Октябрь 1997 г. **УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК** *Том 167, № 10*

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

Самоорганизация и информация на планетах и в экосистемах

М.Н. Изаков

Энтропия играет ведущую роль при описании открытых систем. Она позволяет различить неравновесные и равновесные процессы. Приток негэнтропии к системе служит мерой всех происходящих в системе физико-химических процессов. Уравнение баланса энтропии полезно для полного описания системы, что показано на примере планет и экосистем. Связь между информацией и энтропией, найденная в теории информации, полезна при описании самоорганизующихся систем, учитывая их специфику, особенно различия между системами, запоминающими и незапоминающими информацию.

PACS numbers: 05.70.Ln, **87.10.+e**, **96.30.–t**, **89.60.+x**

Содержание

1. Введение

Среди множества разнообразных систем, существующих в природе, особенно интересны и важны сложные макроскопические неравновесные системы, содержащие упорядоченные структуры, в которых "порядок рождается из хаоса" [1]. Эти системы многочисленны и разнообразны: конвективные гидродинамические ячейки, вихри в атмосфере и океане, химические реакции с временно́й и пространственной периодичностью, лазеры, живые организмы и экосистемы [1–4].

Существование и эволюция таких систем (особенно живых) многим казались до недавнего времени противоречащими второму закону термодинамики, утверждающему, что развитие изолированной системы идет от порядка к хаосу; еще недавно встречались утверждения типа: "Клаузиус и Дарвин не могут быть одновременно правы". Необходимость описывать такие системы и прогнозировать их эволюцию привела к появлению ряда работ, в которых были заложены основы теории самоорганизации. При этом использовались различные подходы и названия: теория самоорганизации или теория диссипативных структур [1], синергетика [2], теория открытых систем [3], информационная динамика [4].

М.Н. Изаков. Институт космических исследований РАН
117810 Москва, Профсоюзная ул. 84/32
Тел. (095) 333-21-44
Факс (095) 310-70-23

Статья поступила 10 апреля 1997 г.

И хотя эта теория далека от завершенности, уже достигнуты определенные успехи, позволяющие надеяться на прогресс в понимании процессов самоорганизации. В частности, она способствует выяснению связей между физико-химическими и биологическими системами и процессами.

В настоящей статье рассмотрены некоторые дискуссионные вопросы теории самоорганизации, такие как роль энтропии в открытых системах и связь негэнтропии и информации, а также приложение выводов этой теории к изучению планет и экосистем, являющихся хорошими примерами открытых неравновесных систем с множеством самоорганизующихся структур.

2. Роль энтропии в открытых системах

Все имеющиеся экспериментальные и наблюдательные данные показывают, что для существования в системе упорядоченных структур (исключая равновесные структуры типа кристалла) система должна быть открытой, т.е. должна обмениваться с окружающей средой энергией и энтропией, переносимыми веществом и/или радиацией. При этом обмен должен быть столь велик, чтобы система находилась вдали от термодинамического равновесия, в области нелинейной зависимости обобщенных термодинамических потоков от термодинамических сил.

Если для описания равновесных или близких к равновесию систем достаточно рассмотреть баланс массы, импульса и энергии, то при описании открытых систем определяющую роль играет баланс энтропии. Это было отмечено уже в 1938 г. Р. Эмденом, который, рассмотрев процесс отопления помещения, заключил, что "на фабрике природы энтропия — директор, определяющий направление и ход процессов, а энергия — лишь бухгалтер, подводящий баланс" [5].

Шрёдингер, заметив, что организм отдает столько же энергии и вещества, сколько получает, спросил, за счет чего же он живет, и сам же ответил: "Живые организмы питаются отрицательной энтропией" [6].

В любой реальной системе всегда идут необратимые диссипативные процессы (диффузия, вязкость, теплопроводность, химические реакции, фазовые переходы), в которых растет энтропия. Причина необратимости кроется в неустойчивости траекторий атомов и молекул при наличии их взаимодействий (столкновений) (см., например, [4]). Очевидно, играет роль и то, что атомы и молекулы не твердые шарики, как принимали в большинстве моделей, а сложные квантовые системы. Единственная функция состояния, которая различается в необратимых и обратимых процессах — это энтропия: в первых она растет, а во вторых не меняется.

Изменение энтропии открытой системы $\mathrm{d}S$ складывается из ее изменения за счет притока из окружающей среды $\mathrm{d}S_{\mathrm{e}}$ и ее увеличения $\mathrm{d}S_{\mathrm{i}} > 0$ за счет внутренних диссипативных процессов [1, 3, 7–9]:

$$\mathrm{d}S = \mathrm{d}S_{\mathrm{e}} + \mathrm{d}S_{\mathrm{i}} \quad (\mathrm{d}S_{\mathrm{i}} > 0)\,. \tag{1}$$

В открытой системе может быть как приток, так и отток энтропии, т.е. $\mathrm{d}S_{\mathrm{e}}$ может иметь любой знак, и энтропия системы может увеличиваться или уменьшаться, но энтропия системы вместе с окружающей средой всегда увеличивается в соответствии со вторым законом термодинамики.

Если система находится в стационарном состоянии, то из нее происходит отток энтропии в окружающую среду $\mathrm{d}S_{\mathrm{e}} < 0$, компенсирующий производство энтропии в системе $\mathrm{d}S_{\mathrm{i}}$, так что $\mathrm{d}S = 0$. Если ввести энтропию с обратным знаком (отрицательную энтропию, "негэнтропию"), то можно сказать, что имеется приток отрицательной энтропии к системе, который расходуется в диссипативных процессах и поддерживает систему в неравновесном состоянии. В стационарном неравновесном состоянии приток негэнтропии равен производству энтропии и может служить мерой всех диссипативных процессов, происходящих в системе.

