

ЭВОЛЮЦИЯ: ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ (эргодинамическая модель)

Аннотация

На основе величины «структурная энергия» обсуждается эргодинамическая модель эволюции систем неживой и живой природы. На постоянных потоках энергии имеет место интенсивное развитие, а на увеличивающихся – экстенсивно-интенсивное. Уровень эволюционного развития тем выше, чем больше величина потока энергии. Эволюционирующие геохимические системы функционируют на низких потоках эндогенной энергии; автотрофы - на больших потоках экзогенной (солнечной) энергии. Гетеротрофы используют аккумулированную (структурную) энергию автотрофов. Человек дополнительно использует еще аккумулированную солнечную энергию горючих ископаемых.

Обычное определение эволюции как направленного движения от простого к сложному, от низшего к высшему, от менее упорядоченного к более упорядоченному является эмпирическим обобщением, основанным на данных естественных и общественных наук. Данное обобщение теоретически описывается в терминах структурной энергии Φ .

Структурная энергия соотносится с работой термодинамически обратимого процесса «сборки» эволюционирующей системы из «простых веществ». Удельная структурная энергия относится к единичной составляющей системы (эрг/г., эрг/чел. и т.п.). Структурная энергия является потенциалом эволюции: чем она больше, тем большую работу (при прочих равных условиях) совершает система. Мир энергий триадичен. Для его полной характеристики, наряду с кинетической и потенциальной энергией, следует дополнительно использовать структурную энергию. Если кинетическая и потенциальная энергия характеризуют действующие и возможные количественные изменения в системе, то структурная энергия – характеристика качественных изменений эволюционирующей системы. Мир, где действует только кинетическая и потенциальная энергия, это – не эволюционирующий мир. Мир систем, обладающих структурной энергией, – эволюционирующий мир.

Рассчитать структурную энергию в энергетических единицах (Дж, эрг) удастся лишь для некоторых простых систем (структурная энергия рудообразования, фотосинтеза) [1,2]. Между тем, человечество через рынок выработало способ определения ценности того или иного объекта (фактически, запасенной в нем структурной энергии) в категориях стоимости. Поэтому структурная энергия выражается нами и в стоимостных единицах (долл., долл./чел. и др.).

Эволюционирующие системы – это системы, обладающие структурной энергией ($\Phi > 0$). Их особые свойства таковы [1]:

1) Сопряжение процессов: самопроизвольного (основного) и не самопроизвольного (сопряженного). Первый является источником энергии для протекания второго, обуславливающего эволюцию.

2) Динамическое неравновесие систем относительно окружающей среды, при котором самопроизвольные процессы распада непрерывно компенсируются сопряженными процессами синтеза, благодаря потреблению энергии основного процесса.

3) Самопроизвольное движение к внутреннему равновесию. Создавая и контролируя равновесную среду, система тем самым самосохраняется.

4) Функционирование за счет непрерывного обмена веществом и энергией с окружающей средой. Эволюционирующие системы непрерывно «живут».

5) Конечное время «жизни» индивидов (кристаллических частиц, живых организмов).

6) Постоянное самообновление составных частей систем.

Рассмотрим закономерности функционирования эволюционирующих систем разного типа: геохимических, биологических, социальных.

Геохимические системы. Примером эволюционирующих геосистем являются современные системы эпигенетического рудообразования на подвижном геохимическом барьере, которые функционируют, «живут» в настоящем времени [1]. Эти системы не равновесны относительно вмещающей среды и обладают более высоким уровнем организации вещества ($\Phi > 0$). Устойчивое неравновесие поддерживается за счет использования свободной энергии основного процесса функционированием подвижного геохимического барьера.

Поскольку читатель не знаком с данным процессом, кратко его опишем на примере формирования так называемых инфильтрационных месторождений урана. Кислородсодержащие растворы, содержащие растворимые соединения урана (концентрации порядка 10^{-5} г/л), фильтруются по проницаемому песчаному пласту, заключенному между непроницаемыми глинистыми породами. Растворенный кислород окисляет органические вещества и сульфиды железа, содержащиеся в песчаных породах, в результате породы зоны окисления приобретают бурый или красноватый цвет. Граница окисленных и неокисленных пород перемещается со временем в направлении движения раствора. Там, где кончается (выклинивается) зона пластового окисления, отлагается рудное вещество – уран, селен и др., в результате чего формируются промышленные месторождения. Процесс происходит и в настоящее время.

