

**Виктор Георгиевич ГОРШКОВ**

**ФИЗИЧЕСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ  
УСТОЙЧИВОСТИ ЖИЗНИ**

Москва, ВИНТИ, 1995, 470 С.

**ГЛАВА ВТОРАЯ**

*“Солнечная энергия и упорядоченные процессы в неживой природе”*

Данный файл имеет разрешение 150 точек на дюйм  
и возможность текстового поиска.

Версия для печати с разрешением 300 точек на дюйм  
(без текстового поиска), содержание книги и ссылки на другие главы  
находятся на сайте

[www.bioticregulation.ru](http://www.bioticregulation.ru)  
в разделе “Публикации: Книги”

## Глава 2. СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГИЯ И УПОРЯДОЧЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В НЕЖИВОЙ ПРИРОДЕ

### 2.1. Распад упорядоченных состояний

В природе мы постоянно наблюдаем упорядоченные макроскопические процессы — ветер, образование облаков, выпадение осадков, течение рек и пр. Упорядоченные движения молекул вещества всегда противопоставляются хаотическому (нескоррелированному) тепловому движению молекул. Упорядоченность выражается в том, что движение одной молекулы или группы молекул вещества оказывается связанным (скоррелированным) с движением другой группы. Так, все молекулы воды в реке имеют составляющую скорости в направлении течения. В водоворотах при турбулентном течении макроскопические группы молекул обладают одинаковыми угловыми скоростями. Ветер означает наличие одинаковой составляющей скорости у всех молекул воздуха.

Молекулы, образующие макроскопическое движение, взаимодействуют с молекулами среды, в которой происходит это движение. При этом возникает очень большое количество конечных состояний: при упругом столкновении молекула может изменить направление своего движения, при неупругом столкновении — передать свою энергию молекуле среды. Любые конечные состояния двух взаимодействующих молекул примерно равновероятны. Это означает, что из всех взаимодействующих со средой молекул лишь ничтожная доля сохранит составляющую скорости в направлении первоначального упорядоченного движения, остальные передадут эту составляющую молекулам среды. Следовательно, упорядоченное скоррелированное движение будет распадаться и переходить в неупорядоченное хаотическое движение молекул. При этом энергия упорядоченного движения подвергается диссипации — превращается в тепловую энергию. Отметим, что распад происходит в том случае, когда возможен переход из начального состояния в большое число конечных состояний. Тогда совокупность объектов, приготовленная в одном и том же начальном состоянии, переходит в совокупность объектов, находящихся в различных конечных состояниях. Это и воспринимается как переход от упорядоченности к хаосу. Существование упорядоченности всегда связано с актом ее приготовления.

В силу непрерывно происходящих процессов распада и диссипации энергии заданный упорядоченный процесс поддерживается, если существует приток энергии от другого упорядоченного процесса. Реки текут потому, что непрерывно выпадают осадки. Выпадение

осадков инициируется образованием облаков. Образование облаков связано с конденсацией паров воды. Выделяющаяся при конденсации скрытая теплота парообразования генерирует макроскопические движения молекул, возникают циклоны, смерчи, сопровождающиеся сильными ветрами. Энергия ветра также постепенно рассеивается, переходя в тепло. Испарение, осадки и ветер возникают потому, что Земля непрерывно получает солнечную энергию. Солнечная энергия генерирует на Земле все виды упорядоченных макроскопических процессов. Тепло, в которое переходит (диссипирует) солнечная радиация, рассеивается в космическое пространство в виде теплового излучения. В результате этого средняя температура Земли остается примерно постоянной. Неравномерность нагрева Земли также приводит к возникновению упорядоченных макроскопических потоков вещества в атмосфере и океане. Энергия, которая способна переходить в энергию упорядоченных макроскопических процессов в земных условиях примерно постоянных давления и температуры, т. е. совершать работу, называют свободной в отличие от тепловой энергии, которая связана с хаотическим движением молекул и совершать работу не может (Sommerfeld, 1952). Свободная энергия четко определена в теории равновесной термодинамики и статистической физики (Ландау, Лившиц, 1964; Фейнман, 1978). Это определение с успехом используется в биофизике и биохимии (Ленинджер, 1976; Брода, 1978) и сохраняет свой смысл и при малых отклонениях от термодинамического равновесия (Николис, Пригожин, 1979; Пригожин, 1980; Николис, 1989). Общей теории процессов, далеких от термодинамического равновесия, не существует. В таких условиях теряет свой смысл и термодинамическое определение свободной энергии (Левич, 1962; Пригожин, 1980).

До открытия закона сохранения энергии под словом энергия понималась именно свободная энергия, способная совершать работу. Свободная энергия не сохраняется. В процессе совершения работы эта энергия превращается из одного вида в другой, постепенно подвергается диссипации и переходит в тепловую энергию. Установленный эмпирически закон сохранения энергии означает, что количество энергии в этих превращениях не меняется (первое начало термодинамики). Происходит лишь рассеивание, распад первоначальной свободной энергии. Распад происходит всегда только в одном направлении уменьшения упорядоченности энергии. Тепловая энергия уже не может самопроизвольно приобрести способность совершать работу. Этот закон также установлен эмпирически (второе начало термодинамики). Во многих отраслях знаний (экономике, биологии) под словом энергия по-прежнему понимается только свободная энергия. Следуя этой традиции, в дальнейшем

почти всегда будем опускать слово "свободная" перед всеми упорядоченными видами энергии, способными совершать работу. Тепловую энергию в большинстве случаев будем называть просто теплом.

Все разнообразие наблюдаемых макроскопических процессов представляет собой различные виды распада начальных упорядоченных состояний вещества и диссипации содержащейся в них энергии. Совокупность существующих богатых энергией состояний вещества составляет энергетические ресурсы Земли. Эти ресурсы представлены либо в кинетической энергии скоррелированного движения различных частей вещества (поток солнечной радиации, гидроэнергия рек и океанических волн, энергия морских приливов, ветровая энергия), либо в накопленной потенциальной энергии скоррелированных связей различных частей вещества (гравитационной, физической в виде скрытой теплоты конденсации и замерзания воды, химической и ядерной энергии), либо в существующей разности температур между экваториальными и полюсными областями поверхности Земли, между поверхностным и глубинным слоями вод океанов, морей, озер. Запасы ядерной энергии, гравитационной энергии перераспределения земных недр и энергии морских приливов сохранились со времен образования солнечной системы. Все остальные виды ресурсов энергии генерируются солнечной радиацией.

При протекании распадных процессов до конца все виды потенциальной энергии сначала переходят в кинетическую энергию упорядоченных движений, которая затем подвергается диссипации и рассеивается в виде тепловой энергии хаотического движения отдельных молекул. Следовательно, конечным результатом распада является минимум потенциальной энергии. Однако при малой скорости диссипации могут происходить обратные процессы перехода упорядоченной кинетической энергии в потенциальную, которая может накапливаться. Так происходит накопление в атмосфере скрытой энергии конденсации влаги при испарении воды, вызывающей впоследствии ураганы и смерчи, накопление энергии деформации в земной коре, вызывающей землетрясения, накопление гравитационной энергии в горных снежных наносах, вызывающей лавины, накопление органических веществ в процессе поглощения растениями солнечной энергии, поддерживающих существование передвигающихся животных (см. раздел 5.9) и создающих возможность возникновения лесных пожаров, накопление электроэнергии в химических или водно-гравитационных аккумуляторных установках и т. п. Во всех колебательных процессах и процессах распространения волн в зависимости от начала отсчета времени можно наблюдать либо переход потенциальной энергии в кинетическую,

либо обратный переход. Примером незатухающей последовательности переходов такого рода может служить вращение комет по сильно вытянутым эллиптическим орбитам. Стремления к минимуму потенциальной и свободной энергии в этих случаях не происходит.

Путем изменения направления распада богатого энергией упорядоченного состояния вещества можно генерировать самые разнообразные макроскопические процессы. Все метеорологические явления, происходящие в природе, все живые организмы, существовавшие на Земле, и, наконец, все энергетические станции, двигатели и машины, созданные человеком, являются примерами этого разнообразия. Установленные теоретические закономерности протекания физических и химических процессов связаны с предсказанием направления изменения начального состояния. Начальное же состояние должно каждый раз приготавливаться или задаваться независимо.

Распадные процессы характеризуются направлением и продолжительностью времени распада. В отсутствие распада процессы характеризуются только скоростями изменений измеримых величин: потоками, скоростями движения, частотами колебаний и пр. Время для процессов в отсутствие распада (стационарных, периодических или случайно флуктуирующих вокруг стационарного значения) может быть получено формально математической заменой переменных путем деления изменяющейся измеримой величины на измеряемую скорость ее изменения. Это время оборота (например,  $m/q$ , где  $m$  — масса организма,  $q$  — скорость обмена веществ) периода колебаний или вращений ( $2\pi/\omega$ ,  $\omega$  — угловая частота). Время приобретает физическое содержание при возникновении процессов затухания и распада, т. е. при наличии начала и конца процесса. Кинетическая энергия, не подвергающаяся распаду, наблюдается во вращении планет и в экспериментально обнаруженных явлениях типа сверхпроводимости и сверхтекучести.

Любые наблюдаемые в повседневной жизни и регистрируемые в эксперименте события состоят из необратимых процессов распада начального состояния. В отсутствие процессов распада не происходит никаких наблюдаемых событий во времени. Периоды суточных и годовых вращений Земли используются как единицы измерения времени распадных процессов, происходящих на земной поверхности. Накопленная и нераспадающаяся потенциальная энергия (например, в виде ископаемых запасов органики) не характеризуется временем до начала или использования человеком. Абсолютная геохронология Земли известна только благодаря распаду нестабильных изотопов химических элементов.

## 2.2. Солнечная энергия

Так как излучение Солнца генерирует практически все распадающиеся процессы на земной поверхности, приведем основные необходимые для дальнейшего описания характеристики солнечной энергии. Солнечное излучение близко к равновесному излучению, подчиняющемуся распределению Планка, с абсолютной температурой  $T_c = 5770$  К (Newkirk, 1980). Средняя температура поверхности Земли ( $15^\circ\text{C}$ ) составляет  $T_0 = 288$  К (Mitchell, 1989). В силу большой разницы температур солнечное излучение на Земле представляет собой практически чистый источник свободной энергии, который может преобразовываться в упорядоченные макроскопические движения с к.п.д., близким к единице. В соответствии с известным принципом Карно (Sommerfeld, 1952), отражающим второе начало термодинамики, это излучение может быть переведено в земных условиях постоянной температуры  $T_0$  в работу с максимальным к.п.д.  $\eta_0 = (T_c - T_0)/T_c = 0,95$ . Максимальный к.п.д. не зависит от того, каким способом улавливается солнечная энергия — в виде кинетической энергии теплового излучения фотонов в замкнутой полости, в виде потенциальной энергии связи химических соединений, образующихся в процессе фотореакций и т. п. Никаким способом нельзя (без энергетических потерь) получить поток солнечного излучения больше, чем на поверхности Солнца и, соответственно, температуру излучения, больше солнечной. В противном случае можно было бы повысить к.п.д. по сравнению с максимально возможным. При дополнительных затратах энергии (в качестве источника которой может быть использовано само солнечное излучение) можно преобразовать солнечное излучение в поток излучения с любой температурой при условии, что общий к.п.д. преобразования не превысит максимально возможного значения. Частным случаем такого преобразования является концентрация солнечного излучения с помощью неизображающей оптики (Уинстон, 1991; Cooke et al., 1990;).

Существующее среднее распределение солнечной энергии по различным генерируемым ее макроскопическим процессам на земной поверхности совместно с заданием видов и частоты всех встречающихся флуктуаций определяют климат земной поверхности.

Мощность солнечного излучения, падающего на всю Землю за пределами атмосферы, равна (Willson, 1984):

$$\begin{aligned} \pi r_z^2 I_c &= 4\pi r_z^2 I = 1,7 \cdot 10^{17} \text{ Вт}, \\ I_c &= 4I = (1367 \pm 3) \text{ Вт/м}^2, \quad I = 340 \text{ Вт/м}^2, \end{aligned} \quad (2.2.1)$$

где  $I_c$  — солнечная постоянная, естественные изменения которой не превосходят 0,1% (Hansen, Lacis, 1990);  $r_z$  — радиус Земли. Солнечная энергия, падающая на сечение Земли площадью  $\pi r_z^2$ , распределяется затем по всей поверхности Земли площадью  $4\pi r_z^2$  за счет вращения Земли и энергетических потоков в атмосфере и океане,  $I$  — средний поток излучения на единицу площади земной поверхности.

Величина  $I$  определяется орбитой планеты при полном поглощении всей падающей солнечной энергии. В действительности часть солнечной энергии отражается от поверхности планет, в результате чего планеты становятся видимыми на звездном небе. Эта отраженная часть солнечной энергии называется планетарным альбедо  $A$ . Земное альбедо сейчас составляет 30%. На 83% эта величина определяется отражением атмосферы и лишь на 17% — поверхностью Земли (Schneider, 1989). Средний, поглощенный Землей (вместе с атмосферой), поток солнечного излучения на единицу площади земной поверхности составляет:

$$I_0 = I(1 - A) = 240 \text{ Вт/м}^2. \quad (2.2.2)$$

Атмосферой поглощается около одной трети  $I_0$ . В результате средний поток солнечного излучения, попадающий на поверхность Земли, ослабляется по сравнению с падающим  $I_c$  (2.2.1) примерно вдвое и составляет около (Schneider, 1989)

$$I_0 \approx 150 \text{ Вт/м}^2. \quad (2.2.3)$$

Эта величина исчерпывает всю свободную энергию, которую земная поверхность получает из космоса.

Абсолютная температура воздуха есть величина, пропорциональная средней энергии движения молекул воздуха. Абсолютная температура поверхности Солнца  $T_c$  пропорциональна средней энергии фотона солнечной радиации. Аналогично абсолютная температура поверхности Земли  $T_0$  пропорциональна средней энергии фотона земного теплового излучения. В равновесном состоянии, когда температура Земли не меняется, энергия солнечного излучения, падающего на Землю, совпадает с энергией обратного теплового излучения Земли. Это означает, что каждый фотон солнечного излучения распадается в среднем на  $n_0 = T_c/T_0 \approx 20$  фотонов теплового излучения, которые излучаются Землей обратно в космическое пространство. Именно в результате распада солнечных фотонов и происходит генерация всех наблюдаемых нами упорядоченных процессов на земной поверхности.

Если бы Солнце посылало на Землю ту же энергию в виде теплового излучения Земли (т. е. температура Солнца совпадала бы с земной  $T_c = T_0$ ), то температура Земли поддерживалась бы на прежнем уровне, но распад солнечного фотона и, следовательно, генерация всех упорядоченных процессов были бы невозможны. Земля была бы теплой, но на ней не происходило бы никаких процессов и не могла бы существовать жизнь. (Вследствие вращения Земли вокруг своей оси и вокруг Солнца могли бы возникать некоторые упорядоченные процессы, связанные с разностью дневных и ночных, а также летних и зимних температур. Однако эти процессы не шли бы ни в какое сравнение с реально существующими процессами на Земле).

В табл. 2.2.1. приведено распределение солнечной и других мощностей по различным видам макроскопических движений на земной поверхности.