Можно определить энтропию неравновесных систем так, что сохранится ее связь с другими термодинамическими параметрами, которая имеет место при равновесии, и выразить ее формулой Гиббса [1, 3, 7–9]:

$$\mathrm{d}S = \frac{\mathrm{d}E}{T} + \frac{p\,\mathrm{d}V}{T} - \frac{1}{T}\sum \mu_i\,\mathrm{d}N_i\,. \tag{2}$$

Здесь E — внутренняя энергия, T — температура, p — давление, V — объем, μ_i, $\mathrm{d}N_i$ — химический потенциал и число частиц i-го компонента системы.

Из (2) при допущении локального термодинамического равновесия (справедливом для очень широкого класса явлений; исключение — ударные волны), с использованием уравнений сохранения массы и энергии получается уравнение баланса энтропии на единицу массы, $s = S/M$ [7–9]:

$$\frac{\partial(\rho s)}{\partial t} + \operatorname{div} J_s = \sigma_s\,, \tag{3}$$

где поток энтропии состоит из кондуктивной, конвективной и диффузионной частей

$$J_s = \frac{Q}{T} + \rho s\mathbf{v} - \sum \rho_k \mathbf{v}_k\,\frac{\mu_k}{T}\,, \tag{4}$$

а производство энтропии равно

$$\sigma_s = Q\cdot\nabla\left(\frac{1}{T}\right) - \frac{1}{T}\prod:\nabla\mathbf{v} - \sum \rho_k\mathbf{v}_k\cdot\nabla\left(\frac{\mu_k}{T}\right) - \frac{1}{T}\sum \omega_{kl}\,A_{kl}\,, \tag{5}$$

ρ — плотность, $\mathbf{v}$ — скорость, t — время, $\prod$ — тензор вязких напряжений, Q — поток тепла, k — индекс, обозначающий величину для k-го компонента, ω_{kl} — скорость l-й реакции k-го компонента, A_{kl} — химическое сродство, $\prod:\nabla\mathbf{v}$ — скалярное произведение тензора вязких напряжений и тензора поля скоростей. В формуле (5) первый член описывает производство энтропии в процессе теплопроводности, второй — в процессе вязкости, третий — в процессе диффузии, четвертый — в химических реакциях и фазовых переходах. Эти члены записаны в общем виде, их конкретный вид различается в зависимости от степени неравновесности, например, при ламинарных и турбулентных течениях в системе.

С другой стороны, методами статистической физики показано, что энтропия есть логарифм числа микросостояний, совместимых с данным (равновесным или неравновесным) макросостоянием системы [3, 7–10]:

$$S = k\ln\Delta\Gamma = -k\ln w\,, \tag{6}$$

где $\Delta\Gamma$ — часть объема фазового пространства, доступная системе в данном макросостоянии; $w = 1/(\Delta\Gamma)$ — вероятность нахождения системы в данном объеме, k — постоянная Больцмана. Для простейшей физической системы — газа одноатомных молекул — классическое непрерывное фазовое пространство можно дискретизировать путем деления $\Delta\Gamma$ на минимальную ячейку, задаваемую квантовым принципом неопределенности и условием неразличимости частиц в статистике, $\Gamma_0 = h^{3N}N!$, где h — постоянная Планка

$$\Delta\Gamma = \frac{\prod_{i=1}^{3N}\delta p_i\delta q_i}{h^{3N}\cdot N!}\,. \tag{7}$$

Если температуру измерять в единицах энергии, то постоянную Больцмана в формуле (6) надо опустить, тогда S будет выражена в безразмерных единицах, определяющих число микросостояний, совместимых с данным макросостоянием.

При выводе формулы (6) все микросостояния считаются равновероятными; если снять это ограничение, то вместо (6) получается

$$S = -\sum w_i\ln w_i = -\langle w_i\rangle\,. \tag{8}$$

Для неравновесных состояний функция распределения вероятностей отличается от равновесного канонического распределения Гиббса.

Можно допустить, что формулы (6), (8) применимы к системам любой сложности; тогда координатами фазового пространства надо считать все параметры, определяющие систему.

Особенно важное значение приобретает энтропия в системах, в которых радиация взаимодействует с веществом. Как показал Планк ([11], см. также [10, 12]), радиация, как и вещество, обладает не только энергией, но и энтропией и температурой. Плотность энтропии пучка фотонов частоты ν и интенсивности I_ν равна

$$s_\nu = \frac{2k\nu^2}{c^3}\left[(1+y)\ln(1+y) - y\ln y\right]\,, \tag{9}$$

а их температура

$$T_\nu^{-1} = \frac{k}{h\nu} \ln\left(1 + \frac{1}{y}\right), \tag{10}$$

где $y = c^2 I_\nu / 2h\nu^3$. Формулы (9), (10) можно получить, рассматривая фотоны, как частицы, подчиняющиеся статистике Бозе–Эйнштейна [10, 12].

Потоки энергии и энтропии радиации через единичную площадку ($f_{\rm r}$ и $f_{\rm s}$) получаются интегрированием I_ν и cs_ν по частоте и телесному углу

$$f_{\rm r} = \int\int I_\nu \mathbf{\Omega}\ \mathrm{d}\Omega\, \mathrm{d}\nu\,, \tag{11}$$

$$f_{\rm s} = \int\int cs_\nu \mathbf{\Omega}\ \mathrm{d}\Omega\, \mathrm{d}\nu\,, \tag{12}$$

где $\mathbf{\Omega}$ — единичный вектор, направленный по лучу, $\mathrm{d}\Omega$ — дифференциал телесного угла.