Рудное вещество осаждается за счет резкого снижения его миграционных способностей на границе окисленных и неокисленных пород, играющей роль подвижного геохимического барьера. Действительно, на этой границе значительно снижается окислительно-восстановительный потенциал системы. Кислородные воды, поступающие на эту границу, содержат различные растворенные компоненты. На геохимическом барьере растворенный уран, а также селен и некоторые другие элементы восстанавливаются. И поскольку растворимость восстановленных соединений этих металлов мала, они откладываются в виде различных рудных минералов. В результате формируется промышленная зона концентрации, форма которой в значительной степени зависит от однородности пласта.

В результате непрерывно протекающих и многократно повторяющихся процессов отложения-переотложения концентрация урана на барьере (как в жидком, так и в твердом состоянии) непрерывно возрастает со временем. Такова картина формирования зоны оруденения и наблюдаемых в ней в настоящее время повышенных концентраций растворенного урана (до 10^{-3} г/л).

При рудообразовании на подвижном геохимическом барьере имеет место сопряжение процессов. Действительно, отложение рудного вещества (урана) из исходного резко недонасыщенного раствора само собой невозможно. Однако оно происходит благодаря процессу функционирования подвижного восстановительного барьера – окисления вещества горных пород. Следовательно, рудообразование – сопряженный процесс, а окисление горных пород – основной.

Благодаря сопряжению процессов формируется подвижная зона оруденения. Она не равновесна относительно окружающей среды, ибо концентрация растворенного вещества в зоне оруденения (10^{-3} г/л) превышает его концентрацию в пласте вне зоны оруденения ($10^{-5} - 10^{-6}$ г/л). Процесс концентрирования несамопроизвольный, для его осуществления надо затратить энергию, совершить работу. Фактически имеем дело с «геохимической машиной», в которой основной химический процесс (реакция окисления) осуществляет работу концентрирования рудного вещества в растворе.

Реализуемый процесс противоположен рассеянию и поэтому имеет прогрессивный характер. Неравновесие системы рудообразования относительно окружающей среды носит динамический характер, при котором процессы растворения рудного вещества (в тылу подвижной зоны оруденения) непрерывно компенсируются его образованием (на передовом фронте подвижного геохимического барьера). Это неравновесие поддерживается («поддерживающее

равновесие») только благодаря непрерывному использованию энергии основного процесса. Система рудообразования является эволюционирующей, обладающей всеми перечисленными выше свойствами, характерными для таких систем.

Любой рудообразующий процесс сводится в конечном счете к концентрированию рассеянных рудных элементов горных пород. Опишем данный процесс, используя теоретический аппарат эргодинамики [1]. Выражение для работы концентрирования единицы массы вещества источника запишем в виде:

$$A_0 = A_e \ln \frac{q_{\max}}{q_0}, A_e = \text{const} \quad (1)$$

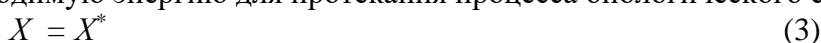
где q_0 и q_{\max} - концентрация рудного компонента в рассеянном и концентрированном (в зоне оруденения) состоянии, A_e - работа концентрирования в e раз, $e = 2,718\dots$ - число Непера.

Фактически величина A_e есть ничто иное как удельная структурная энергия руды ($\Phi = A_e$). Поскольку величины q_0 и q_{\max} можно считать постоянными, то для любого момента времени (t) имеем:

$$d\Phi/dt = 0, \quad \Phi = \text{const} \quad (2)$$

Это показывает, что система рудообразования качественно не меняется (не прогрессирует). Имеем дело с «эволюцией роста», при которой растет масса системы без ее усложнения. Таково свойство эволюции геохимических систем.

