

ПЛАНЕТАРНЫЕ ДЕГАЗАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ И УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПРЕДБИОЛОГИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ НА ПЛАНЕТАХ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ: I. ЗЕМЛЯ

©2009 г. А. И. Малышев*, Л. К. Малышева**

*Институт геологии и геохимии УрО РАН
620075, г. Екатеринбург, пер. Почтовый, 7
E-mail: malyshev@igg.uran.ru

**Астрономическая обсерватория Уральского государственного университета
620083, г. Екатеринбург, просп. Ленина, 51

Поступила в редакцию 13.10.2006 г.

В данной работе возникновение предбиологических состояний увязывается с функционированием абиогенных зон естественного углеводородного синтеза (ЕУС) в развитии планетарных дегазационных процессов. В свою очередь, возникновение зон ЕУС фиксируется определенными *PT*-условиями. Однако на различных планетах эти условия реализуются различным образом, что демонстрируется в работе на примере небесных тел Солнечной системы. В субэвральных условиях Земли при эволюции *PT*-условий в перемещающихся к поверхности эндогенных флюидах, в соответствии с современным геотермическим градиентом, зоны располагаются в литосфере на глубинах 0.86 км (углекислотная) и 3.2 км (сероводородная). В глубоководных условиях океанического дна эти зоны могут непосредственно выходить на его поверхность, в частности, окаймляя по периферии высокотемпературные газо-гидротермальные выходы, т.н. “черные курильщики”. Зоны естественного углеводородного синтеза исключительно благоприятны для образования сложных углеводородов и протекания процессов их самоорганизации, а следовательно, и для возникновения первичной примитивной жизни на нашей планете. Источником питающей эту жизнь энергии является тепло глубинных флюидов. Вынос флюидными струями первично возникавших микроорганизмов из зон естественного углеводородного синтеза на дне океана или с малых глубин под поверхностью материков привел к адаптации их к питанию за счет энергии солнечного света. Дальнейшая эволюция жизни на Земле привела к существенному разветвлению и усложнению цепей питания, однако в основе их по-прежнему лежит энергия солнечного света.

Ключевые слова: Солнечная система, жизнь, возникновение, эволюция, предбиологические состояния.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о происхождении жизни и условиях ее зарождения является одной из ключевых проблем современного естествознания. По нашему мнению, дать на него ответ можно, исходя из понимания процессов образования предбиологических состояний в тех или иных планетарных условиях. Для этого, в свою очередь, ключевым фактором могут стать недавние разработки одного из авторов этой статьи о физико-химических условиях образования зон естественного углеводородного синтеза (ЕУС) [7, 9, 10]. Эти разработки дают определенные основания считать, что возникновение предбиологических состояний на планетах Солнечной системы является закономерным следствием планетарных дегазационных процессов. Так как представления о зонах ЕУС в настоящее время не являются общепринятыми, то в соответствующем разделе работы подробно рассмотрены условия их возникновения. Различия в физико-химических условиях протека-

ния дегазационных процессов на разных планетах могут иметь однозначное соответствие как в различных условиях возникновения предбиологических состояний, так и в возможной ориентировке вектора последующей эволюции самоорганизующихся биоподобных систем. Начнем рассмотрение возможных условий образования предбиологических состояний на нашей планете – Земле¹.

ЗЕМЛЯ

Как известно, существуют две группы взглядов на происхождение земных форм жизни. Первая из них соответствует представлениям о зарождении жизни непосредственно на Земле, благодаря абиогенному синтезу сложных углеводородных соединений. Вто-

¹ При написании работы там, где это особо не оговаривается, использованы справочные материалы: по физико-химическим константам веществ – [20], по характеристикам небесных тел Солнечной системы – [4, 20, 29].

рую группу взглядов представляют варианты концепции панспермии. Суть этой концепции заключается в том, что жизнь как таковая рассматривается в качестве одного из фундаментальных свойств материи, и вопрос о “происхождении жизни” в рамках этой концепции выглядит неактуальным. Однако в действительности этот вопрос из области фундаментальных наук лишь переводится в философскую плоскость. И уже в этой плоскости каждый из сторонников концепции панспермии должен сделать выбор между представлением о принципиальной возможности возникновения жизни в ходе общей эволюции материи (диалектика) и метафизическими представлениями о неизменном и изначальном присутствии неких жизненных спор во Вселенной. На наш взгляд, повсеместное протекание эволюционных процессов в живой и неживой природе делает более обоснованным выбор в пользу диалектической точки зрения, а следовательно, сделавшие этот выбор сторонники концепции панспермии вынуждены вновь вернуться к вопросу о “происхождении жизни”, даже в том случае, если, по их мнению, эта жизнь или ее зародыши были привнесены извне. По нашему мнению, процесс зарождения “жизни” является закономерным следствием эволюции неживой материи, и этот процесс настолько универсален, что представления панспермии оказываются избыточными. Поэтому ниже мы рассмотрим существующие взгляды на происхождение земной жизни *in situ*, абстрагируясь от возможности инфицирования Древней Земли зародышами внеземной жизни.

История вопроса о происхождении жизни на Земле

Начало современным научным представлениям о происхождении жизни было положено в 20-е годы прошлого века работами А.И. Опарина и Дж. Холдейна [18]. По их сценарию, к возникновению жизни на Земле привела следующая последовательность процессов: абиогенный синтез органических соединений, их накопление в океане вплоть до образования насыщенного “питательного бульона” – формирование фазово-обособленных органических микросистем (коацерватов) – появление пробионтов, т.е. первичных протоорганизмов – образование прокариот, простейших из известных живых организмов. Этот самый сценарий лежит в основе многих современных вариантов океанической концепции происхождения жизни (например, [24]).

Долгое время изложенные взгляды казались очень гипотетичными вследствие широко распространенного мнения об исключительно биогенном происхождении органических соединений. Ситуация резко изменилась в 1953 г., когда С. Миллер [32] воспроизвел в колбе газовый состав первичной атмосферы Земли (смесь H_2 , H_2O , CH_4 , NH_3) и при помощи электрических разрядов, имитирующих

грозы, синтезировал в ней ряд органических соединений, в том числе аминокислоты.