Геотермальная энергия с мощностью порядка 30 ТВт образуется в результате перераспределения плотностей вещества и радиоактивного распада в земных недрах (Сорохтин, Ушаков, 1991). Верхний предел мощности, выделяющейся за счет гравитационного перераспределения масс, соответствующий всей массе Земли, первоначально сосредоточенной на поверхности можно оценить из размерных констант величиной порядка  $M_3 g r_3 / t_3 - 3 \cdot 10^3$  ТВт,  $M_3 = 6 \cdot 10^{24}$  кг — масса,  $r_3 = 6 \cdot 10^6$  м — радиус,  $t_3 = 5 \cdot 10^9$  лет — возраст Земли,  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup> — ускорение свободного падения. То есть перераспределение плотности на величину порядка 1% может объяснить величину всей геотермальной мощности. Эта мощность генерирует упорядоченные процессы рудообразования в литосфере и изменения состояния окружающей среды с к.п.д., не превышающим  $10^{-3}$ . Глобальная мощность этих упорядоченных процессов не превосходит 10 ГВт, что на четыре порядка меньше мощности фотосинтеза глобальной биоты (Бримхолл, 1991).

Потоки энергии у земной поверхности

Виды мощности	Мощность		Источники
	ТВт*	Доля, %	
Мощность солнечной радиации и ее распределение:	$1,7 \cdot 10^5$	100	Willson, 1984
поглощение атмосферой и земной поверхностью	$10^5$	69	Ramanathan, 1987; Schneider, 1989
поглощение земной поверхностью	$8 \cdot 10^4$	46	„. „.
расход на испарение	$4 \cdot 10^4$	24	„. „.
явные турбулентные потоки тепла	$-1 \cdot 10^4$	7	„. „.
перенос тепла с экватора к полюсам: атмосферой	$3 \cdot 10^3$	3	Kellogg, Schneider, 1974; Peiboto, Oort, 1984; Chahine, 1992
океаном	$2 \cdot 10^3$	2	
поглощение суши	$2 \cdot 10^4$	13	Ramanathan, 1987; Schneider, 1989
мощность испарения: суши (эвапотранспирация)	$5 \cdot 10^3$	3	Львович, 1974; Братсерт, 1985
растениями (транспирация)	$3 \cdot 10^3$	2	„. „.
ветровая мощность (мощность диссипации ветровой энергии)	$2 \cdot 10^3$	1	Gustavson, 1979; Братсерт, 1985
мощность океанских волн (мощность диссипации волновой энергии)	$1 \cdot 10^3$	0,6	Братсерт, 1985
мощность фотосинтеза	$10^2$	0,06	Whittaker, Likens, 1975
гравитационная мощность падения всех осадков	$10^2$	0,08	Львович, 1974
гидромощность рек (падение стока всех рек с высоты 300 м)	3	$2 \cdot 10^{-3}$	Львович, 1974; Скиннер, 1989
Другие виды возобновимых мощностей:	30	0,02	Berman, 1975; Скиннер, 1989; Starr, 1971
геотермальная			
вулканов и гейзеров	0,3	$2 \cdot 10^{-4}$	Starr, 1971
приливная	1	$6 \cdot 10^{-4}$	Hubbert, 1971
лунного света, падающего на Землю	0,5	$3 \cdot 10^{-4}$	Аллен, 1977
Современное мировое энергопотребление человечества	10	$6 \cdot 10^{-3}$	Starke, 1990; Скиннер, 1989
Антропогенное усиление парникового эффекта	$10^3$	0,6	Dickinson, Cicerone, 1986

### 2.3. Физическое состояние динамического равновесия

Если поток свободной энергии отсутствует, то молекулы среды находятся в состоянии теплового (термодинамического) равновесия. В тепловом равновесии количество молекул с энергией  $\epsilon$  пропорционально бoльцмановской экспоненте  $\exp(-\epsilon/k_B T)$ , где  $k_B$  — постоянная Больцмана, а  $T$  — абсолютная температура ( $T$  [K] =  $t$  [°C] + 273 [K]). В частном случае при  $\epsilon$ , равной кинетиче-

ской энергии молекулы, распределение Больцмана переходит в распределение молекул по скоростям Максвелла. Эти распределения устанавливаются именно в результате случайного нескоррелированного взаимодействия молекул, когда переходы молекул в любое их состояние равновероятны. В результате, подавляющее число молекул оказывается в тех состояниях, число которых наибольшее. Это наименее упорядоченное состояние вещества.

В термодинамике измеряется состояние не отдельной молекулы, а макроскопической группы молекул в объеме, соизмеримом с размером человека. В качестве единицы измерения используется 1 моль, содержащий  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  молекул (число Авогадро). Такое число молекул содержится в объеме вещества, масса которого в граммах равна его молекулярной массе, т. е. совпадает (с точностью до энергии связи) с числом протонов и нейтронов в молекуле. Тогда число молей  $n_E$  в состоянии с энергией  $E = N_A \epsilon$  определяется соотношением:

$$n_E = c e^{-E/RT}, \quad R = \kappa_B N_A = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К моль}},$$

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{\text{молекул}}{\text{моль}}, \quad (2.3.1)$$

$$\kappa_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К молекул}},$$

где коэффициент  $c$  не зависит от энергии  $E$ .

При хаотическом тепловом движении в отсутствие внешнего потока энергии группа из  $N$  молекул может случайно образовывать скоррелированное макроскопическое движение. Такое явление называется флуктуацией. Однако относительная частота (вероятность) возникновения флуктуаций группы, состоящих из  $N$  молекул, пропорциональна  $1/\sqrt{N}$ . Это свойство называется законом больших чисел (см., например, Ландау, Лифшиц, 1964; Пригожин, 1980). Ввиду чрезвычайной общности и важности этого хорошо известного закона для всего последующего изложения продемонстрируем его количественное содержание на конкретном примере.

Рассмотрим скорость движения центра тяжести группы из  $N$  молекул в заданном направлении. Обозначим эту скорость через  $X$ , а скорость движения каждой молекулы группы в том же направлении через  $x_i$ . По определению скорости центра тяжести группы одинаковых молекул имеем:

$$X = \frac{1}{N} \sum x_i. \quad (2.3.2)$$

Средняя скорость каждой молекулы и любой группы молекул в покоящемся сосуде с газом или жидкостью равна нулю:  $\bar{X}_i - \bar{x}_i = 0$ .

Продельвая серию измерений скорости группы молекул, можно получить среднее значение для квадрата этой скорости:

$$\bar{X}^2 = \overline{\left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right)^2} = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \bar{x}^2 + \frac{1}{N^2} \sum_{i \neq j} \sum_j \overline{x_i x_j}. \quad (2.3.3)$$

Если молекулы движутся нескоррелированно друг с другом, то второй член в правой части равен нулю. Учитывая, что средние квадраты скорости для каждой молекулы одинаковы, для среднего значения скорости группы молекул получаем:

$$\sqrt{\bar{X}^2} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sqrt{\bar{x}^2}, \quad (2.3.4)$$

что и составляет сущность закона больших чисел. Главным в выводе закона больших чисел является равенство нулю второго члена в уравнении (2.3.3). Если бы мы имели дело с опытом, в котором движение молекул было бы скоррелировано, например,  $N$  молекул испускались бы с равными скоростями в одном направлении, то в этом случае, очевидно, средняя скорость центра тяжести группы молекул равнялась бы средней скорости каждой молекулы. Это непосредственно видно из выражения (2.3.3). В указанном случае второй член в (2.3.3) оказывается больше первого и равен  $\bar{x}^2$ . Поэтому второй член количественно определяет степень скоррелированности группы молекул: если его наблюдаемая величина меньше или порядка первого члена (т. е. закон больших чисел выполняется), то движение молекул можно считать нескоррелированным. В газе корреляционные длины имеют порядок размеров молекул, которые много меньше среднего расстояния между молекулами (длины свободного пробега).

Очевидно, что приведенный вывод закона больших чисел справедлив для любых величин, выражающихся в виде суммы составляющих их частей. В частности, величину  $X$  в (2.3.2) можно рассматривать как среднее значение  $x_i$  в серии  $N$  независимых измерений. Тогда (2.3.4) соответствует хорошо известному закону уменьшения стандартного отклонения от среднего значения с ростом независимого числа  $N$  измерений.

В математической статистике с законом больших чисел обычно связывают центральную предельную теорему (или ее различные частные случаи), согласно которой нормальное (гауссово) распределение со стандартным отклонением  $\sigma/\sqrt{N}$  возникает как предель-

ный случай наложения большого числа  $N$  произвольных совпадающих (или не совпадающих) распределений со стандартным отклонением  $\sigma$  (или  $\sigma_i \neq \sigma = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 \right)^{1/2}$ ) (Арлей, Бух, 1951; Абезгауз и

др., 1970; Худсон, 1970). Соответствующим физическим примером является наблюдаемое сужение лазерной линии по сравнению с естественным резонансным (лоренцевым) контуром спектральной линии излучения при когерентном наложении излучения многих атомов. Важнейшим фактом в этом случае является именно сужение распределения, пропорциональное  $1/\sqrt{N}$ , которое является следствием отсутствия скоррелированности различных слагаемых в среднем, см. (2.3.3).

Если учесть, что физически наблюдаемой является только конкретная выборка случайной величины, а не принципиально ненаблюдаемая "генеральная совокупность", на которой основана математическая статистика, то разница между "центральной предельной теоремой" и уменьшением стандартного отклонения от среднего пропорционально  $1/\sqrt{N}$  практически стирается.

Безразмерное отношение  $r_{ij} = \frac{x_i \cdot x_j}{\sqrt{x_i^2} \cdot \sqrt{x_j^2}}$  представляет собой простейшую корреляционную характеристику — хорошо известный коэффициент корреляции. Коэффициент корреляции, однако, отражает только наличие линейной корреляции между двумя величинами, которая правильно описывает любые нелинейные корреляционные связи лишь при малых относительных изменениях коррелирующих величин.

Предположим, что вещество состоит из внутренне скоррелированных групп частиц (доменов), которые не скоррелированы между собой. Тогда  $r_{ij}$  отлично от нуля только внутри каждой группы. Средний линейный размер группы (радиус скоррелированности доменов) можно оценить, вычисляя сумму  $(\sum |r_{ij}| \cdot R_{ij}/N^2)$  по тем  $N$  частицам  $i$  и  $j$ , для которых все  $r_{ij}$  (в пределах экспериментальной точности) отличны от нуля, где  $R_{ij}$  — расстояние между частицами  $i$  и  $j$ . Аналогично можно определить радиус скоррелированности по любым измеримым характеристикам частиц, для которых может быть определена величина  $r_{ij}$ . Внутренняя скоррелированность разных объектов чрезвычайно разнообразна. Ее описывают различными корреляторами, отличающимися от  $r_{ij}$  способами усреднения. Отсутствие скоррелированности всегда может быть охарактеризовано величиной коэффициента корреляции.

Среднеквадратичная скорость молекул описывает макроскопические характеристики вещества: температуру и давление газа. Тем-

пература и давление имеют смысл для объектов, обладающих достаточно большими макроскопическими размерами. Так как число молекул в  $1 \text{ см}^3$  твердого тела или  $1 \text{ дм}^3$  газа имеет порядок числа Авогадро, т. е.  $N \sim 10^{23}$ , то для целостных объектов — частиц с размером больше микрона, флуктуации макроскопических характеристик внешней среды практически не наблюдаемы. Однако с уменьшением размера частиц флуктуации температуры и давления для них становятся заметны и частицы начинают совершать в среде беспорядочное броуновское движение. Для частиц с размерами, приближающимися к размерам молекул, температура и давление теряют всякий смысл.

Химическая кинетика и каталитические реакции в живом организме характеризуются усредненными измеримыми характеристиками больших групп молекул. Для того, чтобы эти характеристики имели строго определенные значения и малые флуктуации, размеры этих групп должны быть достаточно велики. Отсюда следует, что минимальные размеры живых организмов должны быть на три—четыре порядка больше размеров молекул.

#### 2.4. Устойчивость физических состояний

Характерной особенностью состояния теплового равновесия, в котором взаимодействие всех молекул нескоррелировано, является сохранение всех свойств этого состояния при расчленении объема газа или жидкости на любые макроскопические части. Каждая часть, содержащая достаточно большое число молекул, будет обладать теми же характеристиками (температурой, давлением и пр.), что и весь объем.

Наименее упорядоченное состояние вещества является физически устойчивым. Устойчивость состояния означает, что после кратковременного внешнего возмущения оно возвращается к первоначальному виду и сохраняется в нем неограниченно долго. Так, например, при ускорении или замедлении групп молекул в веществе распределение Максвелла вновь восстанавливается в соответствии со средней температурой. Сохранение состояния означает, что характеризующие его измеримые переменные — температура, давление, средняя скорость движения центра тяжести и пр. не меняются со временем. Такое состояние называют стационарным. Очевидно, что реально существующее стационарное состояние является устойчивым, ибо внешние возмущения всегда присутствуют. Следует подчеркнуть, что стационарное состояние определяется постоянством макроскопических усредненных измеримых перемен-

ных. В стационарном состоянии теплового равновесия отдельные молекулы продолжают непрерывно сталкиваться, изменяя свои скорости, направления полета и внутреннее возбуждение.

Если внешнее возмущение действует постоянно, как, например, в случае потока солнечной энергии, падающей на Землю, то состояние вещества меняется и устанавливается на другом устойчивом по отношению к возмущениям уровне. Этот уровень соответствует равенству генерации и распада характерных для заданного вещества упорядоченных макроскопических движений и обладает большей средней упорядоченностью, чем в отсутствие возмущения. Стационарность и устойчивость такого состояния означает, что после усреднения по времени существования таких упорядоченных движений измеримые характеристики остаются постоянными и не меняются с течением времени. Течение реки на различных порогах можно считать стационарным, несмотря на то, что в любой локальной части потока непрерывно возникают и распадаются турбулентные вихри. Стационарность и устойчивость потока характеризуются постоянством средней скорости течения, постоянством распределения по размерам угловых скоростей и продолжительности существования турбулентных вихрей и пр. Климат Земли характеризуется постоянной среднегодовой температурой, давлением, среднегодовым направлением и силой ветра, числом циклонов и антициклонов, амплитудой суточных и сезонных колебаний температуры. Можно утверждать, что на протяжении существования жизни на Земле флуктуации температуры у земной поверхности никогда не достигали значений и длительности, при которых могла бы испариться или замерзнуть вся вода в океанах.

При постоянном потоке энергии неограниченно долго поддерживаются только макроскопические процессы средней упорядоченности, распад которых все время компенсируется их генерацией. Поэтому в устойчивом динамическом равновесии отношение числа распадов упорядоченных состояний к числу их спонтанных генераций равно единице.

Макроскопические процессы с упорядоченностью значительно выше средней генерируются в виде редко встречающихся флуктуаций с ограниченным временем существования (например, смерчи). Чем выше упорядоченность флуктуаций, тем меньше вероятность их спонтанного возникновения и тем реже они возникают. Поэтому редкие флуктуации всегда появляются в единичном числе. Среди редких флуктуаций наибольший интерес представляют те, у которых диссипация энергии оказывается минимальной. Эти флуктуации, несмотря на то, что возникают столь же редко, как и быстро распадающиеся, существуют достаточно продолжительное время и поэтому именно они в большинстве случаев обнаруживаются эмпи-

рически (например, шаровые молнии). К таким флуктуациям относятся волновые процессы, упорядоченность которых затухает медленно (например, цунами). Однако редкие флуктуации, как правило, не дают вклада в средние характеристики состояния.

