

УДК 55 : 502.6

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ И ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТЬ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

**М.Г.Ясовеев**

Заведующий кафедрой экономической географии и охраны природы  
Белорусского государственного педагогического университета им. М. Танка,  
Минск, Беларусь

**А.И. Андрухович**

Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка,  
Минск, Беларусь, [annaand@tut.by](mailto:annaand@tut.by)

В результате развития научной мысли на рубеже XIX и XX вв. обобщения разных школ геологов и палеонтологов привели к противоположным выводам о формировании Земли и биосферы, что вызвало необходимость создания научной теории, выходящей за пределы жесткой детерминированности всего сущего. Лайель впервые выдвинул знаменитый тезис об униформизме системы земных изменений. Из этого тезиса следовало, что геологические тела бесконечно повторялись в истории планетного вещества. Механизм действия этого тезиса объяснялся через принцип суммирования отклонений (флуктуаций) в течение длительного времени. Из большого числа отклонений, всегда присутствующих в любой части земной системы, сохраняются путем суммирования лишь те, которые оказались наиболее устойчивыми, т.е. наиболее вероятностными. Следовательно, суммирование понимается как отборочное сохранение флуктуации, а сам принцип – как отражение *вероятностного* подхода в геологии. Из этого принципа следовали эмпирический и теоретический выводы (Holmes, 1986; Woodford, 1985).

Эмпирический вывод вытекал из того заключения, что не всякие флуктуации способны отражаться и сохраняться в геологических отложениях, что и зафиксировано геологами и палеонтологами в геохронологии и геологическом разрезе.

Теоретический вывод из принципа суммирования сделан уже в XX столетии, и он доказывал вероятностное состояние земной системы (Глазовский, 1982).

Вероятностный образ мышления при изучении неорганической природы получил свое выражение в униформистском учении. Но еще большее влияние оказал этот образ мышления при исследовании другой части природы – органического мира. Чарльз Дарвин привел решающие аргументы, объясняющие индивидуализацию (развитие) организмов. В число своих доводов Дарвин включил также принципы униформизма и вероятностный подход.

Флуктуации (отклонения) известны в мире животных и растений как изменчивость. Ч.Дарвин (а также Ж.Б.Ламарк) допускал и безграничную

возможность в этом направлении, указывая, что разные группы организмов характеризуются разной амплитудой изменчивости. Теперь мы знаем, что флуктуации (как неорганическом, так и в органическом мире) – свидетельство высокой энергетической активности систем. Ч. Дарвин приняв во внимание широкий диапазон изменчивости допускал при этом контролирующий механизм – естественный отбор.

Следующий фактор вероятностного подхода – масштабность времени. Дарвин доказывал, что средняя продолжительность жизни видовых форм больше, чем время накопления геологических формаций. Это становление осуществлялось путем суммирования отклонений под контролем естественного отбора. Поскольку суммирование отклонений осуществлялось крайне медленно и непрерывно, то в принципе должен был появиться ряд организмов, показывающий постепенный переход от одного вида к другому. Отсутствие такого ряда организмов Дарвин объяснял, как и Лайель, неполной геологической летописи в земной коре. С позиции вероятностного подхода это означает, что естественный отбор сохраняет формы наиболее приспособленные (Kummel, 1981).

Ситуация изменилась, когда в сферу интересов науки вторгся вероятностный образ мышления, как это произошло в термодинамике. Физический смысл второго закона – тенденция к переходу всех видов энергии в низшую форму – тепловую, а тем самым к деградации. Мерой деградации, как известно, является энтропия. Л. Больцман в 1871 г. Показал, что энтропия отражает наиболее вероятностное состояние на молекулярном уровне и что такое поведение подчиняется статистическим закономерностям (Глазовский, 1982).

Второй закон термодинамики опирался на вероятностный подход. Но положения, которые он допускал, неожиданно для натуралистов XIX в. оказались противоположными тем, к которым пришла теория эволюции, исходившая из тех же предпосылок. В мире животных и растений развитие организмов, идущее в наиболее вероятностном направлении, имеет тенденцию к повышению организованности (прогресс) и, следовательно, к понижению величины энтропии. В конце XIX – начале XX столетия для некоторых исследователей данное обстоятельство служило аргументом в пользу признания особых факторов, не подчиняющихся установленным законам природы и якобы направляющих развитие организмов по заранее предначертанному пути. Эти факторы наделялись надматериальной сущностью и прямо вели к признанию божественной сущности материального мира, что привело многих ученых первой половины XIX в. к признанию идеи существования «Бога», высшего разума и т.д (Klorpf, 1987).