В последующие два десятилетия С. Фоксом, Р. Янгом и многими другими исследователями [19, 22, 23, 26, 31, 42] была проведена серия фундаментальных экспериментов по абиогенному синтезу органических соединений. Согласно этим экспериментам, в широком диапазоне температур из неорганических и простых органических соединений легко синтезируются аминокислоты, из них – белковые макромолекулы (безматричный синтез полипептидов), которые в свою очередь в результате процесса самосборки образуют фазово-обособленные протеиноидные микросферы, по размерам сопоставимые с простейшими бактериями. Позднее Л.М. Мухин с соавторами [16] установил наличие аминокислоты глицин в гидротермальных водах на Камчатке, а Е.К. Мархинин [13–15] разработал концепцию вулканического происхождения предбиологических соединений и высказал предположение о вероятном возникновении жизни в горячих озерах вблизи вулканов. В 1981 г. Дж. Корлисс, Дж. Бэрсс и С. Гоффман [28] опубликовали работу, в которой была изложена модель возникновения жизни в районе выходов гидротермальных источников на дне океанов.

С этими данными смыкались и результаты исследований из области микробиологии. Т.Д. Брок [27], изучая наземные горячие источники, впервые обнаружил термофильные формы бактерий, живущие при температуре выше $80^{\circ}C$. Позднее [37, 43] была выделена группа архайчных бактерий, или архебактерий (*Archaeobacteria*), многие формы которых обитают в горячих источниках при температуре около точки кипения воды. К. Везе [39], обобщая данные по эволюции микроорганизмов, расположил данную группу в основании бактериального филогенетического дерева. В результате все прокариоты (бактерии, не имеющие обособленного ядра) разделились на две группы – архебактерий (*Archaea*) и эубактерий (*Bacteria*). В ходе дальнейших исследований выяснилось, что архебактерии и эубактерии являются параллельными ветвями, развившимися из общей гипотетической предковой формы – Прогенота [41]. Реконструкция главных характеристик Прогенота, выполненная К. Везе [38–40] на основе анализа тенденций изменчивости форм в нижней части эволюционного дерева бактериального мира, привела к выводу о гипертермофильности Прогенота, т.е. о его существовании при температуре кипения воды. С этим выводом полностью согласуется вариант филогенетического дерева бактериального мира, обоснованный К. Штеттером [36].

Обобщая все вышеперечисленные данные В.Н. Компаниченко [3] выступил с гипотезой возникновения жизни в глубинах гидротермальных систем. В соответствии с его концепцией, процесс зарождения простейших живых организмов протекал поэтапно: абиогенный синтез органических

соединений; самосборка макромолекул в микросферы; скачкообразная трансформация микросфер в пробионты – эмбриональные формы протожизни; развитие из пробионтных протоэкосистем простейших экосистем гипертермофильных бактерий. При этом сильно неравновесные, флуктуирующие условия недр гидротермальных систем, по его мнению, являются ключевым фактором для развития спонтанной самоорганизации, обуславливающей сам акт перехода от неживой к живой материи.

Не так давно М. Расселл и У. Мартин и [35] предприняли попытку конкретизировать процесс зарождения жизни в гидротермальных системах. По их мнению, этот процесс протекал в крошечных углублениях в пиритовых породах, игравших роль неорганических инкубаторов естественных клеток. Это, в свою очередь, предопределило дальнейшее развитие клеточных структур первичных микроорганизмов.

В 2003 г. в коллективной монографии “Эволюция на планете Земля” [30] была предпринята попытка детализировать, а если потребуется, то и пересмотреть существующие представления о влиянии физических условий на возникновение и развитие земной жизни. Физические условия зарождения жизни в реконструкции авторов Е. Нисбета и Н. Слипа [33] выглядят следующим образом. Солнечная система имеет возраст почти 4.6 млрд. лет. Наиболее древние строго установленные свидетельства жизни обнаружены в породах с возрастом около 3.5 млрд. лет, т.е. сформированных спустя 1 млрд. лет после аккреции Земли. К этому времени, по мнению авторов монографии, комплекс кислородного фотосинтеза уже развился. Кроме этого, они указывают на возможное свидетельство фотосинтетической жизни в породах из Isua, Гренландия (3.8 млрд. лет), и предполагают возможное существование жизни на Земле уже 4 млрд. лет назад. До этого, по их мнению, сильная метеоритная бомбардировка кипятила океаны, делая маловероятной существование любой жизни около 4.2–4.0 млрд. лет назад, с возможным исключением лишь для гипертермофильных организмов, живущих глубоко в гидротермальных системах. А еще раньше, приблизительно около 4.5 млрд. лет назад, главный метеоритный удар, возможно, расплавил всю Землю. Поэтому для сохранения наиболее ранней жизни, по мнению Нисбета и Слипа, пригодны Венера, на которой, как они считают, в это время присутствовали океаны, и Марс, подвергшийся меньшему количеству метеоритных ударов. Именно эти планеты непосредственно после главного метеоритного удара стали источниками первичной жизни, а затем вместе с Землей активно участвовали в метеоритном обмене этими первичными формами.

Исследователи считают, что к концу метеоритной бомбардировки (4 млрд. лет назад) Земля имела глубокие океаны. Последний общий предок всех клеток может датироваться приблизительно этим

временем. Он, возможно, был гипертермофилом, живущим при температурах выше 75°C. Однако, неясен первый общий предок, который жил при высокой температуре воды. Частые большие метеоритные удары, возможно, вызывали краткие, но катастрофические повышения температуры морской воды, и исследователи допускают возможность, что только гипертермофильный последний общий предок выжил.

По завершению аккреции океаны стабилизировались на поверхности планеты. При этом распределение воды между недрами Земли и ее океанами было обусловлено тепловым балансом мантии, определившим равновесие между потерей и получением воды недрами. Фотосинтез, по мнению исследователей, развился постепенно, возможно как адаптация терморегуляции вокруг гидротермальных выходов. 3.5 млрд. лет назад, по изотопным соотношениям углерода, устанавливается начало современного фотосинтетического углеродистого цикла. В это время жизнь распространилась на среднетермофильную среду обитания, а поверхностная температура планеты была, скорее всего, очень близка сегодняшней ($\pm 0-30^\circ\text{C}$).

Не вдаваясь в дискуссию об обоснованности и вероятности реализации существующих вариантов концепции возникновения жизни на Земле, считаем необходимым подчеркнуть следующее. Во всех рассмотренных выше вариантах как необходимая предпосылка возникновения жизни требуется существование зон повышенной концентрации примитивных углеводородных соединений (типа “питательного бульона” в теории А.И. Опарина). В частности, члены авторского коллектива вышеупомянутой монографии Дж. Равен и К. Скин [34] предполагают возникновение этих зон в результате накопления в древних океанах Земли примитивных органических соединений, образующихся при взаимодействии космических факторов (метеориты, кометы, солнечное излучение) с атмосферой и океаном. Это же взаимодействие давало наиболее существенный вклад в обеспечение энергии ранней жизни в океане. Наличие подобных, обогащенных примитивными органическими соединениями, зон в современных гидротермальных системах предполагается на основании косвенных признаков. Так В.Н. Компаниченко [3] в построении своей концепции использует факты обнаружения разнообразных органических соединений (от метана до аминокислот) в водах современных горячих источников и в газовой-жидких включениях минералов гидротермального происхождения.