Средняя упорядоченность макроскопических процессов, возникающих в заданном постоянном потоке внешней энергии при отводе равного количества отработанной тепловой энергии, не меняется со временем, т. е. является стационарной. Состояния с устойчивой средней упорядоченностью иногда называют неравновесными диссипативными структурами, так как они поддерживаются внешним потоком энергии (Николис, Пригожин, 1979; Пригожин, 1980). Однако, учитывая, что они сохраняют устойчивость только в постоянном внешнем потоке энергии, будем называть их состояниями динамического равновесия (Бауэр, 1935). Наглядно состояние динамического равновесия характеризуют птица или вертолет, неподвижно зависшие в воздухе. Все устойчиво работающие, созданные человеком двигатели также представляют собой стационарные состояния динамического равновесия.

С ростом потока энергии возрастает упорядоченность средних непрерывно поддерживающихся макроскопических процессов и возникающих флуктуаций. При этом редко возникавшие при меньшем потоке энергии флуктуации могут непрерывно поддерживаться, а чрезвычайно редкие флуктуации стать более частыми. Если в заданный поток энергии поместить объект с установившимся слабо упорядоченным макроскопическим процессом, то этот процесс оказывается неустойчивым и по истечении измеримого конечного периода времени переходит в более упорядоченное устойчивое состояние динамического равновесия, соответствующее средней упорядоченности подводимого потока энергии. После усреднения по периодическим колебаниям и частым флуктуациям новое состояние динамического равновесия также оказывается стационарным и, следовательно, полностью определяется величиной и характером внешнего потока энергии. Уменьшение потока энергии вызывает обратное явление и упорядоченность макроскопических процессов падает (Шустер, 1988).

Таким образом, во всех наблюдаемых физических и химических процессах при заданном внешнем потоке энергии существует определенное устойчивое состояние динамического равновесия. С изменением внешнего потока энергии устойчивость состояния нарушается. Этот вид устойчивости в дальнейшем будем называть физической устойчивостью. Макроскопические процессы как с увеличением, так и с уменьшением упорядоченности относительно среднего уровня оказываются неустойчивыми и проявляются в виде редких флуктуаций. Другими словами, редкие флуктуации, спон-

танно возникающие в заданном потоке энергии, не обладают физической устойчивостью.

Как хорошо известно, упорядоченность состояния системы может увеличиваться не только при подводе внешней энергии, но и при отводе тепла, когда газ переходит в жидкость, а жидкость в твердое тело. В этом случае при критических значениях внешних переменных происходит резкое увеличение скоррелированности различных частиц системы и ее упорядоченности. Это связано с взаимодействием молекул и сокращением числа устойчивых состояний отдельных молекул при уменьшении общей энергии системы. Аналогичные резкие изменения скоррелированности различных частей системы происходят во внешних потоках энергии при достижении критических величин измеряемых характеристик этих потоков (Хакен, 1985).

Все процессы изменения устойчивой упорядоченности физических систем при изменении внешних условий вблизи их критических значений, т. е. подводе внешней энергии при отводе тепла, традиционно называют фазовыми переходами (Хакен, 1985). Очевидно, что в зависимости от направления воздействия внешних условий фазовые переходы могут приводить либо к увеличению, либо к уменьшению упорядоченности системы (Шустер, 1988).

Приведем хорошо известные наблюдаемые примеры фазовых переходов с изменением внешнего потока энергии. С ростом скорости потока жидкости происходит переход от ламинарного к турбулентному течению. С ростом градиента температуры неупорядоченное перемешивание жидкости приобретает упорядоченную ячеистую структуру (ячейка Бенара). Лазер при слабой мощности оптической накачки светит как обычная лампа накаливания, излучая свет с широким спектром случайных частот; при большой мощности накачки все атомы лазера начинают излучать скоррелированным когерентным образом на одной частоте, а остальные частоты исчезают. Аналогичные явления происходят в процессах химических реакций; при создании потока богатых энергией мономеров могут возникать стационарные состояния с образованием и распадом полимеров или периодических изменений концентраций веществ во времени и пространстве (Николис, Пригожин, 1979; Накен, 1984). Продукты некоторых автокаталитических реакций, содержащие равное число правых и левых стереоизомерных молекул (рацемат), могут превращаться в упорядоченные кирально чистые состояния, содержащие только левые или правые молекулы, когда подводимый организующий внешний поток энергии (например, концентрации начальных, богатых химической энергией веществ) или отводимый поток тепловой энергии (при охлаждении системы) достигают кри-

тического значения (Морозов, 1978; Гольданский, Кузьмин, 1989; Avetisov, Goldanskii, 1993).

## 2.5. Физическая самоорганизация

В последние десятилетия наблюдается большой прогресс в изучении поведения физических систем во внешнем потоке энергии, т. е. физических систем динамического равновесия (Шустер, 1988). Показано, что фазовые переходы из одного устойчивого состояния в другое под влиянием изменения характеристик внешних потоков энергии при критических значениях этих характеристик описываются сравнительно простыми нелинейными уравнениями. Причем, совершенно различные физические и химические системы часто описываются сходными уравнениями. Это привело к объединению этого направления изучения физических и химических систем под общим названием "синергетика" (Хакен, 1985; Naken, 1984).

Любые измерения значений физических величин обладают погрешностями в пределах разрешающей способности экспериментальных установок. Поэтому любые начальные условия могут быть заданы в пределах этих погрешностей. Предсказания развития систем на основе установленных законов также будут содержать неопределенности начальных условий. В некоторых системах при переходе через пороговые значения параметров внешних потоков энергии эта неопределенность экспоненциально возрастает со временем, так что из заданных начальных условий можно перейти практически в любые конечные. При этом система может сохранять устойчивость в том смысле, что все конечные состояния не отклоняются существенно от определенной величины среднего значения ("притягиваются" к фиксированному значению). Эти значения стали называть "странными аттракторами" (Шустер, 1988; Eckmann, Ruelle, 1985). Аттракторы — это средние значения измеряемых характеристик обычных устойчивых систем, например, затухающих или незатухающих колебаний. Система, обладающая странным аттрактором, ведет себя хаотически, хотя описывается простыми детерминистическими классическими уравнениями, не содержащими квантовых неопределенностей (Eckmann, Ruelle, 1985).

Подобные уравнения со странными аттракторами стали рассматривать как кандидатов на описание явлений турбулентности в природе. Многие исследователи также надеются на возможность аналогичного описания устойчивости жизни (Николис, Пригожин, 1979; Накен, 1984). Однако жизнь и смерть в противоположность фазовым переходам необратимы.

В связи со сказанным в последнее время наблюдаемые характеристики фазовых переходов стали обозначать биологическими терминами, имея в виду существующую, на первый взгляд, аналогию между явлениями физико-химической упорядоченности и процессами в живой природе. Так, процессы увеличения упорядоченности физико-химических систем при подводе внешней энергии стали называть самоорганизацией и самоорганизованной критичностью по аналогии с возникновением новой, ранее не существовавшей генетической информации, т.е. с самоорганизацией видов живых организмов в процессе эволюции (Николис, Пригожин, 1979; Cross, Hohenberg, 1993). Происходящую при этом смену неустойчивого фазового состояния устойчивым стали называть отбором (Хакен, 1985; Haken, 1984), а взаимодействие между неустойчивым и устойчивым состояниями — конкуренцией. Понятия отбор и конкуренция в указанном смысле можно, очевидно, было бы применять к любым физическим и химическим процессам, связанным с переходом из начального состояния через серию неустойчивых промежуточных состояний в конечное устойчивое состояние. Так, например, говорят об отборе различных конкурирующих колебательных максимумов (мод) в лазере (Хакен, 1985; Haken, 1984), о конкуренции и отборе нескольких конкурирующих химических или физических реакций (Николис, Пригожин, 1979), протекающих с различными вероятностями из заданного начального состояния. Конкуренции и отбору, например, приписывают две альтернативные возможности рассеяния облака или выпадения из него осадков, а также известный факт существования только одной реки, вытекающей из озера (Одум, 1986).

Во всех физических и химических процессах самоорганизацию, конкуренцию и отбор связывают с устойчивым состоянием динамического равновесия. В этих случаях типы конкуренции между различными упорядоченными состояниями и их отбор полностью определяются значениями характеристик подводимого потока внешней энергии (Шустер, 1988). Очевидно, что редкие флуктуации, спонтанно возникающие в единственном числе вокруг устойчивого динамического равновесия, не могут конкурировать друг с другом. Отбор выражается в распаде и исчезновении всех редких физических флуктуаций. В следующем разделе показано, что существуют четкие различия в содержании всех этих понятий для живых и неживых систем. Поэтому уже вошедшие в употребление термины — устойчивость, самоорганизация, конкуренция и отбор для физико-химических систем ниже будем снабжать определением "физические".

## 2.6. Размерности измеримых величин и корреляционные связи между ними

Естественными науками называют область знаний, содержащую количественную информацию об измеримых величинах природных объектов. Эта информация заключается в областях изменения числовых значений измеримых величин и эмпирически установленных фундаментальных и корреляционных связях между различными измеримыми величинами. Наблюдаемые на опыте значения измеримых величин и корреляционные связи между ними представляют собой законы природы и изображаются знаками равенства (=).

Из нескольких измеримых величин всегда может быть построена удобная по тем или иным причинам комбинация, которой можно присвоить символ и название. Такая комбинация является определением, "заменой переменных" и в противоположность законам природы должна записываться в виде тождества ( $\equiv$ ). Например, если какая-либо измеримая величина  $z(t)$  изменяется со временем со скоростью  $\dot{z}(t) = dz(t)/dt$ , то можно образовать относительную скорость изменения и обозначить ее через  $k(t)$ :

$$\frac{\dot{z}(t)}{z(t)} \equiv k(t) \quad \text{или} \quad \frac{\dot{z}(t)}{z(t) - \tau(t)} \equiv K(t), \quad (2.6.1)$$

где функция запаздывания  $\tau(t)$  может быть задана произвольно. Выражения (2.6.1) представляют собой тождества, замену переменных, не содержат никакой дополнительной информации и могут быть написаны для любой величины. Они превращаются в уравнения, если независимо от  $z(t)$  известен закон изменения  $k(t)$  или  $K(t)$  и  $\tau(t)$  со временем (Жирмунский, Кузьмин, 1990).

Выбор единиц измерения величины зависит от произвола наблюдателя. Любые наблюдаемые связи между различными измеримыми величинами не зависят от выбора единиц измерения этих величин, т.е. являются инвариантными относительно выбора единиц измерения. Это условие выполняется, если обе части равенства имеют одинаковую размерность, что всегда можно записать в виде равенства безразмерных величин. Связь между двумя переменными величинами ( $z$  и  $l$ ) разных размерностей возможна, если из них удастся образовать одну постоянную безразмерную комбинацию. Безразмерная комбинация может быть составлена при наличии фундаментальной физической постоянной величины переходной размерности. Например, длина  $l$  и время  $t$  могут быть связаны через посредство скорости  $u$  или ускорения  $g$ :

$$l = ut, \quad l = gt^2. \quad (2.6.2)$$

Из этих связей может быть получена связь между скоростью, длиной и ускорением, не содержащая времени:

$$u^2 = gl, \text{ или } \frac{u^2}{gl} = 1. \quad (2.6.3)$$

Если в задаче не существует физической постоянной переходной размерности, то безразмерные комбинации могут быть составлены только из отношения изменения величины  $dz$  (или  $dl$ ) к самой величине  $z$  (или  $l$ ). В этом случае связь между изменениями двух величин разных размерностей  $dz$  и  $dl$ , малыми в сравнении с самими величинами  $z$  и  $l$ , может иметь только следующий вид (Горшков, 1984в; Смирнов, 1986; Brody, 1945; Gell-Mann, Low, 1954; Kleiber, 1961; Wilson, Kogut, 1974; Mandelbrot, 1982; Peng et al., 1992):

$$\frac{dz}{z} = a \frac{dl}{l}, \quad da = \Psi(a) \frac{dl}{l}, \quad (2.6.4)$$

где  $a$  — безразмерный коэффициент пропорциональности. Приращение безразмерной величины  $da$  может изменяться пропорционально приращению величины  $dl/l$  (или  $dz/z$ ) с коэффициентом пропорциональности, равным произвольной функции от единственной конечной безразмерной величины  $a$ , что и написано во втором уравнении.

Любые измерения величин производятся с конечной, достигнутой до настоящего времени экспериментальной точностью (погрешностью измерений), которая определяется чувствительностью используемых приборов (Pirkin, Ritter, 1983). Связь между относительными малыми приращениями (2.6.4) также может быть проверена эмпирическим путем, если величины относительных приращений превышают экспериментальную точность их измерения. Отсюда следует, что "нелинейная связь" между двумя относительными приращениями различных величин невозможна: она означала бы отсутствие корреляции. Например, образуя  $dz/z$  и  $(dl/l)^2$  всегда можно выбрать величины  $dz$  и  $dl$  так, чтобы  $dz/z$  находилась в пределах погрешности измерений, а величина  $(dl/l)^2$  была бы много меньше этих пределов. Как известно  $dx/x = d \ln(x/x_e)$ ,  $x_e$  — произвольно. Поэтому  $\ln(x/x_e)$  — это единственная, выделенная функция размерной переменной, дифференциал которой безразмерен.

Общее решение (2.6.4) имеет вид:

$$\ln z/z_e = \Phi(\ln l/l_e), \quad (2.6.5)$$

где функция  $\Phi(x)$  однозначно выражается через функцию  $\Psi(a)$ :

$$\ln \frac{l}{l_e} = \int_{a_e}^a \frac{da'}{\Psi(a')} \equiv f^{-1}(a), \quad a = f(\ln l/l_e), \quad a_e = f(0),$$

$$\Phi(x) = \int_0^x f(x') dx', \quad (2.6.6)$$

где символ  $f^{-1}$  обозначает обратную функцию,  $l_e$  — произвольная постоянная интегрирования,  $z_e$  и  $a_e$  — выражается через  $l_e$  при фиксированных  $z$  и  $l$  посредством соотношений (2.6.5) и (2.6.6). Эту связь иногда называют ренормализационной группой. В приближении постоянного  $a$  решение этих уравнений принимает простой вид:

$$y = ax, \quad y \equiv lg(z/z_e), \quad x \equiv lg(l/l_e), \quad \text{или } z = z_e(l/l_e)^a. \quad (2.6.7)$$

Соотношения (2.6.7) в биологии называют аллометрическими (Pardé, 1980; Peters, 1983). Так как в дальнейшем корреляционная связь типа (2.6.7) с размером  $l$  будет установлена для многих переменных  $z$ , то удобно наклон  $a$  линии связи  $lg z$  и  $lg l$  обозначать символом  $z'$ :

$$a = z' \equiv d \lg(z/z_e) / d \lg(l/l_e). \quad (2.6.8)$$

Величина  $l_e$  — произвольная размерная постоянная. Она определяется выбором единицы измерения (индекс  $e$ ). Величина  $z_e$  определяется через выбранное значение  $l_e$  и измеренные значения  $z$  и  $l$ . Вид функциональной зависимости (2.6.7) не меняется при изменении  $l_e$  (масштабная инвариантность) (Смирнов, 1986; Mandelbrot, 1982).

