

## Глава 7

# Земные превращения солнечной энергии

Наша родная планета может быть рассмотрена с различных точек зрения: как планета, принадлежащая солнечной системе или как тело, сделанное из расплавленного, богатого железом металлического сплава, покрытого силикатной оболочкой, состоящей из мантии и богатой полезными ископаемыми коры. Промежуточный слой, соседствующий с границей между твердой жидкой поверхностью Земли и тонким слоем атмосферы, является областью жизни – биосферой или биогеосферой. Земля является сложной системой, о которой можно думать как о целом организме, состоящем из многочисленных взаимодействующих и поддерживающих своё существование живых и неживых частей (Lovelock, 1979).

## 7.1 Термодинамика Земли

### 7.1.1 *Потоки энергии и энтропии*

В самом грубом приближении Земля, как термодинамическая система, может быть характеризована внутренней энергией  $E$ , температурой  $T$  и энтропией  $S$ . Эти величины связаны друг с другом первым законом термодинамики

$$dE = T dS - dA$$

где под символом  $-dA$  следует понимать работу внешних гравитационных

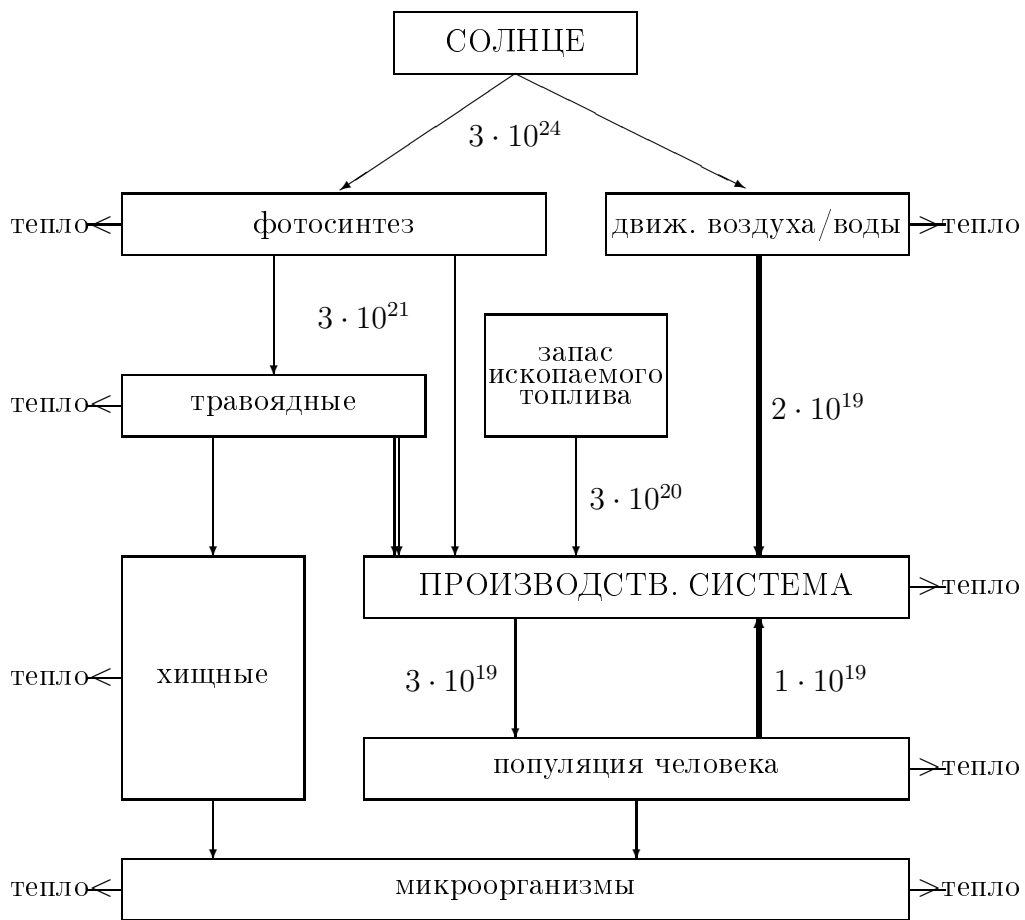
сил, которые приводят к деформации формы Земли. Этим слагаемым можно пренебречь по сравнению с другими слагаемыми, так что остаётся соотношение

