

А.В. Поздняков

Самоорганизация целостных систем как результат спонтанного стремления к равновесию

Институт оптического мониторинга СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 12.11.2001 г.

Рассматриваются методологические аспекты проблемы спонтанной самоорганизации систем различной природы: неопределенность и упорядоченность в их развитии, целесообразность развития и закономерное стремление систем к равновесию. Предложено общее уравнение закономерности и прослеживается ее проявление в формировании различных систем: планет, почвогрунтов, поймы рек, морских и озерных берегов, биологических, социально-экономических и технических. Анализируются особенности саморегуляции систем различной природы.

*Вы верите в Бога, играющего в кости,
я – в полный закон и порядок в мире, кото-
рый существует объективно.*

Альберт Эйнштейн

Введение

Глобальные изменения окружающей среды и климата на Земле, а также возрастающее влияние антропогенных факторов на эти изменения были всесторонне обсуждены и оценены в ряде согласованных мировым сообществом деклараций по перспективам устойчивого развития на Международном форуме в Рио-де-Жанейро в 1992 г. [1]. Активное участие в этом форуме академика В.А.Коптюга, в то время Председателя Сибирского отделения РАН, способствовало расширению научных исследований в этом направлении по программам СО РАН и привело, в частности, к образованию в 1994 г. лаборатории проблем устойчивого развития (ныне лаборатории самоорганизации геосистем) при Институте оптического мониторинга СО РАН.

Основное научное направление лаборатории самоорганизации геосистем, возглавляемой автором данного обзора, с самого начала было сформулировано как исследование общих закономерностей в развитии природы и общества, а также стратегии их взаимодействия в интересах устойчивого развития. Исследования по данной проблеме проводятся при финансовой поддержке различных фондов: РФФИ № 94-05-16328 – «Синергетика геоморфосистем» (1994–1996 гг.), № 01-05-65152 – «Самоорганизация флювиогляциальных катастроф» (2001–2003 гг.); РГНФ № 97-02-02212 – «Синергетика и устойчивое развитие эколого-экономических систем» (1997–1998 гг.); Фонда Сороса САЕ 011 (2000 г.). В 2001 г. получены гранты на проведение экспедиционных научных исследований по этим проблемам: Федеральной целевой программы «Интеграция» № Е 0242 и РФФИ № 01-05-79087.

Существенную роль в проведении исследований играет организованный нами Всероссийский постоянно действующий научный семинар «Самоорганизация

устойчивых целостностей в природе и обществе», на ежегодных конференциях которого обсуждаются общие методологические подходы к исследованиям закономерностей развития систем различной природы, с широким участием отечественных и зарубежных ученых и публикацией полных докладов участников этих семинаров [2–6]. Постоянную финансовую поддержку в работе семинара оказывает РФФИ (гранты на организацию и проведение семинаров 1998–2001 гг.).

Тематика научных проблем лаборатории хорошо согласуется с одним из направлений Программы исследований Отделения океанологии, физики атмосферы и географии РАН – «Географические основы устойчивого развития природы и общества». Направление исследований лаборатории не выходит за рамки основных научных проблем ИОМ СО РАН; результаты, полученные лабораторией, могут представлять интерес и быть полезными для ученых, занимающихся изучением современных природно-климатических изменений регионального или глобального масштаба.

Неопределенность и упорядоченность в развитии систем

В последние десятилетия в общемировоззренческих осмыслениях фундаментальных законов термодинамики распространяется идея развития далеких от равновесия диссипативных структур, разрабатываемая известным физиком И. Пригожиным. Суть выводов, вытекающих из работ И. Пригожина [7, 8] и его многочисленных последователей, основывается на втором начале термодинамики, постулирующем наличие в динамике систем (в особенности в технической деятельности человека) асимметрии – *однонаправленности, необратимости* распределения энергии: рассеивающаяся энергия самопроизвольно не концентрируется и не возвращается в исходное со-

стояние; для этого необходимо произвести работу, затрачивая дополнительную энергию. Полагается, что второе начало прямо связывает возрастание энтропии с «положительным направлением времени», т.е. время необратимо, поскольку необратим процесс, сопровождающийся необратимым же ростом энтропии. Опираясь на выдвинутые положения, И. Пригожин считает, что «...будущему соответствует большее значение энтропии» [7, с. 213], т.е. что во всех системах деградация и дезорганизованность возрастают. В этом лежат корни распространяющихся сейчас категорически утверждаемых положений: «...равновесие не может быть целью сущего, так как оно исключает развитие»; или: «стремление к максимальному беспорядку, ограниченное условиями, есть главный закон природы» [9, с. 43]. Здесь упускаются из виду три важных обстоятельства.

Во-первых, второе начало термодинамики характеризует лишь вторую, заключительную часть цикла развития систем – их деградацию; оно не относится к первой стадии их развития, к тому периоду, когда системы формировались, а их размеры, сложность, разнообразие и другие характеристики по внутреннему содержанию и по форме росли и качественно улучшались. Данный процесс, очевидно, мог продолжаться до некоторого равновесного, установившегося состояния, пока не прекращался или существенно не замедлялся расход Q вещества и информации в потоке из среды. Естественно полагать, что в период самоорганизации систем этот процесс сопровождался уменьшением энтропии (S): $dS \rightarrow 0$. Например, формирование таких мегасистем, как звезды и планеты (Солнце, Земля и др.), на начальной стадии сопровождалось все более нарастающим производством и выделением в пространство тепловой энергии. И, как и должно быть в соответствии с известными законами физики, росла производимая работа $dA(t) \rightarrow A_{\max}$, а $dS(t) \rightarrow \min$, что прямо следует из факта образования высокоупорядоченных сфероидально-симметричных структур планет, с закономерным распределением слоев, плотности вещества и пр. Естественно, что одновременно с этим в нарастающих темпах происходила и диссипация энергии.