Биологические системы: мир растений. В данном случае закономерности эволюции разные для автотрофов (растительного мира) и гетеротрофов [3]. Рассмотрим автотрофы. Они осуществляют синтез органического вещества из углекислого газа и воды. Этот процесс не самопроизвольный и сам собой идти не может. Он осуществляется благодаря сопряжению с самопроизвольным процессом поглощения солнечной энергии хлорофиллом растений, что дает необходимую энергию для протекания процесса биологического синтеза. Схематически:



Здесь X и X^* - обозначение хлорофилла до и после поглощения кванта света. Расходование хлорофилла в процессе (3) непрерывно сдвигает равновесие процесса (4) в сторону образования органического вещества. Имеет место сопряжение не самопроизвольного процесса биосинтеза с поглощением солнечной энергии хлорофиллом. Запишем по аналогии с (1) уравнение для удельной работы фотосинтеза A_0 (в расчете на единицу массы органического вещества):

$$A_0 = A_e \ln C_n / C_0 \quad (5)$$

где C_n ($C_n = \text{const}$) - равновесная по реакции органического синтеза концентрация углекислого газа, C_0 - его концентрация в источнике (атмосфере). Величину A_0 станем сопоставлять со структурной энергией фотосинтеза.

В истории Земли концентрация углекислого газа неоднократно менялась [3]. При росте CO_2 происходило увеличение массы фотосинтетиков без их совершенствования и даже с их деградацией ($dA_0/dt < 0$ при $dC_0/dt > 0$) - имела место «эволюция роста». Наоборот, при уменьшении CO_2 наблюдался прогресс:

$$d\Phi/dt > 0 \quad \text{при} \quad dC_0/dt < 0 \quad (6)$$

Функционирование фотосинтетиков в режиме «голодания» по CO_2 приводило к отмиранию одних (наименее приспособленных к ухудшающимся внешним условиям) биологических объектов и к зарождению и развития других, более приспособленных форм. Времена локального увеличения и последующего уменьшения содержания CO_2 в атмосфере приурочены к крупным глобальным эпохам тектономагматической активизации и интенсивного вулканизма [4]. В результате этих процессов из глубин Земли в атмосферу выделялся углекислый газ. Проведенный анализ позволяет объяснить соответствие главных эпох эволюции живых систем (отмирания старых и зарождения новых [5] глобальным эпохам тектономагматической активизации и интенсивного вулканизма [6].

Биологическая эволюция: мир животных. В эволюционном учении разграничивают понятия микроэволюции как эволюции на уровне популяций, ведущей под действием естественного отбора к образованию новых видов; и макроэволюции как эволюции более сложных систем (родов, семейств, отрядов). Если масштабы микроэволюции сопоставимы с длительностью человеческой жизни, то макроэволюция имеет дело с геологическим временем—от десятков тысяч до сотен миллионов лет. Поэтому макроэволюция изучена слабо.

Согласно современным представлениям биологическая эволюция протекает на уровне популяции, являющейся элементарной эволюционирующей единицей. Поэтому эргодинамическая модель рассматривает эволюцию популяции. Естественно, она дает возможность в количественной форме охарактеризовать лишь простейший случай функционирования популяции, который в природе в чистом виде вообще может не существовать. Тем не менее, идеализация явления, отбрасывание деталей — обычный прием в науке: он позволяет выявить наиболее общие закономерности явления.

Дарвиновская парадигма «выживания наиболее приспособленных» имеет в виду, что среда жизнеобитания может меняться; при этом возникают новые приспособления. Поскольку изменения среды на «малых» отрезках времени имеют незакономерный, случайный характер, то и эволюция на этих масштабах времени (микроэволюция) также случайна. Это и утверждает синтетическая теория эволюции. Но как тогда осуществляется прогресс, то есть направленные изменения? Изъян данных рассуждений состоит в следующем. Изменения среды, действительно, могут быть случайными, но лишь с точки зрения стороннего наблюдателя. Для популяции же эти изменения закономерны и означают либо ухудшение среды — пищи мало, либо улучшение — пищи много (нейтральные изменения не влияют на популяцию, и поэтому они исключаются из рассмотрения).

Функционирование популяции будем моделировать как эффективный процесс концентрирования вещества источника, от концентрации q_0 в источнике до q_{\max} в системе. Величины q_0 и q_{\max} имеют эффективный характер — они характеризуют в обобщенной форме внешнюю среду и популяцию. Найдем выражение для удельной мощности сопряженного процесса концентрирования (работы в единицу времени, производимой единицей массы популяции). Уравнение для работы концентрирования единицы массы имеет вид (1). Если m — масса популяции, а n — биопродуктивность (приращение биомассы в популяции за единицу времени), то удельная мощность P сопряженного процесса функционирования популяции будет:

$$P = \frac{nA_e}{m} \ln \frac{q_{\max}}{q_0} \quad (7)$$

Обсудим в дальнейшем частный случай, когда биопродуктивность пропорциональна массе популяции:

$$n = \beta m, \beta = const \quad (8)$$

Тогда уравнение (7) примет более простой вид:

$$P = \beta A_e \ln \frac{q_{\max}}{q_0} \quad (9)$$

Для упрощения выкладок зададимся простым периодическим законом изменения ресурса:

$$q = \begin{cases} q_{01}, & (0 < t < \tau), (2\tau < t < 3\tau), (4\tau < t < 5\tau), \dots; \\ q_{02}, & (\tau < t < 2\tau), (3\tau < t < 4\tau), (5\tau < t < 6\tau), \dots; \end{cases} \quad (10)$$