$$dE = T dS \quad (7.1)$$

На значения внутренней энергии  $E$  и энтропии  $S$  Земли, как *открытой термодинамической системы*, влияют внешние потоки. Земля получает потоки радиационной энергии от Солнца и излучает тепло, в то время как поступающая энергия претерпевает множество преобразований в течение продвижения через систему (Рис. 7.1). Первые оценки энергетического баланса Земли принадлежат, по-видимому, Генриху Герцу (Mulligan и Hertz, 1997). Впоследствии к этой проблеме обращались многие другие исследователи (Ребане, 1985; Harries, 2000; Kleidon, 2009). По современным оценкам (Harries, 2000; Kleidon, 2009) около трети из полного количества поступающей радиационной энергии ( $5.5 \cdot 10^{24}$  Джоулей за год) отражается облаками и поверхностью Земли, а остальная часть (около  $3 \cdot 10^{24}$  Джоулей за год) поглощается атмосферой и поверхностью Земли.

Благодаря тому, что в течение многих миллионов лет поток энергии от Солнца почти постоянен, Земля находится в почти стационарном состоянии, в котором приток радиационной энергии от солнца почти уравновешен оттоком (Harries, 2000; Kleidon, 2009), так что значения внутренней энергии  $E$  и энтропии  $S$  почти постоянны. Однако даже небольшие изменения потока энергии от Солнца могут вызывать катастрофические (с точки зрения человека) изменения в верхних оболочках (в атмосфере, криосфере, гидросфере, литосфере) Земли. При кратковременных возмущениях потока энергии от Солнца меняются течения воздушных и водных масс. Предполагают, что смена периодов потепления ледниковыми периодами на Земле связана с медленными периодическими изменениями потока энергии от Солнца. Впрочем, не установлено достоверно, связано ли наблюдаемые периоды оледенения с пульсациями солнечной радиации или же существует земные колебательные процессы.

В грубом приближении мы можем рассматривать, что Земля находится в стационарном, неравновесном состоянии с набором внутренних переменных  $\xi_1, \xi_2, \dots$ , характеризующих структурную и функциональную сложность системы. Хотя энтропия стационарной Земли постоянна, в системе, как во всякой неравновесной термодинамической системе, существует



**Рисунок 7.1 Энергетические потоки в земных системах**

Показаны основные потоки химической энергии (одинарные линии) и механической энергии (двойные линии). Оценки потоков (Newman, 1993) в джоулях за год.

внутреннее производство энтропии, которое связано с релаксацией внутренних переменных

$$\frac{d_i S}{dt} = -\frac{1}{T} \sum_j \Xi_j \frac{d\xi_j}{dt}, \quad \frac{d_i S}{dt} \geq 0, \quad (7.2)$$

В стационарном состоянии производство энтропии компенсируется потоком энтропии из системы

$$d_i S = -d_e S. \quad (7.3)$$

Поток энтропии в термодинамическую систему  $d_e S$  может быть оценен непосредственно, по формуле (1.14), с учётом того, что Земля получает энергию от Солнца в форме потока высокоэнергетических фотонов (соответствующий температуре около  $6000^\circ K$ ) и теряет энергию в форме тепла при температуре  $T \approx 300^\circ K$ ). Поскольку химический потенциал фотонов равен нулю, то поток солнечной энергии не приводит к изменению энтропии Земли, при этом потеря энергии в форме тепла определяет поток энтропии от Земли, который может быть оценен как

$$d_e S = -\frac{Q}{T} < 0 \quad (7.4)$$

где  $Q$  – часть радиационной энергии, которая поглощается (попадает в ловушку) Землей,  $T$  – средняя температура Земли. Такого рода оценки были сделаны ранее многими исследователями (Ребане, 1985; Kleidon, 2009) и свидетельствуют, в силу приближенного соотношения (7.3) о существенном производстве энтропии на Земле.

