal zone (the lateral) of the primary ocean. Volcanic eruptions and deposition (accretion) of interplanetary dust could serve as the sources of organic substance. The intensity maxima of ionizing radiation, organic revenues and other factors supposedly took place 3.8—4.1 billion years ago that also corresponds to the biological data on life birth. Apparently, there existed a special epoch with maximum probability of life appearance, when the facilitating factors affected with the utmost force. This refers both to the Earth and possibly other locations in the Universe.

Keywords: biogenesis, external conditions of biogenesis, tidally-radiational hypothesis of the origin of life