

ГЕОЛОГИЯ. ГЕОЭКОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 550.461:551.12

РОЛЬ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ В ЗАРОЖДЕНИИ ЖИЗНИ НА ЗЕМЛЕ

В.Н. Компаниченко

Институт комплексного анализа региональных проблем ДВО РАН,
ул. Шолом-Алейхема 4, г. Биробиджан, 679016,
e-mail: kompanv@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4208-1932>

В рамках концепции термодинамической инверсии было обосновано еще одно необходимое условие возникновения жизни – многоуровневые колебания физико-химических параметров (в дополнение к трем общепринятым: наличие органического вещества, водной среды и источника энергии). Принимая во внимание это условие, гидротермальные системы были предпочтительной средой для зарождения жизни на ранней Земле по сравнению с океаном, в котором колебания физико-химических параметров проявляются в минимальной степени. Гидротермальные среды характеризуются чрезвычайно широким диапазоном градиентов температуры, давления, pH и концентраций компонентов. Наличие многоуровневых флуктуаций было подтверждено с помощью термодинамических оценок и прямых измерений давления и температуры в ходе мониторинга в некоторых гидротермальных системах полуострова Камчатка (например, в Мутновском и Паужетском термальных полях). Математическая обработка базы данных мониторинга выявляет по меньшей мере три уровня колебаний давления: 1) нерегулярные макрофлуктуации (с большими амплитудами, достигающими нескольких бар); 2) регулярные микроколебания (с меньшими амплитудами, порядка нескольких десятых бара, и периодами около 20 минут); 3) внезапные изменения давления и колебания с периодами менее 5 минут, а также мелкомасштабная вариативность с оптимальными амплитудами до 0.1 бара. Высокая корреляция между давлением, температурой и концентрациями химических компонентов также обнаружена в гидротермальных системах на Камчатке и в Словении. Множество данных о динамике термодинамических и физико-химических параметров гидротермального флюида, полученных многими исследователями в разных регионах мира, могут быть применимы для изучения процесса зарождения первичных форм жизни на ранней Земле.

Ключевые слова: гидротермальная система, происхождение жизни, флюид, термодинамика, флуктуация, температура, давление, гидрохимия.

Образец цитирования: Компаниченко В.Н. Роль гидротермальной динамики в зарождении жизни на Земле // Региональные проблемы. 2023. Т. 26, № 4. С. 9–11. DOI: 10.31433/2618-9593-2023-26-4-9-11.

Введение

Гидротермальные системы на ранней Земле рассматриваются многими исследователями как вероятное место зарождения жизни [8, 11, 13, 15, 18, 26, 29, 31, 33]. Некоторые из них связывают среду зарождения жизни с подводными горячими источниками [11, 31], другие подчеркивают пригодность тепловых потоков на континентах [12, 26]. Тепловая энергия и резкие градиенты являются двумя важными факторами, которые могут

быть благоприятны для образования первичных клеток в таких средах. Высокая температура жидкости способствует синтезу органических молекул и самосборке их агрегатов, включая пребиотические микросистемы. Сильные перепады температуры (особенно между подводными жерлами и океанической водой) и концентрации соединений являются эффективным источником энергии. Итак, гидротермальная среда обладает всеми тремя необходимыми условиями для зарождения

жизни – наличием жидкой воды, органического вещества и источника энергии, которые признаны современной наукой. Однако океан также содержит растворенные и рассеянные органические вещества. Некоторые исследования позволяют нам предположить высокую температуру океана (около +70 °С) около 3,5 миллиардов лет назад [19].

Таким образом, перечисленных трех критериев недостаточно для надежного выбора наиболее вероятной среды для зарождения жизни: либо гидротермальные системы, либо океан (за пределами горячих выбросов на его дне).

В рамках концепции термодинамической инверсии (ТИ), или просто инверсионной концепции, было обосновано еще одно необходимое условие возникновения жизни [4, 22, 23]. Его можно сформулировать как многоуровневые колебания физико-химических параметров (температуры, давления, концентраций компонентов, рН, Eh и т.д.). Важность этого четвертого условия заключается в необходимости непрерывных внешних воздействий на пребиотическую органическую микросистему, которые инициируют ее неизбежное противодействие (в соответствии с принципом Ле Шателье). Следуя ТИ-концепции, в локальных условиях, далеких от равновесия внутри гидротермальной системы, противодействие может усилиться по сравнению с первоначальным внешним воздействием, которое приводит к трансформации пребиотической микросистемы в первичную форму жизни. Отсутствие существенных флуктуаций в среде (например в океане) не дает возможности для такой трансформации.

Необходимость многоуровневых флуктуаций параметров для зарождения жизни в конечном итоге вытекает из второго закона термодинамики. Согласно последнему, в неживых системах (включая открытые системы) энтропия со временем увеличивается. В ходе эволюции биосферы, наоборот, увеличивается концентрация свободной энергии и информации за счет относительного снижения энтропии. Оба этих тренда известны. Из этого вытекает, что процессы в неживых химических системах и биологических системах протекают в рамках термодинамически противоположных способов организации: в первых на общем фоне дефицита свободной энергии (и информации), во втором – на фоне их избытка. В этой связи в ходе автокаталитических циклических реакций в химических (органических) системах неизбежно возникают побочные продукты, накопление которых приводит к остановке процесса. Появ-