### 7.1.2 Иерархия подсистем

Производство энтропии свидетельствует о структурной и функциональной сложности Земли, которая создаётся и поддерживается поступающим потоком радиационной энергии от Солнца. Земля и ее поверхностные слои находятся в далеком-от-равновесия термодинамическом состоянии с устойчивыми структурно-функциональными структурами, называемые также диссипативными структурами (Morowitz, 1968; Nicolis and Prigogine, 1977; Prigogine, 1980). Все биологические организмы и их сообщества на Земле можно считать диссипативными структурами, которые существуют благодаря потокам энергии (Morowitz, 1968; Nicolis and Prigogine, 1977). Существуют диссипативные структуры бóльшего масштаба: конвекционные течения в атмосфере и океанах, экологические системы, социально-экономические системы, системы знаний и прочие.

Естественная иерархия подсистем определяется прохождением энергии в поверхностных слоях Земли, начиная от поглощения фотонов и заканчивая рассеянием тепловой энергии. Структурно-функциональная сложность геобиосферы естественно описывается с помощью внутренних переменных, при этом может оказаться, что какая-то группа переменных естественным образом выделяется, что позволяет действовать с ними независимо. Таким образом, рассматриваются биологические популяции (глава 5), в том

числе и популяция человека, процессы кругооборота веществ, движения воды и атмосферы, химические реакции и многое что другое. Разумеется, это не обязательно означает какое-то пространственное выделение объекта, или разбиение территории Земли на какие-то области. Всё же в определенном смысле, Землю можно рассматривать как состоящую из подсистем, взаимодействующих друг с другом, иллюстрацию чего можно увидеть на рис. 7.1.

Каждая, в некотором смысле выделенная подсистема, может рассматриваться как открытая термодинамическая система. Каждая подсистема может непосредственно воспринимать (поглощать) часть потока излучения от Солнца, обмениваться теплом и веществом с другими подсистемами и совершать механическую работу, так что, со ссылками на соотношения (1.13) и (1.14), можно записать

$$dE = T dS - dA_{out} + dA_{in}, \quad dS = d_e S + d_i S$$

$$d_e S = \frac{1}{T} (Q_{in} - Q_{out}) + \frac{1}{T} (G_{in} - G_{out}), \quad d_i S = -\frac{1}{T} \sum_j \Xi_j d\xi_j \geq 0, \quad (7.5)$$

где  $A_{out}$  и  $A_{in}$  – работа, совершаемая выделенной подсистемой и над подсистемой;  $Q_{in}$  и  $Q_{out}$  – тепло, поступающее от окружения и рассеиваемое в окружение;  $G_{in}$  и  $G_{out}$  – суммарный поток химической энергии в подсистему и из подсистемы. Подсистема находится в неравновесном состоянии и характеризуется внутренними переменными, релаксация которых вызывает производство энтропии  $d_i S > 0$ . Внутренние процессы, которые обеспечивают увеличение и/или уменьшение энтропии, связаны, так или иначе, со структурной неоднородностью. Заметим, что система обменивается с окружающими подсистемами веществом и энергией, но не энтропией.

Некоторые подсистемы имеют возможность захватить больше энергии, что другие, и воздействуют на другие части, совершая работу

$$dA_{out} = dA_{in} - dE + T dS, \quad (7.6)$$

источником, который служит, в конце концов, радиационная энергия Солнца.

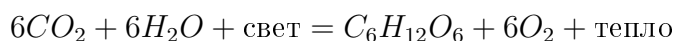
Биофизик Горвард Одум разработал детальные схемы передачи энергии от одной подсистеме к другой (Odum and Odum, 1976; Odum, 1996), определяющие цепи преобразований первоначальной радиационной энергии, прибывающей от Солнца.

## 7.2 Механизмы поглощения солнечной энергии

Земля была бы мертва, если бы не существовало механизмов, позволяющих захватывать солнечную энергию. Важнейшим механизмом усвоения солнечной энергии биосферой является фотосинтез. Солнечная энергия нагревает также земное вещество непосредственно, что приводит к конвективным потокам в атмосфере и океанах. И, наконец, всё большее значение приобретают изобретенные человеком приборы, непосредственно превращающие солнечную радиацию в электрический ток.