Зоны ЕУС как следствие планетарных дегазационных процессов

К выводу о существовании абиогенных зон ЕУС, независимо от проблематики зарождения жизни,

пришел один из авторов этой статьи. В работах [7, 9, 10] было показано, что зоны ЕУС в земных условиях возникают как результат физико-химической эволюции газовой фазы эндогенных флюидов при температурном равновесии с вмещающими породами и, в частности, обуславливают образование крупных скоплений углеводородного сырья. Однако в указанных выше работах аргументация существования зон ЕУС выполнена довольно поверхностно. Для устранения этого недостатка мы вынуждены сделать небольшое отступление, начав с того, что в настоящее время в геологических науках существует неявно выраженная фундаментальная проблема, связанная с недооценкой роли газового массопереноса в эндогенных процессах. Эта проблема, по нашему мнению, является серьезным препятствием на пути дальнейшего развития геологических наук и, в частности, как это будет показано ниже, для понимания условий возникновения предбиологических состояний.

Существование указанной проблемы непосредственно следует из вулканологических наблюдений. Все исследователи, занимавшиеся изучением процесса вулканических извержений со времен Дж. Поулетт-Скропа (20-е годы XIX в.), в конечном счете неизбежно приходили к выводу о ключевой роли газовой активности в эруптивном процессе. Пожалуй, лучше всех это вывод сформулировал Ф.А. Перре, наблюдая динамику извержений вулкана Мон-Пеле: “Газ – это активный агент, и магма является его переносчиком”. Аналогичный вывод был сделан и одним из авторов этой работы на основании изучения процесса извержений вулк. Безьянный [6]. Тем не менее, эти наблюдения и выводы многих поколений вулканологов остаются невостребованными в магматической геологии, так как проявление газовой активности в вулканическом процессе рассматривается лишь как частный случай, возникающий в приповерхностных условиях в результате кристаллизации магматических расплавов. В более глубоких условиях, как правило, исключается сама возможность существования вещества в газообразном состоянии.

Одна из причин, дающих определенные основания для игнорирования выводов наблюдательной вулканологии – не вполне корректное использование физических данных о сути критических явлений в переходах “газ – жидкость”, а именно перенос экспериментальных данных, полученных при изучении закрытых систем в лабораторных условиях, на открытые природные системы. По мере все более широкого использования в эндогенной геологии термодинамических методов при рассмотрении этих переходов стал доминировать формализованный макроподход Гиббса, согласно которому в надкритических условиях состояние вещества оказывается неопределенным, так как все различия между газом и жидкостью исчезают в критиче-

ской точке. Одновременно произошла утрата понимания молекулярной сути критических явлений в соответствии с интерпретацией Эндрюса–Вандер-Ваальса, согласно которой критическая температура – одна из физико-химических констант вещества, соответствующая такому уровню теплового движения молекул, при превышении которого происходит полный разрыв межмолекулярных связей. Поэтому существует ключевое различие между конденсированными и газообразными состояниями вещества. Это отличие определяет стремление газов равномерно распространиться по всему доступному пространству, тогда как конденсат, напротив, стремится сформировать молекулярные агрегаты с минимальной (в идеале – сферической) поверхностью. Это различие становится ключевым в эндогенных процессах, где газообразные соединения сохраняют высокую подвижность даже в случае сплошных сред за счет перемещения путем молекулярной диффузии. Поэтому любая природная система для газообразных соединений становится открытой.

Здесь и далее под газообразными соединениями в условиях сплошных сред понимаются такие молекулярные образования, которые не создают устойчивых молекулярных связей ни между собой, ни с вмещающими молекулярными структурами. Отсутствие этих связей создает благоприятные условия для диффузионного перемещения таких соединений в сплошных средах, включая кристаллические структуры. Само диффузионное перемещение осуществляется путем миграции комплексных (по М.А. Кривогаззу [5]) дефектов, в которых n примесных атомов расположено на $(n + 1)$ или $(n - 1)$ узлах решетки.

Газовый массоперенос является ключевым фактором постаккреционной планетарной эволюции. В него включаются как изначально захваченные в ходе аккреции, так и вновь образующиеся в земных глубинах за счет ядерных и химических реакций газообразные соединения. Замещение легких молекул газообразных соединений на более тяжелые молекулярные агрегаты и вытеснение газов в вышележащие горизонты – энергетически выгодный и поэтому самодостаточный процесс. Выделяющаяся при этом энергия пропорциональна разности в весе между молекулами газа и замещающими их молекулами вмещающей среды и расходуется на увеличение тепловых колебаний (повышение температуры) в диффузионной зоне. В свою очередь увеличение тепловых колебаний еще более облегчает процесс газовой диффузии, создавая условия для еще большего выделения энергии. В итоге, в ходе такого нарастающего гравитационного перераспределения вещества, прежде всего за счет диффузионной миграции в вышележащие породы легких и подвижных газовых компонентов, выделяющейся энергии становится достаточно для начала парциального

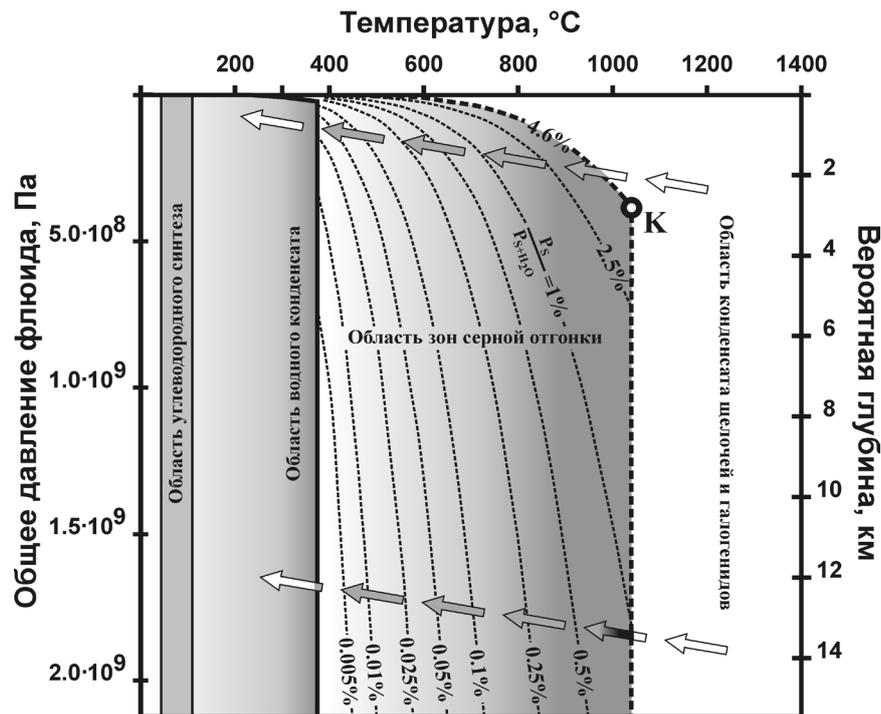


Рис. 1. Важнейшие геохимические области в эволюции высокотемпературных эндогенных флюидов. Вероятная глубина соответствует 5-кратному литостатическому эквиваленту давления. При построении этой и последующих диаграмм использованы данные о давлении паров насыщения и критических параметрах веществ из [21, табл.11.1–11.6, 13.4–13.6].