Зависимость (2.6.7) в биологической литературе наиболее часто представляется в виде (Peters, 1983):

$$z = bl^a, \quad b = \frac{z_e}{l_e^a}, \quad (2.6.9)$$

где константа  $b$  при произвольном логарифмическом наклоне  $a$  имеет иррациональную размерность (размерность Хаусдорфа (Шустер, 1988; Хайлов и др., 1992)).

Приведем также вид функциональной зависимости (2.6.5) в случае, когда  $\Psi(a_0) = 0$  и функция  $\Phi(a)$  может быть разложена в ряд Тейлора по степеням  $a(a-a_0)$ , причем оставлен только первый не исчезающий член в этом разложении:

$$1) \gamma_1 \neq 0 \quad \Psi(a) = \gamma_1 a; \quad \Phi(x) = a_0 x + b_1 (e^{x^2} - 1), \quad (2.6.10)$$

$$c_1 \equiv \gamma_1, \quad b_1 \equiv a_0 \gamma_1, \quad x \equiv \ln(l/l_0),$$

$$2) \gamma_1 = 0: \quad \psi(a) = \gamma_2 a^2; \quad \Phi(x) = a_0 x + b_2 \ln(1 + c_2 x), \quad (2.6.10a)$$

$$b_2 \equiv -1/\gamma_2, \quad c_2 \equiv -\gamma_2 a_0.$$

Вторые члены функции  $\Phi(x)$  в выражениях (2.6.10) и (2.6.10a) могут рассматриваться как поправочные члены к аллометрической формуле (2.6.7), где  $b_1$ ,  $c_1$  и  $b_2$ ,  $c_2$  так же, как и  $a_0$ , могут быть подобраны эмпирически. Константа  $a_0$  может быть близка или равна нулю. В этом случае поправочные члены становятся главными.

Связь двух величин через посредство одной фундаментальной физической постоянной также может быть записана в виде (2.6.7). При этом в силу линейности законов динамики наклон логарифмических прямых линий  $z'$  в (2.6.7) выражаются в виде простых рациональных чисел. Например, зависимость вида  $u = \sqrt{gl}$ , связывающая длину вертикального прыжка  $l$  со скоростью отрыва  $u$ , может быть записана в виде (2.6.7) при  $z' = 1/2$ ,  $u_0 = \sqrt{gl_0}$  и в виде (2.6.9) при  $b = u_0/\sqrt{l_0} = \sqrt{g}$ .

Единицы измерения устанавливаются экспериментаторами из соображений удобства. У различных экспериментаторов-профессионалов эти единицы могут никогда не пересечься, они могут не знать, что многие единицы имеют одну и ту же размерность. Откуда ясно, что метры и ярды, годы и часы имеют одну и ту же размерность, а, например, метры и годы — разную? Покажем, что во всех случаях это может быть установлено только эмпирическим путем.

В простейшем случае измерения длин мы убеждаемся, что у одного и того же объекта могут быть получены путем измерения две количественные характеристики длины, например, одна,  $L_1$ , в метрах и другая,  $L_2$ , в ярдах. Заранее неизвестно, что эти два числа представляют собой одну и ту же характеристику объекта, измеренную в разных единицах. Только эмпирическим путем мы устанавливаем, что при измерении различных объектов соотношение между числами этих длин в метрах и ярдах в пределах экспериментальной точности всегда одинаково. Следовательно, можно утверждать, что эти два измерения относятся не к разным, а к одной и той же характеристике объекта. Формально это можно записать в виде:

$$\frac{L_1}{1 \text{ м}} = C \frac{L_2}{1 \text{ ярд}}, \quad C = 0,914399. \quad (2.6.11)$$

Зная, что  $L$  представляет всегда одну и ту же характеристику измеряемого объекта — длину, мы можем формально положить  $L_1 = L_2 = L$  в обеих частях эмпирически установленного равенства (2.6.11) и получить соотношение между ярдами и метрами. С относительной погрешностью порядка 0,4% имеем:

$$1 \text{ ярд} = 0,91 \text{ м}, \quad \text{или} \quad 0,91 \text{ м/ярд} = 1.$$

Полагая переводную константу тождественной единице, мы можем навсегда исключить из рассмотрения единицу измерения ярд, перейдя на измерение длин только в метрах.

Теплота ( $Q$ ) и работа ( $W$ ) долгое время считались различными энергетическими характеристиками системы. Теплота измерялась в калориях, работа — в Джоулях. Открытие закона сохранения энергии показало, что работа переходит в эквивалентное количество теплоты, т. е. выполняется равенство:

$$\frac{W}{1 \text{ Дж}} = C \frac{Q}{1 \text{ кал}}, \quad C = 4,1855. \quad (2.6.12)$$

Равенство (2.6.12) представляет собой закон природы, который выполняется всегда в пределах достигнутой экспериментальной точности. Поэтому, как и в предыдущем случае, можно считать теплоту и работу совпадающими энергетическими характеристиками системы одной размерности. Рассматривая теплоту и работу как энергию можно положить  $Q = W$  и избавиться от единицы измерения теплоты — калории, перейдя целиком на использование Джоулей. С относительной погрешностью порядка 0,3% имеем:

$$4,2 \text{ Дж} = 1 \text{ кал}, \quad \text{или} \quad 4,2 \text{ Дж/кал} = 1.$$

Не следует, однако, забывать, что в процессе перехода работы в теплоту происходит изменение другой, не сохраняющейся измеримой характеристики системы — энтропии (или информации), см. раздел 2.8.

Сила ( $f$ ), масса ( $m$ ) и ускорение ( $a$ ) считались до открытия второго закона Ньютона не связанными между собой. Сила измерялась в кгс, масса в кг, ускорение в  $\text{м/с}^2$ . Закон Ньютона установил, что всегда при приложении силы  $f$  к телу с массой  $m$  возникает ускорение  $a$ , связанное с массой и силой соотношением:

$$\frac{m}{1 \text{ кг}} \cdot \frac{a}{1 \text{ м/с}^2} = C \frac{f}{1 \text{ кгс}}, \quad C = 9,81. \quad (2.6.13)$$

(Для веса тела, когда  $a = g = 9,81 \text{ м/с}^2$ , сила (вес), измеренная в кгс, численно совпадает с массой тела, измеренной в кг, что тоже

представляет собой следствие закона Ньютона). В силу универсальности соотношения (2.6.13), выполняющегося всегда (при скоростях передвижения, малых по сравнению со скоростью света), второй закон Ньютона можно записать в виде:

$$f=ma,$$

т. е. считать силу и произведение массы на ускорение величинами одной размерности и навсегда избавиться от единицы измерения силы — кГс:

$$1 \text{ кГс} = 9,81 \text{ Н}, \quad 1 \text{ Н} \equiv 1 \text{ кг м}^2/\text{с}^2, \quad \text{или} \quad 9,81 \text{ Н/кГс} = 1.$$

Связь энергии  $E$  с импульсом  $p$  тел, движущихся со скоростью, близкой к скорости света  $c$ , имеет хорошо известный вид:  $E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$ . Масса пропорциональна энергии при импульсе, равном нулю. Эта масса характеризует внутреннюю потенциальную энергию покоящегося тела. При переходе из одной инерционной системы в другую энергия и импульс меняются. Они преобразуются как компоненты вектора в пространстве—времени. Масса  $m$  одинакова во всех системах отсчета, она является инвариантом, скаляром. При взаимодействии тел суммарная энергия и импульс сохраняются. Масса  $m$  не сохраняется. Например, атом, поглощающий фотон с нулевой массой, переходит в возбужденное состояние с большей потенциальной энергией и большей массой. Сохранение массы и вещества следует из закона сохранения энергии только в приближении скоростей передвижения, малых по сравнению со скоростью света. Так как растительность использует энергию света, то отсутствие массы у света приводит к важным экологическим следствиям.

Массу  $m$  иногда называют массой покоя. При этом релятивистской массой движения тела  $M$  называют величину, связанную с энергией соотношением  $E = Mc^2$  (см., например, Левич, 1962). В отличие от массы покоя  $m$  масса движения  $M$ , как и энергия  $E$ , сохраняется, но изменяется при переходе из одной системы отсчета в другую. Однако введение дополнительной величины, всегда связанной с энергией постоянным множителем, физически бессодержательно. Поэтому физически релятивистской массы движения не существует. Любое тело характеризуется только массой  $m$  и определение "покоя" перед этой массой следует опускать (Окунь, 1988).

Закон всемирного тяготения (при скоростях передвижения, малых в сравнении со скоростью света) двух масс  $m_1$  и  $m_2$  на расстоянии  $r$  друг от друга определяет силу их взаимодействия:

$$f = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad G = 6,670 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2). \quad (2.6.14)$$

Так как этот закон универсальный, выполняющийся всегда, то можно было бы избавиться от размерности массы, полагая  $G=1$  (Ландау и др., 1965). Однако гравитационные силы между двумя массами ничтожно малы в сравнении с электродинамическими силами, которые определяют все биохимические реакции и взаимодействия между телами в биологии. Относительную величину гравитационных сил можно определить, сравнивая электродинамические и гравитационные взаимодействия между электронами. Кулоновское взаимодействие двух электронов определяется хорошо известной силой вида (2.6.14), в котором  $m_1$  и  $m_2$  заменены на заряды электрона, а константа  $G$  положена равной единице (размерность зарядов определяется из закона Кулона). Безразмерное отношение двух сил гравитационного  $fG$  и электродинамического  $f_e$  равно:

$$f_{\text{eff}e} = \frac{G m_e^2}{e^2} = 2,3 \cdot 10^{-43},$$

где  $m_e$  и  $e$  — масса и заряд электрона.

Поэтому гравитационное взаимодействие между окружающими нас телами с размерами порядка биологических объектов (организмов) является эффективно выключенными (т. е.  $G \rightarrow 0$ ) по сравнению с электродинамическими силами. Сохраняется лишь взаимодействие между всеми телами и массой Земли, что проявляется только при наличии ускорения свободного падения  $g$  на суше и в воздухе. В океане гравитация компенсируется архимедовой силой и не проявляется. Если бы жизнь не вышла из океана на сушу и в атмосферу, или зародилась на малых планетах типа искусственных спутников, то существование универсального гравитационного взаимодействия вряд ли было бы открыто, движение планет казалось бы происходящим по исключительным законам, а вся жизнь бы протекала в состоянии невесомости без изменения характера биохимических реакций.

В этом смысле гравитационное взаимодействие эффективно не является универсальным. Характерная для биологии масса, 1 кг, не имеет никакого отношения к единице массы  $1 \text{ м}^3/\text{с}^2 = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ кг}$ , возникающей при условии  $G \equiv 1$ .

Таким образом, только эмпирически установленные универсальные связи между величинами разных размерностей позволяют сокращать число размерностей измеримых величин (Седов, 1977). Не, в противоположность утверждению работы (Седов, 1977), продолжение сокращения числа размерностей не зависит от нашего же-

лания, а определяется наличием законов природы — универсальных корреляционных связей. Почему же остаются независимыми размерности массы, длины и времени? Потому, что между этими характеристиками не установлено никаких универсальных корреляционных связей. Более того, сам факт происходящих в окружающем нас мире процессов показывает, что таких универсальных связей не существует.

Таким образом, выбор единиц измерения массы, длины и времени во всех имеющих реальное отношение к жизни и окружающей среде науках остается произвольным. Их можно фиксировать в международной системе единиц (СИ). В конкретных исследованиях часто бывает удобно использовать в качестве единиц измерения три фундаментальные константы различных размерностей (Окунь, 1988). (Например, в физике высоких энергий в качестве основных единиц измерения используют постоянную Планка  $\hbar$ , скорость света  $c$  и массу электрона  $m_e$  или протона  $m_p$ ).

С рассмотренных позиций можно оценивать также целесообразность введения новых терминов и понятий. Несколько различных терминов допустимо вводить только в том случае, если они включают различные нескоррелированные между собой характеристики объекта. Например, биота характеризует только живые организмы, а биосфера включает также все вещества, используемые организмами. Полезно различать такие понятия как теория и математическая модель. Эти понятия четко определены в точных естественных науках (астрономии, физике, химии), но не всегда адекватно используются в биологии и экологии.

Теория — это эмпирически установленная единственная система ограниченного числа корреляционных связей, описывающая большую совокупность явлений с известной из эксперимента степенью точности. Эта точность не обязательно должна быть высокой (например, теория  $\alpha$ -распада ядер способна правильно предсказать лишь порядок величины постоянной распада), но всегда определенной. Теория строго предсказывает то, чего не может быть. Теория далеко не всегда способна (детерминированно или стохастически) предсказать то, что должно происходить. Например, все, что нарушает соотношения (2.6.11)—(2.6.14), невозможно в пределах установленной экспериментальной точности. В рамках выполнения этих соотношений может происходить все, что угодно.

При наличии теории многие ее следствия могут быть получены в рамках теории возмущений — проведении расчетов с точностью до определенной степени малого безразмерного параметра. Такими параметрами могут быть малые относительные отклонения измеримых величин от состояния равновесия  $\Delta z/z_0$  (2.6.4) и (2.7.9) и безразмерные комбинации, включающие фундаментальные физиче-

ские константы типа чисел Фруде  $u^2/gl$  (2.6.3) и др. Учет высших приближений по малому параметру увеличивает точность результата. Недопустимой ошибкой является учет только части членов, пропорциональных заданной степени малого параметра, и игнорирование оставшейся части, например, в силу трудности их вычисления. В этом случае учет членов, пропорциональных следующей степени малого параметра, уменьшает точность расчета, достигнутого при правильном учете всех членов предшествующей степени. Такую ошибку называют превышением точности.

В математической модели делается попытка понять, как рассматриваемый процесс должен происходить во всех деталях. Модель строится, когда общей теории не существует. В модели объединяются известные теории отдельных частей явления. Недостающие для однозначных (детерминистических или стохастических) предсказаний корреляционные связи постулируются без предварительной эмпирической проверки их точности. Возможно множество моделей, описывающих рассматриваемое явление. Точность, с которой модель делает предсказание, неизвестна. Превышение точности характерная черта многих моделей. Усложнение модели путем увеличения ее степеней свободы позволяет согласовать любую модель с заданным количеством эмпирических данных. Широкое распространение использования моделей связано с возможностью перебора на современных быстродействующих компьютерах большого числа различных сценариев и вытекающих из них предсказаний. Неопределенность постулируемых корреляционных связей часто приводит к уровню достоверности предсказаний математической модели, близкому к нулю. В этом случае число моделей и сценариев, описывающих явление, стремится к бесконечности, а получаемая с помощью них информация стремится к нулю.

## 2.7. Термическая устойчивость климата

Поток коротковолновой солнечной энергии, поглощаемой Землей  $I_e$ , приводит к разогреву земной поверхности, что вызывает тепловое излучение Земли обратно в космическое пространство. В результате закона сохранения энергии (2.6.12) баланс потоков энергии на Земле может быть записан в виде (Горшков, 1994):

$$I_e = q_e + cdT/dt, \quad (2.7.1)$$

где  $I_e$  — солнечное излучение, поглощенное Землей, определяемое солнечной постоянной  $I_c$  и планетарным альбедо  $A$ ;  $q_e$  — поток теплового эффективного излучения Земли в космическое пространство,  $c$  — теплоемкость,  $T$  — абсолютная температура земной по-

верхности. Последний член (2.7.1) представляет собой изменение тепловой энергии Земли  $Q$  со временем. Считается, что  $Q$  зависит только от абсолютной температуры  $T$ . Теплоемкость  $c = \delta q / \delta T$  в основном определяется теплоемкостью океанов (Mitchell, 1989).

