

УДК 910.1

## К ВОПРОСУ О ВОЗМОЖНОСТИ ФИЗИЧЕСКОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

© 2001 г. В. Г. Горшков, А. М. Макарьева

Представлено академиком К.Я. Кондратьевым 01.08.2000 г.

Поступило 18.09.2000 г.

Как известно, замкнутые системы стремятся перейти в устойчивое состояние минимальной упорядоченности (максимальной неупорядоченности – энтропии). В замкнутых системах невозможны процессы спонтанного увеличения упорядоченности (уменьшения энтропии). Этот закон носит название второго начала термодинамики. Открытые физические системы, существующие в потоках внешней энергии, могут повышать свой уровень упорядоченности. Такие процессы называют физической “самоорганизацией”.

Далекое от равновесия состояния физических систем с накопленной потенциальной энергией могут генерировать мощные лавиноподобные упорядоченные процессы, вызванные стремлением системы перейти к равновесному состоянию. К таким процессам относятся собственно лавины, образующиеся за счет накопленной в горах гравитационной энергии снежных масс; циклоны и смерчи, мощность которых определяется выделением энергии конденсации атмосферного водяного пара, накопленного в предшествующих процессах длительного испарения воды; землетрясения, энергия которых была накоплена в процессе деформационных сдвигов земной коры и др. Далекие от равновесия состояния некоторых физических систем с накопленной потенциальной энергией называются состояниями “самоорганизованной критичности” [1, 2].

Характерной особенностью состояний физической самоорганизации является жесткая связь вновь возникающего уровня упорядоченности с величиной и характером внешнего потока энергии. Помещая систему в определенные внешние потоки энергии, получаем строго определенное распределение по возможным состояниям физической самоорганизации. Например, размер и количество вихрей (водоворотов) при турбулент-

ном течении воды в реках определяются мощностью водяного потока. Подобным же образом вероятность реализации, характер и особенности упорядоченных процессов, возникающих при распаде начального физического состояния самоорганизованной критичности, полностью определяются характером и особенностями потенциальной энергии, накопленной в начальном состоянии.

В состояниях физической самоорганизации все вновь возникающие упорядоченные физические состояния непрерывно распадаются, а их упорядоченная энергия подвергается диссипации. Сохранение упорядоченного физического состояния в заданном внешнем потоке энергии связано с непрерывной генерацией упорядоченных структур взамен аналогичных распавшихся. После прекращения подачи энергии или распада накопленной потенциальной энергии все самоорганизованные состояния распадаются, и система постепенно переходит в состояние максимальной неупорядоченности. В этом смысле слово “самоорганизация” неверно характеризует процессы и состояния в физических системах: они не самоорганизованы, а организованы величинами и характером внешних потоков энергии и запасенной потенциальной энергии.

Процессы физической самоорганизации и распада состояний самоорганизованной критичности описываются нелинейными уравнениями физической кинетики [2, 3]. В настоящее время многие исследователи надеются описать процессы биологической эволюции и многие характеристики экологических и биологических систем аналогичным образом [4–6]. Цель настоящей работы – показать принципиальные различия в организации физических и биологических (экологических) систем.

Упорядоченность всех физических систем окружающей среды в естественных внешних потоках энергии характеризуется макроскопическими степенями свободы (например, числом вихрей при турбулентном течении жидких и воздушных масс). Каждая степень свободы описывается не-

кой измеримой величиной (например, размер турбулентного вихря, скорость вращения и пр.), которая может принимать определенные значения. С учетом конечности разрешающей способности любого измерения число всех возможных значений, характеризующих каждую степень свободы, является ограниченным.

Упорядоченность (информационная мера) системы пропорциональна числу степеней свободы с однозначно определенным значением измеримой характеристики. Таким образом, максимально возможное значение упорядоченности (информации) с логарифмической точностью оценивается числом степеней свободы системы — числом информационных “ячеек памяти” [7]. (Число всех возможных состояний системы с  $N$  степенями свободы и  $k$  возможными значениями измеримой величины, характеризующей каждую степень свободы, равно  $k^N = 2^{N \log_2 k}$ . Поэтому информация, содержащаяся в системе, для которой известны конкретные значения измеримой характеристики для всех степеней свободы, определяется как  $N \log_2 k$  при равновероятности всех значений

измеримой характеристики и как  $-N \sum_{i=1}^k \omega_i \log_2 \omega_i$ , если вероятности  $\omega_i$  этих  $k$  значений различны.)