Во-вторых, совершенно не учитывается, что формирование и развитие целостных самоорганизующихся структур возможны лишь в одном случае – когда потоки вещества, энергии и информации, поступающие из среды (представляющей собой сочетание множества систем) или от каких-либо отдельно взятых систем, являются упорядоченными. Потоки вещества, энергии и информации, действующие случайным образом, формируют лишь хаос – полную неопределенность развития. Можно утверждать, что все известные законы развития материи потому таковы и являются, что они отображают устойчивые, при одних и тех же условиях одинаково проявляющиеся, детерминированные соотношения. Они характеризуют порядок, своего рода детерминированный аттрактор, к которому закономерно направляется тот или иной процесс.

В-третьих, выводы о диссипации энергии и необратимости развития делаются на основе рассмотрения какой-либо одной системы, нередко технической, искусственной, причем в отрыве от ее создателя – человека, что, если строго подходить к принципам выделения самоорганизующихся систем, недопустимо. Все технические системы, включая и кибернетические, являются частями самоорганизующихся социально-экономических систем, которые организуют и порядок функционирования технических систем, и упорядоченность потоков энергии. Следует подчеркнуть, что всякая упорядоченно организованная целостность диссипирует в пространство упорядоченный поток вещества M , энергии E и информации I – MEI . Это же относится и к техногенным системам, если их рассматривать в неразрывной связи с человеком. А упорядоченные, организованные потоки объективно предполагают формирование на их основе других систем. С учетом данных обстоятельств можно резюмировать, что в конечном итоге потоки вещества, энергии и информации, нанизывая системы различных рангов, образуют замкнутую цепь, представляющую собой не что иное, как систему более высокого иерархического уровня по организованности, генетическому разнообразию, выполняемой работе и пр.

Рассмотрим для примера целостную систему – Земля, с развивающимся на ней сложным разнообразием систем различных рангов, от косных и биокосных до социальных и технических, создаваемых человеком. Земля и все ныне существующие на ней системы на начальном этапе формировались исключительно за счет аккумуляции вещества, энергии, включая и информацию, закодированных в строгой последовательности событий, стратификации вещества. Процесс диссипации энергии (поток q в среду) в этот период самоорганизации систем не мог быть определяющим, поскольку $dQ(t) - dq(t) > 0$. Иначе говоря, на начальной стадии формирования системы в широчайшем масштабе совершалась колоссальная и грандиозная по своим последствиям работа, направленная против рассеяния вещества, на его аккумуляцию и концентрацию, закономерно сопровождавшуюся производством энергии в количествах, превышающих ее диссипацию.

Какими силами была организована эта работа?

При $M > M_{кр}$ ($M_{кр} = 10^{21}$ г – масса вещества, гравитационной энергии которой достаточно для самопроизвольной гравитационной аккумуляции вещества) – это силы преимущественно слабых взаимодействий. При очень больших, критических массах вещества ($M = 0,03-60$ солнечных масс) – это силы слабых и сильных взаимодействий, ведущих к образованию сфероидально-симметричных структур и сопровождавшихся ростом давления и температуры до величин, достаточных для развития термоядерных реакций. На этом этапе процесс протекает необратимо в «положительном направлении времени», по выражению И. Пригожина, но не в соответствии со вторым началом термодинамики: структурная упорядоченность систем, количество тепловой энергии воз-

растали, росла и производимая работа, и все это совершалось с уменьшением энтропии.

Естественно, что одновременно и неизбежно происходила диссипация вещества и энергии, но она протекала на фоне абсолютно преобладающей их аккумуляции.

Справедливо допускать, что Земля, как спонтанно самоорганизующееся структурное образование, относится к классу замкнутых систем; по крайней мере, на текущем этапе развития она получает энергии и вещества больше, чем выделяет в среду; обменивается со средой она преимущественно энергией. Количество поступающего на Землю вещества в рамках характерного времени развития на Земле систем пренебрежимо мало. Главным источником вещества для земных систем (систем косной среды, экосистем, систем цивилизации) являются земная кора, атмосфера и гидросфера. Основными, определяющими развитие систем Земли источниками энергии являются солнечная тепловая и лучистая энергия и эндогенная энергия Земли. Судя по скорости изменения Солнца (за 5 млрд лет его масса уменьшилась всего на 0,01%), количество поступающей тепловой солнечной энергии на Землю за всю ее историю существенно не изменилось. Практически неизменной осталась и светимость Солнца.

Следовательно, можно полагать, что формирование и развитие геооболочек Земли, определяющих образование и существование экосистем, осуществлялись при постоянном внешнем источнике энергии. Несомненно, что такое состояние сохранится в течение последующего миллиарда лет.

Итак, подчеркнем еще раз, что от Солнца к Земле поступает высокоупорядоченный поток тепловой и лучистой энергии; упорядочен и эндогенный поток энергии самой Земли, за счет которого осуществляется работа по горообразованию. Упорядоченным, закономерным является и процесс пространственной изменчивости насыщения влагой атмосферы и формирования циклонов, в сочетании с рельефом поверхности Земли, выступающий в качестве главного условия концентрации осадков в водные потоки и образования высокоорганизованной водоносной системы Земли. А она является одним из неисчерпаемых и самых чистых источников кинетической энергии.