Дифференцируя (9) по времени t и координатам r, получаем [12]

$$\frac{\partial}{\partial t}(cs_\nu) = \frac{1}{T_\nu}\frac{\partial I_\nu}{\partial t}\,, \quad \mathbf{\Omega}\cdot\nabla(cs_\nu) = \frac{1}{T_\nu}\mathbf{\Omega}\cdot\nabla I_\nu\,. \tag{13}$$

Отсюда следует, что уравнение переноса энтропии радиации просто связано с обычным уравнением переноса радиации

$$\frac{1}{c}\frac{\partial s_\nu}{\partial t} + \mathbf{\Omega}\cdot\nabla(cs_\nu) = \frac{1}{T_\nu}\left(\frac{1}{c}\frac{\partial I_\nu}{\partial t} + \mathbf{\Omega}\cdot\nabla I_\nu\right) = \\ = \frac{1}{T_\nu}\left[B_\nu \varkappa_{\rm a} - I_\nu(\varkappa_{\rm a} + \varkappa_{\rm s})\right], \tag{14}$$

где $\varkappa_{\rm a}$, $\varkappa_{\rm s}$ — коэффициенты поглощения и рассеяния фотонов, B_ν — функция излучения Планка; из-за наличия множителя $1/c$ производные по t в (14), как правило, пренебрежимо малы.

В частном случае, если радиация испускается абсолютно черным телом (при этом $T_\nu = T_r$ постоянная), из (11), (12) следует, что она несет в полупространство поток энергии:

$$f_e = \sigma_{\rm B} T_r^4 \tag{15}$$

(где $\sigma_{\rm B}$ — постоянная Стефана–Больцмана) и поток энтропии

$$f_s = \frac{4}{3}\sigma_{\rm B} T_r^3 = \frac{4 f_e}{3 T_r}\,. \tag{16}$$

В неравновесной системе, содержащей вещество и радиацию при различных температурах (например, молекулы атмосферы и солнечные фотоны), плотности энтропии, ее потоки и производства энтропии вещества (величины с индексами m) и фотонов (с индексами r) складываются [12]

$$s = s_m + s_r; \quad J(s) = J(s_m) + J(s_r); \quad \sigma = \sigma_m + \sigma_r\,.$$

При взаимодействии фотонов с частицами (поглощении и рассеянии) производство энтропии в единице объема равняется [13]

$$\sigma_r = \int -\mathrm{div}(\mathbf{\Omega} I_\nu)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_\nu}\right)\mathrm{d}\Omega\,\mathrm{d}\nu\,. \tag{17}$$

Для излучения черного тела из (17) получается

$$\sigma_r = -\mathrm{div}\, f_r\left(\frac{1}{T} - \frac{4}{3T_r}\right). \tag{18}$$

В (17), (18) первые члены описывают изменение энтропии вещества, а вторые — фотонов.

Тот факт, что даже для наиболее неравновесного состояния материи — потока фотонов — энтропия зависит от тех же параметров, что и энтропия вещества, $S(E, T, V)$ (с учетом того, что химический потенциал фотонов $\mu = 0$ [10]) подтверждает справедливость обобщения формулы (2) на неравновесные состояния.

Подытожим свойства энтропии, определяющие ее ведущую роль в неравновесных системах. Прежде всего — это единственная функция состояния, которая различается в необратимых и обратимых процессах: в первых она растет, а во вторых не меняется. При этом рост энтропии в совокупности необратимых процессов определяет направление течения времени ("стрелу времени" [14]). Кроме того, энтропия является мерой неупорядоченности макросостояния, которое может реализоваться через различные комбинации микросостояний; поэтому ее уменьшение может служить мерой упорядочения, а увеличение — мерой разупорядочения системы [3, 4]. Наконец, энтропия выражает качество энергии: если система получает поток энергии с более высокой температурой, следовательно, большая энергия приходится на каждую частицу или фотон, которые несут эту энергию, и они сильнее воздействуют на систему (это особенно наглядно проявляется при воздействии потока солнечной радиации на планету, которое мы рассмотрим ниже); другой пример: только свободная энергия в системе, $F = E - TS$, совершает механическую или химическую работу.

Изложенная точка зрения не является общепринятой. Некоторые авторы считают, что, так как энтропия системы не сохраняется, она играет второстепенную роль по сравнению с энергией (см., например, [15]). Однако то, что энтропия не сохраняется, не является недостатком: ее увеличение или уменьшение указывает на характер происходящих в системе процессов (упорядочение или разупорядочение), а величина ее изменения может служить их мерой. Ведь всегда, когда мы говорим, что расходуется энергия, в действительности расходуется негэнтропия, а энергия приходит и уходит, только в разных формах.

Итак, при построении теоретических моделей сильно неравновесных систем необходимо, кроме баланса массы импульса и энергии, рассматривать баланс энтропии. Однако возникает вопрос: получим ли мы при этом новую информацию? Ведь обычно применяемая в термогидродинамике система уравнений баланса массы, импульса и энергии (или вместо последнего — упрощенного уравнения баланса энтропии [16]) замкнута и позволяет определить параметры газа или жидкости — плотность, скорость и температуру как функции координат и времени. Однако следует вспомнить, что для замыкания системы используются эмпирические законы Фурье, Ньютона и Фика, выражающие тепловой поток, тензор вязких напряжений и диффузионные потоки через коэффициенты теплопроводности, вязкости и диффузии и градиенты температуры, скорости и концентраций компонентов. Но эти законы пригодны лишь при небольших отклонениях от равновесия, а при больших течение жидкости или газа становится турбулентным, резко усиливаются процессы диссипации энергии и процессы переноса, а их характеристики становятся трудно определяемыми [17].

Представляется, что можно использовать уравнение баланса энтропии для поиска характеристик турбулентного перемешивания и диссипативной функции, $\Phi = T\sigma$, определяющей количество энергии, переходящей в тепло в единице объема в единицу времени.