Отметим, что с появлением в потоках внешней энергии макроскопических степеней свободы возникает возможность как временной *стохастизации* системы при относительно равновероятном распределении общего состояния системы по всем возможным физическим значениям в каждой возникшей степени свободы, так и *организации* системы, если наиболее вероятным является распределение по определенным значениям степеней свободы. С остановкой потока внешней энергии исчезают макроскопические ячейки памяти физической системы и вместе с ними — обе возможности, как стохастизации, так и организации системы. Эта ситуация аналогична обращению в ноль термодинамической энтропии при приближении температуры к абсолютному нулю. Физическая система при этом переходит к основному состоянию, характеризующемуся одной молекулярной ячейкой памяти с единственным физическим состоянием в этой ячейке. Поэтому информация, характеризующая такую систему, также обращается в ноль [7].

При максимальных наблюдаемых в окружающей среде потоках энергии степени свободы самоорганизованного физического состояния остаются макроскопическими, а их плотность на единицу макроскопического объема остается ограниченной.

Это может быть проиллюстрировано на относительно простом примере системы турбулентно-

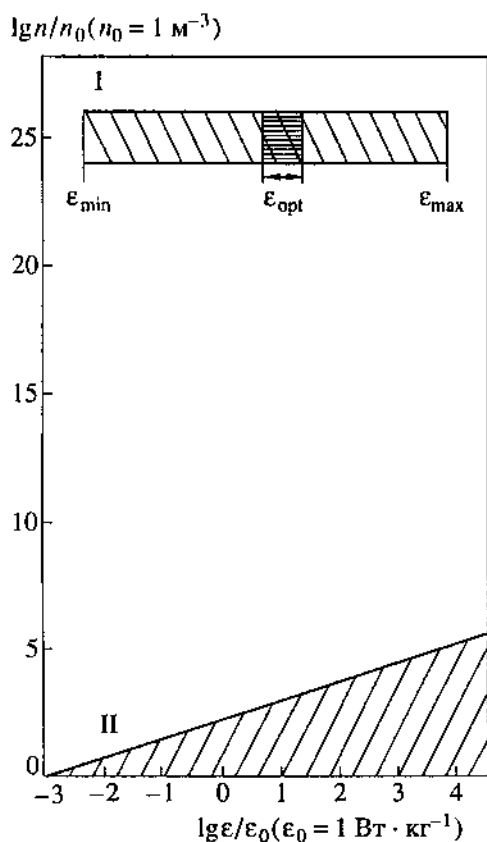
го течения газа или жидкости вдали от твердых стенок. Число степеней свободы (“ячеек памяти”) такой системы определяется числом вихрей, в которых происходит диссипация энергии вращения вещества [8, 9]. Зависимость плотности числа степеней свободы  $n$  от плотности  $\epsilon$  мощности энергии на единицу воздушной массы может быть получена из известного закона Колмогорова—Обухова [8] в следующем виде:

$$\ln \frac{n}{n_0} = \frac{3}{4} \ln \frac{\epsilon}{\epsilon_{кр}}, \quad (1)$$

где  $n_0 = 1 \text{ м}^{-3}$ ,  $\epsilon_{кр} = 10^{-3} \text{ Вт} \cdot \text{кг}^{-1}$  — критическая плотность энергии, соответствующая появлению турбулентности, рис. 1. (Здесь принято, что турбулентность отсутствует при скоростях течения воздуха, меньших  $1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ , что соответствует числу Рейнольдса  $Re \leq 10^4$  при пограничном слое атмосферы  $l \sim 1 \text{ км}$  [8].) Движение естественных водных масс, как и прочие упорядоченные процессы в естественной окружающей среде, характеризуются меньшими скоростями и, как следствие, на несколько порядков меньшими числами степеней свободы.