ление таких продуктов рассмотрено во многих работах (например, [10]). В биохимических реакциях жизнеспособного организма такие побочные продукты различными способами утилизируются, и организм продолжает свое существование. В итоге переход от химических к биологическим системам во время возникновения жизни неизбежно требует термодинамического переворота, в ходе которого система переходит к существованию в условиях избытка свободной энергии со всеми вытекающими последствиями. Такой переход и осуществляется через ответ системы на внешние воздействия (стресс). Если она способна оказывать усиленное (через избыток свободной энергии) и целенаправленное (через избыточную информацию) ответное реагирование на внешние воздействия, то она переходит в живое состояние. Роль стресса в возникновении жизни рассмотрена в специальной работе [20]. При этом важным является сочетание нерегулярных макрофлуктуаций параметров в среде, что поддерживает необходимые неравновесные условия всего процесса, и более или менее регулярных микрофлуктуаций, которые обеспечивают относительную стабильность предбиологических (микро)систем, трансформирующихся в простейшие формы жизни.

Цель этой статьи – показать, как изучение гидротермальной динамики может быть применено для изучения происхождения жизни.

Инверсионная концепция происхождения жизни: основные положения

Концепция инверсии рассматривает «термодинамическую инверсию» в пребиотических микросистемах как ключевой этап, ответственный за их трансформацию в первичные формы жизни. С термодинамической точки зрения такое преобразование представляет собой инверсию балансов «вклад свободной энергии по отношению к вкладу энтропии» и «вклад информации по отношению к вкладу информационной энтропии» в системе – от отрицательного в неживой пребиотической микросистеме до положительного в исходном живом микроорганизме. Произошедшая инверсия означает возникновение избыточной «сверхэнтропийной» свободной энергии и избыточной информации (которые не подвергаются энтропийному прессингу), циркуляция которых запускает соответствующие биологические процессы в преобразованной системе. На пути к инверсии химическая система должна преодолеть негэнтропийный барьер, который следует из второго закона термодинамики [23].

Инверсия может происходить в условиях, далеких от равновесия, в ходе бифуркационного перехода химической системы из исходного стабильного состояния в новое стабильное состояние. Общие закономерности бифуркационных переходов хорошо изучены в рамках теории диссипативных структур (основатель – Илья Пригожин) и синергетики (основатель – Герман Хакен) [14, 16, 27, 30]. Апогеем такого перехода является точка бифуркации, где химическая система претерпевает множество случайных изменений, которые могут повлиять на выбор ее дальнейшего пути развития (либо к усложнению через самоорганизацию, либо к упрощению и деградациии). Вблизи точки бифуркации химическая система обладает некоторыми существенными свойствами, которые лежат в основе жизни: самоподдерживающаяся гетерогенность, непрерывные флуктуации и реорганизация молекул, кооперативные явления и непрерывный обмен веществом и энергией с окружающей средой. Эти свойства исчезают, если система покидает область бифуркации и переходит в новое стабильное (близкое к равновесию) состояние. Чтобы сохранить эти свойства, система должна оставаться в пределах области бифуркации посредством сбалансированных внутренних колебаний между исходным и новым стабильными состояниями, что возможно только при адекватных колебаниях параметров во внешнем мире. Таким образом, физико-химические флуктуации в среде необходимы для зарождения жизни, следуя концепции инверсии [4, 23].

Ниже приведены некоторые пояснения амплитудно-частотных характеристик колебаний, благоприятных для зарождения жизненного процесса.

1. Флуктуации должны быть многоуровневыми, проявляющимися по крайней мере на двух уровнях: нерегулярные макрофлуктуации со значительными амплитудами, которые постоянно поддерживают далекое от равновесия состояние органических агрегатов, и регулярные микрофлуктуации с малыми амплитудами, которые поддерживают сбалансированные колебания агрегатов вблизи точки бифуркации.

2. Высокочастотные колебания (с периодами, измеряемыми по крайней мере в минутах) должны иметь место в материнской среде, поскольку срок жизни простейших термофильных клеток, расположенных вблизи корня филогенетического дерева, может быть очень коротким: 10–30 минут.

Выбор наиболее подходящей среды для зарождения жизни

Предложенное четвертое необходимое условие возникновения жизни позволяет более четко определить наиболее вероятную среду для возникновения жизни. Масштаб физико-химических колебаний в водных средах зависит от масштаба соответствующих градиентов. Океаны Земли (за пределами подводных горячих источников) характеризуются очень низкими градиентами основных параметров. Так, значения солености колеблются от 30 до 38 г/л, рН – от 8,0 до 8,4. Небольшие градиенты определяют низкие амплитуды физико-химических колебаний в океане, которые могут возникать при медленных течениях, прибое и ураганах. Они не приводят к значительным изменениям температуры, гидростатического давления или химического состава воды. Суточные колебания температуры характеризуются низкими амплитудами и очень длительным периодом (около 24 часов), которые значительно преобладают на протяжении всей жизни термофильных прокариот, расположенных близко к корню филогенетического дерева. Принимая во внимание довольно стабильные условия в океане, его нельзя определить как подходящую среду для зарождения жизни. То же самое касается озер и подземных водоносных горизонтов со стоячим режимом и тем более ледяных покровов.

Колебания в гидротермальных системах очень разнообразны. Их масштаб колеблется от очень низкого до необычайно высокого. Так, соленость в гидротермальных средах колеблется в пределах <1–500 г/л, рН 1–12, температура 30–400 °С. Макрофлуктуации в современных гидротермальных системах инициируются землетрясениями, тектоническими дислокациями, извержениями вулканов и эксплозиями флюидов. Эти события обеспечивают очень высокий потенциал для генерации многоуровневых флуктуаций. В целом непрерывные макро- и микрофлуктуации в гидротермальных системах поддерживаются постоянным противоречивым взаимодействием между гидродинамическим давлением поднимающейся жидкости и нисходящим литостатическим давлением вмещающих пород. Такое встречное взаимодействие полярно ориентированных давлений отсутствует в океане: здесь действует только нисходящее гидростатическое давление.