«Мы рассматриваем себя как высокоразвитую разновидность диссипативных структур и «объективно» обосновываем различия между прошлым и будущим», – пишет И. Пригожин [7, с. 214], но не учитывает, что мы должны рассматривать и себя, и любую другую целостную организацию одновременно как ассоциативную структуру-ансамбль, на начальных стадиях формирования и развития которой над диссипацией преобладают интеграция и концентрация *MEI*. Собственно, за счет этого и происходит образование целостных структур, перерабатывающих поступающие из среды *MEI* в упорядоченном потоке (следовательно, *негэнтропийном*) в две качественно различающиеся формы:

1) новообразованный упорядоченный и, следовательно, тоже негэнтропийный поток q , выделяемый в среду, количественно равный $q = Q - M$, где Q – расход *MEI* во входящем в систему потоке; M – расход вещества, энергии и информации на организацию и развитие самой системы;

2) вторая форма представляет собой саму материальную систему, занимающую определенный объем среды со своими индивидуальными свойствами, отражающимися на состоянии и динамике среды (системы более высокого ранга), т.е. она становится составной частью структуры среды.

Таким образом, упорядоченный поток *MEI* Солнца на Земле, по существу, не рассеивается, а концентрируется в бесконечном множестве разнообразных систем, начиная от экосистем суши и акваторий и кончая микроорганизмами и бактериями и практически полностью поглощается многообразием систем, функционирующих за счет друг друга и друг для друга. И, таким образом, все целостные структурно-упорядоченные самоорганизующиеся образования надо называть *диссипативно-интеграционными* системами.

Со вторым началом термодинамики И. Пригожин связывает «положительную» направленность времени – в сторону роста энтропии [7, 8]. Однако «стрела времени» определяется не необратимостью и законом возрастания энтропии, а формированием *нового*, отличного от *старого*. *Стрела времени* есть не что иное, как *необратимое отрицание старого необратимо формирующимся новым*.

Именно благодаря этому, по моему глубокому убеждению, в мироздании существует порядок, а хаос возникает вследствие замены устаревшего, не соответствующего создавшимся условиям среды порядка – новым. Он характеризует, таким образом, переход системы из одного состояния в качественно другое.

Опираясь на изложенные выше положения, можно констатировать, что в формировании и развитии всех материальных (и даже абстрактных) самоорганизующихся целостностей, включая планетарные системы, одновременно протекают два процесса: интеграция и аккумуляция вещества, энергии и информации и формирование потока диссипации *MEI* (формирование хаоса). При этом любая целостная система, включая и абстрактные идеи, обладает имманентно присущим ей свойством целесообразности, состоящей в спонтанном и закономерном стремлении к достижению равновесия: динамически подвижного термодинамического, в виде так называемого равновесного режима, или статического.

Закономерность спонтанного стремления к равновесию формулируется следующим образом: *динамика размеров ($M(t)$) целостных систем пропорциональна разности расходов вещества, энергии и информации в поступающем потоке $Q(t)$ из среды (F -потоке) и выделяемом $q(t)$ в среду (D -потоке)*. В дифференциальной форме данная закономерность записывается в следующем виде:

$$dM/dt = Q(M, t) - q(M, t). \quad (1)$$

Проявление стремления к равновесию в динамике систем косной природы

Формирование планет

Мною впервые выдвинуто положение [10, 11], согласно которому условия для формирования планет создавались только в плоскости эклиптики, где газопылевое облако под влиянием гравитации со стороны Солнца структурировалось в спиральные рукава. Все частицы из краевых частей облака двигались к центру тяготения по спиральным траекториям. Поскольку масса $m(t)$ формирующихся планет (планетезималей) и ускорение $g(t)$ по мере движения возрастали, то радиус $R(t)$ спирали уменьшался до некоторой величины $R = \text{const}$, соответствующей условиям

$$GMm/R^2 - mv^2/R = 0. \quad (2)$$

Здесь первое слагаемое – сила гравитации, второе – центробежная сила. Естественно, что до достижения данного условия $g(t)$, $m(t)$ и $R(t) \rightarrow \text{const}$. Уравнение перехода спиральных траекторий планет в круговую таково:

$$dR/dt = F(R, t) - F_c(g, m), \quad (3)$$

где $F(R)$ – сила тяготения, создаваемая Солнцем; $F_c(g, m)$ – центробежная сила формирующейся планеты. Очевидно, что предельный цикл планет, выход на круговую орбиту, был возможен в случае достаточности для этого расстояния от места их зарождения до Солнца. В противном случае тела падали на Солнце.

Аналогично протекал и процесс формирования спутников планет – центров аккреции третьего порядка.

Формирование слоя почвогрунтов вследствие выветривания горных пород и денудации

Пусть H – мощность почвогрунтов; Q – количество обломочных частиц, образующихся вследствие выветривания и формирующих слой $\Delta H(t)$ почвогрунтов (по существу, это расход горных пород, за счет чего высота поверхности понижается); q – расход вещества (денудация) в образовавшемся слое ΔH . Тогда, учитывая, что Q и q являются функцией высоты H и времени t , динамика толщины слоя будет описываться уравнением

$$dH/dt = Q(H, t) - q(H, t). \quad (4)$$

Известно, что $Q(H, t)$ затухает по логистическому закону: убывает пропорционально разности некоторой предельной величины $H_{\text{пр}}$ и текущей – $\Delta h(t, H)$. Так, $dQ/dt = H_{\text{пр}} - h(t)$, т.е. убывает, стремясь к нулю, а $q(H, t)$ растет с увеличением H : $q = pH^3 \sin a / 3\lambda$ (здесь p – плотность рыхлого вещества, λ – вязкость, a – наклон поверхности). Учитывая, что прирост мощности слоя почвогрунтов $\Delta h(t, H) \rightarrow 0$, а $\Delta q(t, H) \rightarrow \text{max}$, наступает такой

момент, когда при непрекращающихся процессах выветривания и денудации $Q(H, t) - q(H, t) \rightarrow 0$; $dH/dt \rightarrow 0$. Модель процесса описана мною в [12–14].