### 7.2.1 Фотосинтез

Фотосинтез создал жизнь на Земле. Зеленые части растения имеют специализированные структуры для захвата солнечного излучения. Эти структуры - хлоропласты, содержащие хлорофилл - зеленый пигмент, интенсивно поглощающий свет с длинами волн, соответствующими красному и желтому цветам. Фотосинтез является процессом, в котором энергия фотонов захватывается и превращается в химическую энергию органических молекул, таких как глюкоза, рибоза, крахмал, белки, липиды, и т.д. Реакции фотосинтеза многоступенчаты и разнообразны, в качестве типового примера рассмотрим, следуя работе (Albarran-Zavala and Angulo-Brown, 2007), процесс синтеза молекулы глюкозы, Реакция проходит в несколько стадий, суммарная реакция может быть записана в виде:



В присутствии света, зеленые части растений из углекислого газа и воды производят органические молекулы шестиуглеродного сахара, причём выделяется свободный кислород и тепло. Для образования одной молекулы кислорода необходимы 8 квантов света с суммарной энергией около 1470 кДж/моль. В ходе реакции выделяется тепловая энергия, значение которой, равное 470 кДж/моль, оценивается по балансу энергии связей участвующих в реакции молекул без учета энергии фотонов.

Можно представить некоторый реактор, в который непрерывно поступают необходимые для реакции исходные вещества и удаляются глюкоза и кислород, причем в процессе фотосинтеза сохраняется баланс энергии. Поскольку глюкоза запасает 112 ккал/моль или 468 кДж/моль, то количество выделяемого при синтезе глюкозы тепла  $Q$  должно быть меньше энергии

поглощенных фотонов  $\Phi$

$$\Phi - Q = -6\mu_{CO_2} - 6\mu_{H_2O} + \mu_{C_6H_{12}O_6} + 6\mu_{O_2} = -A > 0. \quad (7.7)$$

Здесь введена термодинамическая сила или сродство реакции фотосинтеза  $A$  (см определение в разделе 3.2.1). Далее удобно рассчитывать количество тепла и все остальные величины на производство одного моля глюкозы.

Реакция фотосинтеза многоступенчата и не происходит мгновенно, в силу чего в рассматриваемом реакторе находятся реагирующие вещества с некоторой концентрацией, что можно фиксировать степенью полноты реакции, определяемой по формуле (3.5) как

$$\frac{\Delta N_{CO_2}}{6} = \frac{\Delta N_{H_2O}}{6} = \frac{\Delta N_{C_6H_{12}O_6}}{1} = \frac{\Delta N_{O_2}}{6} = \Delta\xi \quad (7.8)$$

Степень полноты реакции фотосинтеза совпадает с количеством не выведенной из реактора глюкозы. При рассмотрении суммарной реакции это, конечно, некоторая эффективная величина.

Энтропия оценивается по формуле (1.14), которая с учётом соотношения (3.9) определяет изменение энтропии при производстве одного моля глюкозы

$$T dS = A - Q - A\Delta\xi,$$

которое с помощью соотношений (7.7) и (7.8) записывается в простом виде

$$dS = -\frac{\Phi}{T} - \frac{A}{T}\Delta\xi. \quad (7.9)$$

Первое слагаемое этой формулы отрицательно и показывает предельно возможное уменьшение энтропии в процессе фотосинтеза. Второе слагаемое, в силу соотношения (7.7), положительно, в силу чего фактическое уменьшение энтропии меньше, поскольку реакции фотосинтеза многоступенчаты и оказываются незавершёнными. При оценке изменения энтропии в менее идеализированной ситуации следует рассматривать конкретно стадии процесса.

Мир гетеротрофных организмов (большинство бактерий, животные, человек) потребляет для своей жизни продукты фотосинтеза и выделившийся кислород. Организмы животных, в том числе человека, допускают превращение химической энергии в механическую.

### **7.2.2** *От солнечной радиации к потокам воздуха и воды*

Солнечная энергия воспринимается также поверхностными слоями Земли непосредственно, приводя к нагреванию вещества, что вызывает конвективные потоки в океанах и атмосфере.

Основная причина, приводящая к возникновению в атмосфере Земли движений воздуха является неравномерность получения энергии от Солнца на разных широтах и в разное время суток. Там, где поверхность Земли получает солнечную энергию, воздух расширяется и поднимается вверх, при охлаждении – опускается вниз.