Таким образом, только гидротермальная среда удовлетворяет четвертому необходимому условию для возникновения жизни. По этой причине автор рассматривает именно гидротермаль-

ные системы как наиболее вероятную колыбель жизни на ранней Земле (как и многие другие исследователи, перечисленные выше). Это мнение подтверждается исследованиями Камчатского геотермального региона, где действительно были выявлены упомянутые выше типы разнообразных флуктуаций Р-Т [6, 21, 23].

Колебания физико-химических параметров гидротермального флюида

Существует много информации, касающейся измеренных или предполагаемых колебаний в гидротермальных системах, но почти никто не пытался применить эти данные к исследованию происхождения жизни. Автор с коллегами предприняли такую попытку, используя как термодинамические оценки, так и прямые измерения.

Термодинамические оценки при моделировании гидротермального флюида были сделаны для различных температур (25, 100, 125, 150 °С), давления (1, 10, 50 бар), соотношения вода/порода (от 1000 до 0,05, т.е. от открытых трещин до небольших пор, заполненных флюидом), с добавлением и без добавления воды. 2 моля CO_2 . Общее описание метода приведено в работах [5, 23], в то время как подробная характеристика используемых термодинамических моделей дана в книгах

Авченко и др. [1, 2] и Чудненко [7]. Расчетная модель была составлена по методу минимизации потенциала Гиббса с использованием программного комплекса «Селектор». Моделирование проводилось на термодинамической основе [17] с использованием моделей твердых растворов.

Полученные результаты демонстрируют огромные вариации значений параметров, которые зависят от условий R-T и соотношений жидкой, твердой и газообразной фаз [5, 23]. Таким образом, рН гидротермального флюида, мигрирующего из открытой трещины в мелкие поры, может изменяться с кислого на щелочной (при тех же температуре и давлении). Добавление газовой фазы (CO_2) в систему вода-порода может привести к существенному повышению кислотности и уменьшению вариаций в содержании многих компонентов. Некоторые примеры изменчивости показаны на рис. 1. Из оценок следует, что параметры Р-Т-Х гидротермального флюида, движущегося через разветвленную сеть трещин и пор, влияют друг на друга и должны характеризоваться высокой изменчивостью. Этот тезис соответствует теореме Онзагера, постулирующей взаимозависимость между значениями различных параметров в растворе и расплаве [28].

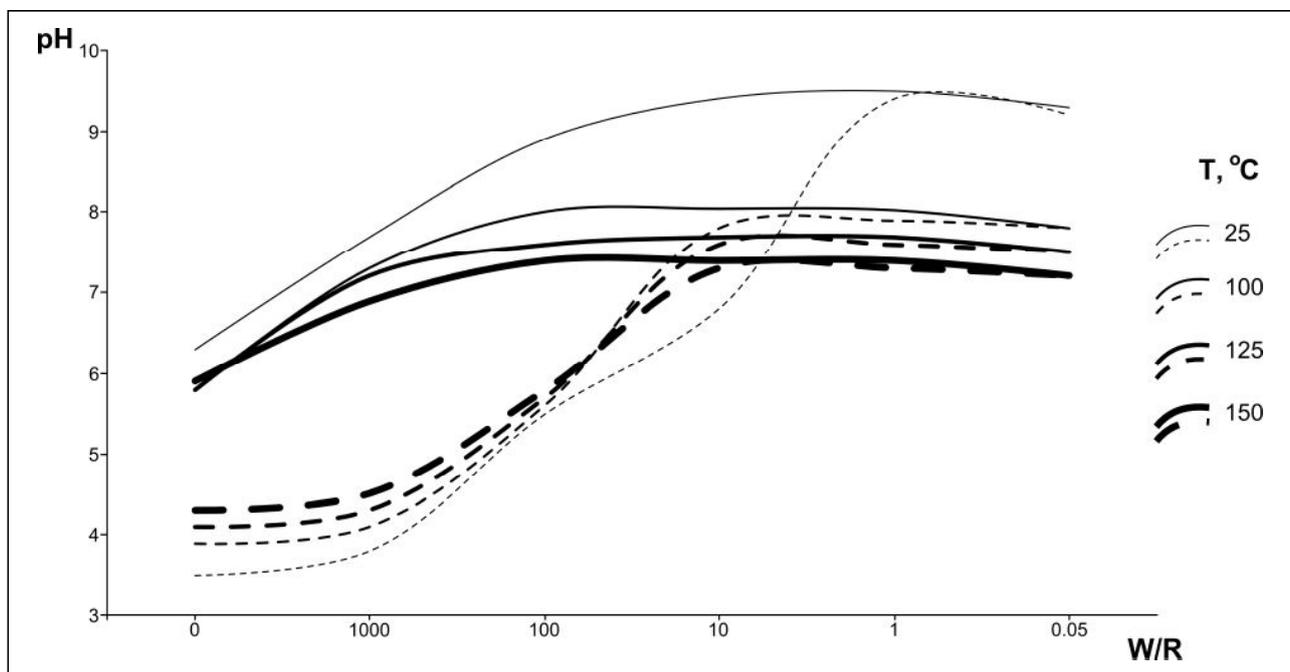


Рис. 1. Расчетные значения рН в зависимости от температуры и соотношения вода/порода (W/R) при стабильном давлении (10 бар), без добавления 2 молей CO_2