Динамика поймы

Пойма реки представляет собой периодически затапливаемую в паводки поверхность. Динамика поймы неразрывна с динамикой русла. Она формируется лишь в случае одновременного горизонтального и вертикального смещения русла реки, т.е. при $H = f(x, y)$ (здесь x, y – горизонтальные и вертикальные координаты). Если $dy/dt = 0$ (дно русла не понижается), то река, смещаясь в горизонтальной плоскости, оставляет за собой низкую поверхность, затапливаемость которой паводками (суммарная продолжительность затопления) изменяется от максимальной величины в начальный момент времени t_0 до нуля в t_n . Точно так же, по понятным причинам, меняется суммарная величина аккумулируемого вещества на поверхности поймы. Таким образом, высота $H(t)$ поймы растет пропорционально разности количества $Q(t)$ материала, выпадающего в осадок (мощность наилка на единице площади) за период затопления поймы и удаленного $q(t)$ за время между паводками. И в этом случае, по мере приближения высоты $H(t)$ поймы к предельной $H_{\text{пр}}$, равной максимальной высоте паводков – $\Delta Q(t) \rightarrow 0$, а $\Delta q(t) \rightarrow \text{max}$. Отсюда легко определяется динамика расходов вещества в обоих потоках и уравнение изменения высоты поймы в течение времени имеет вид [15, 16]:

$$dH/dt = Q(H, t) - q(H, t). \quad (5)$$

Данная модель, принципиально не меняясь, позволяет учитывать врезание реки, аккумуляцию материала на пойму со склонов и денудацию с поверхности поймы, а также динамику подвижных пойменных островов и растительных сообществ на них [17]. Например, их возраст определяется уравнением (5) и периодом T движения острова.

Формирование эрозионно-денудационного рельефа

Динамика форм рельефа определяется направленными изменениями их объема V и площади S поверхности, при известных физических свойствах вещества, из которых следуют морфометрические показатели. В силу того что скорость роста размеров форм рельефа определяется расходами P и Q вещества, соответственно в F - и D -литопотоках (F – глубинный литопоток, D – экзогенный литопоток), динамика геоморфосистем описывается уравнением [18, 19]:

$$dV/dt = P(S, t) - Q(S, t). \quad (6)$$

Если в качестве размеров экосистемы брать объем V вещества, заключенного в формах рельефа, то, получим следующую систему уравнений [20, 21]:

$$\begin{cases} \frac{dV(t)}{dt} = P - Q(t), \\ \frac{dQ(t)}{dt} = kS^m[V(t)], \end{cases} \quad (7)$$

где k – коэффициент денудации; m – дробный показатель фрактального роста площади поверхности рельефа.

Данная система является нелинейной в силу нелинейности изменения площади S поверхности в зависимости от объема форм.

Формирование морских и озерных берегов

Показательным примером действия рассматриваемой закономерности является развитие морских берегов, озер и искусственных водохранилищ. Вследствие морских трансгрессий (или создания искусственных водохранилищ) усиливаются абразия берегов и аккумуляция обломочного материала в лагунах и заливах. При этом формируется серия штормовых валов, расстояние между которыми закономерно убывает до нуля (рис. 1). В данном примере заполнение

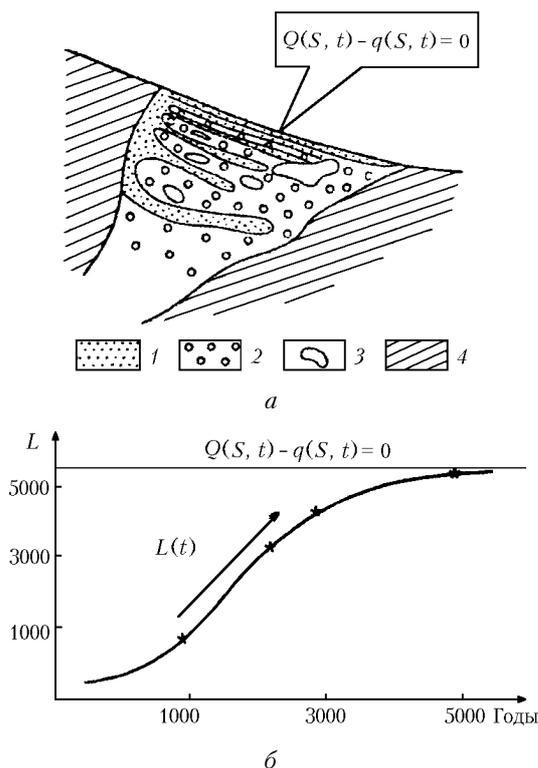


Рис. 1. Формирование динамически равновесного берега в зал. Мухтель (Охотское море): a – схема расположения штормовых валов: 1 – штормовые аккумулятивные валы; 2 – аккумулятивная равнина; 3 – озера; 4 – горы; b – график изменения расстояния N между валами в течение времени лагуны осуществлялось в течение примерно 5000 лет в соответствии с уравнением:

$$dS/dt = Q(S, t) - q(S, t), \quad (8)$$

где S – площадь поверхности прибрежной отмели лагуны единичной ширины.