Производство энтропии в сложных системах рассчитывать трудно, строгий расчет известен лишь для идеального газа. Если же мы ввели в рассмотрение уравнение баланса энтропии, мы можем для стационарной системы выразить σ с помощью уравнения (3) через приток энтропии к системе, который можно измерить экспериментально. Ниже, на примерах планеты и экосистемы мы покажем, что их описание можно уточнить, учитывая баланс энтропии. Наконец, данные об энтропии и ее производстве могут помочь в изучении устойчивости системы [3, 9, 14].

Конечно, говоря о необходимости учитывать приток энергии и энтропии к системе, мы должны понимать, что в действительности имеется единый приток фотонов и/или частиц, но у него есть две характеристики, отражающие количество и качество приносимой в систему энергии.

3. Негэнтропия и информация

Для того, чтобы глубже понять роль негэнтропии в неравновесных системах, вспомним, что была установлена прямая связь между негэнтропией и количеством информации [18, 19].

В теории информации рассматриваются системы, которые могут регистрировать и запоминать информацию. Для этих систем вводится определение энтропии, по существу, так же, как в физике. Рассматривается информационная система из N ячеек, в каждой из которых может быть задан нуль или единица; возможны 2^N комбинаций знаков (текстов), вероятность каждой из которых $w = (2^N)^{-1}$; при этом энтропия также определяется формулами (6), (8) и также является мерой неопределенности — дает среднюю вероятность любой возможной комбинации. Эту информационную энтропию удобно измерять в битах, для чего физическую энтропию надо разделить на $(k \ln 2) = 9{,}57 \times 10^{-24}$.

Количеством информации называют величину, равную уменьшению неопределенности (энтропии) системы [19], т.е.

$$I_1 = S_0 - S_1 = -\Delta S = \Delta N . \qquad (19)$$

Это значит, что в некотором процессе (опыте) энтропия, которой система обладала до опыта, S_0, уменьшилась до величины S_1, т.е. система получила приток негэнтропии ΔN.

Если допустить, что после опыта система находится в одной определенной ячейке фазового пространства (т.е. $\Delta\Gamma = 1$, $S_1 = 0$), тогда из (19) следует

$$I_1 = S_0 , \qquad (20)$$

т.е. апостериорная информация численно равна априорной энтропии тогда и только тогда, когда энтропия после опыта стала равна нулю, т.е. система пришла в определенную ячейку; это возможно для информационной системы (например, выпала определенная грань игральной кости) и принципиально невозможно для микросостояний физической системы (если только ее температура не равна абсолютному нулю). Это важно подчеркнуть, так как во многих статьях определяют информацию формулой (20), иногда даже не указывая, что левая и правая части формулы относятся к различным временам и условиям — до и после опыта и что имеется такое сильное ограничение на конечное состояние. Кроме того из полной формулы (19) видно, что информация численно равна негэнтропии [19]. Значит, если система получила информацию, следовательно, из нее произошел отток энтропии или к ней — приток негэнтропии; это может обеспечить поддержание стационарного состояния системы или — процессов самоорганизации в ней. Если же энтропия системы растет, можно сказать, что система получила дезынформацию, что может вызвать стресс или даже деградацию системы.

Формулу (19) можно переписать так

$$I_1 + S_1 = S_0 . \qquad (21)$$

Отсюда видно, что если в результате опыта увеличивается информация, значит, настолько же уменьшается энтропия, а их сумма остается постоянной, равной величине априорной энтропии.

Теперь из теории информации вернемся в физику и используем формулы (19), (21) не для информационных, а для любых физических систем; т.е. будем считать, что приток негэнтропии к системе равносилен притоку информации. В частности, если до опыта система находилась в состоянии термодинамического равновесия, а после опыта перешла в неравновесное состояние, то полученная негэнтропия (информация) может служить мерой отклонения от равновесия в том числе и для систем, в которых появляются упорядоченные структуры.

Однако, используя аппарат теории информации для любых физических систем, важно помнить, что, хотя приведенные выше формулы пригодны для любой системы, информационные системы сильно отличаются от простых физических систем. Главное их отличие состоит в том, что они способны сохранять (запоминать) информацию на достаточно долгий срок после того, как она получена. Очевидно, информация о значениях координат и импульсов частиц газа в данный момент или о наличии в газе конвективных ячеек не сохраняется при изменении внешних условий, тогда как информация в памяти компьютера или в молекуле ДНК, находящейся в живой клетке, сохраняется надолго и при изменении внешних условий используется в жизненных процессах и передается по наследству.

Еще одно важное отличие информационных систем: их ячейки памяти имеют сложное устройство, поэтому занимаемый каждой ячейкой объем фазового пространства на много порядков больше, чем у простой физической системы. Например, в ДНК информационная ячейка по меньшей мере в 10^{20} раз больше, чем минимальная ячейка физического фазового пространства, определяемая формулой (7) [20]. Это необходимо учитывать при расчете информационной емкости различных систем. Неучет этого факта, а также различия запоминаемой и незапоминаемой информации приводит к ошибочным оценкам количества информации, содержащейся в организме, экосистемах или биосфере [21].

Кроме того, информационные системы отличаются тем, что они могут приходить в одно определенное состояние с нулевой энтропией, тогда как для большинства физических систем (при $T \neq 0$) это невозможно, а следовательно, к ним неприменима формула (20).

Наконец, для информационных систем важно определить не только количество, но и качество (или ценность) информации. Это понятие очень трудно формализуется. Ценность определялась как польза, получаемая системой за счет уменьшение потерь [22, 23] или как увеличение вероятности достижения цели [24] при получении данного количества информации. Можно допустить, что более ценная информация повышает вероятность сохранения системы, т.е. увеличивает ее приспособленность к среде обитания, а следовательно, и продолжительность жизни. Конечно, польза и цели различны для различных систем и должны определяться специально для каждой.