Fig. 1. Estimated pH depending on temperature and water/rock (W/R) ratio at stable pressure (10 bars), without addition of 2 CO_2 moles

Математическая обработка базы данных мониторинга, включающей измерения давления и температуры пароводяной смеси, была проведена для некоторых гидротермальных систем полуострова Камчатка [6, 21, 23]. Полученные результаты позволяют нам охарактеризовать многоуровневые колебания (амплитуды, периоды и частоты) в скважинах на глубине 1–1,5 км и вблизи поверхности (на устьях скважин). Наиболее существенные данные касаются мониторинга давления, проведенного в скважине 30 Мутновской гидротермальной системы в течение 2006 года группой А.В. Кирюхина из Института вулканологии ДВО РАН (глубина 950 метров, интервал между измерениями 2 минуты, в сумме около 250 000 измерений). Фрагмент записи показан на рис. 2. Математическая обработка базы данных выявляет по меньшей мере три уровня флуктуаций: 1) нерегулярные макроколебания (амплитуды до нескольких баров); 2) регулярные микроколебания (периоды около 20 минут, амплитуды до 1 бара); 3) внезапные изменения давления и флуктуации с периодами менее 5 минут. Другое исследование было направлено на оценку коэффициента корреляции между давлением и температурой пароводяной смеси на устьях двенадцати скважин; измерения проводились в течение нескольких лет (один раз в 10 дней). Расчетный коэффициент очень высок: он варьируется от 0,89 до 0,99 для разных скважин.

Комбинированный мониторинг давления, температуры и некоторых химических параметров в горячем растворе в геотермальном бассейне Мура (Словения) был проведен Питером и Полоной Краль [24, 25]. Они выявили регулярные колебания термодинамических и физико-химических параметров в горячей воде с периодом около 70 минут. Детальное изучение изменений химических параметров в течение одного 70-минутного цикла показало, что концентрации многих компонентов положительно коррелируют с изменением многих химических компонентов (рис. 3). Концентрации Na^+ , K^+ , Ca_2^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Br и рН отчетливо следуют за температурным пиком с 15-минутной задержкой. Слабые пики концентрации J , F^- , CO_2 также коррелируют с температурным пиком. Только содержание Mg_2^+ и NH_4^+ не проявляет определенной тенденции.

Заключение

Описанные выше исследования гидротермальных систем демонстрируют чрезвычайно широкий диапазон флуктуаций, включая их масштаб (макро- и микрофлуктуации с различной амплитудой), тип (нерегулярные флуктуации и регулярные колебания), частоты/периоды (высокочастотные и низкочастотные), параметры (температура, давление, рН, концентрации из компонентов). Амплитуды колебаний могут необычайно возрастать из-за вулканических явлений и/или землетрясений, что показано в некоторых работах [3, 9, 32].

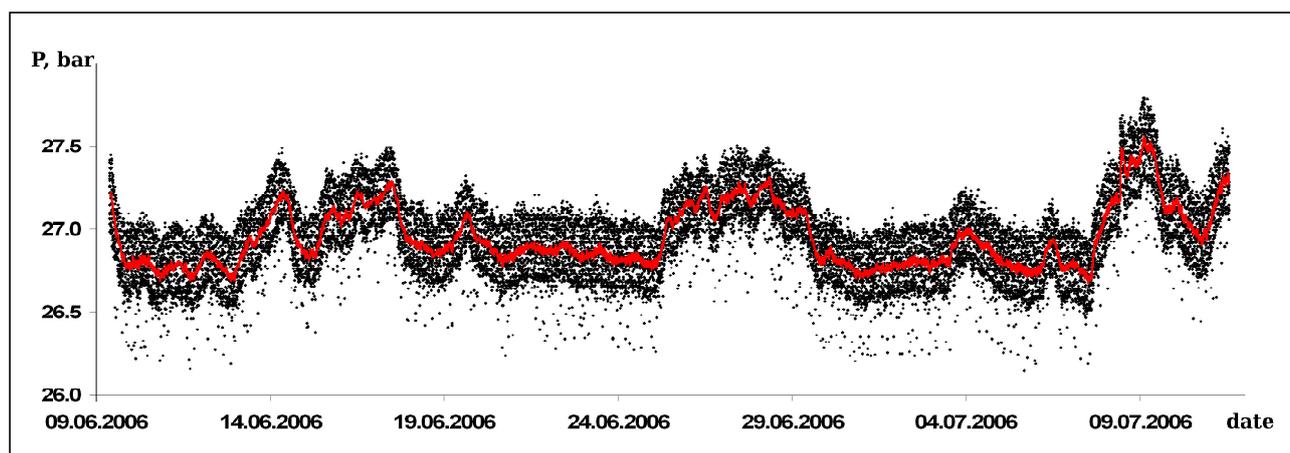


Рис. 2. Запись колебаний давления в скважине № 30 на глубине 950 метров, Мутновское гидротермальное месторождение, Камчатка (использовано около 20 000 измерений, выполненных группой А.В. Кирюхина из ИВиС ДВО РАН в июле 2006 г.)