В уравнении (8) $Q(S, t)$ характеризует изменение положения береговой линии вследствие накопления обломочного материала в лагуне; берег наступает на море. Но одновременно он подвергается с возрастающей степенью интенсивности абразии, сопровождающейся вдольбереговым переносом материала $q(S, t) \rightarrow \max$. Поэтому в лагуне материала накапливается с течением времени меньше, а расстояние между аккумулятивными валами сокращается и система переходит в установившийся динамически равновесный режим развития, т.е. объективно $dS/dt \rightarrow 0$, но никогда состояние равновесия не достигается.

Использование данной закономерности позволяет давать достаточно точный прогноз абразии берегов искусственных водохранилищ. На основе этой методологии под руководством автора был составлен прогноз абразионной переработки берегов Зейского и Бурейского водохранилищ [22, 23].

Формирование аккумулятивных равнин при заполнении тектонических впадин

Как видно из рис. 2, заполнение тектонических впадин во времени затухает и мощность M обломочного материала приближается к постоянной величине, определяемой тем, сколько материала во впадину поступает и сколько удаляется.

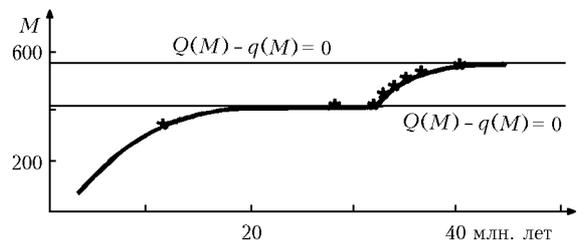


Рис. 2. График изменения мощности отложений в Средне-Амурской впадине. Скорость накопления осадков замедлялась в соответствии с $dM/dt = Q(M, t) - q(M, t)$. Перелом графика характеризует изменение режима аккумуляции осадков, обусловленное тектоническим прогибанием впадины

Из графиков следует, что состояние, близкое к динамическому равновесию, в олигоцене прерывалось вследствие изменения тектонических и климатических условий. Однако после этих изменений процесс заполнения впадин осуществлялся закономерно и был направлен к достижению динамического равновесия в новых условиях. Процесс заполнения впадины, так же как и динамика многих других геологических и геоморфологических процессов – формирование стратовулканов, гор и долин и пр., описывается аналогичными приведенным выше уравнениями.

Проявление стремления к равновесию в динамике биологических систем и цивилизации

Динамика биологических систем

По-видимому, одними из первых моделей, которые для анализа динамики популяций использовали уравнение динамики сложных саморегулирующихся систем с нелинейными обратными связями, были модели В. Вольтерра и А. Лотка, предложенные в 30-х гг. XX в. [24], а также модели И.А. Полетаева [25]. Это модели конкуренции популяций в условиях ограниченных ресурсов питания, широко известные как модели «хищник – жертва»:

$$\begin{aligned} dN_1/dt &= k_1N_1 - k_1 N_1N_2, \\ dN_2/dt &= k_2N_2 - k_2 N_1N_2, \end{aligned} \quad (9)$$

где N_1 – численность некоторого вида животных, выступающих в качестве ресурса питания популяции N_2 хищников; k_1 и k_2 – коэффициенты, характеризующие скорость размножения популяций N_1 и N_2 соответственно.

Система уравнений (9) описывает динамику численности популяций «жертвы» и «хищника» в их взаимодействии. Данная модель позволяет учитывать варианты отношений различного рода биосистем, например внутривидовую конкуренцию как представителей «жертвы», так и «хищника». С их помощью можно рассматривать и более сложные модели динамики биоценозов, с учетом расходов не только питательных веществ, но и энергии.

Модели развития цивилизации

В последние 30 лет нарастает интерес к моделям глобального развития цивилизации. Активную дискуссию вызвали модели, разрабатываемые в Массачусетском технологическом институте под руководством Дж.В. Форрестера [26], а затем во многих других научных коллективах. Наибольшую известность получили работы Римского клуба.

Системно-динамический подход Форрестера в описании глобальной социально-экономической системы основан на представлении ее в виде множества сообщающихся между собой резервуаров, через которые протекают различные виды жидкости, имитирующие вещества, энергию и информацию. Количество вещества M в каком-либо из резервуаров (аналогов конкретных социально-экономических систем) в каждый момент t определяется разностью расходов вещества: P_i – поступающего из среды и из других резервуаров (социосистем) и q_i – выделяемого в среду и в другие резервуары (социосистемы) [26, 27].

Таким образом, общее уравнение динамики различных показателей развития цивилизации имеет вид

$$dM/dt = P_i - q_i, \quad (10)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$.

Например, уравнением для капитала K (равно как и для производства сельскохозяйственной продукции, загрязнения и т.д.) является

$$dK/dt = K_2 - K_1, \quad (11)$$

где K_2 – прирост основных фондов (капитала, любой другой продукции), пропорциональный численности населения; K_1 – убыль капитала, вызываемая износом и старением. Аналогичным уравнением описывается демографический процесс.

Модели функционирования искусственных (технических) систем

Можно без преувеличения сказать, что прогрессивное развитие цивилизации (технические изобретения, вплоть до современных кибернетических систем, атомных электростанций, ядерных зарядов, запуск искусственных спутников и пр.) определяется границами вышеописываемой объективно действующей закономерности. Человек, являясь продуктом природы, в своей интеллектуальной и практической деятельности также подчиняется генетически приобретенной всеобщей закономерности развития, и он закладывает ее, часто неосознанно, в основу функционирования изобретений, искусственных технических систем.

В обобщенной энергетической форме уравнение динамики регулируемых различных технических систем имеет вид [28, 29]:

$$Bdy/dt = E_1 - E_2, \quad (12)$$

где Bdy/dt – аккумулируемая в системе энергия; B – постоянная системы; y – регулируемый параметр; E_1 и E_2 – подводимая и отводимая энергия.