Были разработаны (Sertorio, 1991; De Vos, 1992) некоторые модели, которые позволяют вычислять верхний предел для доли радиационной солнечной энергии, которая может быть преобразована в энергию ветра в атмосфере планеты. Модели основаны на обобщенном цикле Carnot (Curzon-Ahlborn, 1975), в котором атмосфера является рабочим телом. Горячая изотерма находится на дневной стороне Земли, а холодная изотерма находится на ночной стороне (De Vos and Flatter, 1991).

### **7.2.3** *Солнечные батареи*

Фотосинтез управляет энергетическим циклом жизни, который, по Сент-Дьердьи (Szent-Györgyi, 1960) "состоит в том, что электроны сначала поднимаются на более высокий энергетический уровень фотонами, а затем в живых системах падают обратно на свой основной уровень, отдавая при этом порциями свою избыточную энергию, которая и приводит в действие всю машину жизни". В этом случае органические молекулы являются носителями электрических зарядов и их перемещение эквивалентно слабому электрическому току. К настоящему времени сконструированы полупроводниковые приборы, которые непосредственно превращают энергию фотонов в электрический ток. Пока таким образом превращается незначительная доля солнечной энергии, но уже лет через сто ситуация может измениться и этот способ использования энергии Солнца может оказаться преобладающим.



## 7.3 Производственная деятельность человека

### 7.3.1 Термодинамика производственного процесса

Для того чтобы включить процессы производства в термодинамическое описание, удобно рассмотреть две подсистемы. Выделим *искусственную окружающую среду*, которая включает человека и его непосредственное искусственное окружение: здания, одежду, машины, канализационные сети и все остальные предметы, созданные человеком. Предполагаем, что естественными характеристиками искусственной окружающей среды являются количества продуктов  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ . Заметим, что в этот набор включаются как полезные продукты, так и бесполезные, иногда вредные, но неизбежные последствия производства. Будем рассматривать искусственные вещи вместе с популяцией человека как одну из подсистем. Оставшуюся часть будем считать *естественной средой обитания (the environment)*, содержащей все природные образования, которых не коснулась рука человека. Набор чисел  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  определяет, таким образом, границу между двумя рассматриваемыми подсистемами.

Каждая из подсистем является открытой термодинамической системой, допускающей обмен теплом и веществом друг с другом. В дальнейшем рассмотрении используем упрощённую схематизацию: естественная среда воспринимает энергию от Солнца и передаёт её другой подсистеме в химической форме. Для поддержания и развития искусственной окружающей среды существует производственная система, которая совершает работу, являющуюся, в конечном счете, после многих преобразований, работой энергии, которую Земля получает от Солнца. При создании продуктов сдвигаются границы между естественным и искусственным окружением человека.

В соответствие с общими правилами, можно сформулировать термодинамические соотношения для рассматриваемых подсистем. Обозначая штрихом характеристические величины, относящиеся к подсистемам популяции человека и искусственных вещей, записываем

$$\begin{aligned} dE' &= T dS' - dA, \\ dS' &= -\frac{Q'}{T} - \frac{1}{T} \sum_j \Xi'_j d\xi'_j + \frac{G}{T}, \quad dA = \frac{1}{T} \sum_j a_j dQ_j \end{aligned} \quad (7.10)$$

где  $T$  - температура,  $dA$  - работа популяции человека и искусственного

окружения по сдвигу границ с естественным окружением,  $a_j$  - работа для создания единицы продукта  $j$ ,  $Q'$  - поток тепла из рассматриваемой подсистемы в окружение,  $G$  - поток химической энергии из подсистемы естественного окружения в рассматриваемую подсистему. Работа  $dA$  выполняется людьми и внешними энергетическими источниками с помощью производственного оборудования и источников энергии и изменяет как естественную, так и искусственную окружающую среду.

Подсистема естественного окружения не совершает никакой работы, так что для неё

$$dE'' = T dS'', \quad dS'' = \frac{Q' - Q}{T} - \frac{1}{T} \sum_j \Xi_j'' d\xi_j'' - \frac{G}{T}, \quad (7.11)$$

где  $Q$  - поток рассеиваемого Землёй тепла,  $Q'$  - поток тепла из подсистемы искусственных вещей,  $G$  - поток химической энергии из подсистемы естественного окружения в подсистему искусственного окружения.