Fig. 2. Recording of pressure fluctuations in well No. 30 at a depth of 950 meters, Mutnovoye hydrothermal field, Kamchatka (about 20,000 measurements were used, performed by A.V. Kiryukhin's group from the IVis FEB RAS in July 2006)

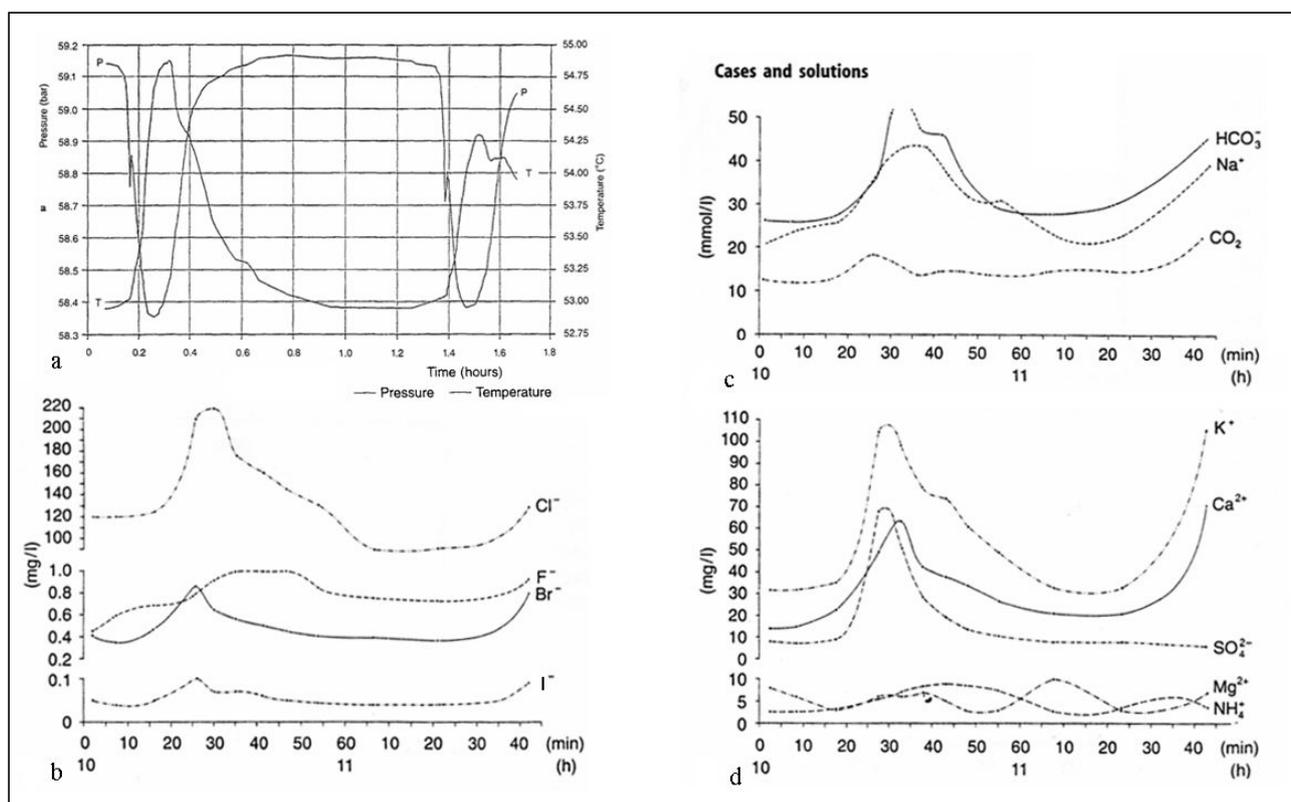


Рис. 3. Корреляционные временные вариации в изменениях температуры, давления, pH и концентраций некоторых химических компонентов в горячей воде в течение одного цикла микроколебаний (интервал времени 70 минут) в устье скважины Sob-1, геотермальный бассейн Мура (Словения), запись за ноябрь 1997 г. "a" - изменение давления (P) и температура (T); 'b-d' – колебания содержания различных ионов, микроэлементов и нерастворенных газов: Cl, F⁻, Br, J. (b), Na⁺, HCO₃⁻, CO₂ (c), K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, NH₄⁺, SO₄²⁻ (d) [Kralj, 2001]

Fig. 3. Correlative temporal variations in changes in temperature, pressure, pH and concentrations of certain chemical components in hot water during one cycle of micro-oscillations (time interval 70 minutes) at the wellhead Sob-1, Mura geothermal basin (Slovenia), entry for November 1997. "a" – pressure change (P) and temperature (T); 'b-d' – fluctuations in the content of various ions, trace elements and undissolved gases: Cl⁻, F⁻, Br⁻, J⁻. (b), Na⁺, HCO₃⁻, CO₂ (c), K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, NH₄⁺, SO₄²⁻ (d) [Kralj, 2001]

Кроме того, важно обнаружение микроколебаний, период которых измеряется в минутах. Эти данные соответствуют четвертому необходимому условию возникновения жизни, что позволяет нам рассматривать именно гидротермальные системы как наиболее вероятную среду для ее возникновения; для сравнения, изменчивость геофизических и геохимических параметров в океане несопоставимо ниже. Дальнейшее изучение динамики гидротермальных флюидов и их применение в области происхождения жизни может быть очень полезным для характеристики потенциальной колыбели жизни на Земле.