Аналогичными уравнениями описываются:

$$Jd\omega/dt = M_d - M_c$$

– динамика технических систем с крутящим моментом;

$$dG/dt = Q_n - Q_p$$

– ресивер определенного объема с коммуникациями подвода и отвода газа;

$$FgdH/dt = Q_n - Q_p$$

– технические системы с регулированием уровней жидкости в резервуарах и др.

Сами по себе технические системы не относятся к числу самоорганизующихся. Тем не менее ввиду того, что они являются частью единственного в своем роде «симбиоза» интеллектуальной антропогенной системы и технической, их необходимо рассматривать как сложную антропогенно-техногенную самоорганизующуюся систему, которая обладает всеми признаками самоорганизации: спонтанное, генетически заложенное в человеке стремление к повышению качества порядка и уменьшению энтропии в организуемой техногенной социально-экономической системе.

Особенности регулирования систем различной природы

Вышеприведенные уравнения, описывающие динамику систем, являются уравнениями самоорганизации целостных систем: слагаемые в правой части находятся в функциональной зависимости от самих регулируемых характеристик систем, и так как второе слагаемое всегда стремится по своей величине к первому слагаемому, то эта функциональная зависимость, выступая в качестве обратной отрицательной связи, ингибирует процесс – замедляет рост вещества, энергии и информации в системе, приводит их массу к некоторой динамически равновесной величине, мало меняющейся в течение времени. Система переходит в разряд самоорганизующихся – единственной из всех систем, способных к увеличению своей упорядоченности за счет изъятия вещества, энергии и информации и порядка (неэнтропии) из среды. Учитывая данные обстоятельства, мы относим геосистемы (системы косной среды) к самоорганизующимся. Ярким примером их являются формы рельефа, показанные на рис. 3 [30], или прибрежные отмели, сформированные вследствие абразии берегов. В этом случае хаотический, совершенно неупорядоченный режим формирования берегов (или заболоченной равнины, рис. 3) на конечных стадиях переходит в режим структурной, удивительно стройной упорядоченности.

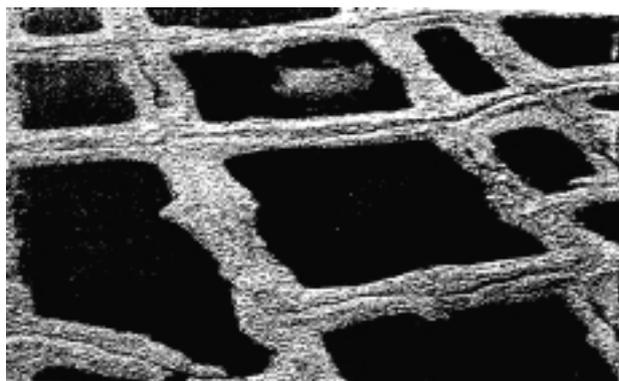


Рис. 3. Структурная самоорганизация ячеек, подобных ячейкам Бенара, в обводненных почвогрунтах вследствие высокоупорядоченных суточных колебаний температуры с переходом через 0° (фото А.Л. Уошборна [30])

Было бы ошибочным полагать, основываясь на идентичности уравнений динамики разных систем, что механизмы их саморегуляции и самоорганизации не имеют принципиальных различий. Природные, естественным образом формирующиеся системы не имеют специальных регулирующих органов для определения величины рассогласования между заданным и текущим состояниями системы, для определения количества поступающих в систему и выводимых ею в среду веществ и энергии. Функции регуляторов в природных системах выполняют ее собственные размеры H , связанные обратными отрицательными и положительными связями с процессом поступления вещества и энергии таким образом, что с увеличением H уменьшается количество подводимой в систему энергии.

Важно заметить и особо подчеркнуть, что аналогичные принципы функционирования действуют и в развитии социально-экономических систем. В них тоже в качестве регулятора развития выступают собственные размеры. Иначе говоря, социально-экономические системы, развиваясь, растут в соответствии с имеющимся упорядоченным, неэнтропийным потоком ресурсов из среды – природной и той, которая создается глобальной совокупностью систем.

Тем не менее к числу самоорганизующихся можно отнести лишь те социосистемы, развитие которых сопровождается увеличением собственной структурной упорядоченности и $dS \rightarrow 0$. Очевидно, только такую систему можно считать истинно прогрессивной. Однако согласно законам термодинамики в замкнутой системе, каковой является Земля, развитие социосистем с неограниченным ростом потребления вещества, энергии и информации, увеличением их размеров и разнообразия заведомо увеличивает энтропию систем, образующих среду. Отсюда следует, как кажется, парадоксальный вывод: цивилизация в целом не является самоорганизующейся системой.

И в самом деле, естественным образом развивающиеся самоорганизующиеся природные системы не повышают энтропию экосистемы Земли. Есть достаточно данных о том, что они ее уменьшают, повышая возможность устойчивого развития. Всякий раз, когда развитие природных систем прерывалось глобальными катастрофами, экосистема Земли не только восстанавливалась, но и развивалась направленно к состоянию телеологической функциональной упорядоченности. Данный процесс возможен в единственном случае: если система (в данном случае – это геоэкосистема) получает из среды энергию, вещество и *неэнтропию*, т.е. то, что содержит в себе и несет порядок. А цивилизация, по заложенным природой принципам самоорганизации и функционирования, предполагающим движение ее к устойчивому, динамически равновесному состоянию, при всем при этом энтропию геоэкосистем и собственную заведомо увеличивает.