При суммировании соотношений (7.10) и (7.11) естественно мы возвращаемся к результатам раздела 7.1.1, в частности, к соотношению (7.1) и получаем выражение для приращения энтропии

$$dE = T dS, \quad dS = -\frac{Q}{T} - \frac{1}{T} \sum_j \Xi_j d\xi_j - \frac{1}{T} \sum_j a_j dQ_j. \quad (7.12)$$

Два последних слагаемых в последней формуле имеют одинаковый вид, и потому эта формула для приращения энтропии демонстрирует, что количества продуктов  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  могут быть внесены в список внутренних переменных (параметров внутренней сложности) термодинамической системы Земли. Так же как и любые внутренние переменные, эти переменные, предоставленные сами себе, исчезают, что приводит к дополнительной диссипации энергии. Создание искусственных вещей связано с уменьшением энтропии Земли

$$dS = -\frac{1}{T} \sum_j a_j dQ_j \quad (7.13)$$

Отрицательная энтропия  $-S$  является естественной мерой сложности неравновесного состояния системы, в данном случае, количества и сложности искусственной окружающей среды.

Эта простая схема осложняется тем, что одновременно с полезными продуктами, производственная система создает также бесполезные и вредные

продукты (тепло и отбросы). Большая часть энергии преобразовывается в тепло, которое, в конечном счете, выходит за пределы Земли. Производство полезных вещей стимулирует также процессы смешивания, дисперсии и диффузии, так что можно думать о недостатке вещества, необходимого для производства (Georgescu-Roegen, 1971). Другими словами, химические элементы становятся все более и более смешанными вместе и, таким образом, становится всё более трудным отделить вещества друг от друга. Необходимые для производства вещества становятся всё более и более недоступными. Итак, должна ли Земля ждать диффузионной смерти? Нет, несмотря на некоторые процессы деградация вещества, сущностью процессов производства является создание сложности в окружающей среде. При доступной энергии материалы могут восстанавливаться из отходов как от руды (Ayres, 1997), так что Землю не ждёт диффузионная смерть: несмотря на некоторые процессы деградации вещества, сущностью процессов производства является создание полезной сложности в окружающей среде.

### 7.3.2 Производственные циклы

Работа тепловых машин, которые разработаны, чтобы преобразовать тепло в механическую работу, описывается посредством термодинамических циклов. Сама термодинамика появилась при изучении термодинамических циклов этого вида. При изготовлении вещей мы имеем дело с термодинамическими циклами другого вида – производственными циклами, которые разработаны для того, чтобы преобразовывать 'дикие' формы веществ в 'полезные' формы (жилье, пища, одежда, машины и так далее). Простейший пример производственного цикла, посредством которого создаётся неравновесное состояние вещества, рассмотрен в разделе 2.4.3 второй главы. Можно думать, что по подобной схеме действуют все производственные циклы.

Для выполнения производственного цикла необходимо производственное оборудование, которое выполняет специальные операции, сохраняясь неизменным (не говоря ничего об износе) после цикла, и некоторые вещественные тела, формы которых (можно предположить, что изменением энергии можно пренебречь) изменяются вследствие специальной работы производственного оборудования. Производственный цикл может быть рассмотрен как последовательность элементарных операций  $j_1, j_2, \dots$ , причём набор элементарных операций задан. Индекс  $j_l$  является индексом элементарной операции, выполняемой как номер  $l$  в последовательности операций. Уникальный выбор индексов

определяет, где, когда и как разрешено действовать приложенным извне силам, чтобы выполнить работу, которая может быть вычислена как сумма работ при элементарных операциях

$$\Delta A = A_{j_1} + A_{j_2} + \dots$$

В результате разумно определённой последовательности операций возникает некоторое изделие, полезное людям в каком-либо отношении. Возникновение изделия, согласно формуле (7.13), приводит к уменьшению энтропии нашего окружения. С другой стороны, известно (см. раздел 7.2), что универсальной мерой искусственно созданных и полезных человеку продуктов оказывается стоимость продуктов. Это позволяет нам рассматривать стоимость как аналог отрицательной энтропии, которую можно рассматривать как меру сложности системы, в нашем случае, сложности, которая полезна для людей. Существенной характеристикой производственного процесса является работа производственной системы (совокупная работа машин и человека), так что можно сопоставить стоимость и необходимую для её производства работу человека и машин.