Работа выполнена в рамках госзадания ИКАРП ДВО РАН.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Авченко О.В. Основы физико-химического моделирования минеральных систем / О.В. Авченко, К.В. Чудненко, И.А. Александров. М.: Наука, 2009. 229 с.
2. Авченко О.В., Чудненко К.В., Александров И.А., Худоложкин В.О. Адаптация программного комплекса «Селектор-С» к решению проблем петрогенезиса метаморфических пород // Геохимия. 2011. № 2. С. 149–164.
3. Кирюхин А.В., Лесных М.Д., Поляков А.Ю. Естественный гидродинамический режим Мутновского геотермального резервуара и его связь с сейсмической активностью // Вулканология и Сейсмология. 2002. № 1. С. 51–60.

4. Компаниченко В.Н. Этапы перехода от доклеточных органических микросистем к первичным сообществам прокариот // Известия РАН. Серия биологическая. 2011. № 5. С. 630–640.
5. Компаниченко В.Н., Авченко О.В. Термодинамические расчеты параметров состояния гидротермальной среды для моделирования процесса зарождения биосферы // Региональные проблемы. 2015. Т. 18, № 2. С. 5–13.
6. Компаниченко В.Н., Шлюфман К.В. Амплитудно-частотная характеристика колебаний давления пароводяной смеси в Верхне-Мутновской гидротермальной системе // Вулканонология и сейсмология. 2013. № 5. С. 51–58. DOI: 10.7868/S0203030613050027.
7. Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения. Новосибирск: Гео, 2010. 287 с.
8. Baaske P., Weinert F.M., Duhr S., Lemke K.H., Russell M.J., Braun D. Extreme accumulation of nucleotides in simulated hydrothermal pore systems // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2007. Vol. 104, N 22. P. 9346–9351. DOI: 10.1073/pnas.0609592104.
9. Brown K.M., Tryon M.D., DeShon H.R., Dorman L.M., Schwartz S.Y. Correlated transient fluid pulsing and seismic tremor in the Costa Rica subduction zone // Earth and Planetary Science Letters. 2005. Vol. 238, N 1–2. P. 189–203.
10. Budin I., Szostak J.W. Expanding roles for diverse physical phenomena during the origin of life // Annu Rev Biophys. 2010. Vol. 39. P. 245–263.
11. Corliss J.B., Baross J.A., Hoffman S.E. An hypothesis concerning the relationship between submarine hot springs and the origin of life on the Earth // Oceanological Acta. 1981. N 4. P. 59–69.
12. Deamer D.W. Combinatorial chemistry in the prebiotic environment // Journal of Biomolecular Structure and Dynamics. 2013. N 31, Suppl. 1. P. 9. DOI: 10.1080/07391102.2013.786323.
13. Deamer D.W. First Life: Discovering the Connections between Stars, Cells, and How Life Began. Berkeley (California): University of California Press, 2011. 272 p.
14. Ebeling W. Physik der Evolutionsprozesse / W. Ebeling, A. Engel, R. Feistel. Berlin: Akademie-Verlag, 1990. 371 p.
15. Feistel R. Physics of Self-Organization and Evolution / R. Feistel, W. Ebeling. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2011. 576 p.
16. Haken H. Synergetics. An Introduction Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry and Biology. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1978. 358 p. DOI: 10.1007/978-3-642-96469-5.
17. Holland T.J.B., Powell R. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest // Journal of Metamorphic Geology. 1998. Vol. 16, N 3. P. 309–343. DOI: 10.1111/j.1525-1314.1998.00140.x.
18. Holm N.G., Andersson E. Hydrothermal simulation experiments as a tool for studies for the origin of life on Earth and other terrestrial planets: a review // Astrobiology. 2005. Vol. 5, N 4. P. 444–460. DOI: 10.1089/ast.2005.5.444.
19. Knauth L.P., Lowe D.R. High Archaean climatic temperature inferred from oxygen isotope geochemistry of cherts in the 3.5 Ga Swaziland Supergroup, South Africa // Geological Society America Bulletin. 2003. Vol. 115, N 5. P. 566–580. DOI: 10.1130/0016-7606(2003)115<0566:HAC TIF>2.0.CO;2.
20. Kompanichenko V., Kotsyurbenko O. Role of Stress in the Origin of Life // Life. 2022. Vol. 12, N 11. 1930. DOI: 10.3390/life12111930.
21. Kompanichenko V.N., Poturay V.A., Shlufman K.V. Hydrothermal systems of Kamchatka are Models of the Prebiotic Environment // Origin of Life and Evolution of Biospheres. 2015. Vol. 45, N 1–2. P. 93–103. DOI: 10.1007/s11084-015-9429-2.
22. Kompanichenko V.N. Inversion Concept of the Origin of Life // Origins of Life and Evolution of Biospheres. 2012. Vol. 42. P. 153–178.
23. Kompanichenko V.N. Thermodynamic Inversion: Origin of Living Systems. Cham (Switzerland): Springer International Publishing, 2017. 275 p. DOI: 10.1007/978-3-319-53512-8.
24. Kralj P. Das Thermalwasser-System des Mur-Beckens in Nordost-Slowenien // Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie. 2001. Vol. 81. P. 1–82.
25. Kralj Pt., Kralj P. Thermal and mineral waters in north-eastern Slovenia // Environmental Earth Sciences. 2000. Vol. 39, N 5. P. 488–500. DOI: 10.1007/s002540050455.
26. Mulkidjanian A.Y., Bychkov A.Yu., Dibrova D.V., Galperin M.Y., Koonin E.V. Origin of first cells at terrestrial, anoxic geothermal fields // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2012. Vol. 109 (14). P. E821–E830. DOI: 10.1073/pnas.1117774109.