В стационарном состоянии постоянной температуры  $T = T_0$  земной поверхности имеем:

$$q_{e0} = I_{e0} = I(1 - A_0). \quad (2.7.2)$$

Величины  $q_{e0}$  и  $A_0$  зависят от температуры  $T_0$ . Соотношение (2.7.1) представляет собой неявную функцию температуры  $T_0$  от солнечной постоянной  $I_s$ ,  $I = I_s/4$  (2.2.1). Прежде, чем переходить к исследованию температурной устойчивости (2.7.2), выясним основной вид зависимости  $q_e$  от  $T_0$ .

С хорошей точностью  $q_e$  может быть аппроксимировано излучением абсолютно черного тела. Это определяет эффективную температуру  $T_e$  излучения Земли в космическое пространство, которая не совпадает с  $T_0$ . Согласно закону Стефана—Больцмана имеем:

$$q_e = \sigma T_e^4, \quad \sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт м}^{-2} \text{ К}^{-4}. \quad (2.7.3)$$

Поток излучения  $q_e$  непосредственно измеряется за пределами атмосферы со спутников Земли (Raval, Ramanathan, 1989), поэтому температура  $T_e$  достаточно хорошо известна. Используя значение  $I_s$  (2.2.2), получаем  $T_e = 255 \text{ К}$ , или  $-18 \text{ }^\circ\text{C}$  (табл. 2.7.1). Приземная температура  $T$  больше температуры излучения, покидающего верхние слои атмосферы,  $T_e$ . Поэтому излучение земной поверхности  $q$  больше  $q_e$ . Это связано с тем, что парниковые газы атмосферы захватывают значительную часть излучения земной поверхности и направляют его обратно. В результате, излучение земной поверхности  $q$  может быть получено из уравнения:

$$q = I_s + \alpha q, \quad \text{или} \quad q = \frac{I_s}{1 - \alpha} \quad (2.7.4)$$

Коэффициент отражения  $\alpha$  характеризует часть теплового излучения земной поверхности, захваченного атмосферой и "отраженного" обратно на поверхность Земли, где оно поглощается поверхностью, приводит к ее дополнительному нагреванию и вновь излучается в атмосферу (рис. 2.7.1). Излучение земной поверхности также может быть описано законом Стефана—Больцмана, что определяет  $T$ , непосредственно измеряемую на поверхности Земли:

$$q = \sigma T^4. \quad (2.7.5)$$

В стационарном состоянии, таким образом, имеем:

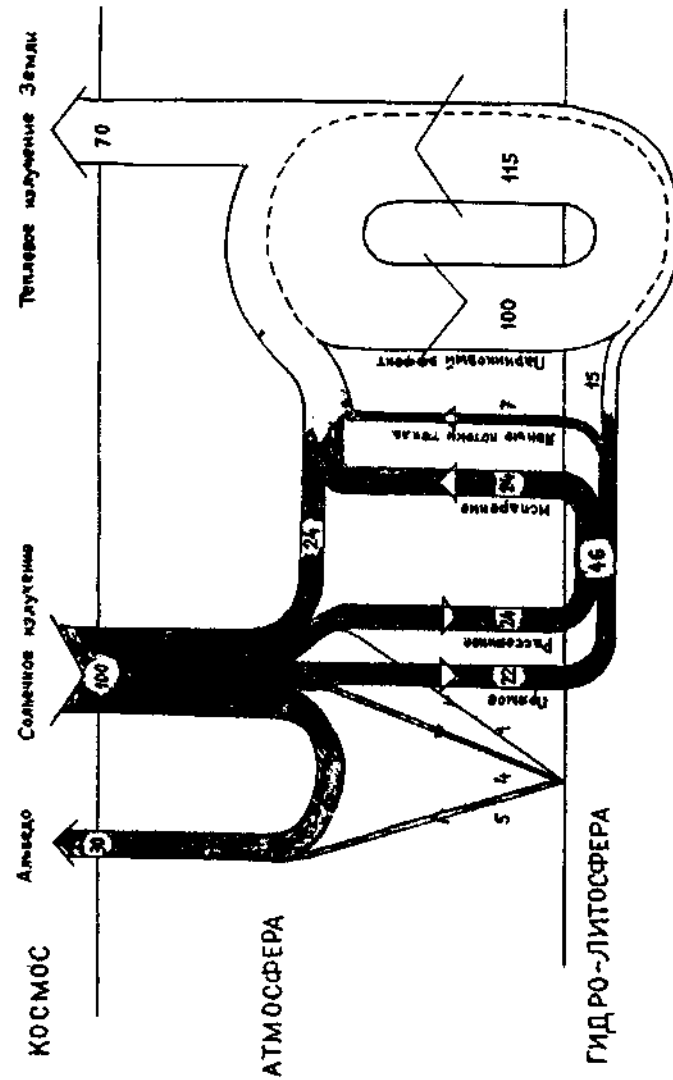


Рис. 2.7.1. Распределение солнечной энергии на Земле. Зачерненные стрелки обозначают потоки свободной энергии, генерируемые солнечным излучением. Потоки тепловой энергии обозначены белыми (полными) стрелками (Mitchell, 1989, Schneider, 1989).

$$q_{\text{от}} = q_0(1 - \alpha_0), \quad (2.7.6)$$

$$I(1 - A_0) = q_0(1 - \alpha_0), \quad q_0 = \sigma T_0^4. \quad (2.7.7)$$

Коэффициент отражения  $\alpha = (q_0 - q_{\text{от}})/q_0$  часто называют нормированным парниковым эффектом. Он также может быть непосредственно измерен со спутников Земли (Raval, Ramanathan, 1989). Зная температуру земной поверхности  $T_0 = 288 \text{ K}$  ( $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ), можно определить  $q_0 = 390 \text{ Вт/м}^2$  и найти  $\alpha_0 \approx 0,4$  (табл. 2.7.1). Абсолютная величина парникового эффекта составляет  $\alpha_0 \theta_0 \approx 160 \text{ Вт/м}^2$ . Около  $100 \text{ Вт/м}^2$  определяется парами воды, относительное содержание которых в атмосфере составляет по объему  $0,3\%$ . Примерно за  $50 \text{ Вт/м}^2$  ответственен газ  $\text{CO}_2$ , содержание которого  $\sim 0,03\%$ . Оставшуюся часть парникового эффекта определяют газы  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{O}_3$ , общее содержание которых не превосходит  $3 \cdot 10^{-4}\%$  (Mitchell, 1989).

Атмосфера, создающая парниковый эффект, представляет собой многослойное образование и эквивалентна "шубе". Поток уходящего тепла  $q_e$  пропорционален градиенту температуры  $\nabla T$ . При заданном внешнем потоке тепла  $q_e$  и внешней температуре  $T_e$  внутренняя температура возрастает пропорционально толщине шубы:  $T_0 = T_e + L_{\text{ш}} \nabla T$ . Шуба направляет часть излучаемого телом тепла обратно. Температура земной поверхности определяется наблюдаемым градиентом атмосферной температуры ( $\nabla T = 5,5 \text{ }^\circ\text{C/км}$ ) и ее эффективной толщиной ( $L_{\text{ш}} = 6 \text{ км}$ ). Вплоть до  $L \sim L_{\text{ш}}$  величина  $\nabla T$  остается практически постоянной (Mitchell, 1989; Raval, Ramanathan, 1989) и соответственно падение температуры равно  $33 \text{ }^\circ\text{C}$  (см. табл. 2.7.1). В отличие от шубы в парниковом эффекте источник тепла оказывается внешним — атмосфера прозрачная для солнечного излучения и малопрозрачна для теплового.

В отсутствие атмосферы при нулевом альбедо температура планеты определяется солнечной постоянной, зависящей только от радиуса орбиты планеты. Эта температура, которую можно назвать орбитальной,  $T_R$  определяется из уравнения (табл. 2.2.1):

$$I = \sigma T_R^4. \quad (2.7.8)$$

Для Земли  $T_R = 278 \text{ K}$  ( $+5 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Наличие альбедо Земли понижает температуру на  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  (до  $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ ), а парниковый эффект повышает температуру на  $33 \text{ }^\circ\text{C}$  (до  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ). На Венере эти изменения достигают сотен градусов, табл. 2.7.1. Таким образом, приземная температура планеты, содержащей атмосферу, практически полностью определяется не ее орбитальным расположением, на которое биота не может воздействовать, а величиной альбедо и парникового

Таблица 2.7.1

Энергетические и термические планетарные характеристики

Планеты	Солнечная постоянная $I_e = 4I_e$ Вт/м <sup>2</sup>	Орбитальные величины ( $A = \alpha = 0$ )		Тепловое излучение в космос ( $A > 0$ )			Средние значения на поверхности планеты ( $A > 0, \alpha > 0$ )		
		$qR = I$ Вт/м <sup>2</sup>	$t_R, \text{ }^\circ\text{C}$ ( $T_R, \text{ K}$ )	$A$	$q_e = I(1 - A)$ Вт/м <sup>2</sup>	$t_e, \text{ }^\circ\text{C}$ ( $T_e, \text{ K}$ )	$\alpha$	$q_0 = I \frac{1 - \alpha}{1 - \alpha}$ Вт/м <sup>2</sup>	$t_i, \text{ }^\circ\text{C}$ ( $T_0, \text{ K}$ )
Марс	589	147	-48 (225)	0,15	125	-56 (217)	0,07	134	-53 (220)
Земля	1367	342	+5 (278)	0,30	239	-18 (255)	0,4	390	+15 (288)
Венера	2613	653	+58 (331)	0,75	163	-41 (232)	0,99	16000	+460 (730)

Примечание:  $I$  — средний поток солнечной энергии, приходящийся на единицу полной поверхности планеты за пределами атмосферы;  $A$  — планетарное альбедо,  $\alpha$  — планетарный нормированный парниковый эффект,  $q_e$  — тепловое излучение планеты в космос,  $q_0$  — тепловое излучение на поверхности планеты (Mitchell, 1989; Raval, Ramanathan, 1989)

эффекта, которые могут полностью находиться под контролем биоты.

Подчеркнем, что все упорядоченные процессы на планете, включая жизнь самой биоты, могут поддерживаться только солнечным излучением, членом  $I$  в (2.7.7). С увеличением альbedo и парникового эффекта относительная доля солнечного излучения на планете падает и упорядоченные процессы затухают. Поэтому далекие от Солнца планеты могли бы быть теплыми, но упорядоченные процессы и жизнь на них невозможны.

Дополнительный к солнечному глобальный поток энергии, вызываемый сжиганием ископаемого топлива, достиг  $10^{13}$  Вт, или  $0,02$  Вт/м<sup>2</sup> (табл. 2.2). В то же время антропогенное увеличение концентрации парниковых газов (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, CFC-1, CFC-12) привело к в сто раз большему парниковому усилению теплового излучения поверхности Земли, в совокупности на  $2$  Вт/м<sup>2</sup> (Dickinson, Ciccone, 1986), что соответствует глобальной дополнительной мощности  $10^{15}$  Вт. Однако эта тепловая мощность может привести только к увеличению температуры Земли и не может изменить упорядоченные процессы, поддерживаемые солнечной мощностью и мощностью сжигания ископаемого топлива.

Для выяснения термической устойчивости состояния  $T=T_0$  разложим все члены уравнения (2.7.1) по малому относительному отклонению от равновесной точки  $(T-T_0)/T_0 \equiv z$ . Тогда, используя условия (2.7.7) в точке равновесия  $z=0$  и учитывая только малые линейные члены по  $z$ , получаем:

$$\dot{z} + k_0 z = 0, \quad k_0 \equiv \lambda_0/c_0, \quad (2.7.9)$$

$$\lambda_0 \equiv \frac{q_0}{T_0} \left( 4 + \frac{A_0' T_0}{1-A_0} - \frac{\alpha_0' T_0}{1-\alpha_0} \right), \quad (2.7.10)$$

где введены обозначения

$$\dot{z} \equiv dz/dt, \quad X_0' \equiv \partial X(T_0)/\partial T_0, \quad X_0 = X(T_0), \quad X = A; \quad \alpha; \quad q; \quad c.$$

Чувствительность климата  $\lambda_0$  является функцией  $T_0$ . Стационарное значение  $T_0$  является функцией  $I$ , неявный вид которой определен в (2.7.7). Дифференцируя обе части (2.7.7) по  $I$ , имеем (North et al., 1981):

$$k_0 = \frac{1-A_0}{c_0} \left( \frac{dT_0}{dI} \right). \quad (2.7.11)$$

Решение уравнения (2.7.9) имеет вид:

$$z = z_0 e^{-k_0 t}. \quad (2.7.12)$$

Из (2.7.12) следует, что при  $k_0 > 0$  любые отклонения от равновесной точки экспоненциально затухают со временем релаксации  $k_0^{-1}$  и, следовательно, состояние  $T=T_0$  является устойчивым. В системе преобладают отрицательные обратные связи, гасящие малые возмущения. Наоборот, при  $k_0 < 0$  любое отклонение от точки  $T=T_0$  экспоненциально нарастает и состояние неустойчиво. В системе преобладают положительные обратные связи, усиливающие возмущение.

Формально уравнение (2.7.1) можно переписать в виде (2.7.9) без разложения по  $z$  с заменой  $k_0$  на функцию  $k(z)$  которая определяется из (2.7.1), если известны зависимости всех членов (2.7.1) от  $T$  (или  $z$ ). В этом случае  $k_0 = k(0)$ . Если случайно  $k(0) = k_0 = 0$ , то необходимо учитывать следующие члены разложения  $k(z)$  по  $z$ . Если  $k(z) \sim z^n$ , то  $z(t) \sim t^{-1/n}$ , т. е.  $z$  стремится к нулю с ростом  $t$  чрезвычайно медленно, и стационарного решения задачи эффективно не существует. Кроме того, вид функции  $k(z)$  зависит от множества других характеристик окружающей среды, при изменении которых значение  $k(0) = 0$  ничем не выделено. С ростом возмущения этих характеристик величина  $k_0$ , характеризующая устойчивость окружающей среды, может изменяться. Поэтому значение  $k_0 = 0$  ниже будем называть точкой потери устойчивости.

Уравнение (2.7.1) и его форму (2.7.9) с заменой переменной  $k_0$  на  $k(z)$  часто переписывают через потенциальную функцию (функцию Ляпунова), которая при любых  $z$  определяется соотношением:  $k(z) = -\partial U(z)/\partial z$  (North et al., 1981; Rapoport, 1986). Экстремумы этой функции при  $z = z_0$ , в которых  $\partial U(z)/\partial z = 0$ , характеризуют стационарную точку, а вторая производная  $\partial^2 U(z)/\partial z^2$  определяет устойчивость решения. При  $z_0 = 0$  имеем  $U(z) = -(1/2)k_0 z^2$ , т. е.  $-\partial U/\partial z = k_0 z$ , а  $k_0 = -\partial^2 U/\partial z^2$ , т. е.  $U(z)$  изображает устойчивую яму при  $k_0 < 0$ , и неустойчивый бугор при  $k_0 > 0$ . Однако в реальных задачах об окружающей среде поведение всех членов уравнения (характеризующих законы сохранения типа (2.7.1) в областях, далеких от существующего стационарного состояния) неизвестно. Поэтому рассмотрение потенциальной функции представляет лишь академический интерес. В дальнейшем все рассмотрение устойчивости окружающей среды ограничено определением стационарной точки (в рассматриваемом случае точки  $T=T_0$ ), скорости (обратного времени) релаксации  $k_0$  и порога возмущения измеримых характеристик окружающей среды, при которых система теряет устойчивость, т. е.  $k_0$  обращается в нуль.