плавления пород, тем более, что присутствие летучих существенно понижает температуры их плавления. Появление расплавной фазы еще более облегчает миграцию газообразных компонентов, и образующаяся магма становится путем преимущественного перемещения газообразных соединений. При этом перемещение газов осуществляется как путем молекулярной диффузии, характерным для наиболее высокобарических условий, так и в виде обособившихся и находящихся под высоким давлением газовых пузырьков, что больше соответствует малоглубинным (вулканическим) условиям. В свою очередь насыщенные летучими расплавы сами становятся динамически активными и способными к внедрению в окружающие породы в направлении наименьшего сопротивления. Так, по нашему мнению, рождаются магмы [11], динамическая активность которых является ведущим фактором тектонической активности нашей планеты. Таким образом, газовый массоперенос обеспечивает значительный вклад в энергетический баланс планеты за счет, как самих дегазационных процессов, так и запускаемых при их помощи более масштабных явлений гравитационного перемещения вещества планеты (мантийных плюмов, диапиров и т.п.). Современная эндогенная активность Земли выражается в том числе и в наличии теплового потока из недр, благодаря которому земная поверхность в среднем излучает $(6.3-7.5) \cdot 10^{-2}$ Вт/м².

При перемещении к поверхности Земли высокотемпературные эндогенные летучие претерпевают закономерную физико-химическую эволюцию [10]. Направленность этой эволюции контролируется физическими переходами между газообразным и конденсированными состояниями, как для веществ, входивших в исходный состав эндогенной газовой смеси, так и для продуктов их реакций и между собой и с вмещающими породами. Во-первых, переходы “газ–конденсат” выполняют функцию физического сепаратора эндогенных летучих на газообразную составляющую, сохраняющую способность к перемещению даже в случае сплошных сред, и на остаточный конденсат, полностью теряющий способность к перемещению в сплошных средах или перемещающийся сравнительно медленно в пористых и трещиноватых средах. Во-вторых, переходы “газ–конденсат” выполняют функцию химического сепаратора эндогенных летучих, так как контролируют направленность химических реакций, сопровождающихся этими переходами. Это происходит как благодаря отмеченной выше избирательной открытости природных систем для веществ в разном агрегатном состоянии, так и вследствие скачкообразного изменения концентрации реагирующих веществ при переходах “газ–конденсат”.

Скачкообразное или постепенное выведение из состава высокотемпературной газовой смеси конденсирующихся веществ обуславливает суще-

ствование трех геохимических областей, имеющих большое теоретическое и практическое значение [9, 10] (рис. 1):

1. Область зон серной отгонки, в которой происходит сброс конденсата серы. Эта область имеет большое значение для образования многих рудных месторождений, а в той части, где область примыкает к барьеру водной нейтрализации, происходит формирование эндогенных месторождений собственно самородной серы.

2. Область зон водной отгонки, приводящая к появлению на пути эндогенных флюидов барьера нейтрализации и последующего зарождения волны повышенной кислотности. Эта зона имеет ключевое значение для формирования гидротермальных, золоторудных и кварцевых месторождений.

3. Область зон сероводородной и углекислотной отгонки (зон ЕУС), играющая ведущую роль в формировании месторождений углеводородного сырья.

Следует отметить, что выведение из состава высокотемпературной газовой смеси конденсирующихся веществ может сопровождаться довольно значительным эффектом изотопной сепарации [8, 9]. Это делает некоторые общепринятые генетические выводы, сделанные на основе изотопных смещений, не вполне однозначными.

С точки зрения создания условий для возникновения жизни, интерес представляет последняя из перечисленных областей, так как именно в зонах ЕУС создается наиболее благоприятная среда для возможного возникновения жизни, тот питательный бульон, наличие которого предполагается всеми вариантами концепции зарождения жизни на Земле. В то же время, гравитационная дифференциация вещества в диффузионной зоне обеспечивает процессы самоорганизации автономным источником энергии. Для данной работы представляет интерес и тот факт, что положение зон ЕУС имеет жесткую физико-химическую привязку по *PT*-условиям, а, следовательно, имеется возможность смоделировать различные варианты образования подобных зон не только для Земли, но и для условий иных планет.

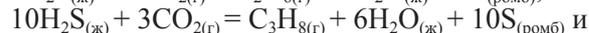
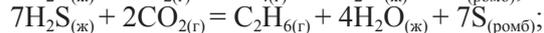
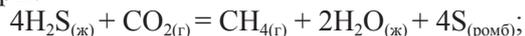
Зоны ЕУС в современных субаэральных условиях

Будем считать, что эндогенные летучие, перемещающиеся к поверхности Земли в ходе дегазационных процессов, находятся в тепловом равновесии с вмещающими породами, т.е. перемещение летучих происходит по линии геотермического градиента (трасса А на диаграмме рис. 2). Ради определенности будем считать, что температура пород непосредственно вблизи поверхности составляет 5°C, а геотермический градиент составляет 0.03 град./м. Для перехода от общего флюидного давления к вероят-

ной глубине при построении диаграммы (рис. 2) воспользуемся данными [17] о 5-кратном (в среднем) превышении флюидного давления над его литостатическим эквивалентом. Это представляется вполне корректным, поскольку для перемещения флюидного потока требуется повышенный градиент давления, наиболее высокий в случае перемещения флюида путем молекулярной диффузии.