Это противоречие не является неразрешимым и необъяснимым. Современное динамическое состояние цивилизации является временным, обусловленным некоторым запаздыванием развития обратных отрицательных связей. При внимательном рассмотрении современных общемировых тенденций наблюдается заметный рост различных отрицательных регулирующих воздействий.

Спонтанное стремление к равновесию – движущая сила развития

Следуя логике приведенных рассуждений, нельзя обойти вниманием широко дискутируемый в последние годы вопрос о роли состояния равновесия в динамике систем.

Считается [8, 9, 31, 32], что определяющими в развитии целостных систем являются бифуркации, хаотический режим, а объективное стремление к рав-

новесию характеризует нарастающую деградацию систем. При этом стало тенденцией под бифуркациями понимать «поворотные пункты развития», выбор дальнейшего пути развития, осуществляющийся под влиянием малейших случайных воздействий. Бифуркации также связывают с чувствительностью к начальным условиям и формированием так называемых «странных аттракторов», описанных Лоренцем в 1963 г. Необходимо предостеречь от существенной, на наш взгляд, ошибки – гипертрофированного преувеличения роли бифуркации и начальных условий развития сложных самоорганизующихся систем. В математических моделях развития систем имеется возможность отвлечься от реальных ситуаций и, меняя некоторые определяющие их параметры, прийти к выводу о роли «взмаха крыла бабочки» в развитии сложных систем. Абстрактные математические модели формирования «странных аттракторов» и детерминированного хаоса как бы подводят фундаментальную базу под известные положения Хайека и других экономистов о невозможности прогнозирования развития сложных систем, таких, например, как социально-экономические. Увлекаясь абстрактными математическими моделями, игнорируют факты и теорию кибернетических систем, систем авторегулирования.

Все сложные саморегулирующиеся и самоорганизующиеся системы развиваются целесообразно, что является их имманентным свойством. Человек создает различные технические системы: самолеты, ракеты, спутники и др., движущиеся в соответствии с заданной им целью и для достижения цели. Абсолютно все они чувствительны к начальным условиям, и с самого начала их заданная и текущая траектории начинают разбегаться, но этот разбег гасится, в силу непрерывно действующего регулятора, корректирующего траекторию движения системы. И если бы не было такой возможности, то человечество не достигло бы тех грандиозных результатов, которыми оно обладает. Стаи перелетных птиц также никогда не достигли бы своих целей, не будь у них способности к корректировке пути в соответствии с заданным состоянием.

Для систем с развитыми обратными отрицательными связями хаотическая динамика не является характерной чертой, что, вообще говоря, подтверждается наличием устойчивых фрактальных закономерностей, проявляющихся как в форме (во фрактальной геометрии), так и в содержании – во фрактальной динамике, например, в автомоделном режиме развития систем. Хаотическая динамика возникает, на наш взгляд, вследствие нарушения иерархии систем, нарушения фрактальных соотношений, но не потому, что фрактальная смена состояний закономерно, самопроизвольно и объективно переходит в динамический хаос. Хаос, описываемый математическими моделями, может развиваться в абстрактных системах, если изменение коэффициентов – некоторых постоянных величин, характеризующих специфику воспроизводства систем, выходит за пределы естественной динамики, существующие благодаря обратным отрицательным связям. Так, постепенное увеличение коэффициента параметра

роста в модели «хищник–жертва» Ферхюльста–Перла, при достижении некоторого предельного значения, ведет к хаотизации процесса воспроизводства численности особей и хищников, и жертв [33].

Все множество событий, сопровождающих образование порядка и хаоса, свидетельствует об одном: в состоянии хаоса когерентность частиц, согласованность их движения невозможны. Их синергизм возникает в результате действия порядка более высокого ранга и асимптотически, с насыщением растет, приближаясь к состоянию динамического равновесия. И лишь при достижении его все элементы системы «видят» друг друга. Более того, в состоянии динамического равновесия взаимообусловленность и согласованность поведения элементов системы находятся в наиболее совершенной форме по сравнению с начальным периодом разрушения хаоса и формирования порядка. Другое дело, что с момента начала формирования порядка и до стадии равновесия происходят самые существенные изменения формирующейся системы, а с приближением к равновесию, к максимально возможной при заданных условиях согласованности, эти изменения уменьшаются, и в состоянии динамического равновесия они пренебрежительно малы. Тем не менее в этом состоянии происходит обмен веществом, энергией и информацией между системой и средой на уровне, достаточном для поддержания данного состояния неизменным. Видимо, разногласия во взглядах на эти явления следуют из того, что в условиях состояния равновесия достаточно трудно или невозможно раскрыть динамику переходного режима развития от хаоса к порядку и от него к хаосу. Однако надо признать, что состояние равновесия для всех самоорганизующихся систем является аттрактивной целью, а в технических системах – заданным состоянием.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 01-05-65151, и ФЦП «Интеграция», грант Е 0242.

1. *Программа действий*. Повестка дня на 21 век и другие документы в Рио-де-Жанейро в популярном изложении. Женева: Центр «За наше общее будущее», 1993. 70 с.
2. *Порядок и хаос в развитии социально-экономических систем*: Материалы 2-го науч. семинара. Томск: Изд. ИОМ СО РАН, 1998. 130 с.
3. *Проблемы собственности на природные ресурсы*: Материалы 1-го науч. семинара. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. 82 с.
4. *Принцип неопределенности и прогноз развития социально-экономических систем*: Материалы 3-го науч. семинара. Томск: Спектр, 1999. 164 с.
5. *Самоорганизация и организация власти*: Материалы 4-го Всерос. науч. семинара. Томск: Спектр, 2000. 210 с.
6. *Фракталы и циклы развития систем*: Материалы 5-го Всерос. науч. семинара. Томск: Изд. ИОМ СО РАН, 2001. 187 с.
7. *Пригожин И.* От существующего к возникающему: Время и сложность в физических науках / Пер. с англ. М.: Наука, 1985. 328 с.
8. *Пригожин И., Стенгерс И.* Время, хаос, квант. М.: «Прогресс», 1999. 266 с.