Термодинамическое равновесие в химии и физике характеризуется устойчивостью по любой переменной (давление, объем, температура, концентрации химических элементов в различных фазовых

состояниях и пр.). Возмущение любой переменной приводит к возникновению компенсирующих процессов, возвращающих систему к равновесному состоянию. Это свойство равновесия, как хорошо известно, носит название принципа Ле Шателье (Lotka, 1925). Однако после значительных возмущений, связанных с добавлением дополнительной массы вещества, изменением объема или внутренней энергии системы, устойчивое стационарное состояние устанавливается в новом положении равновесия — состояние оказывается отличным от устойчивого стационарного состояния до возмущения. Совершенно так же могут быть описаны и устойчивые состояния динамического равновесия ("диссипативных структур") во внешнем потоке энергии (Николис, Пригожин, 1979), частным случаем которых являются физические и химические состояния безжизненных планет солнечной системы (Lovelock, 1982; Holland, 1984).

Поддержание пригодного для жизни состояния окружающей среды на протяжении миллиардов лет, несмотря на непрерывное воздействие сильных геофизических и космических возмущений, однозначно указывает на то, что это состояние является устойчивым. Устойчивость на протяжении геологических периодов времени порядка сотен тысяч и миллионов лет характеризуется сохранением пригодных для жизни температуры, давления и концентраций веществ в различных фазовых состояниях, несмотря на чередование ледниковых, межледниковых и безледниковых периодов (Брокер, Дентон, 1990; Broecker et al., 1985a). Устойчивость окружающей среды на протяжении периодов порядка и меньших тысяч лет характеризуется строгим постоянством практически всех характеристик окружающей среды (Oeschger, Stauffer, 1986; Charpellaz et al., 1990; Barnola et al., 1991), и никаких поступательных сдвигов стационарного состояния не происходит. Возникает вопрос, поддерживается ли эта устойчивость физическими причинами (Holland, 1984; Holland et al., 1986) или же она определяется существованием жизни (Gorshkov, 1985; Lovelock, 1989).

Во-первых, если бы устойчивость окружающей среды на Земле объяснялась только физическими причинами, то положение равновесия должно было бы непрерывно сдвигаться под воздействием направленных внешних (по отношению к окружающей среде) возмущений. Этот сдвиг должен был бы неизбежно привести к выходу за пределы, пригодные для существования жизни. Например, в отсутствие депонирования органического углерода в осадочных породах содержание неорганического углерода в окружающей среде, в основном, в виде  $\text{CO}_2$ , должно было бы за последние  $6 \cdot 10^8$  лет возрасти на четыре порядка по сравнению с современным значением (Ронов, 1976; Будыко и др., 1985). Это могло бы привести к катастрофическому нарастанию парникового эффекта и подъему

температуры выше точки кипения воды. Солнечное излучение выросло за время существования жизни ( $3,5 \cdot 10^9$  лет) примерно на 30% (Newkirk, 1980), что также должно было бы поднять приземную температуру до непригодного для жизни значения (Lovelock, 1989). Кислород атмосферы должен был бы израсходоваться на окисление вулканических выбросов за время порядка  $10^8$  лет (Будыко и др., 1985), а азот атмосферы перейти в связанные растворимые в воде соединения (Lovelock, 1988).

Во-вторых, стационарность современного климата, по-видимому, не является устойчивой в пределах погрешности существующих измерений. Для выяснения этого вопроса обратимся к формулам (2.7.10) и (2.7.11). Так как для альбедо и теплоемкости выполняются условия

$$A_0 \leq 1, \quad c_0 \geq 0,$$

то  $k_0 > 0$  при условии, что  $dT_0/dI > 0$  (North et al., 1981), т. е. температура  $T_0$  должна увеличиваться с ростом  $I$  и наоборот. Однако, так как зависимость  $T_0(I)$  не известна и, по-видимому, никогда не сможет быть прямо измерена, то последнее неравенство не может быть непосредственно использовано. Тем не менее, из (2.7.11) можно сделать очевидное заключение, что устойчивость (величина  $k_0$ ) уменьшается 1) при  $A_0 \rightarrow 1$ , что происходит при оледенении всей планеты и 2) при  $c_0 \rightarrow \infty$ , что возникает с ростом испарения воды, когда подводимое тепло не приводит к изменению температуры. Дальнейший анализ устойчивости  $k_0$  можно провести на основании исследования обратных связей  $A_0$  и  $\alpha_0'$  в (2.7.10).

При  $A_0 = \alpha_0' = 0$  устойчивость климата определяется первым членом  $+4$  в круглых скобках (2.7.10), который возникает от отрицательной обратной связи, характеризующей закон Стефана—Больцмана (2.7.7): с ростом температуры увеличивается уходящий поток теплового излучения, что при неизменном парниковом эффекте ( $\alpha_0' = 0$ ) и альбедо ( $A_0 = 0$ ) охлаждает поверхность Земли. В этом случае можно оценить величину  $k_0$  и найти время релаксации системы  $k_0^{-1}$ . Из (2.7.10) при  $A_0 = \alpha_0' = 0$  имеем:  $\alpha_0 = 3,3 \text{ Вт м}^{-1}\text{К}^{-1}$ . Среднюю величину  $c_0$  на единицу земной поверхности можно оценить, полагая, что главный вклад в  $c_0$  вносит верхний слой океана толщиной  $H_2: c_0 = (\rho C)_{\text{H}_2\text{O}} S_2 H_2 / S_3$ ,  $(\rho C)_{\text{H}_2\text{O}} = 4,2 \text{ МДж/(м}^3\text{К)}$ , где  $S_2/S_3 = 0,70$  — отношение поверхности океана к поверхности Земли,  $H_2 \approx 300 \text{ м}$ . Верхняя и нижняя границы  $H_2$ :  $H_2$  больше толщины хорошо перемешиваемого слоя ( $\sim 100 \text{ м}$ ) и меньше глубины границы главного термоклина ( $\sim 1000 \text{ м}$ ):  $100 \text{ м} < H_2 < 1000 \text{ м}$ . Отсюда получаем  $c_0 \sim 10^9 \text{ Дж/(м}^2\text{К)}$  ( $3 \cdot 10^9 \text{ Дж/}$

$m^2K > c_0 > 3 \cdot 10^8$  Дж/( $m^2K$ )). Учитывая, что  $1 \text{ Вт} = 3 \cdot 10^7$  Дж/год, имеем:

$$k_0 \approx 10^{-1} \text{ год}^{-1}, \quad k_0^{-1} \sim 10 \text{ лет}, \quad (A_0' = \alpha_0' = 0). \quad (2.7.13)$$

Таким образом, в отсутствие обратных связей парникового эффекта и альbedo приземная температура должна возвращаться к нормальному значению спустя время порядка 10 лет после прекращения действия возмущения.

В действительности, оба члена  $A_0'$  и  $\alpha_0'$  в (2.7.10) представляют собой термодинамически положительную обратную связь  $\alpha_0' > 0$ ,  $A_0' < 0$ : с ростом температуры нормированный парниковый эффект усиливается, а альbedo уменьшается вследствие сокращения ледяного и снежного покровов (Mitchell, 1989). Два последних члена в круглых скобках (2.7.10) отрицательны и, следовательно, уменьшают устойчивость. Величина  $\alpha_0'$  измеряется непосредственно со спутников путем сравнения величин  $\alpha_0$ , соответствующих различным локальным значениям приземной температуры (Raval, Ramanathan, 1989). Для чисто безоблачного неба согласно этим измерениям  $\alpha_0' T_0 \approx 1,0$ . Учет облачного покрова добавляет к  $\alpha_0' T_0$  величину порядка 0,6 (Mitchell, 1989). В результате член  $-\alpha_0' T_0 / (1 - \alpha_0) \approx -2,7$ . Реакция альbedo рассчитывается в различных моделях глобальной циркуляции. Согласно этим расчетам величина  $A_0' T_0 / (1 - A_0) \approx -0,4$ , что увеличивает отрицательное значение суммы последних двух членов в (2.7.10) до  $-3,1$ . До сих пор неопределенными остаются радиационные свойства облачного покрова. Если считать, что знак, связанный с обратными связями облачного покрова, также не определен (Mitchell, 1989), то в пределах погрешности измерений величины  $\lambda_0$  и  $k_0$  не отличимы от нуля и, возможно, являются отрицательными величинами.

Однако во всех измерениях и расчетах могут быть учтены лишь физические, а также немногочисленные и незначительные химические обратные связи (Holland et al., 1986; Kump, 1989). В работе (Raval, Ramanathan, 1989) однозначно показано, что наблюдаемый рост парникового эффекта связан с увеличением содержания водяных паров с ростом температуры. Несмотря на огромную изменчивость абсолютного содержания паров воды в атмосфере, относительная влажность (отношение концентраций паров к их насыщающей концентрации) варьирует значительно меньше и может быть принята в первом приближении постоянной (Mitchell, 1989). Тогда зависимости от температуры концентрации паров воды в атмосфере совпадают с поведением насыщающей концентрации. Это поведение определяется Больцмановской экспонентой (2.3.1), в которой

в качестве энергии  $E$  необходимо поставить скрытую энергию испарения  $L_w = 40,5$  кДж/моль ("энергию активации" испарения в экспоненте Клапейрона—Клаузиса). Используя численное значение  $L_w$ , получаем, что концентрация паров воды возрастает примерно вдвое при возрастании температуры на  $10^\circ \text{C}$  ( $Q_{10 \text{ H}_2\text{O}} \approx 2$ ). Именно это и приводит к усилению парникового эффекта.

Однако экспонента Клапейрона—Клаузиса определяет только термодинамически равновесное содержание паров в атмосфере. Температура испарения (активации) водяного пара  $T_w = L_w / R \approx 4900$  К,  $R$  — газовая постоянная (2.3.1), близка к температуре Солнца и много больше приземной температуры  $T_0$ . Поэтому круговорот воды, состоящий из испарения под воздействием солнечного излучения, последующих осадков и стока, является упорядоченным процессом, далеким от равновесия. Как и другие упорядоченные процессы, поддерживаемые солнечным излучением на земной поверхности, круговорот воды не может ускоряться при усилении парникового эффекта, сопровождающегося ростом приземной температуры. Может происходить лишь перераспределение испарения и осадков по поверхности Земли при сохранении их среднеглобальных значений. Ускорение круговорота воды возможно лишь за счет увеличения доли солнечной энергии, затрачиваемой на испарение по сравнению с современной величиной (рис. 2.7.1), что должно как следствие привести к изменению приземной температуры. Это может происходить только на суше под воздействием континентальной растительности (Shukla, Mintz, 1982) (разделы 4.13 и 5.4).

Как видно из рис. 2.7.1, около половины солнечного излучения затрачивается на испарение влаги. Если бы на испарение, например, затрачивалась большая доля мощности солнечной радиации, достигающей поверхности Земли, то это существенно понизило бы приземную температуру. В процессе испарения повышения температуры не происходит. Пары воды поднимаются в атмосфере на большую высоту, где, конденсируясь в облачность, выделяют энергию, поглощенную при испарении. Эта энергия в виде теплового излучения уходит в космическое пространство и лишь небольшая часть его, преодолевая отражающий экран паров воды в атмосфере, достигает поверхности Земли, увеличивая ее температуру. Одновременно облачность может увеличивать коэффициент отражения как солнечного, так и теплового излучения, поступающего с поверхности Земли, т. е. увеличивать и альbedo, и парниковый эффект. Суммарный эффект всех этих процессов остается неясным, так как удовлетворительной теории, описывающей процессы, далекие от термодинамического равновесия, не существует (Николис, Приго-

жин, 1979). Это и составляет неопределенность радиационных свойств облачности (Mitchell, 1989).

Остальные парниковые газы ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) распределены относительно равномерно в атмосфере и для определения обратных связей между концентрацией этих газов и температурой Земли приходится обращаться к прошедшим эпохам. Наибольшая информация об этих обратных связях получена из анализа состава ледяных кернов известного возраста (Lorius et al., 1990), а также различных математических моделей глобальной циркуляции (Mitchell, 1989; Cess et al., 1989). Однако таким путем, как и при исследовании локальных различий, можно установить лишь физико-химические обратные связи. Возможный контроль биотой состояния окружающей среды полностью выпадает из этих рассмотрений. Более того, по-видимому, невозможно определить все степени свободы состояния окружающей среды, контролируемые биотой, в силу того, что информационная мощность биоты на 15 порядков превосходит информационную мощность, достижимую в цивилизации (Горшков, 1991a).

Таким образом, устойчивые состояния полного оледенения (типа Марса) или полного испарения жидкой фазы (типа Венеры), по-видимому, не отделены от существующего стационарного состояния никакими физическими барьерами, и сохранение существующего состояния окружающей среды (без учета биотического контроля) остается неясным. Единственным объяснением наблюдаемой устойчивости окружающей среды является функционирование естественной биоты, смысл существования которой заключается в поддержании оптимальных для жизни условий. В отличие от физической устойчивости, контролируемой физическим принципом Ле Шателье, биотический контроль окружающей среды не приводит к сдвигу устойчивого состояния под влиянием внешних возмущений. Подробную биотическую устойчивость окружающей среды можно было бы назвать биотическим принципом Ле Шателье. В дальнейшем в книге рассматривается только биотическая устойчивость окружающей среды, и под принципом Ле Шателье понимаются биотические отрицательные обратные связи по всем характеризующим биоту и окружающую ее среду переменным, полностью компенсирующие все внешние возмущения и не приводящие к сдвигу положения равновесия.

## 2.8. Корреляционные длины и информация

Упорядоченное состояние вещества в потоке энергии характеризуется наличием скоррелированных структур, обладающих неограниченной или конечной корреляционной длиной. Атмосферная цир-

куляция и океанические течения являются глобально скоррелированными вращением Земли и перепадом температур от экватора к полюсам. Неограниченная корреляционная длина характерна, например, для течения реки: запруда, поставленная на реке, сказывается практически на всем протяжении течения реки. Неограниченная корреляционная длина характерна также для твердого состояния. Между тем, многие скоррелированные структуры обладают строго определенной корреляционной длиной (как, например, у молекул, состоящих из атомов), либо определенным распределением возникающих структур по конечным корреляционным длинам (как, например, размеры вихрей при турбулентном течении). Объем вещества, в котором установилось это состояние из скоррелированных структур с конечными корреляционными длинами, уже не может быть разделен на любые макроскопические части без нарушения характеристик состояния. Очевидно, что вихрь смерча, циклона, как и любой вихрь при турбулентном движении, не может быть разделен на части. То же относится к ячейкам Бенара и областям пространства, в которых происходит смена состояний периодических химических реакций. Все виды биологической скоррелированности, как будет показано в следующем разделе, принципиально могут обладать только строго ограниченной конечной корреляционной длиной.