Образование зон ЕУС связано с выпадением в конденсат из состава газовой смеси сначала сероводорода, а затем диоксида углерода. Область зон образования сероводородного конденсата связана с критической температурой сероводорода – 100.4°C. В соответствии со сделанными выше предположениями, движущийся по линии геотермического градиента флюид (трасса А на диаграмме рис. 2) входит в зону конденсации сероводорода на вероятной глубине 3.2 км (точка С). В точке входа остаточное парциальное давление паров воды составляет всего 0.024% от общего флюидного давления, паров диоксида серы – 0.63%. Поэтому в составе газовой фазы флюида доминирует диоксид углерода, водород и сероводород. Однако на входе в область сероводородной отгонки его содержание в газовой фазе скачкообразно уменьшается до уровня остаточного парциального давления, составляющего 2.06% от общего флюидного давления, тогда как весь избыток сбрасывается в конденсат с образованием на пути газового потока области зон сероводородной отгонки.

В этой области при фильтрации газообразного диоксида углерода сквозь сероводородный конденсат происходит образование углеводородного сырья с одновременным выделением воды и самородной серы:



и так далее.

Направленность этих химических реакций определяется принципом Ле Шателье–Брауна: в условиях повышенного давления флюидной смеси равновесие этих реакций смещается в сторону уменьшения объема газообразных соединений. Этот же эффект дает выпадение в осадок образующейся самородной серы.

Образующиеся в зоне сероводородного конденсата сравнительно тяжелые простейшие углеводороды, начиная с бутана и бутилена, формируют углеводородный конденсат. Так как критические давления этих соединений относительно невелики, то их остаточные парциальные давления имеют очень низкий уровень. Повышенные температура и общее флюидное давление способствуют дальнейшим реакциям полимеризации углеводородов с образованием более тяжелых соединений. Более легкие углеводороды, такие как метан, этан, этилен, пропан и пропилен, имея более низкие критические

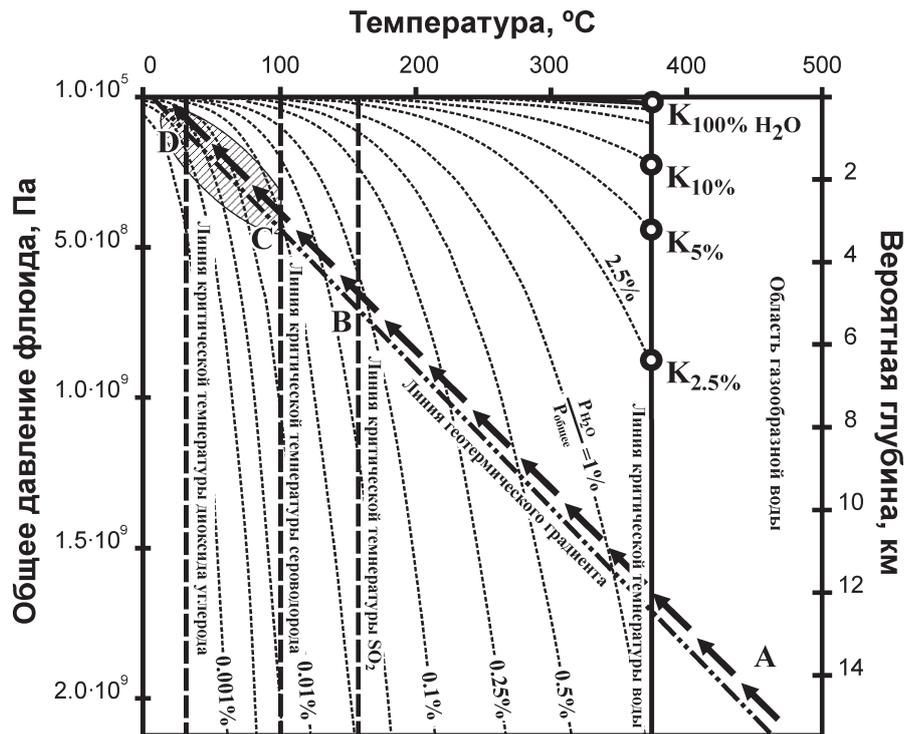


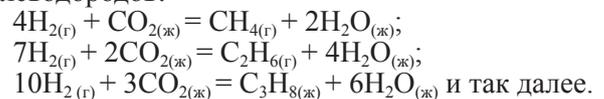
Рис. 2. Положение зоны ЕУС (показаны штриховкой) в земных субаэральных условиях. Пояснения – см. текст.

температуры, полностью остаются в газообразном состоянии. Фильтруясь через конденсат более тяжелых углеводородов, они частично поглощаются в ходе реакций полимеризации. Оставшаяся часть продолжает эволюцию в составе газовой фазы флюида.

Однако два последних из вышеперечисленных легких углеводородных соединений – пропан и пропилен – недалеко уходят по трассе эволюции флюида от места их первичного образования в зоне сероводородной отгонки. Пропан достигает своей критической температуры 96.67°C почти сразу после зоны сероводородной отгонки – на вероятной глубине 3.06 км. При этом из-за его низкого критического давления в конденсат сбрасывается все количество пропана, превышающее равновесный уровень парциального давления 0.36% от общего флюидного давления в данной точке. Чуть дальше по трассе флюида, на вероятной глубине 2.9 км, расположена зона отгонки пропилена, имеющего чуть более низкую критическую температуру. В этой зоне в конденсат сбрасывается весь избыточный пропилен, превышающий уровень парциального давления пропиленовых паров в 1.16%. В этих зонах отгонки, как и в зоне сброса сероводорода, протекают реакции полимеризации углеводородов, в которые частично вовлекаются в фильтрующиеся сквозь конденсат легкие углеводородные соединения.

Еще одна зона ЕУС связана с конденсацией диоксида углерода. В соответствии со сделанными при построении диаграммы (рис. 2) предположени-

ями, критическая температура диоксида углерода (30.85°C) достигается на вероятной глубине около 860 м (точка D на диаграмме рис. 2). При входе в эту зону остаточные газы эндогенного флюида состоят в основном из CO₂, H₂ и в меньшей степени из легких летучих углеводородов. Уровень давления остаточных паров воды в точке входа составляет лишь около 0.004% от общего флюидного давления, давление остаточных паров SO₂ – 0.4%, H₂S – 1.9%. На входе в зону давление паров CO₂ скачкообразно уменьшается до предельно возможного критического уровня, соответствующего в данной точке 6.2% от общего флюидного давления. Весь избыток диоксида углерода сбрасывается в конденсат, сквозь который происходит фильтрация водорода, сопровождающаяся образованием воды и углеводородов:



Как и в случае сероводородной зоны ЕУС, равновесие этих реакций в условиях повышенного давления флюидной смеси смещается в сторону уменьшения объема газообразных соединений, т.е. в сторону образования углеводородов.