В противоположность физически упорядоченным системам упорядоченность биологических систем характеризуется молекулярными (а не макроскопическими) степенями свободы или “ячейками памяти”. Они определяются числом нуклеотидных пар в молекулах ДНК, генетически программирующим функционирование живой клетки. Плотность этих молекулярных степеней свободы превосходит  $10^{24}$  на  $1 \text{ м}^3$ : среднее число нуклеотидных пар (н.п.) в молекулах ДНК одной клетки сообщества равно  $10^6$  для прокариот,  $10^9$ – $10^{11}$  — для эукариот [10]; число клеток на  $1 \text{ м}^3$  метаболически активной биомассы равно  $10^{18}$  для прокариот,  $10^{15}$  — для эукариот [11]. Поэтому существует огромный разрыв между количественными характеристиками организации физических и биологических (экологических) систем (рис. 1). Этот разрыв определяется числом, превосходящим  $10^{20}$ . Следовательно, никакие изменения окружающей среды и физических потоков в ней не могут увеличить существующую величину биологической и экологической упорядоченности.

Как известно со времен Пастера, жизнь не может самозародиться ни в каких внешних условиях. (Опыты по поиску возможного самозарождения жизни были прекращены примерно в то же время, когда была признана невозможность создания вечных двигателей.) Упорядоченность организмов каждого вида поддерживается в течение всего времени его существования порядка миллиона лет за счет внутренних процессов конкурентного взаимодействия особей в популяции и устра-



**Рис. 1.** Организация физических и живых систем в зависимости от плотности поглощаемой системой энергии. Ордината – десятичный логарифм плотности числа ячеек памяти (степеней свободы) на единицу объема ( $\text{м}^3$ ) физических систем (II) и единицу метаболически активного объема ( $\text{м}^3$ ) биологических (экологических) систем (I). Абсцисса – десятичный логарифм мощности внешней энергии  $\epsilon$ , потребляемой единицей массы системы ( $\text{Вт} \cdot \text{кг}^{-1} = \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-3}$ ). Области, занимаемые физическими (II) и биологическими (I) организованными системами, заштрихованы.

$\epsilon_{\min}$  – наблюдаемый минимум метаболической мощности;  $\epsilon_{\max}$  – наблюдаемый максимум метаболической мощности.

нения особей с пониженной конкурентоспособностью в ходе естественного отбора. Образующиеся при этом в популяции вакансии замещаются потомками особей, сохранивших свой уровень упорядоченности.

Конкурентное взаимодействие, стабилизирующий отбор и воспроизводство нормальных особей требуют затрат энергии и, следовательно, потребления жизнью внешней энергии из окружающей среды. Однако потребление энергии жизнью кардинально отличается от потребления энергии физическими упорядоченными системами. Упорядоченность физических самоорганизованных систем определяется характеристиками потребляемых потоков энергии. Она возникает и поддерживается при наличии подачи энергии и распадается непо-

средственно с ее прекращением. В противоположность физической упорядоченности, в отсутствие конкурентного взаимодействия и стабилизирующего отбора, генетическая упорядоченность организмов любого вида распадается даже при продолжающемся потреблении потоков питания и воспроизводстве особей. Помимо этого, в отличие от процессов, стабилизирующих самоорганизованные физические состояния, процессы конкурентного взаимодействия, отбора и воспроизводства особей в популяции не зависят от характеристик потоков внешней энергии (питания), будучи определяемыми уровнем организации самой жизни. Так, метаболическая мощность потребления энергии изменяется в универсальных для всех живых существ пределах от  $5 \cdot 10^{-3}$  до  $7 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{кг}^{-1}$  [12] независимо от запаса генетической информации (величины генома), рис. 1. Из этого следует, что уровень генетической упорядоченности организмов не зависит от потребляемых ими потоков питания.

Наклонная линия на рис. 1 обозначает плотность числа турбулентных степеней свободы (турбулентных вихрей) воздушных масс в зависимости от плотности мощности энергии на единицу воздушной массы,  $\epsilon$  (см. уравнение (1)). Характеристики всех прочих естественных самоорганизованных физических процессов в окружающей среде по оценкам авторов не выходят за пределы заштрихованного треугольника. Отметим, что при продолжении наклонной линии физической самоорганизации (рис. 1) вправо последняя достигнет значений упорядоченности, характерных для живых систем, при плотностях энергии, больших  $10^{32} \text{ Вт} \cdot \text{кг}^{-1}$ . Очевидно, что при таких мощностях никакие устойчивые молекулярные структуры, необходимые для возникновения жизни, образоваться не могут.