Количественно степень скоррелированности и упорядоченности объектов можно охарактеризовать распределением корреляционных длин, энтропией и информацией. Корреляционные длины можно определять посредством различных корреляционных функций и коэффициентов типа второго члена в (2.3.3). Энтропия является четко определенной функцией состояния для равновесных, термодинамических состояний и малых отклонений от этих состояний (Николис, Пригожин, 1979). Описания систем динамического равновесия с помощью поля локальных микроскопических значений энтропии, имеющей определенное значение в каждой точке пространства, занимаемой системой, наталкиваются на трудности, ибо характеристика упорядоченности должна включать информацию о пространственной скоррелированности системы, имеющей макроскопические размеры, и, следовательно, требует нелокального описания (Пригожин, 1985).

Для сравнения упорядоченности различных скоррелированных систем можно пользоваться определением энтропии и информации через логарифмы вероятности образования заданных видов скоррелированности (Брюллюэн, 1960). Однако для сверхсложных скоррелированных объектов, каковыми являются живые организмы и окружающая их среда, не удастся конструктивно определить всю совокупность скоррелированных частей. При этом приходится вы-

числать информацию какой-либо части объекта и приписывать полученной информации понятие ценности, которую можно определить как отношение известного количества информации к полной информации, характеризующей весь скоррелированный объект.

Однако количественную оценку информации можно использовать для сравнения потоков информации, перерабатываемой естественной биотой Земли, с реально достижимыми потоками информации во всех компьютерах человечества. Информацию можно характеризовать числом ячеек памяти  $N$ . Если каждая ячейка включает два равновероятных возможных значения, то число возможных комбинаций различных значений во всех ячейках равно  $2^N$ . Двоичный логарифм этого значения равен числу ячеек  $N$ . Число  $N$  составляет максимально возможную величину информации в битах (объем памяти или информационную емкость системы (Эйген, 1973; Корогодии, 1991)), которую может содержать система таких ячеек. Это максимальное значение достигается в том случае, если положение каждой ячейки памяти строго определено. Если из общего числа ячеек состояние  $N_1$  ячеек неизвестно, то информация сокращается до величины  $N - N_1$ . Наконец, если состояние всех ячеек памяти не определено, то информация обращается в нуль.

Если первоначально положение всех ячеек памяти было определено, а по истечению времени произошло стирание информации и положение всех ячеек памяти стало полностью неопределенным, то потеря информации также, очевидно, определяется числом ячеек  $N$ . Увеличение числа различных значений, которые может принимать каждая ячейка памяти, практически не изменяет порядка величины максимальной информации: если это число возрастает от 2 до  $n$ , то число различных комбинаций всех возможных значений становится равным  $n^N = 2^{N \lg_2 n}$ , а информация при определенном значении состояния каждой ячейки возрастает до  $N \lg_2 n$ . То есть информация зависит линейно от числа ячеек  $N$  и логарифмически от числа значений  $n$  в каждой ячейке памяти.

Полное стирание информации в какой-либо ячейке памяти соответствует равновероятности всех  $n$  возможных значений, т.е. вероятности каждого  $i$ -го значения, равного  $\frac{1}{n}$ . Информационную емкость ячейки  $\lg_2 n$  можно формально представить в виде среднего значения логарифма этой вероятности:

$$\lg_2 n = - \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \lg_2 \left( \frac{1}{n} \right).$$

Если различные значения  $i$ -й ячейки могут встречаться с разной вероятностью  $\xi_i$ , то информационная емкость оказывается меньше

и определяется, по-прежнему, средним значением логарифма этой вероятности:

$$S = - \sum_{i=1}^n \xi_i \lg_2 \xi_i.$$

В случае, когда ячейками памяти являются молекулы, а распределение значений  $i$  определяется распределением основного и возбужденных состояний молекулы, информационная емкость, определяемая последней формулой, совпадает с энтропией системы, выраженной в единицах информации. Для перехода к обычным, принятым в физике единицам энтропии последнюю формулу нужно домножить на постоянную Больцмана  $k_B$  (см. ниже формулу (2.8.6)). В таком виде формула для энтропии была получена Больцманом в середине прошлого века (Больцман, 1953; Фейнман, 1978). Для целей передачи информации, где ячейкой памяти является положение буквы (или символа) в обычном (или закодированном) тексте и вероятность появления конкретной буквы определяется ее частотой встречаемости во всех словах, та же формула была получена Шенноном почти сто лет спустя (Шеннон, 1963). Эта формула послужила основой всех современных расчетов количества информации в программировании и компьютерной технике. Однако не следует забывать, что во всех случаях информационная емкость зависит линейно от числа ячеек памяти и лишь логарифмически от числа и распределения значений в каждой ячейке.

Элементарными ячейками памяти окружающей среды являются состояния атомов и молекул: основные состояния молекул и атомов не распадаются. Фотоны взаимодействуют только с веществом (рассеяние света на свету ничтожно мало), поэтому распад солнечных коротковолновых фотонов на длинноволновые фотоны земного излучения может происходить за счет возбуждения и распада каскада молекулярных процессов в атмосфере и на земной поверхности. Число молекул, с которыми взаимодействуют солнечные фотоны (объем молекулярной памяти Земли), совпадает с числом длинноволновых фотонов, излученных Землей в космос. Так как средняя энергия теплового земного фотона имеет порядок  $k_B T_e$ , то поток  $N_e$  длинноволновых фотонов на единицу земной поверхности равен:

$$N_e = c A_e / k_B T_e, \quad (2.8.1)$$

где  $q_e$  — поток эффективного теплового излучения Земли в космос (2.7.3), табл. 2.7.1, а безразмерный коэффициент пропорциональности  $c_e$  имеет порядок единицы.

Тепловое излучение Земли близко к хаотическому излучению абсолютно черного тела. Поэтому число  $N_e$  (2.8.1) характеризует

потерю информации в результате полного распада всех упорядоченных молекулярных состояний, возбужденных солнечной энергией, и неупорядоченных состояний, не получивших никакой информации при взаимодействии с солнечными фотонами. Если бы все солнечные фотоны были полностью упорядочены, подобно потоку фотонов лазерного луча (или потоку молекул падающей воды), то все молекулярные ячейки памяти Земли возбуждались бы упорядоченным образом и лишь по истечении времени происходил бы их полный распад на хаотическое тепловое излучение. В этом случае поток информации, поступающей от Солнца на Землю, совпадал бы с числом возбуждаемых ячеек памяти и определялся бы величиной (2.8.1).

В действительности солнечные фотоны образовались из хаотического абсолютно черного излучения на поверхности Солнца. Начальная потеря информации солнечной энергии характеризуется числом солнечных фотонов, поглощенных Землей. В стационарном состоянии, когда поток солнечной энергии  $T_c$ , поглощенной Землей, совпадает с испущенной Землей тепловой энергией  $q_c$ , число солнечных фотонов равно:

$$N_c = c q_c / k_B T_c \quad (2.8.2)$$

Так как (2.8.1) и (2.8.2) характеризуют универсальное излучение абсолютно черного тела, то коэффициенты пропорциональности  $c_e$  в них совпадают. Каждый солнечный фотон, попадая на Землю, вступает во взаимодействие с земными молекулами. Земные молекулы находятся в хаотическом тепловом движении со средней энергией  $k_B T_c$ . Хаос теплового движения соответствует непрерывному переходу из одного состояния молекулы в другое с той же энергией, отсутствию определенного положения в молекулярной ячейке памяти, т. е. стертости информации. Солнечный фотон, обладающий значительно большей энергией, поглощается молекулой, которая переходит в определенное высоковозбужденное состояние. Молекулярная ячейка памяти приобретает информацию. Далее молекула, оставаясь все еще в определенном возбужденном состоянии и не теряя своей информации, может передать часть своей энергии другим молекулам, переводя их также в определенное возбужденное состояние, соответствующее наличию информации. Число молекул, приобретающих информацию, будет расти до тех пор, пока передаваемая им энергия не сравняется с тепловой энергией Земли  $k_B T_c$ . В этом случае молекула, передающая энергию, получает обратный удар равной силы, но в случайном направлении. Состояние молекулы оказывается неопределенным, а информация потерянной. В результате этого каскада процессов энергия солнечного фотона переходит в энергию тепловых фотонов Земли.

Описанный процесс может быть эффективно представлен в виде каскада, в котором солнечный фотон последовательно отдает свою энергию молекулам, приобретающим информацию, а сам теряет свою энергию. При этом каждая молекула для получения информации должна приобретать чуть больше тепловой энергии  $k_B T_c$ . Очевидно, в таком каскаде передача информации молекулам будет происходить до тех пор, пока энергия солнечного фотона не сравняется с энергией теплового фотона Земли. В последнем случае происходит эффект обратного удара равной силы, и молекула не получает информации. Каждая молекула, получившая информацию, может затем разрядиться с испусканием фотона с энергией чуть больше энергии теплового фотона и перейти в неупорядоченное состояние, соответствующее потере информации. Число молекул, получивших таким образом информацию от солнечного фотона, будет равно числу тепловых фотонов, на которые может распасться один солнечный фотон без единицы, ибо последний этап каскада не сопровождается передачей информации. Если процесс разрядки молекул можно считать достаточно медленным, то на протяжении всего каскада не происходит потери информации (распада), и, следовательно, в этом случае каскад является обратимым процессом. Таким образом, информация  $N$ , поступающая от всех солнечных фотонов, поглощаемых Землей, равна разности чисел  $N_c$  и  $N_c$ :

$$N = N_c - N_c = c_e \frac{q_c}{k_B T_c} \eta_c, \quad (2.8.3)$$

$$\eta_c \equiv N/N_c = 1 - n_c^{-1}, \quad n_c \equiv N_c/N_c = T_c/T_c \approx 23, \quad (2.8.4)$$

где  $n_c$  — число фотонов земного излучения, на которое распадается в среднем один солнечный фотон;  $\eta_c$  — коэффициент полезного действия солнечной энергии:  $\eta_c$  представляет собой относительное число молекулярных ячеек памяти, содержащих информацию,  $1 - \eta_c = n_c^{-1}$  — относительное число молекулярных ячеек памяти, в которых эта информация была стерта изначально. Так как  $n_c$  достаточно велико, то  $\eta_c \approx 0,96$  близок к единице и оценка информации, поступающей на Землю, практически совпадает с (2.8.1). Но при  $T_c \rightarrow T_c$ ,  $n_c \rightarrow 1$ ,  $\eta_c \rightarrow 0$  и информация (2.8.3) обращается в нуль: как уже указывалось выше Солнце с температурой поверхности Земли, посылающее на Землю ту же энергию, что и сейчас, не вызвало бы никаких упорядоченных процессов на земной поверхности.

Поддержание солнечной энергией упорядоченных процессов в окружающей среде и биоте является физической основой существ-

ования жизни. Поэтому рассмотрим соотношения (2.8.3) и (2.8.4) с других точек зрения. Солнечные фотоны могут генерировать упорядоченные процессы на земной поверхности, отдавая свою энергию вплоть до перехода к тепловому равновесию с обратным длинноволновым излучением Земли в космическое пространство. Так как распад одного фотона на несколько при его взаимодействии с молекулами соответствует необратимой диссипации энергии, то в процессе преобразования солнечной энергии без ее диссипации количество фотонов, пришедших в равновесие с тепловым излучением Земли, должно совпадать с количеством падающих на Землю солнечных фотонов. Эти фотоны связаны с изначальной неупорядоченностью солнечной энергии, и поэтому не возникли от распада земных упорядоченных процессов. Если считать, что все возбужденные солнечной энергией упорядоченные процессы также распадаются на тепловые фотоны, то температура Земли определяется законом  $q_e = \sigma T_e^4$  (2.7.3). Число солнечных фотонов задается условием (2.8.2). Минимальный поток энергии  $q_{\min}$  длинноволновых земных фотонов, не связанный с генерацией упорядоченных процессов, т. е. полезной работой, удовлетворяет условию (известному как условие Карно):

$$N_c = \frac{q_e}{k_B T_c} = \frac{q_{\min}}{k_B T_c}, \quad \text{или} \quad \frac{q_{\min}}{q_e} = \frac{T_c}{T_e} = n_c^{-1}. \quad (2.8.5)$$

К.п.д. полезной работы (к.п.д. Карно) равно  $(q_e - q_{\min})/q_e$  и совпадает с (2.8.4).

Распределение солнечной энергии по различным упорядоченным процессам зависит от структуры среды, поглощающей солнечное излучение. Очевидно, что вид этих упорядоченных процессов различен при наличии и отсутствии биоты. Возбуждение упорядоченных процессов не описывается равновесной термодинамикой, в которой к.п.д. (2.8.4) представляет собой максимальную, реально недостижимую величину. Он возникает при полном отсутствии диссипации на протяжении больших промежутков времени, за которые успевают установиться термодинамическое равновесие. Реальные упорядоченные процессы имеют различные времена диссипации. Поэтому процессы с наибольшими временами диссипации генерируются с к.п.д., меньшими (2.8.4). По истечении этих наибольших времен диссипации происходит полный распад солнечного излучения на тепловые фотоны. В результате, потоки падающей и излученной энергии совпадают.

Можно представить себе ситуацию, в которой солнечная энергия, в основном, генерирует упорядоченные процессы с практически неограниченным временем диссипации. Например, солнечная

энергия могла бы запасаться в потенциальной энергии синтезируемого органического вещества или в виде скрытой теплоты при непрерывном испарении океанов и пр. Такая поглощенная энергия не переходила бы в тепловое излучение и не приводила бы к нагреву земной поверхности. В этом случае тепловое излучение Земли определялось бы той частью солнечной энергии  $q_{\min}$  (2.8.5), которая не может быть превращена в энергию упорядоченных процессов. Учитывая, что в соответствии с законом Стефана—Больцмана  $q_{\min} = \sigma T_{\min}^4$ , а  $q_e = \sigma T_e^4$  (2.7.3), получим из (2.8.5) для  $T_{\min}$  величину  $T_{\min} = T_e (T_e/T_c)^{1/4} \approx 117 \text{ К}$  ( $-156 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Поток  $q_{\min}$  на единицу земной поверхности при этом составлял бы  $11 \text{ Вт/м}^2$ . То есть в этом гипотетическом случае Земля была бы полностью в оледеневшем, лишенном жизни состоянии и все упорядоченные процессы коренным образом отличались бы от существующих.

Можно было бы поднять в этом случае приземную температуру за счет усиления парникового эффекта. Добавочное хаотичное тепловое излучение, возникающее при парниковом эффекте, не связано с распадом упорядоченной энергии и поэтому не увеличивает поток информации. Более того, увеличение приземной температуры  $T_0$  по сравнению с эффективной температурой излучения планеты  $T_e$  уменьшает к.п.д. преобразования солнечной энергии на земной поверхности, которое определяется (2.8.4) с заменой  $T_e$  и  $T_0$ . При этом упорядоченные процессы, генерируемые солнечным излучением, перемещаются от земной поверхности в верхние слои атмосферы. Упорядоченные процессы на земной поверхности исчезают вовсе при  $T_0 \rightarrow T_c$ . Подобная тенденция имеет место на Венере (табл. 2.7.1). Для увеличения потока тепловых фотонов от  $q_{\min}$  до наблюдаемого значения  $q_0$  (2.7.7) необходима величина нормированного парникового эффекта  $\alpha = 0,97$ , близкая к венерианскому. Следовательно, потребовалась бы полная перестройка состава существующей атмосферы, при котором жизнь, по-видимому, была бы также невозможна. Поэтому для поддержания существующих упорядоченных процессов (включая жизнь) все они должны обязательно распадаться, а их энергия подвергаться диссипации за достаточно короткие промежутки времени. Это означает, что любая организация должна быть "смертной", а создаваемые "шедевры" упорядоченности должны непрерывно разрушаться для того, чтобы их можно было воссоздать заново.