27. Nicolis G. Self-organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations, 1st Edition / G. Nicolis, I. Prigogine. New York: Wiley, 1977. 512 p.
 28. Onsager L. Reciprocal relations in irreversible processes. II // *Physical Review*. 1931. Vol. 38(12). P. 2265–2279. DOI: 10.1103/physrev.38.2265.
 29. Pace N.R. Origin of life - facing up to the physical setting // *Cell*. 1991. Vol. 65 (4). P. 531–533. DOI: 10.1016/0092-8674(91)90082-a.
 30. Prigogine I. Order out of chaos: Man's New Dialogue with Nature / I. Prigogine, I. Stengers. Toronto; New York; London; Sydney: Bantam Books, 1984. 349 p.
 31. Russell M.J., Hall A.J., Boyce A.J., Fallick A.E. 100th anniversary special paper: > on hydrothermal convection and the emergence of life // *Economic Geology*. 2005. Vol. 100, N 3. P. 419–438. DOI: 10.2113/gsecongeo.100.3.419.
 32. Stefansson V. The Krafla geothermal field, North-East Iceland // *Geothermal Systems: Principles and Case Histories*. New York: Wiley and Sons, 1981. P. 273–294.
 33. Washington J. The Possible Role of Volcanic Aquifers in Prebiotic Genesis of Organic Compounds and RNA // *Origins of life and evolution of the biosphere*. 2000. Vol. 30 (1). P. 53–79. DOI: 10.1023/A:1006692606492.
- REFERENS:
1. Avchenko O.V. *Osnovy fiziko-khimicheskogo modelirovaniya mineral'nykh system* (Fundamentals of Physicochemical Modeling of Mineral Systems), O.V. Avchenko, K.V. Chudnenko, I.A. Aleksandrov. Moscow: Nauka Publ., 2009. 229 p. (In Russ).
 2. Avchenko O.V., Chudnenko K.V., Aleksandrov I.A., Khudolozhkin V.O. Adaptation of the SELECTOR-C program package for solving petrogenetic problems of metamorphic rocks. *Geochemistry international*, 2011, no. 2, pp. 149–164. (In Russ).
 3. Kiryukhin A.V., Lesnykh M.D., Polyakov A.Yu. The natural hydrodynamic regime of the Mutnovsky geothermal reservoir and its connection with seismic activity. *Vulkanologiya i Seismologiya*, 2002, no. 1, pp. 51–60. (In Russ).
 4. Kompanichenko V.N. Stages of transition from precellular organic microsystems to primary prokaryotic communities. *Izvestiya RAN. Seriya biologicheskaya*, 2011, no. 5, pp. 630–640. (In Russ).
 5. Kompanichenko V.N., Avchenko O.V. Thermodynamic calculations of the parameters of hydrothermal environment in the modeling of biosphere origin. *Regional'nye problemy*, 2015, vol. 18, no. 2, pp. 5–13. (In Russ).
 6. Kompanichenko V.N., Shlyufman K.V. Amplitude-frequency characteristic of pressure fluctuations of the steam-water mixture in the Verkhne-Mutnovskaya hydrothermal system. *Vulkanologiya i Seismologiya*, 2013, no. 5, pp. 51–58. (In Russ). DOI: 10.7868/S0203030613050027.
 7. Chudnenko K.V. *Termodinamicheskoe modelirovanie v geokhimi: teoriya, algoritmy, programmnoe obespechenie, prilozheniya* (Thermodynamic modeling in geochemistry: theory, algorithms, software, applications). Novosibirsk: Geo Publ., 2010. 287 p. (In Russ).
 8. Baaske P., Weinert F.M., Duhr S., Lemke K.H., Russell M.J., Braun D. Extreme accumulation of nucleotides in simulated hydrothermal pore systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, vol. 104, no. 22, pp. 9346–9351. DOI: 10.1073/pnas.0609592104.
 9. Brown K.M., Tryon M.D., DeShon H.R., Dorman L.M., Schwartz S.Y. Correlated transient fluid pulsing and seismic tremor in the Costa Rica subduction zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, vol. 238, no. 1–2, pp. 189–203.
 10. Budin I., Szostak J.W. Expanding roles for diverse physical phenomena during the origin of life. *Annu Rev Biophys*, 2010, vol. 39, pp. 245–263.
 11. Corliss J.B., Baross J.A., Hoffman S.E. An hypothesis concerning the relationship between submarine hot springs and the origin of life on the Earth. *Oceanological Acta*, 1981, no. 4, pp. 59–69.
 12. Deamer D.W. Combinatorial chemistry in the prebiotic environment. *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*, 2013, no. 31, suppl. 1, pp. 9. DOI: 10.1080/07391102.2013.786323.
 13. Deamer D.W. *First Life: Discovering the Connections between Stars, Cells, and How Life Began*. Berkeley (California): University of California Press, 2011. 272 p.
 14. Ebeling W. *Physik der Evolutionsprozesse*, W. Ebeling, A. Engel, R. Feistel. Berlin: Akademie-Verlag, 1990. 371 p.
 15. Feistel R. *Physics of Self-Organization and Evolution*, R. Feistel, W. Ebeling. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2011. 576 p.
 16. Haken H. *Synergetics. An Introduction Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organiza-*