причем для определенности примем $q_{01} > q_{02}$.

Суммарная удельная работа (в расчете на единицу массы популяции), которая производится популяцией за время $(0 < t < \tau)$, есть:

$$A_1 = P_1 \tau = \gamma \tau \ln \frac{q_{max}}{q_{01}}, (\gamma = \beta A_e) \quad (11)$$

Соответственно при $(\tau < t < 2\tau)$ удельная работа другая. Она равна:

$$A_2 = \gamma \tau \ln \frac{q_{max}}{q_{02}} \quad (12)$$

Так как $q_{01} > q_{02}$, то $A_2 > A_1$. Отсюда заключаем, что при $(\tau < t < 2\tau)$ популяция приобрела полезные свойства (признаки), позволяющие ей функционировать в неблагоприятных условиях (при $q_0 = q_{02}$). Для реализации прогресса важно, чтобы эти признаки передавались в череде поколений. Если полезное свойство, позволяющее популяции выжить в неблагоприятных условиях, получено за счет мутации, то есть некоторого случайного внешнего воздействия на наследственные структуры, то оно полностью передается по наследству, становясь врожденным признаком. Когда это свойство найдено самой популяцией в неблагоприятный период ($q_0 = q_{02}$), то оно генетически не программируется, а передается в ряду поколений через научение, роль которого возрастает с совершенствованием нервной системы.

В последующий интервал времени ($2\tau < t < 3\tau$) популяция совершает работу A_1 , меньшую A_2 . Однако благодаря передаче полезного признака она способна совершать и большую работу A ($A_1 < A \leq A_2$). Если полезные признаки передаются полностью, «идеально», то при ($2\tau < t < 3\tau$) популяция способна совершать ту же работу A_1 , что и при ($\tau < t < 2\tau$). Поскольку в действительности она совершает работу A_2 , то это означает, что удельная структурная энергия популяции возросла на величину:

$$\Delta\Phi_{1max} = A_2 - A_1 = \gamma \tau \ln \frac{q_{01}}{q_{02}} \quad (13)$$

Вероятно, в общем случае приобретенные признаки передаются научением частично, с некоторой их «потерей». Поэтому выражение для приращения удельной свободной энергии популяции при ($2\tau < t < 3\tau$) (такое приращение в рамках модели фактически происходит скачком в момент $t = 2\tau$) запишем в виде:

$$\Delta\Phi_1 = \xi \Delta F_{1max} = \gamma \xi \ln \frac{q_{01}}{q_{02}} \quad (14)$$

где ξ ($0 \leq \xi \leq 1$) — некоторый поправочный коэффициент, учитывающий отношение реальной передачи признаков к идеальной (при которой $\xi = 1$).

Далее полагаем, что каждый последующий период дефицита ресурса образуется случайной вариацией внешних условий, то есть способом, новым для популяции, к которому она еще не приспособлена. Поэтому при каждом периоде дефицита ресурса ($q_0 = q_{02}$) популяция для выживания приобретает новые поведенческие признаки, в результате чего в ней непрерывно накапливается структурная энергия. Принимая в простейшем варианте простое суммирование воздействия дефицита ресурса на популяцию, выражение для приращения удельной структурной энергии популяции за время $t = n\tau$ (n — целое число) запишем в виде:

$$\Delta\Phi = \sum_{i=1}^n \Delta\Phi_i = \gamma \xi t \ln \frac{q_{01}}{q_{02}} \quad (15)$$

Приращение удельной структурной энергии популяции за единицу времени есть:

$$\frac{d\Delta\Phi}{dt} = \gamma \xi \ln \frac{q_{01}}{q_{02}} \quad (16)$$

Поскольку $\frac{d\Delta\Phi}{dt} > 0$, то условие (2) прогресса системы выполняется. При этом имеет место равномерный (линейный) прогресс ($\frac{d\Delta\Phi}{dt} = const$). Если иметь в виду ненаправленную мутационную изменчивость, то уравнение (15) относится к предельной ситуации, когда в каждый период дефицита ресурса ($q_0 = q_{02}$) имеется хотя бы одна благоприятная мутация, способствующая выживанию популяции.