Процесс производства может рассматриваться как процесс преобразования 'диких' форм природы в формы полезные для людей (главным образом без изменения внутренней энергии), для чего необходима должным образом организованная работа производственной системы. Для организации работы должным образом необходим поток информации, который, в конечном счете, определяют новую организацию вещества, которое приобретает формы различных предметов потребления. Процессы производства можно рассматривать как процессы материализации информации, стоимостью чего является работа системы производства.

Производственная деятельность является результатом сознательной активности человека, и существенным этапом является подготовка к производству: определение целей производства, выяснение возможности реализации наших желаний и проектирование оборудования. Мы знаем, что существует деятельность, производящая принципы организации, проектирование технологических процессов и т. д., то есть знание в широком смысле этого слова. Мы полагаем, что этот депозит знаний является фундаментальным результатом науки, результатом исследования, проектных работ и прочих наблюдений. Запас знания должен рассматриваться как ресурс непосредственно. Можно думать, что текущее внимание к запасам знаний, как к истинному источнику экономического роста, не случайно и может помочь описать проблему.

### 7.3.3 Работа в производственных процессах

Работающий организм человека или животного подчиняется соотношениям (3.39) и (3.40), которые можно переписать в виде

$$dE = T dS - dA, \quad T dS = \Delta Q - \sum_i \Xi_i \Delta \xi_i + G. \quad (7.14)$$

Для того чтобы человек или животное могло совершать работу  $dA$ , необходимо повышенное поступление химической энергии  $G$  в организм с пищей. Как биологическая популяция, человек имеет естественный биологический механизм для извлечения из окружающей среды энергии в химической форме.

Кроме того, человек научился извлекать для себя энергию через производственную систему. Эта энергия через различные приспособления используется для преобразования веществ естественной окружающей среды в предметы искусственной окружающей среды, создавая полезную для людей сложность. Примером может служить паровая машина, которая непосредственно превращает химическую энергию угля в механическое движение.

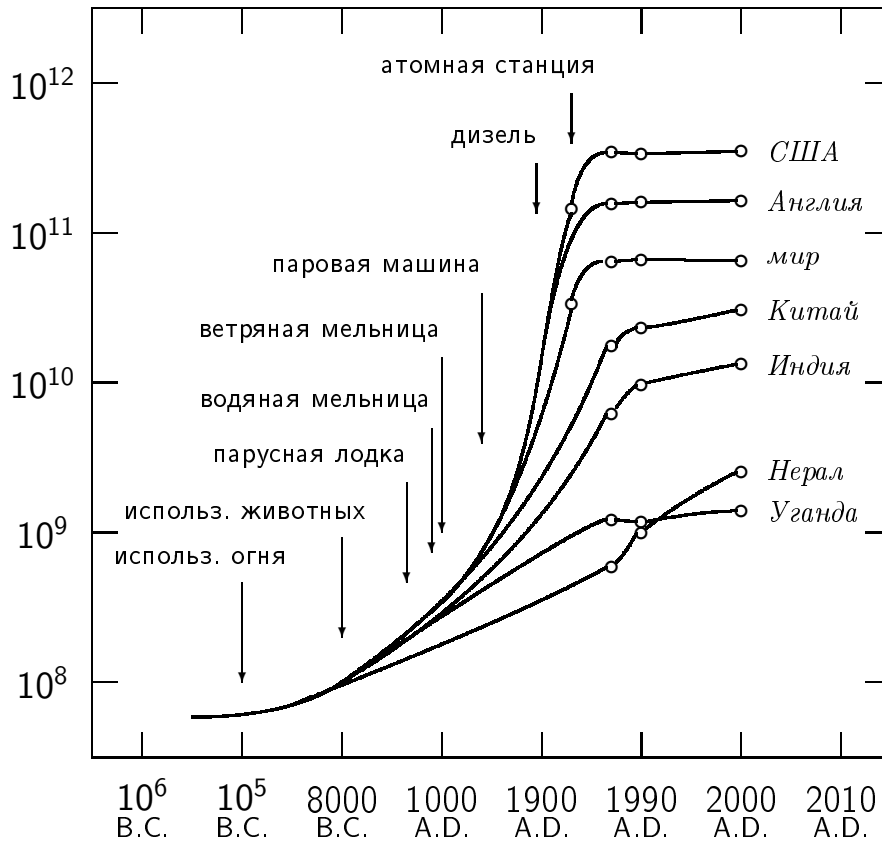
Общественно организованный поток энергии начинается с идентификации первичных энергоносителей: уголь, нефть, потенциальная энергия падающей воды, ... - это то, что человек находит в природе и что ничего не стоит, пока не придумано, как извлекать энергию из энергоносителей. Общее количество первичных энергоносителей, используемых человеком и оцененных в энергетических единицах, попадает в справочники, как величина использованной первичной энергии.<sup>1</sup>