Перечисленные сложности заставляют некоторых исследователей сомневаться в целесообразности использования связи информации и негэнтропии (см., например, [20]). Однако при учете вышеуказанных трудностей этот подход может быть весьма плодотворным. Он позволяет использовать при изучении физических систем разработанный аппарат теории информации.

Рассмотрение открытой системы как управляемой не только притоком энергии, но и информации, помогает понять, как в процессе самоорганизации развиваются сложные иерархические системы: при информационном управлении нелинейной системой возникает возможность ее развития по ряду альтернативных путей и все большего усложнения, в результате чего система может лучше приспособиться к меняющимся условиям окружающей среды [4].

4. Энтропийный баланс планет

Наглядный пример определяющей роли энтропии дает изучение энергетического и энтропийного баланса планет Солнечной системы [13, 25–30]. Для планеты притоком и оттоком массы можно пренебречь, а в энергетическом балансе рассматривать лишь приток солнечной радиации, Φ_{s}, поглощенной планетой, и отток инфракрасной планетной радиации, Φ_{p} (для земных планет, где поток тепла из недр пренебрежимо мал по сравнению с радиационными потоками):

$$B = \Phi_{\mathrm{s}} - \Phi_{\mathrm{p}} = f_{\mathrm{s}}(1-A)\pi r^2 - 4\pi r^2 f_{\mathrm{p}}\,. \tag{22}$$

Здесь f_{s} — поток солнечной радиации на единицу площади, $f_{\mathrm{p}} \approx \sigma_{\mathrm{B}} T_{\mathrm{e}}^4$— поток инфракрасной радиации, испускаемой с единицы площади планеты, T_{e} — равновесная температура, A — интегральное сферическое альбедо планеты, r — ее радиус; коэффициент 4 в последнем члене возникает потому, что солнечная радиация падает на поперечное сечение планеты, а планетная уходит со всей ее поверхности. Многолетние измерения потоков радиации с помощью приборов, установленных на спутниках, показали, что энергетический баланс Земли в среднем за год близок к нулю [27], т.е. приток и отток энергии примерно равны (отличия от нуля равны ± 5 % от f_{p} при нахождении Земли в перигелии и афелии). Из уравнения (22) видно, что при увеличении (уменьшении) солнечного потока увеличится (уменьшится) и планетный, обеспечивая таким образом примерное постоянство климатических условий на планете.

Что же расходуется в планетарных процессах, в которых перерабатываются огромные количества энергии и вещества? Покажем, что расходуется полученная планетой негэнтропия.

Будем считать, что спектры солнечной и планетной радиации близки к спектрам радиации абсолютно черного тела (это упрощение сделано для наглядности рассмотрения и может быть отменено). Тогда приток энтропии на планету равен:

$$\Delta S = \frac{4}{3}\left(\frac{\Phi_{\mathrm{s}}}{T_{\mathrm{s}}} - \frac{\Phi_{\mathrm{p}}}{T_{\mathrm{p}}}\right). \tag{23}$$

Так как температура солнечной радиации ($T_{\mathrm{s}} = 5780$ K) всегда много больше, чем температура тепловой радиации планеты (для земных планет $T_{\mathrm{p}} = 211-441$ K, для остальных — еще меньше), следовательно, на любой планете всегда $\Delta S < 0$, т.е. имеется отток энтропии с планеты или приток негэнтропии $\Delta N = -\Delta S$, которая расходуется во всех процессах, происходящих на планете [26].

То, что энергетический баланс не полностью определяет процессы на планете можно показать с помощью следующего мысленного эксперимента: допустим, что Солнце заменено звездой с той же светимостью (следовательно, сохранится величина солнечной постоянной f_{s}), но с меньшей радиационной температурой T_{s}, т.е. со спектром, сдвинутым в инфракрасную область. Согласно формулам (22), (23), планета будет получать тот же приток энергии, но меньший приток негэнтропии. При этом многие процессы на планете пойдут по-другому; например, инфракрасные фотоны не могут поддерживать фотосинтез, поэтому, если на планете будет биосфера, она будет совсем другая, чем настоящая. Это является следствием того, что приток негэнтропии выражает качество притока энергии, приходящего на планету [26, 27].

На Земле, по данным спутниковых измерений, $f_{\mathrm{s}} = 1368$ Вт м$^{-2}$, $A = 0{,}29$, $T_{\mathrm{s}} = 5778$ K, $T_{\mathrm{p}} = 254$ K. Используя эти значения, получаем по формулам (13), (14), что приток негэнтропии на всю планету равен $\Delta N = 6{,}2 \times 10^{14}$ Вт К$^{-1}$, а в среднем на единицу площади $\Delta n = 1{,}22$ Вт м$^{-2}$ К$^{-1}$ [27]. Более подробный расчет с учетом пространственных и временных вариаций дал $\Delta N = 6{,}8 \times 10^{14}$ Вт К$^{-1}$, $\Delta n = 1{,}25$ Вт м$^{-2}$К$^{-1}$ [30]. Этот большой приток негэнтропии расходуется прежде всего на поддержание теплового баланса планеты: фотоны взаимодействуют с частицами атмосферы и поверхности, при этом увеличение энтропии вещества и радиации равняется

$$\Delta S_1 = \int \left[-\frac{\operatorname{div} f_{\mathrm{s}} + \operatorname{div} f_{\mathrm{p}}}{T} + \frac{4}{3}\left(\frac{\operatorname{div} f_{\mathrm{s}}}{T_{\mathrm{s}}} + \frac{\operatorname{div} f_{\mathrm{p}}}{T}\right)\right] \mathrm{d}z\,, \tag{24}$$

где z — высота над поверхностью планеты.