- tion in Physics, Chemistry and Biology*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1978. 358 p. DOI: 10.1007/978-3-642-96469-5.
17. Holland T.J.B., Powell R. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology*, 1998, vol. 16, no. 3, pp. 309–343. DOI: 10.1111/j.1525-1314.1998.00140.x.
 18. Holm N.G., Andersson E. Hydrothermal simulation experiments as a tool for studies for the origin of life on Earth and other terrestrial planets: a review. *Astrobiology*, 2005, vol. 5, no. 4, pp. 444–460. DOI: 10.1089/ast.2005.5.444.
 19. Knauth L.P., Lowe D.R. High Archaean climatic temperature inferred from oxygen isotope geochemistry of cherts in the 3.5 Ga Swaziland Supergroup, South Africa. *Geological Society America Bulletin*, 2003, vol. 115, no. 5, pp. 566–580. DOI: 10.1130/0016-7606(2003)115<0566:HAC TIF>2.0.CO;2.
 20. Kompanichenko V., Kotsyurbenko O. Role of Stress in the Origin of Life. *Life*, 2022, vol. 12, no. 11, 1930. DOI: 10.3390/life12111930.
 21. Kompanichenko V.N., Poturay V.A., Shlufman K.V. Hydrothermal systems of Kamchatka are Models of the Prebiotic Environment. *Origin of Life and Evolution of Biospheres*, 2015, vol. 45, no. 1–2, pp. 93–103. DOI: 10.1007/s11084-015-9429-2.
 22. Kompanichenko V.N. Inversion Concept of the Origin of Life. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 2012, vol. 42, pp. 153–178.
 23. Kompanichenko V.N. *Thermodynamic Inversion: Origin of Living Systems*. Cham (Switzerland): Springer International Publishing, 2017. 275 p. DOI: 10.1007/978-3-319-53512-8.
 24. Kralj P. Das Thermalwasser-System des Mur-Beckens in Nordost-Slowenien. *Mitteilungen zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie*, 2001, vol. 81, pp. 1–82.
 25. Kralj Pt., Kralj P. Thermal and mineral waters in north-eastern Slovenia. *Environmental Earth Sciences*, 2000, vol. 39, no. 5, pp. 488–500. DOI: 10.1007/s002540050455.
 26. Mulkidjanian A.Y., Bychkov A.Yu., Dibrova D.V., Galperin M.Y., Koonin E.V. Origin of first cells at terrestrial, anoxic geothermal fields. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, vol. 109 (14), pp. E821–E830. DOI: 10.1073/pnas.1117774109.
 27. Nicolis G. *Self-organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations, 1st Edition*, G. Nicolis, I. Prigogine. New York: Wiley, 1977. 512 p.
 28. Onsager L. Reciprocal relations in irreversible processes. II. *Physical Review*, 1931, vol. 38 (12), pp. 2265–2279. DOI: 10.1103/physrev.38.2265.
 29. Pace N.R. Origin of life - facing up to the physical setting. *Cell*, 1991, vol. 65 (4), pp. 531–533. DOI: 10.1016/0092-8674(91)90082-a.
 30. Prigogine I. *Order out of chaos: Man's New Dialogue with Nature*, I. Prigogine, I. Stengers. Toronto; New York; London; Sydney: Bantam Books, 1984. 349 p.
 31. Russell M.J., Hall A.J., Boyce A.J., Fallick A.E. 100th anniversary special paper: >on hydrothermal convection and the emergence of life. *Economic Geology*, 2005, vol. 100, no. 3, pp. 419–438. DOI: 10.2113/gsecongeo.100.3.419.
 32. Stefansson V. The Krafla geothermal field, North-East Iceland. *Geothermal Systems: Principles and Case Histories*. New York: Wiley and Sons, 1981, pp. 273–294.
 33. Washington J. The Possible Role of Volcanic Aquifers in Prebiotic Genesis of Organic Compounds and RNA. *Origins of life and evolution of the biosphere*, 2000, vol. 30 (1), pp. 53–79. DOI: 10.1023/A:1006692606492.

ROLE OF HYDROTHERMAL DYNAMICS FOR THE ORIGIN OF LIFE ON EARTH

V.N. Kompanichenko

In framework of the inversion concept one more required condition for the origin of life has been substantiated: multilevel fluctuations of physic-chemical parameters (in addition to the three accepted: availability of organic matter, aqueous medium, and source of energy). Taking this condition into consideration, hydrothermal systems were preferable medium for the origin of life on early Earth, in comparison with ocean. Hydrothermal environments are characterized by an extremely wide range of temperature, pressure, pH, and concentrations of components gradients. Multilevel fluctuations availability has been corroborated by means of thermodynamic estimations and direct measurements of pressure and temperature during the monitoring in some of the Kamchatka peninsula hydrothermal systems. The monitoring database mathematical processing reveals at least three levels of pressure fluctuations: 1) irregular macro fluctuations (with big amplitudes); 2) regular micro oscillations (with smaller amplitudes and periods about 20 minutes); 3) sudden pressure changes and fluctuations with periods lower than 5 minutes. High correlation between pressure, temperature, and concentrations of chemical components is also detected both in hydrothermal systems of Kamchatka and Slovenia. A lot of data on pressure and temperature dynamics in hydrothermal fluid, obtained by many researchers, can be applicable for investigation of the origin-of-life process.

Keywords: hydrothermal system, origin of life, fluid, thermodynamic estimation, fluctuation, amplitude, period, temperature, pressure, hydrochemistry.

Reference: Kompanichenko V.N. Role of hydrothermal dynamics for the origin of life on Earth. *Regional'nye problemy*, 2023, vol. 26, no. 4, pp. 52–61. (In Russ.). DOI: 10.31433/2618-9593-2023-26-4-52-61.

Поступила в редакцию 14.10.2023

Принята к публикации 18.12.2023