В XX столетии, когда была разработана теория открытых систем, выяснилось, что живая система относится к эквифинальному типу, которая способна понижать энтропию, сохраняя при этом высокую степень упорядоченности и работоспособности (Пригожин, 1986).

Техногенез в природной среде приводит к отклонению от состояния равновесия и необратимым изменениям в природных комплексах и

геосистемах. Причем, как было отмечено выше, длительность процессов техногенеза существенно меньше, чем природных процессов, что создает определенные предпосылки для возникновения нелинейных зависимостей между техногенным вмешательством в природную среду и реакцией последней на них (U.S. Bureau of Mines, 2000).

В этой связи привлекает внимание теория нелинейных систем, разработанная школой Нобелевского лауреата И. Пригожина (Пригожин, 1986; 2000), которая позволяет описать эволюцию нелинейных, существенно неравновесных систем. Ключевым элементом теории – «диссипативные структуры». Они представляют собой развитие флуктуаций в равновесной открытой системе вследствие необратимого перехода в неравновесное состояние. Для их существования необходимы потоки энергии и вещества извне.

Оценка состояния природной среды под воздействием техногенеза, как открытой, существенно неравновесной системы, характеризуется степенью техногенеза. В рамках термодинамической теории эволюции неравновесных систем, критерием оценки выступает энтропия (Геохимия, 1990; Пригожин, 2000).

Начальные стадии техногенеза более отвечают условиям, которые рассматривает равновесная термодинамическая теория устойчивости, разработанная Дж. Гибсом. Критерий устойчивости  $F$ , определяется через термодинамические функции свободной энергии  $F$ , внутренней энергии  $E$ , и энтропии  $S$ .

$$F = E - TS, \quad (1)$$

где  $T$  – абсолютная температура по шкале Кельвина.

И. Пригожиным предложен расширенный вариант II-го закона термодинамики, который описывает как замкнутые, так и открытые системы. Открытая система характеризуется изменением энергии во времени:

$$d = d_e + d_t S, \quad (2)$$

где  $d_e$  – поток энтропии, обусловленный обменом энергией с окружающей средой,  $d_t S$  – производство энтропии в системе вследствие необратимых процессов. Поскольку, из определения вытекает, что  $d_t S \geq 0$  всегда ( $d_t S = 0$  отвечает случаю изолированной системы), ясно, что отклонение от равновесия, в нашем случае развитие техногенеза, будет происходить, как процесс, в котором система достигает более низкого уровня энтропии, чем начальная, то есть:

$$\Delta S = \int_{\alpha} dS < 0, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – эволюционная фила (траектория эволюции системы в фазовом пространстве). И. Пригожин и Г. Николис называют процесс отклонения системы от равновесия «эволюцией системы».

При стационарном снижении энтропии в системе, то есть при постоянном подводе энергии, возникают условия для перехода флуктуации в диссипативную структуру. Условие стационарности будет иметь вид:

$$D_e - d_t S < 0. \quad (4)$$

Стационарность процесса означает, что к системе постоянно существует техногенный приток вещества, энергии и информации. Он, в свою очередь, вызывает поток энтропии  $d_t S$ , который заведомо больше, чем поток энтропии  $d_e S$ , характеризующий природный обмен техногенной системы с окружающей средой. Величину  $d_t S$  нетрудно представить двумя слагаемыми.

Первое слагаемое,  $d_t S_1$ , определяет техногенный поток энтропии, вызванный непосредственно технологическими процессами техногенеза, который состоит из потоков: материального (материалы и оборудование)  $d_t S_2$ , энергетического (электрическая, тепловая, топливо, сжатый воздух)  $d_t S_3$ , информационного для организации первых двух потоков  $d_t S_4$ :

$$d_t S_1 = d_t S_2 + d_t S_3 + d_t S_4 \quad (5)$$

Второе слагаемое,  $d_t S_5$  описывает реакцию на техногенные процессы – потоки энергии и веществ  $d_t S_6$ , и поток отходов  $d_t S_7$ :