9. *Хазен А.М.* Законы природы и «справедливое общество». М., 1998. 112 с.
10. *Поздняков А.В.* Механизм закручивания газопылевой туманности в спираль и формирование солнечной системы // Пробл. самоорганизации. Вып. I: Самоорганизация геоморфосистем. Томск: Изд. КТИ «Оптика» СО РАН, 1994. С. 23–37.
11. *Поздняков А.В., Поздняков А.А.* Гипотеза самоорганизации планет, структуры и динамики Земли // Внутреннее ядро Земли. Геофизическая информация о процессах в ядре: Материалы конф. М.: ОИФЗ РАН, 2000. С. 28.
12. *Поздняков А.В.* К теории динамического равновесия рельефообразующих сил // Геоморфология. 1973. № 4. С. 92–100.
13. *Поздняков А.В.* Основной закон развития рельефа // Структурная геоморфология горных стран. М.: Наука, 1976. С. 57–62.
14. *Поздняков А.В.* Динамическое равновесие в рельефообразовании. М: Наука, 1988. 207 с.
15. *Поздняков А.В., Ройхваргер З.Б.* Математическая модель развития склона при вязко-пластическом смещении обломочного материала // Геоморфология. 1980. № 4. С. 54–60.
16. *Поздняков А.В., Махинов А.Н., Ушаков А.В.* Математическая модель формирования поймы и некоторые вопросы мелиорации земель пойменных островов Амура // Исслед. русловых процессов для практики народного хозяйства. М.: МГУ, 1983. С. 133–134.
17. *Поздняков А.В., Махинов А.Н., Ушаков А.В.* Механизм формирования подвижных островов в руслах рек // География и природ. ресурсы. 1986. № 4. С. 62–65.
18. *Поздняков А.В.* Авторегуляция и динамическое равновесие в рельефообразовании // Основные пробл. теоретич. геоморфологии. Новосибирск, 1985. С. 39–48.
19. *Поздняков А.В., Черванев И.Г.* Самоорганизация в развитии форм рельефа. М.: Наука, 1990. 204 с.
20. *Поздняков А.В., Лялин Ю.В., Тихоступ Д.М.* Формирование поверхности равновесия и фрактальные соотношения в эрозионном расчленении // Самоорганизация геоморфосистем (Пробл. самоорганизации, вып. 3). Томск, 1996. С. 36–48.
21. *Лялин Ю.В., Поздняков А.В.* Фракталы и автоколебания в геоморфосистемах // Геоморфология Центральной Азии: Материалы XXVI Пленума Геоморфолог. комиссии. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та. 2001. С. 141–144.
22. *Поздняков А.В., Махинов А.Н., Петров Е.С., Готванский В.И.* Прогноз изменения природной среды в прибрежной зоне Зейского водохранилища: Науч. отчет о результатах НИР по теме исслед. Хабаровск, 1976. 170 с.
23. *Поздняков А.В., Махинов А.Н., Петров Е.С., Готванский В.И.* Прогноз изменения природной среды под влиянием Бурейского водохранилища: Науч. отчет о результатах НИР по теме Ленгидропроекта. Хабаровск: ХабКНИИ ДВО АН СССР, 1979. 120 с.
24. *Гильдерман Ю.И.* Лекции по высшей математике для биологов. Новосибирск: Наука, 1974. 408 с.
25. *Полетаев И.А.* О математических моделях элементарных процессов в биогеоценозах // Пробл. кибернетики. 1966. Вып. 16. С. 62–66.
26. *Форрестер Дж.В.* Мировая динамика. М.: Наука, 1978. 164 с.
27. *Егоров В.А., Каллистов Ю.Н., Митрофанов В.Б., Пионтковский А.А.* Математические модели глобального развития. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 191 с.
28. *Крутов В.И., Спорыш И.П., Юношев В.Д.* Основы теории автоматического регулирования. М.: Машиностроение, 1969. С. 358.
29. *Шински Ф.* Системы автоматического регулирования химико-технологических процессов: Пер. с англ. М.: Химия, 1974. 336 с.
30. *Уошборн А.Л.* Мир холода. Геокриологические исследования: Пер. с англ. М.: Прогресс, 1988. 381 с.
31. *Князева Е.Н., Курдюмов С.П.* Синергетика как новое мировоззрение: диалог с И.Пригожиным // Вопр. филос. 1992. № 12. С. 3 – 20.
32. *Николис Г., Пригожин И.* Познание сложного. Введение: Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 344 с.
33. *Пайтген Х.-О., Рихтер П.Х.* Красота фракталов. Образы комплексных динамических систем: Пер. с англ. М.: Мир, 1993. 176 с.

A.V. Pozdnyakov. Self-organization of complete systems as a result of spontaneous striving to equilibrium.

Methodological aspects are considered of the problem of spontaneous self-organization of systems having different origins: uncertainty and ordering in their development, development expediency, and regular striving of the systems for equilibrium. The general equation of regularity is suggested. The manifestation of the regularity is traced down in forming different systems, such as planets, soils, river floodlands, sea and lake shores, biological, social-economic, and technical systems. The self-regulation peculiarities of systems having different origin are analyzed.