Процессы эволюции основаны на генетических мутациях и естественном отборе особей в популяциях биологических и экологических систем. Они представляют собой истинные процессы самоорганизации, не зависящие от изменения внешних потоков энергии. Поэтому нелинейные уравнения, описывающие физическую самоорганизацию, не могут иметь отношения к истинной биологической самоорганизации, т.е. к эволюции. Не могут они характеризовать и уже существующую организацию биологических и экологических систем, которая возникла ранее на основе биологической эволюции. Все сделанные утверждения относятся к любому уровню организации живых объектов от клетки до многоклеточных организмов и экологических сообществ.

Изменение состояния физической системы, связанное с изменением вероятности распределения по конечным физически упорядоченным состояниям, полностью определяется характером

внешней энергии, воздействующей на систему. Изменения же биологической упорядоченности, обусловливаемые спонтанными мутациями, являются случайными и не связаны с изменениями потоков питания. Процессы, подобные появляющимся при распаде состояний физической самоорганизованной критичности, могут появляться и при распаде (патологии) состояний биологической самоорганизации. Однако подобные процессы распада не имеют отношения к увеличению уровня организации биологических систем.

Таким образом, несмотря на то, что жизнь на Земле находится во внешнем потоке солнечной энергии и потребляет эту энергию, чем обеспечивается метаболизм всех живых организмов, уровень упорядоченности жизни не определяется величиной и характером потребляемой энергии. Жизнь характеризуется уровнем организации (запасом информации), который более чем на двадцать порядков превосходит уровень организации всех возможных физических упорядоченных состояний, генерируемых солнечной и другими видами внешней энергии в окружающей среде.

В этом смысле все индивидуальные самовоспроизводящиеся живые организмы вне их популяций ведут себя подобно замкнутым физическим системам. Вне популяций, т.е. в отсутствие конкурентного взаимодействия и отбора, выполняющих стабилизирующую функцию, такие особи и их потомки могут только терять свой уровень упорядоченности, т.е. подчиняются закону, подобному второму началу термодинамики для замкнутых физических систем.

Авторы благодарны М.В. Филатову за обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Госкомэкологии России, а также гранта 800/2000. Схемы поддержки исследований Фонда открытого общества для А.М. Макарьевой.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bak P., Tang C., Wiesenfeld K.* // *Phys. Rev. Lett.* 1987. V. 59. P. 381–384.
2. *Cross M.C., Hohenberg P.C.* // *Rev. Mod. Phys.* 1993. V. 65(II). P. 851–1111.
3. *Eckmann J.-P., Ruelle D.* // *Rev. Mod. Phys.* 1985. V. 57(I). P. 617–656.
4. *Kauffman S.A.* *The Origins of Order.* Oxford: Oxford Univ. Press, 1993. 709 p.
5. *Boer J., Derrida B., Flyvbjerg H. et al.* // *Phys. Rev. Lett.* 1994. V. 73. P. 906–909.
6. *Sneppen K., Bak P., Flyvbjerg H., Jensen M.H.* // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 1995. V. 92. P. 5209–5213.
7. *Бриллюэн Л.* Наука и теория информации. М.: Физматгиз, 1960. 392 с.
8. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Механика сплошных сред. М.: Гостеортехиздат. 1954. 795 с.
9. *Монин А.С.* // УФН. 1986. Т. 150. С. 61–105.
10. *Hinegardner R.* Evolution of Genome Size. In: *Molecular Evolution.* Sunderland (Mass.): Sinauer Associates, 1976. P. 179–199.
11. *Gorshkov V.G., Gorshkov V.V., Makarieva A.M.* Biotic Regulation of the Environment: Key Issue of Global Change. Chichester: Springer, Praxis Publ, 2000. 367 p.
12. *Горшков В.Г.* // Журн. общ. биол. 1981. Т. 42. С. 417–429.