В результате того, что для солнечных фотонов атмосфера гораздо более прозрачна, чем для инфракрасных, устанавливается и поддерживается распределение температуры по высоте с температурой у поверхности $T_0 = 288$ К, значительно большей, чем равновесная температура $T_e = 254$ К на высоте несколько км, откуда инфракрасные фотоны уходят в космос. Превышение T_0 над T_e (так называемый парниковый эффект) обеспечивает существование жидкой воды и биосферы на Земле. Расчет по формуле (24) показал, что на поддержание теплового режима Земли тратится около 70 % негэнтропии, приходящей на планету [27].

Около 25 % притока негэнтропии расходуется на испарение воды [27], преимущественно с поверхности океанов; водяной пар, поднимаясь в атмосфере, конденсируется, создавая облака, переносимые ветрами на сушу, и выпадающие осадки обеспечивают водой растения суши. В этом так называемом гидрологическом цикле испаряется и затем выпадает в виде осадков около 5×10^{14} т воды в год.

Из этих оценок (которые должны уточняться с помощью более подробных расчетов) следует, что на всю динамику атмосферы и океана, включая все потоки массы и тепла в атмосфере и океане, цунами, ураганы и тому подобные явления, расходуется не более 5 % пришедшей на Землю негэнтропии [27]. Это удовлетворительно согласуется с оценками климатологов, по которым кинетическая энергия атмосферы и океана составляет 2 – 4 % от поглощенной солнечной энергии. Э.Лоренц (кстати, открывший первый странный аттрактор при изучении конвекции), рассмотрев эти оценки, указал на важность объяснения малости "КПД атмосферной тепловой машины" [31]. Рассмотрение баланса энтропии на планете дает простое объяснение: подавляющая часть притока негэнтропии тратится на поддержание теплового режима и испарение воды и на динамику остается несколько процентов. На Венере, где отсутствует вода, гораздо бóльшая доля притока негэнтропии расходуется на динамику атмосферы.

На Венере приток негэнтропии $\Delta N = 4{,}0 \times 10^{14}$ Вт К$^{-1}$ и $\Delta n = 0{,}88$ Вт м$^{-2}$ К$^{-1}$, а на Марсе $\Delta N = 9{,}9 \times 10^{13}$ Вт К$^{-1}$ и $\Delta n = 0{,}69$ Вт м$^{-2}$ К$^{-1}$ [26].

В статье [32] и некоторых других высказано мнение, что данные о солнечных потоках и температуре атмосферы Венеры, полученные с помощью космических аппаратов, либо ошибочны, либо указывают на нарушение баланса энтропии на планете. Расчет энтропийного баланса Венеры по формуле (23) показывает, что эти опасения необоснованны [26].

Таким образом, все процессы на планетах (включая биосферные процессы на Земле) идут за счет притока негэнтропии, возникающего из-за того, что солнечная радиация, приносящая на планету энергию, имеет температуру около 6000 К, а уходящая инфракрасная радиация, уносящая в единицу времени примерно такую же энергию, имеет много меньшую температуру, т.е. уносит много бóльшую энтропию, компенсирующую энтропию, произведенную во всех диссипативных процессах на планете.

Такие процессы и явления на Земле, как парниковый эффект, гидрологический цикл воды, общая циркуляция атмосферы и океана, а также ряд других, суть диссипативные структуры, поддерживаемые притоком негэнтропии и слагающие единую самоорганизующуюся систему, характеристикой которой является климат Земли.

В настоящее время ведется регулярный мониторинг радиационного баланса Земли с помощью приборов, установленных на спутниках. По этим данным можно рассчитать приток негэнтропии на планету, который может служить мерой происходящих там процессов. Это может помочь уточнить параметризацию диссипативных функций в атмосфере и океане, а также быть полезным для изучения эволюции и устойчивости климата [28 – 30].

5. Учет притоков энтропии при описании экосистем

Как известно, экосистема — совокупность живых организмов, населяющих определенную территорию, и окружающей среды, с которой они обмениваются веществом, энергией и информацией (см., например, [33]).

Известно, насколько сложными иерархическими системами являются организмы, а тем более экосистемы. Поэтому многие авторы высказывали сомнение в репрезентативности их теоретических моделей. Однако практика показала, что теоретические модели экосистем и биосферы постепенно совершенствуются и позволяют получать очень интересные результаты (см., например, [34 – 36]).

Первая задача при изучении экосистемы — узнать, как меняется со временем ее биомасса B и масса детрита (органического разлагающегося вещества) D. Если биомасса не уменьшается со временем, можно считать, что экосистема развивается нормально. Для B и D можно написать такие уравнения:

$$\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} = P_{\mathrm{p}} + \sum P_i - R_{\mathrm{a}} - M\,, \tag{25}$$

$$\frac{\mathrm{d}D}{\mathrm{d}t} = M - R_{\mathrm{h}}\,. \tag{26}$$

Здесь t — время, P_{p} — продукция фотосинтеза, P_i — притоки питательных веществ из почвы, R_{a} — автотрофное дыхание растений, M — скорость отмирания биоты, R_{h} — гетеротрофное дыхание (скорость разложения детрита).

В рамках рассматриваемой задачи достаточно изучать биомассу растений (фитомассу), которая составляет 95 – 98 % биомассы большинства экосистем. Входящие в уравнения (25), (26) члены описываются при ряде упрощений эмпирическими или полуэмпирическими соотношениями. Например, при описании продукции фотосинтеза учитывается ее зависимость от притока фотоактивной солнечной радиации (с длинами волн 0,4 – 0,7 мкм), концентрации углекислого газа CO_2 в атмосфере, влажности почвы и атмосферы, температуры растений и атмосферы, листового индекса (отношения площади листвы к площади почвы). В различных моделях применяют разные аппроксимации, причем всякая попытка уточнения описания вызывает появление множества новых параметров (см., например, [34 – 36]).