Образование углеводородов происходит и при фильтрации сквозь конденсат диоксида углерода остаточного газообразного сероводорода. Но поскольку его содержание в остаточных газах не превышает 2%, то общее количество образующейся при этом серы сравнительно невелико. Легкие

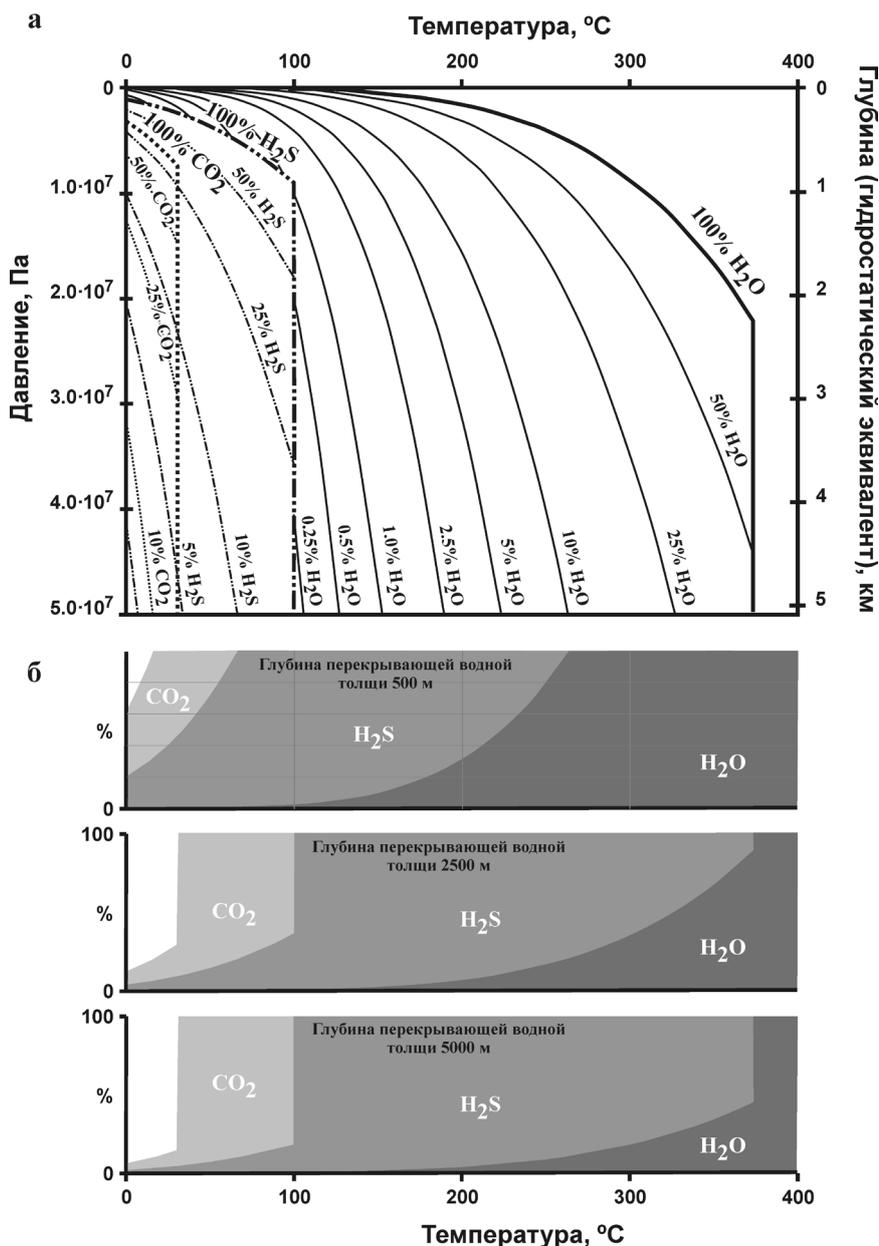


Рис. 3. Соотношение РТ-условий конденсации воды, сероводорода и диоксида углерода с гидростатическим давлением (а) и температурные зависимости предельного парциального давления пара этих веществ на глубинах 500, 2500 и 5000 м (б). Для простоты изолинии насыщения воды в областях конденсации сероводорода и диоксида серы не показаны.

углеводороды, фильтруясь сквозь углеводородный конденсат, частично поглощаются за счет реакций образования более сложных углеводородных соединений.

В том случае, когда температура флюидного потока превышает температуру вмещающих пород (что вполне обычно для газо-гидротермальной деятельности), возможно образование зон абиогенного синтеза по периферии флюидного потока по мере снижения его температуры до соответствующих значений 100.4°C и 30.85°C. В субэдральных условиях эти зоны на поверхность, как правило, не выходят, исходя из критических давлений серово-

дорода и диоксида углерода (9.010 и 7.378 МПа соответственно) при условии 5-кратного превышения флюидным давлением его литостатического давления сброс этих соединений в конденсат на соответствующих изотермических поверхностях может происходить лишь на глубинах более 65 и 53 м соответственно.

Зоны ЕУС в субмаринных условиях

По иному складывается ситуация в субмаринных условиях (рис. 3). Здесь перекрывающая водная толща, во-первых, обеспечивает дополнительное

гидростатическое давление, а во-вторых обеспечивает эффективное принудительное охлаждение как самого потока высокотемпературных эндогенных флюидов, так и придонных пород, разогреваемых гидротермами. Давление перекрывающей водной толщи обеспечивает теоретическую возможность конденсации сероводорода и диоксида углерода непосредственно в придонных породах, а резкое снижение температуры флюидного потока в придонных породах обуславливает практическую реализацию этой возможности. По сути, здесь мы имеем дело с геохимической температурной ловушкой, которая уже рассматривалась ранее применительно к процессу образования сульфидных руд подводных гидротерм [12]. Как и в случае рудообразования, эффективность действия этой ловушки возрастает с увеличением давления. Как можно видеть на графиках рис. 3б, с увеличением мощности перекрывающей водной толщи конденсация H_2O , H_2S и CO_2 в придонных породах протекает все более контрастно с увеличением доли конденсации на изотермах критических температур этих веществ. Необходимо отметить, что конденсация сероводорода и диоксида серы возможна и в самой водной толще, однако в этом случае образование зон ЕУС маловероятно из-за реакций взаимодействия образующегося конденсата с водой. Таким образом, благодаря действию температурной геохимической ловушки зоны ЕУС наиболее эффективны в придонных породах глубоководных гидротерм океана, где они контролируются изотермальными поверхностями соответствующих критических температур.