Наконец, отношение производства тепла к абсолютной температуре  $q/T$  равно производству энтропии (Николис, Пригожин, 1979). Так как упорядоченность процессов на земной поверхности поддерживается на определенном стационарном уровне, то производство энтропии за счет распада этих процессов компенсируется притоком "негоэнтропии" от Солнца, который равен, следовательно, производ-

ству энтропии с обратным знаком (Шредингер, 1947; Брюллюэн, 1960). В силу большой разницы температур Земли и Солнца количество энтропии, приносимой с солнечным излучением, мало в сравнении с ее производством на Земле и соответственно обратным потоком с Земли в космос. В результате этого чистый поток энтропии на Землю отрицателен, что и послужило поводом для введения понятия "негоэнтропия". Поэтому с точностью до коэффициента поток негоэнтропии определяется величиной  $qc/T_c$ , которая совпадает с оценкой величины информации (2.8.1), (2.7.3) в системе единиц  $k_B=1$ . В этой системе в соответствии с (2.3.1) и разделом 2.6 единица измерения абсолютной температуры Кельвина выражается через энергию, приходящуюся на одну молекулу:

$$1 \text{ К} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/молекула.}$$

Коэффициенты пропорциональности для абсолютно черного излучения хорошо известны: при  $k_B=1$  энтропия  $S = (4/3) (Q/T) = 3,7N$ , где  $Q \sim T^4$  — тепловая энергия излучения, ( $\delta Q = T\delta S$ ),  $N$  — среднее число фотонов излучения (Ландау; Лифшиц, 1964).

Если все молекулярные ячейки памяти содержат определенную информацию, то с логарифмической точностью (см. начало этого раздела) можно полагать — 1 бит — 1 молекула. В этом случае условие  $k_B = 1$  (2.3.1) соответствует соотношению  $1 \text{ Дж/К} \approx 10^{23}$  бит. Однако, если только доля молекул, равная  $\eta$  (2.8.3), содержит полезную информацию, то условие  $k_B = 1$  соответствует соотношению:

$$1 \text{ Дж/К} \approx 10^{23} \text{ молекул} \approx \eta \cdot 10^{23} \text{ бит.} \quad (2.8.6)$$

Эта оценка справедлива во всех случаях, когда ячейками памяти являются объекты молекулярных размеров. Именно такими структурами обладают все поглотители солнечной энергии в окружающей среде и биоте. Для тепловой энергии, когда все молекулы находятся в тепловом равновесии, в частности, для всей тепловой энергии, обусловленной парниковым эффектом, к.п.д.  $\eta$  и, следовательно, содержащаяся в этой энергии информация равны нулю, причем с очень высокой точностью порядка обратной величины числа частиц молекул и фотонов  $N \sim 10^{23}$ . Однако практически все виды используемой биотой и человеком возобновляемой и невозобновляемой энергии (солнечной, органического и ископаемого топлива, ветровой и гидроэнергии) могут быть переведены в полезную работу с к.п.д.  $\eta$ , близким к единице. Поэтому в оценках величины информации можно использовать (2.8.6) при  $\eta \sim 1$ , и, следовательно, используемые единицы внешней энергии на самом деле характери-

зуют подводимую информацию, компенсирующую происходящий распад (накопление энтропии) упорядоченного процесса.

Отметим, что в рассмотренном выше случае запасаения всей полезной работы в виде потенциальной или кинетической энергии в отсутствие ее диссипации, производства энтропии не происходит: поток энтропии от Солнца совпадает с обратным потоком энтропии в космос, связанным с тепловым излучением Земли. Поток негоэнтропии и информации и в этом случае следует оценить как максимальное количество молекулярных (и фотонных) ячеек памяти, которое может быть возбуждено при упорядоченном распаде накопленной потенциальной энергии, т. е. прежним выражением (2.8.3).

Таким образом, полный поток информации, перерабатываемый на поверхности Земли в упорядоченных процессах, генерируемых солнечной энергией (2.8.3), можно оценить величиной  $10^{23}$  бит  $\text{с}^{-1} \text{ м}^{-2}$ , или  $10^{38}$  бит/с для всей Земли (Thiribus, McIrvine, 1971). Биота утилизирует около 5% солнечной энергии, поглощенной Землей, из которых основная часть используется на транспирацию растениями суши и около 0,1% на фотосинтез (табл. 2.2.1). Соответствующие этому потоки информации, используемые естественной биотой, составляют более  $10^{36}$  бит/с и около  $10^{35}$  бит/с. Поток этой информации направлен на поддержание устойчивости окружающей среды. Естественная биота способна (в соответствии с принципом Ле Шателье) компенсировать искажающий среду поток информации величиной до  $10^{33}$  бит/с. Энергопотребление человечества составляет  $10^{34}$  бит/с, табл. 2.2.1, т.е. на порядок большую величину. Следовательно, этот информационный поток поддерживает цивилизацию за счет разрушения биоты и окружающей среды.

Отметим, что молекулярные ячейки памяти с определенной вероятностью изменяют свое состояние при различных производимых над ними операциях — считывании, копировании и пр. В результате происходит стирание и потеря информации. Для предотвращения потерь генетической информации, запрограммированной в ДНК, жизнь использует каталитические системы репарации повреждений ДНК и стабилизирующий отбор, основанный на конкурентном взаимодействии особей в популяциях. Эти принципы подробно исследуются в следующей главе. Внегенетическая информация памяти, накапливаемая в процессе жизни животного и не передающаяся по наследству, по-видимому, также основана на молекулярных ячейках памяти. Эта информация рассчитана на конечный период жизни животного (см. главу 5) и значительно менее устойчива по сравнению с генетической. В современных компьютерах предотвращение потерь информации при различных операциях достигается за счет макроскопичности ячеек памяти. Сохранение информации в процессе длительной работы компьютера о

ваются коллективными взаимодействиями молекул твердого тела, образующих ячейку памяти. При этом неизбежно ограничивается как общий объем памяти, так и поток информации, перерабатываемый компьютером по сравнению с молекулярными ячейками памяти, используемыми биотой. При переходе к молекулярным ячейкам памяти в компьютерах будущего неизбежно придется сталкиваться с проблемой быстрого (спонтанного и индуцированного различными проводимыми операциями) стирания информации. Решение этой проблемы, по-видимому, может лежать только в создании сохраняющих информацию механизмов, аналогичных используемым жизнью (см. разделы 3.10—3.14).

Так как в современных компьютерах ячейками памяти являются объекты макроскопических размеров, то соотношение (2.8.6) для них не выполняется. Самые мощные компьютеры следующих поколений будут перерабатывать не более  $10^{12}$  бит/с (Вайзер, 1991). Даже если считать, что все люди Земли будут снабжены подобными персональными компьютерами, то человечество сможет перерабатывать не более  $10^{21}$  бит/с. Для того, чтобы поднять информационный поток в компьютерах на 15 порядков (до информационного потока в глобальной биоте), нужно было бы довести ячейки памяти до молекулярных размеров и покрыть всю Землю сплошной сетью подобных компьютеров, т. е. заменить ими существовавшие миллиарды лет естественные "компьютеры".

Наследственная информация одного вида организмов определяется полимерной молекулой ДНК (Льюни, 1987), содержащей около  $10^9$  мономерных единиц — нуклеотидных пар (ячеек памяти), и имеет порядок  $10^9$  бит. Число видов в биосфере имеет порядок  $10^7$  (Thomas, 1990). Наследственная информация всех видов биосферы, с которыми может взаимодействовать отдельный организм, содержит соответственно около  $10^{16}$  ячеек памяти\*. Число молекул (число ячеек памяти окружающей среды) в  $1 \text{ м}^3$  имеет порядок  $10^{30}$ , а во всей биосфере —  $10^{46}$ . Отсюда видно, что информация окружающей среды, с которой скоррелирован организм, на много порядков превосходит наследственную информацию.

Переработка и хранение информации должны быть связаны с ее материальными носителями. В природе переработка информации солнечного излучения производится всей биосферой и сопряжена с

расходом всей солнечной энергии. В мозгу животных и человека осуществляется хранение и переработка информации на элементах молекулярных размеров, которые имитируют реальные процессы в окружающей среде. При такой имитации природные процессы оказываются оторванными от их реальных материальных носителей (дух?). Переработка и хранение информации в компьютерах осуществляется с помощью отдельных элементов, которые также могут быть доведены до молекулярных размеров. При этом преобразование информации может происходить с к.п.д., близким к единице, практически без затрат энергии (Robinson, 1984). В таких компьютерах на базе подходящих математических моделей можно пытаться имитировать процессы, происходящие в биосфере и биоте.

Однако биота уже функционирует на базе "естественных компьютеров" с минимально возможными молекулярными носителями информации. Биота также достигла максимально возможного к.п.д. переработки информации. Развитие зародыша в яйце ("естественном микропроцессоре") происходит без поглощения внешней энергии (для разных видов различается лишь оптимальная температура). В процессе развития малька или цыпленка яйцо может терять менее 20% своей массы. К.п.д. преобразования информации в яйце составляет более 80% (Kendeigh, 1974). Поэтому вся энергия, поглощаемая биотой, используется с максимально возможной эффективностью. В этом случае реальные процессы в биоте совпадают с их возможными наилучшими имитационными моделями, т. е. компьютеры совмещены с элементами реального воздействия на окружающую среду.

Следовательно, для того, чтобы приблизиться к "технологии" естественной биоты, необходимо питающиеся солнечной энергией технические устройства воздействия, совмещенные с компьютерами, довести до бактериальных размеров, а вычислительные программы сделать эквивалентными геномам нескольких миллионов видов. Таким образом, нужно воссоздать полностью естественную биоту в глобальных масштабах, которая, следовательно, является единственной системой, способной стабилизировать окружающую среду.

\* Нуклеотидная пара содержит около сотни атомов и синтезируется самой биотой из неорганических молекул окружающей среды. Поэтому число молекулярных ячеек памяти ДНК в сто раз больше числа нуклеотидных пар. Следовательно, информация одного вида млекопитающих можно определить в  $10^{11}$  бит. Однако большинство видов биосферы составляют насекомые, ДНК которых в сто раз меньше, чем у млекопитающих. Поэтому оценка генетической информации всей биосферы совпадает с приведенной величиной.

### 3А. Принципы сохранения устойчивости жизни

#### 3.1. Биологическая устойчивость

Все живые организмы существуют за счет потребления внешнего потока энергии — питания. Как и у физических систем динамического равновесия, питание генерирует реакции направленного биохимического распада энергии внутри организма. Упорядоченность реакций распада индуцируется катализаторами, которые синтезируются организмом. Катализатором называют химическое соединение, которое ускоряет определенную химическую реакцию и не расходуется в процессе этой реакции. Скорость реакции пропорциональна относительному числу молекул (2.3.1) с энергией  $E$ , превышающей потенциальный барьер реакции  $A$ ,  $E > A$ . Катализатор понижает потенциальный барьер  $A$  в несколько раз, что увеличивает скорость реакции на величину порядка  $e^{A/RT}$ . Эффективная "барьерная температура"  $T_A \equiv A/R$  для большинства биохимических реакций превосходит солнечную  $T_A > T_c$  (5.1.1), так что  $T_A/T > 20$  (2.8.4) и  $e^{A/RT} \sim 10^8 - 10^{10}$ . Следовательно, в отсутствие катализатора скорости соответствующих биохимических реакций уменьшаются на много порядков величины, так что спонтанные реакции практически не протекают. Таким образом, с помощью синтеза соответствующих катализаторов организм управляет всеми биохимическими реакциями, происходящими внутри него, обеспечивая распад потребляемой энергии по строго определенным каналам реакций. Все быстро протекающие спонтанные химические реакции, которые не управляются каталитически, не могут использоваться жизнью.

После смерти организма и прекращения синтеза катализаторов управляемые химические реакции останавливаются и начинается медленный хаотический спонтанный распад накопленной химической энергии по всем возможным каналам. Разложение мертвых тел ускоряется деятельностью бактерий и других организмов, которые используют органические вещества для поддержания каталитических биохимических реакций внутри своих клеток. Синтез специфических для данного организма молекул—катализаторов при неизменных внешних условиях, а также изменение скорости этого синтеза в ответ на изменение внешних условий, запрограммированы в его наследственной программе, которая закодирована в различных участках — генах — полимерных макромолекул ДНК (Льюин, 1987). Структура молекул ДНК клетки определяет генотип особи.

Скорость синтеза различных катализаторов (при наличии нервной системы) может управляться также индивидуальным опытом, накапливаемым в различных видах внегенетической памяти в течение жизни конкретной особи — фенотипе. Информация, накопленная в этих видах памяти, не закодирована в генотипе и не передается по наследству, однако объем и характер индивидуального опыта также определяется генотипом особи.

Каждая живая особь функционирует на основе законов физики и химии. Все известные принципы физической самоорганизации (Николис, Пригожин, 1979; Шустер, 1988; Anderson, 1983), возникновение различного рода аттракторов (Николис, 1989; Кауфман, 1991; Kaiser, 1990) могут использоваться в различных структурах живого организма. Однако аналогично редким физическим упорядоченным флуктуациям каждая особь с течением времени распадается, теряя уровень своей упорядоченности. Распад особи происходит как в результате старения и увечий особи в процессе ее жизни (распада фенотипа), так и в результате случайных распадных изменений (распадных мутаций) в наследственной программе особи (распаде генотипа), т. е. распада всей последовательности потомков особи.

Как и все физические распадные системы, жизнь особи характеризуется временем распада (или временем жизни). Среднее время распада фенотипа особи — легко измеряемая величина. Среднее время распада генотипа особи можно получить путем измерения времени появления распадных мутаций в последовательности потомков особи, включающей несколько поколений.

На протяжении времен, много меньших времени распада, живые системы (так же, как и физически редкие флуктуации) можно рассматривать как устойчивые системы динамического равновесия. Устойчивость внутренне скоррелированных живых систем означает, что после внешних возмущений состояние системы возвращается к первоначальному значению. Возникают компенсирующие возмущения физиологические реакции организма, регенерация поврежденных органов и т. п. Происходит восстановление (репарация) поврежденных участков ДНК (Радман, Вагнер, 1988).

Все эти реакции запрограммированы в генотипе особи и характеризуют физическую устойчивость особи. Однако, согласно наблюдениям, все эти свойства особи подвергаются распаду и характеризуются измеримым, конечным временем жизни. Следовательно, жизнь одной особи есть сложным образом управляемый процесс распада, который не может неограниченно долго поддерживаться при любом внешнем потоке энергии.

Устойчивость физических систем на протяжении длительного времени наблюдения эквивалентна существованию глубокой потен-