Теоретическое описание экосистемы можно уточнить, добавив к уравнениям (25), (26) уравнение баланса энтропии [24, 25]. Напишем его в стационарной форме (усреднив по времени за год или за вегетационный период, там, где он меньше года), расположив верхнюю границу области интегрирования в атмосфере над растительным покровом, нижнюю — в почве ниже корневой системы растений:

$$\int J(s)\,\mathrm{d}A = \int \sigma(s)\,\mathrm{d}V\,, \tag{27}$$

$$J(s) = \frac{f_\mathrm{s}}{T_\mathrm{s}} - \frac{4}{3}\,\sigma_\mathrm{B}(\varepsilon_\mathrm{s} T_\mathrm{s}^3 - \varepsilon_\mathrm{a} T_\mathrm{a}^3) - \\ - \frac{1}{T_\mathrm{s}}\left[LE - c_{pw} T_w r + Q + \sum_k J_k(m_k)\mu_k\right]. \tag{28}$$

Здесь V — объем системы (A — площадь ее границы); ε_s, ε_a — коэффициенты излучения растительности и атмосферы вблизи верхней границы системы, T_s, T_a — соответствующие температуры, L — теплота парообразования, E — скорость испарения, c_{pw} — теплоемкость воды, T_w, r — температура и интенсивность выпадения осадков, Q — турбулентный поток тепла в атмосферу.

Можно измерить компоненты потока энтропии, входящие в уравнение (28) (для необходимой точности следует комбинировать наземные и спутниковые измерения [28]), рассчитать этот поток, а следовательно, согласно (27), узнать скорость производства энтропии, являющуюся мерой всех физико-химических процессов в системе и связанную с важнейшей характеристикой системы — ее продуктивностью. Это может помочь уточнить ряд зависимостей, входящих в уравнения (25), (26), при отсутствии подробной модели системы.

Использование информации в различных формах — одно из основных характерных свойств живых систем [20, 22, 23]. Во-первых, эти открытые самоорганизующиеся системы питаются информацией (негэнтропией), приходящей из окружающей среды: растения – при поглощении радиации, используемой в процессе фотосинтеза, животные — при поглощении пищи. Это — незапоминаемая информация того же типа, что поддерживает стационарные состояния любой открытой системы. Но кроме того, в каждом организме имеется информационная система на основе молекул ДНК с участием РНК и белков, которая рецептирует, создает, хранит, передает и использует информацию для координации многочисленных процессов синтеза, идущих в каждой клетке, и процессов, идущих в организме, для поддержания гомеостаза организма и его роста, для передачи наследственных признаков при размножении. Эта запоминаемая информация обеспечивает согласованный ход всех жизненных процессов, а также — совершенствование организма и экосистемы.

Оценим численно средний приток информации к экосистеме. Как показано выше, средний приток негэнтропии на единицу площади на Земле равен $\Delta n = 1{,}22$ Вт м$^{-2}$ К$^{-1}$. Следовательно, приток информации $I = 1{,}27 \times 10^{19}$ бит см$^{-2}$ с$^{-1}$. Допустим, что этот приток падает на зеленый лист, в котором идет фотосинтез и на котором число живых клеток на 1 см^2 листа примерно 10^8. Тогда получаем приток $I \approx 1{,}3 \times 10^{11}$ бит с$^{-1}$ на клетку. Этот приток незапоминаемой информации расходуется на все процессы, в том числе — на фотосинтез и дыхание, испарение воды листьями (транспирация) и на поддержание температуры растений.

Теперь оценим количество информации, идущее непосредственно на фотосинтез — важнейший процесс, поддерживающий существование биосферы. По имеющимся данным полная первичная продукция биосферы на суше и в океане равна примерно $(4-5) \times 10^{14}$ кг год$^{-1}$ сухой массы [33, 37]. Среднее энергосодержание фитомассы равно 18,5 кДж кг$^{-1}$ [38]. Следовательно, глобальная мощность фотосинтеза равна примерно $(7-9) \times 10^{21}$ Дж год$^{-1}$ или $(2{,}3-2{,}9) \times 10^{14}$ Вт. Поделив эту величину на среднюю температуру у поверхности Земли — 288 К, получаем, что приток негэнтропии, который обеспечивает глобальную продукцию фитомассы, равняется $N = (0{,}8-1{,}0) \times 10^{12}$ Вт К$^{-1}$, что соответствует притоку информации $I = (0{,}9-1{,}0) \times 10^{35}$ бит с$^{-1}$. Поделив его на площадь Земли, получаем $(1{,}8-2{,}0) \times 10^{16}$ бит см$^{-2}$ с$^{-1}$. Считая, что на одном квадратном сантиметре зеленого листа расположено примерно 10^8 клеток, получаем, что клетка в процессе фотосинтеза перерабатывает информацию примерно 2×10^8 бит с$^{-1}$, т.е. со скоростью персонального компьютера. Интересно отметить, что энергия такого же порядка, как расходуется в сложнейшем процессе фотосинтеза, выделяется в простейшем процессе падения осадков в гравитационном поле Земли, что еще раз доказывает необходимость учета качества энергии [27].

Подчеркнем еще раз, что оценка количества информации — это лишь первый шаг в изучении информационной системы, гораздо важнее оценить ее качество. Например, оценено, что в человеческом организме содержится (в основном в молекулах белков) порядка $1{,}3 \times 10^{27}$ бит информации, тогда как в молекулах ДНК — всего 3×10^{23} бит, но именно эта информация самая ценная, так как это информация, составляющая гено́м [23].

На основании изложенного можно сделать вывод о целесообразности использования негэнтропии и информации при изучении экосистем и биосферы.

6. Заключение

Подытожим основные выводы из проведенного рассмотрения. Энтропия играет ведущую роль при описании открытых и особенно самоорганизующихся систем, так как это единственная функция, позволяющая различить неравновесные и равновесные процессы; приток негэнтропии является мерой всех физико-химических процессов, происходящих в системе. Состояние любой стационарной неравновесной системы поддерживается притоком негэнтропии. Для полного описания открытой системы кроме баланса массы, импульса и энергии следует рассматривать баланс энтропии, включающий качество приходящей к системе энергии и производство энтропии в физико-химических процессах, происходящих в системе.