Способ эволюции популяции на основе передачи приобретенных признаков от одной особи к другой посредством научения может быть назван **этологическим прогрессом** (от названия науки, изучающей поведение животных — этологии). В биологической литературе часто подчеркивается роль обучения в эволюции. Однако отсутствуют системные подходы к рассмотрению обучения в свете эволюционных теорий. В соответствии с (15), (16) прогресс популяции зависит как от внутренних факторов (γ, ξ), так и внешних (q_{01}, q_{02}). В неизменной среде прогресс отсутствует ($\Delta\Phi = 0$ при $q_{01} = q_{02}$), что не противоречит и взглядам биологов.

Приращение структурной энергии $\Delta\Phi$ за время t характеризует увеличение «запаса устойчивости» популяции за это время. Суммарное приращение «запаса устойчивости» пропорционально длительности функционирования популяции и определяется контрастностью изменения ресурса ($\frac{q_{02}}{q_{01}}$). Полный же «запас устойчивости», определяемый величиной $\Phi_{\Sigma} = \Phi_0 + \Delta\Phi$ (Φ_0 - свободная энергия популяции в момент времени $t = 0$, с которого рассматривается эволюция), зависит как от истории жизни популяции на рассматриваемом интервале времени (то есть от величин q_{01}, q_{02}, t), так и от всей ее предистории (Φ_0, γ, ξ), определяясь тем самым всем эволюционным путем, приведшем к формированию популяции.

Величина Φ_0 может быть условно названа витальным (жизненным) капиталом популяции, а $\Delta\Phi$ - этологическим капиталом (при условии, если $\Delta\Phi$ имеет поведенческое происхождение, а не за счет мутаций). Витальный капитал характеризует изначальный «запас устойчивости» популяции, а этологический — приобретенный в процессе эволюции на основе поведенческого совершенствования.

В XIX веке выдающийся биолог Геккель сформулировал закон закрепленного наследования: «Все признаки, которые организм приобретает в течение своего индивидуального состояния посредством приспособления и которыми не обладали его предки, наследуются тем точнее и полнее во всех последующих поколениях, чем длительнее влияли казуальные условия приспособления и чем дольше они воздействовали в следующих друг за другом поколениях».

Развития модель соответствует данной формуле, расшифровывая ее на количественной основе. Механизмом реализации закрепленного наследования для животных является этологический прогресс. В эволюции высших животных с развитым мозгом этологический прогресс играет все большую роль, приводя через совершенствование центральной нервной системы к увеличению эффективности использования энергии. На основе этологического прогресса возник и культурный прогресс человека, ставший для него главным способом эволюции.

Давний спор между генетиками и ламаркистами относительно передачи по наследству приобретенных признаков не совсем конструктивен. Нет необходимости передачи приобретенных признаков по наследству - они передаются через научение. Передача их через наследственные структуры уменьшала бы пластичность организмов, а следовательно, и их приспособляемость к изменяющимся условиям. Именно благодаря синтезу приобретенных и врожденных признаков возможно устойчивое функционирование популяции в масштабах длительного времени, необходимого для биологической эволюции. Поэтому этологический прогресс является необходимым условием для биологического прогресса — возникновения новых видов.

Литература

1. Бушуев В.В., Голубев В.С. Основы эргодинамики. М., ЛЕНАНД, 2012.
2. Бушуев В.В., Голубев В.С. Эргодинамика – экоразвитие – социогуманизм. М., ЛЕНАНД, 2010.
3. Голубев В.С. Модель эволюции геосфер. М., Наука, 1990.
4. Будыко М.И., Ронов А.Б., Яншин А.Л. История атмосферы. Л., Гидрометеоздат, 1985.
5. Соколов Б.С. Органический мир Земли на пути к фанерозойской дифференциации. Вестник АН СССР, №1, 1976.
6. Сидоренко Св.А., Теняков В.А., Голубев В.С. К эволюции живых систем и периодичности накопления биолитогенных образований в докембрии. ДАН СССР, т.2765, №4, 1984.