$$d_t S_5 = d_t S_6 + d_t S_7 \quad (6)$$

Кроме того, вследствие техногенеза в природной среде совершаются механические  $d_t S_9$ , геохимические и физические процессы,  $d_t S_{10}$  и  $d_t S_{11}$  происходит также вариация физических полей, а их суммарное выражение  $d_t S_8$  равно:

$$d_t S_8 = d_t S_9 + d_t S_{10} + d_t S_{11} \quad (7)$$

С учетом составляющих  $d_t S_1$ ,  $d_t S_3$ ,  $d_t S_8$  в окончательном виде для оценки техногенеза в природной среде выражение имеет вид ( $dS$ )

$$dS - [(d_t S_2 + d_t S_3 + d_t S_4) + (d_t S_5 + d_t S_6 + d_t S_7) + (d_t S_8 + d_t S_9 + d_t S_{10})] < 0 \quad (8)$$

Термодинамическая функция энтропии, как мера упорядоченности системы (мера техногенного вмешательства в природную среду), может быть использована для характеристики равновесной и неравновесной систем. Кроме того, благодаря условию стационарности, выражение (8) позволяет отличить флуктуацию равновесного состояния от диссипативной структуры существенно неравновесной открытой системы. Важным для нашей модели является расширенное толкование II-го закона термодинамики И.Пригожина, в соответствии, с которым поток энтропии в общем случае можно разделить на две составляющие. Одна из них характеризует естественные процессы, другая, - техногенные.

## ВЫВОДЫ.

1. Процесс техногенеза природной среды можно описать в рамках термодинамической теории эволюции неравновесных систем, разработанной школой профессора И.Пригожина. Индикатором данного критерия выступает энтропия. И.Пригожиным предложен расширенный вариант II-го закона термодинамики, которая описывает как замкнутые, так и открытые системы:

$$d = de + d_t S,$$

где  $de$  – поток энтропии обусловленный обменом энергий с окружающей средой,  $d_t S$  – производство энтропии в системе вследствие необратимых процессов. Применяя хорошо известные соотношения А.Эйнштейна «вещество-энергия» и Ф.Больцмана – энтропия, как мера информации, все три потока могут быть вычислены через энтропию.

2. Процессы техногенеза, взаимодействуя и с природной геосистемой, характеризуются открытой системой в состоянии равновесия. Технологические процессы отклоняют систему от состояния равновесия. Степень техногенеза отражает степень неравновесности, глубину техногенных изменений природной среды, количественно отражаемую энтропией неравновесной открытой системы.

3. Предложено в качестве критерия техногенеза применять термодинамическую функцию энтропии, отражающую в соответствии с расширенным II законом термодинамики, степень неравновесности (глубину техногенных изменений).

4. Энтропия неравновесной системы оценивает совокупную глубину преобразований независимо от их природы (механической, физической, химической) и формы (вещество, энергия, информация).

#### Литература

1. Геохимия окружающей среды / Саев Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. – М., Недра. 1990.- 422с.
2. Глазовский, Н.Ф. Техногенные потоки вещества в биосфере / Н.Ф.Глазовский // в кн. Добыча природных ископаемых и геохимия природных экосистем. – М.: Наука, 1982.-278с.
3. Пригожин, И.И. Время, хаос, квант. К решению парадокса времени / И.Пригожин, И Стенгерс. – М.: Эридодиал УРСС, 2000.-240с.
4. Пригожин, И.И. Порядок из хаоса / И.Пригожин, И.Стенгерс. – М.:Прогрес, 1986.-432с.
5. Europe's Environment / Edited by D.Stanners and P.Bourdeau.-European Environment Agency, Copenhagen, 1998.-684p.p.
6. Holmes, A. A revised geological time scaled Traus. Edinburg Geol Soc, 27, 1986.- pp. 183-216
7. Knopf, A. Measuring geological time Sci. Montly , 85. 1987.- pp 225- 236.
8. Kummel, B. History of the Earth W. H. Freeman and Co., San Francisco, 1981.-365p.p.
9. U.S. Bureau of Mines. 2000. Mineral Commodity Summaries, 2001. Washington, D.C: Government Printing Office.-387p.p.
10. Woodford, A. O. Historical geology, Freeman. San Francisco, 1985.-589p.p.