Связь между информацией и энтропией, найденную в теории информации, полезно использовать при описании самоорганизующихся систем, учитывая различия между системами, запоминающими и не запоминающими информацию, объем фазового пространства информационной ячейки и способность или неспособность системы приходить в определенное состояние с нулевой энтропией.

Все физико-химические процессы на планетах идут за счет расхода притока негэнтропии, возникающего из-за того, что солнечная радиация, приходящая на планету, имеет температуру, много большую, чем инфракрасная радиация, уходящая с планеты. Мысленный эксперимент с заменой Солнца на звезду той же светимости, но с другим спектром, показывает, что полное описание процессов на планете невозможно без учета баланса энтропии. С помощью уравнения баланса энтропии можно рассчитать, какая доля притока негэнтропии израсходована в различных процессах, происходящих на планете, уточнить характеристики диссипации, исследовать устойчивость системы.

При изучении экосистемы измерение притока негэнтропии, возможное с помощью комбинации спутниковых и наземных приборов, и использование уравнения баланса энтропии позволяет уточнить величину производства энтропии, являющуюся мерой всех физико-химических процессов, происходящих в экосистеме, которую очень трудно найти другим путем ввиду сложности моделирования экосистемы.

Список литературы

1. Николис Г, Пригожин И *Познание сложного* (М.: Мир, 1990)
2. Хакен Г *Синергетика. Иерархия неустойчивостей* (М.: Мир 1985)
3. Климонтович Ю Л *Статистическая теория открытых систем* (М.: Янус, 1995)
4. Кадомцев Б Б *УФН* **164** 449 (1994), *УФН* **165** 967 (1995)
5. Emden R *Nature* (London) **141** 908 (1938)
6. Шрёдингер Э *Что такое жизнь с точки зрения физики* (М.: Иностр. Лит., 1947)
7. Де-Гроот С, Мазур П *Неравновесная термодинамика* (М.: Мир, 1964)
8. Зубарев Д Н *Неравновесная статистическая термодинамика* (М.: Наука,1971)
9. Гленсдорф П, Пригожин И *Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций* (М.: Мир, 1974)
10. Ландау Л Д, Лифшиц Е М *Статистическая физика* (М.: Наука, 1964)
11. Планк М *Теория теплового излучения* (М.: ОНТИ, 1935)
12. Oxenius J *Kinetic Theory of Particles and Photons* (Berlin: Springer, 1986)
13. Callies U, Herbert F *Ann. Geophys.* **6** 645 (1988)
14. Пригожин И *УФН* **131** 185 (1980)
15. Мартынов Г А *УФН* **166** 1105 (1996)
16. Ландау Л Д, Лифшиц Е М *Механика сплошных сред* (М.: Наука, 1953)
17. Монин А С, Яглом А М *Статистическая гидромеханика* (М.: Наука, 1965)
18. Szilard L *Z. Phys.* **53** 840 (1929)
19. Бриллюэн Л *Наука и теория информации* (М.: Физ.-мат. лит., 1960)
20. Романовский Ю М, Степанова Н В, Чернавский Д С *Математическая биофизика* (М.: Наука, 1984)
21. Горшков В Г *ДАН СССР* **350** 135 (1996)
22. Волькенштейн М В *Биофизика* (М.: Наука,1988)
23. Волькенштейн М В *Энтропия и информация* (М.: Наука, 1986)
24. Стратонович Р Л *Теория информации* (М.: Сов. радио, 1975)
25. Essex C *J. Atmos. Sci.* **41** 1985 (1984)
26. Изаков М Н *Космич. исслед.* **28** 617 (1989)
27. Изаков М Н *Исслед. Земли из космоса* (4) 3 (1991)
28. Изаков М Н, Жуков Б С *Исслед. Земли из космоса* (6) 32 (1992)
29. Peixoto J P et al. *J. Geophys. Res.* **96** 10981 (1991)
30. Stephens G L, O'Brien D M *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **119** 121 (1993)
31. Лоренц Э *Природа и теория общей циркуляции атмосферы* (Л.: Гидрометиздат, 1970)
32. Ingersol A P *J. Geophys. Res.* **85** 8219 (1980)
33. Бигон М, Харпер Дж, Таунсенд К *Экология* (М.: Мир, 1989)
34. Крапивин В Ф, Свирежев Ю М, Тарко А М *Математическое моделирование глобальных биосферных процессов* (М.: Наука,1982)
35. Моисеев Н Н и др. *Человек и биосфера* (М.: Наука, 1985)
36. Foley J A *J. Geophys. Res.* **99** D10 20773 (1994)
37. Виноградов М Е *Океанология* **36** 566 (1996)
38. Лархер В *Экология растений* (М.: Мир, 1978)

Selforganisation and information for planets and ecosystems

M.N. Izakov
Space Research Institute, Russian Academy of Sciences
Profsoyuznaya ul. 84/32, 117810 Moscow, Russia
Tel. (095) 333-21 44
Fax (095) 310-70 23

Entropy is fundamental to describing open systems. It makes possible the distinction between nonequilibrium and equilibrium processes. The influx of negentropy is a measure of all physical and chemical processes occurring in the system. The entropy balance equation is a useful tool for the comprehensive description of an open system, as its application to planets and ecosystems illustrates. The entropy-information relationship established by the theory of information is applicable to self- organising systems provided their special features, particularly the presence or absence of memory, are taken into account.

PACS numbers: 05.70.Ln, **87.10.+e**, **96.30.–t**, **89.60.+x**

Bibliography — 38 references

Received 10 April 1997