Вещественные проявления этих процессов можно наблюдать в современных выходах высокотемпературных гидротерм на поверхность дна океана. В качестве примера можно привести гидротермальные образования Южного трога впадины Гуаймас (Калифорнийский залив Тихого океана) [2]. Дно трога расположено на глубине 2000–2300 м. Сам трог и его склоны заполнены рыхлыми осадками. По данным глубоководного бурения, разрез рыхлых отложений трога осложнен базальтовыми внедрениями. Одним из представителей гидротермальных проявлений в пределах трога является холм Северного гидротермального поля. На поверхности этого холма, имеющего высоту до 10 м при 500 м в диаметре, расположены многочисленные гидротермальные постройки. Холм окружен 200-метровой полосой осадков, отличающихся от “фоновых” своей ноздреватой текстурой. Как предполагают исследователи, необычная текстура этих осадков сформирована диффундирующими к поверхности дна газами. К периферии гидротермального поля приурочены низкотемпературные гидротермальные постройки – небольшие холмы высотой не более 6–10 м и в диаметре максимально – 30 м. Температура выделяющихся термальных вод над этими постройками не превышала $10^\circ C$. Исследователи

отмечают, что слагающий эти постройки материал сильно пористый, причем поры заполнены жидкими углеводородами, а сами постройки обрамлены полуметровыми полосами черных осадков с высоким содержанием сероводорода. Основную часть поля занимают более высокотемпературные образования – конические постройки высотой от 1 до 50 м. Большинство из этих построек действующие. Многие из них являются “черными курильщиками”, т.е. на выходе термальных вод из этих построек формируется густая черная взвесь. Измеренные температуры вод непосредственно у выхода достигают $320^\circ C$. При изучении материала этих построек было обнаружено, что некоторые из образцов были пористы и содержали в значительном количестве жидкие углеводороды, подобно веществу периферийных низкотемпературных гидротермальных построек. Генерация углеводородных соединений в зонах подводного вулканизма и гидротерм настолько обычна, а их объемы настолько значительны, что обнаружение этих соединений при опробовании придонных вод стало частью запатентованного метода [25] обнаружения подводных вулканов.

Зоны ЕУС как среда для зарождения первичной жизни

Как уже отмечалось выше, во всех концепциях зарождения жизни на Земле в качестве необходимой предпосылки возникновения жизни требуется существование зон повышенной концентрации примитивных углеводородных соединений (типа “питательного бульона” в теории А.И. Опарина). В свою очередь необходимая для зарождения жизни повышенная концентрация углеводородных соединений закономерно возникает в ходе планетарных дегазационных процессов в зонах ЕУС. Таким образом, положение о зонах ЕУС является объединяющим и упрощающим моментом, как для океанического, так и для гидротермального вариантов гипотез о формировании жизни на Земле. В частности, из температурного режима этих зон автоматически следует гипертермофильность первичных микроорганизмов, т.е. Прогенота.

Наличие единой среды миграции и распространения зарождающихся микроорганизмов – океана – способствовало закреплению возникшего Прогенота. В этом плане, на наш взгляд, концепции океанического зарождения жизни на нашей планете имеют определенное преимущество. Косвенным свидетельством в пользу большого значения океанских гидротермалей для зарождения жизни на Земле служит сам факт обилия и многообразия форм жизни в океанских гидротермальных биоценозах. Уже в первых работах, выполненных в конце 70-х годов прошлого века, было показано, что в пробах воды из зоны разгрузки гидротерм обнаруживается значительное количество микроорганизмов – общая

численность бактерий в воде на выходе гидротерм обычно на 1–2 порядка превышает численность бактерий в придонной воде вне зон гидротермального воздействия. Здесь также выявлено обилие и высокая степень эндемизма гидротермальной фауны, часто на уровне отрядов и выше, не говоря уже о таксонах более низких рангов [1].

Если углеводороды зон ЕУС служили строительным материалом и питательной средой зарождающейся жизни, то первичным источником энергии для Прогенота было тепло земных глубин. Последующий вынос протожизни флюидными струями из зон естественного углеводородного синтеза на дне океана или с малых глубин под поверхностью материков привел к ее отрыву от первоначального источника энергии. А это, в свою очередь, обусловило адаптацию первичной жизни к существованию за счет энергии солнечного света. Дальнейшая эволюция жизни на Земле привела к существенному разветвлению и усложнению цепей питания, однако в основе их по-прежнему лежит энергия солнечного света.

Если исходить из терминологии коллективной монографии “Эволюция на планете Земля” [30], то все вышесказанное относится к последнему общему предку всех клеток. Что касается их первого общего предка, жившего или возникшего, как считают исследователи, в более высокотемпературных условиях в период метеоритной бомбардировки, то возможность его существования нам представляется маловероятной. Действительно, в эпоху “кипящих океанов” формирование зон ЕУС в приповерхностных породах дна возможно лишь при температурах ниже 100°C, а формирование зон ЕУС в атмосфере исключается, так как масса планеты оказывается недостаточной для создания там условий конденсации H₂S и CO₂. Более подробно этот вопрос можно рассмотреть на примере современного состояния Венеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геологическое строение и гидротермальные образования хребта Хуан-де-Фука / А.П. Лисицын (ред.). М.: Наука, 1990. 200 с.
2. Гидротермальные образования рифтовых зон океана / А.П. Лисицын, Ю.А. Богданов, Е.Г. Гурвич. М.: Наука, 1990. 256 с.
3. *Компаниченко В.Н.* Возникновение жизни в глубинах гидротермальных систем. Хабаровск. 1996. 105 с.
4. *Кононович Э.В., Мороз В.И.* Общий курс астрономии. М.: Едиториал УРСС, 2001. 544 с.
5. *Кривоглаз М.А.* Дефекты в твердых растворах, стабилизирующиеся при понижении температуры // ФТТ. 1970. Т. 12. Вып. 8. С. 2445–2451.
6. *Малышев А.И.* Жизнь вулкана. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 262 с.
7. *Малышев А.И.* Значение фазовых переходов “газ–жидкость” в эндогенном образовании углеводородного сырья // Докл. АН. 2004. Т. 399. № 3. С. 384–387.
8. *Малышев А.И.* Изотопная сепарация серы в зонах высокотемпературной отгонки // Докл. АН. 2004. Т. 394. № 5. С. 669–672.
9. *Малышев А.И.* Сера в магматическом рудообразовании. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2004. 189 с.
10. *Малышев А.И.* Значение фазовых переходов “газ–жидкость” в эволюции высокотемпературных эндогенных флюидов // Геохимия. 2005. № 6. С. 673–680.
11. *Малышев А.И.* Динамическая модель магматического процесса // Геология Урала и сопредельных территорий. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. С. 16–39.
12. *Малышев А.И.* Особенности колчеданного рудообразования в субмаринных условиях разной глубинности // Докл. АН. 2007. Т. 414. № 6. С. 805–809.
13. *Мархинин Е.К.* Вулканы и жизнь. М.: Мысль, 1980. 196 с.
14. *Мархинин Е.К.* Вулканизм и биосфера // Вулканол. и сейсмол. 1985. № 4. С. 16–25.
15. *Мархинин Е.К.* Происхождение биосферы (экосферы) Земли. Туапсе, 2007. 84 с.
16. *Мухин Л.М., Бондарев В.Б., Калинин В.И. и др.* Синтез органических соединений в условиях моделирующих вулканическую деятельность // Докл. АН СССР. 1976. Т. 226. № 5. С. 1225–1228.
17. *Наумов В.Б., Коваленко В.И., Дорофеева В.А.* Магматические летучие и их участие в формировании рудообразующих флюидов // Геология рудных месторождений. 1997. Т. 39. № 6. С. 520–529.
18. *Опарин А.И.* Эволюция представлений о происхождении жизни 1924–1974 гг. // Изв. АН СССР. Сер. биол. 1975. № 1. С. 5–10.
19. *Руттен М.* Происхождение жизни (естественным путем). М.: Мир, 1973. 415 с.
20. Физическая энциклопедия / Гл. ред. А.М. Прохоров. М.: Изд-во “Большая Российская энциклопедия”. Т. 1. 1988. 704 с. Т. 2. 1990. 703 с. Т. 3. 1992. 672 с. Т. 4. 1994. 704 с. Т. 5. 1998. 760 с.
21. Физические величины. Справочник. / Ред. И.С. Григорьев, Е.З. Мейлихов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
22. *Фокс С.* Модельные эксперименты по спонтанному формированию морфологических единиц из протеноида // Происхождение предбиологических систем. М.: Мир, 1966. С. 362–373.
23. *Фокс С., Дозе К.* Молекулярная эволюция и возникновение жизни. М.: Мир, 1975. 374 с.
24. *Фолсом К.* Происхождение жизни. М.: Мир, 1982. 158 с.
25. *Черткова Л.В., Авдейко Г.П., Гусева В.И.* Способ выявления подводных вулканов и гидротерм. Авт. свид. № 1242887, 1986.
26. *Янг Р.* Морфология и химия протеноидных микросфер // Происхождение предбиологических систем. М.: Мир, 1966. С. 351–359.
27. *Brock T.O.* Microbial growth under extreme conditions // Microbial growth Symposia of the Society for General Microbiology. V. XXIX / P. Meddow. S.J. Pirt (Eds). 1969. P. 15.
28. *Corliss J.B., Barross J.A., Hoffman S.E.* An hypothesis concerning the relationship between submarine hot springs and the origin of life on the Earth // Oceanol. Acta. 1981. № SP. V. 4. P. 59–69.
29. Encyclopedia of astronomy and astrophysics. UK, Hampshire: Nature Publishing Group, 2001. 5306 p.

30. Evolution on Planet Earth: The impact of the physical environment / Ed. L.J. Rothschild and A.M. Lister. Elsevier, Amsterdam, 2003. 438 p.
31. Fox S.W. A theory of macromolecular and cellular origins // Nature. 1965. V. 205. P. 328–340.
32. Miller S.L. A production of amino acids under possible primitive Earth conditions // Science. 1953. V. 117. P. 228–229.
33. Nisbet E.G. and Sleep N.H. The physical setting for early life // Evolution on Planet Earth: The impact of the physical environment / Ed. L.J. Rothschild and A.M. Lister. Elsevier, Amsterdam, 2003. P. 3–24.
34. Raven J, Skene K. Chemistry of the early oceans: the environment of early life // Evolution on Planet Earth: The impact of the physical environment / Ed. L.J. Rothschild and A.M. Lister. Elsevier, Amsterdam, 2003. P. 55–64.
35. Russell M.J., Martin W. The rocky roots of the acetyl-CoA pathway // Trends Biochem. Sci. 2004. V. 29, № 7. P. 358–363.
36. Stetter K.O. Microbial life in hyperthermal environment // ASM News. 1995. V. 61. № 6. P. 285–290.
37. Stetter K., Konig H., Stackerbrandt E. Pyrodictium gen. nov. a new genus of submarine disc-shaped sulfur reducing archaeobacteria growing optimally at 105°C // System. appl. Microbiol. 1983. № 4. P. 535–551.
38. Woese C.R. The primary lines of descent and the universal ancestor // Evolution from molecules to men / D.S. Bendal (ed.) Cambridge University Press, Cambridge, 1983. P. 209–233.
39. Woese C.R. Microbial evolution // Microbiol. Rev. 1987. V. 51. P. 221–270.
40. Woese C.R. The universal ancestor // Proc. National Acad. Sci. 1998. V. 95. № 12. P. 6854–6859.
41. Woese C.R., Kandler O., Wheelis M.L. Toward a natural system of organisms: Proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucaria // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1990. V. 87. P. 4576–4579.
42. Young R. Morphology and chemistry of proteinoid microspheres // The origins of prebiological systems and of their molecular matrices. Ac. Press. NY–London, 1965.
43. Zillig W., Stetter K.O., Schafer W. et al. Thermoproteales: a novel type of extremely thermoacidophilic archaeobacteria isolated solfataras // Zbl. Bact. Hyd. I. Abl. Orig. 1981. 2c. P. 205–227.

Рецензент Э.О. Амон

Planetary degassing processes and conditions of pre-biological states origin on Solar system planets: I. Earth

A. I. Malyshev*, L. K. Malysheva**

*Institute of Geology and Geochemistry, Urals branch of RAS

**Astronomical Observatory of Ural State University

The origin of pre-biological states is tied up in this work with abiogenous hydrocarbon synthesis zones (AHSZ) in the planetary degassing processes. The origination of AHSZ are stiffly fixed by certain *PT*-conditions. On the different planets these conditions are realized in different ways which may be showed on the examples of Solar system planets. Under sub-aerial conditions of the Earth AHSZ are located at the depths of 0.86 km (carbon dioxide) and 3.2 km (hydrosulphuric) according to modern geothermal gradient. Under deep-water conditions these zones can go out directly to the ocean bed in particular to the borders of the so-called “black smokers”. Natural hydrocarbon synthesis zones are favorable for complex hydrocarbons buildup and for the self-organization processes and, hence, for origin of the primary primitive life on our planet. The heat of deep fluids is the source of energy supplying this life. Carry over of the microorganisms primarily emerging in natural hydrocarbon synthesis zones to the surface of the Earth achieves with fluid streams. That process lead to adaptation of microorganisms to nutrition at the expense of the sun light energy. Further evolution of the Earth life has resulted in sufficient branching and complication of the supply circuits, though they are based on the sun light energy as before.

Key words: *Solar system, life, origin, evolution, pre-biological states.*