Величины общественно-организованного потока энергии из традиционных и коммерческих источников на душу населения для некоторых стран и для всего мира в целом показано на рис. 7.2. Ветер и потоки воды являются древнейшими источниками энергии, используемыми человеком. Уже в течение сельскохозяйственной эры общественно-организованный поток энергии на душу населения достигает величины биологически

---

<sup>1</sup>Сложилась традиция – говорить о потреблении энергии в народном хозяйстве. Ради точности, слово *потребление* должно быть заменено словом *преобразование*. Энергия не может быть *израсходована* в процессе производства, но может только быть преобразована в другие формы: химическая энергия в тепловую энергию, тепловая энергия в механическую энергию, механическая энергия в энергию тепловую и так далее. Для оценки количества возможного преобразования энергии (работы) используют эксергию (exergy).

$E/N$ , джоуль на человек в год



**Рисунок 7.2 Социально-организованный поток энергии**

Увеличение потребления энергии связано с изобретением все более и более сложных устройств для использования энергии (ветер, проточная вода, уголь, нефть...). Числа, показанные пустыми кругами, не включают работу животных, которые должны быть добавлены к потокам. Эта поправка существенна для Уганды и Непала, но может быть пренебрежена для других стран. Значения для точек взяты из ежегодного статистического сборника.

организованного потока энергии ( $4 \cdot 10^9$  джоулей в год на человека). К середине девятнадцатого столетия величины двух потоков были приблизительно равны. В настоящее время, в развитых странах, общественно организованный поток энергии на душу населения в 50 - 100 раз превышает биологически организованный поток. В американской экономике, например, потребление первичной энергии приблизительно равно  $4 \times 10^{11}$  джоулей на человека ежегодно в 2000 году, что в 100 раз превышает биологически организованный поток энергии.

Из общего количества первичных энергоносителей мы должны выделить ту часть, которая используется для приведения в действие различных приспособлений, выполняющих замещение трудовых усилий работой производственного оборудования. Эту величину называют *первичной производительной энергией*  $E_P$ . Истинная работа замещения или *производительная энергия*  $P$ , определённая в разделе 6.3 шестой главы, как действительное замещение усилий работающих, является малой частью потребления первичной производительной энергии  $E_P$ , и коэффициент эффективности  $P/E_P$  зависит от используемой технологии. Можно оценить, что подлинная заменяющая работа оборудования производства  $P$  составляет только несколько процентов от полной энергии, направленной на то, чтобы производить эту работу.

Остальная часть общественно-организованного потока энергии, названная квази-работой, используется непосредственно в производстве и домашних хозяйствах для освещения, нагревания, химических преобразований и других целей.

## 7.4 Литература

- Печуркин, Н.С. (1982), *Энергетические аспекты надорганизменных систем*, Наука, Новосибирск.
- Ребане, К.К. (1985), *Энергия, энтропия, среда обитания*, Знание, Москва.
- Erik Albarran-Zavala and Fernando Angulo-Brown, A Simple Thermodynamic Analysis of Photosynthesis. *Entropy*, 2007, 9, 152-168
- Ayres R U. Comments on Georgescu-Roegen, *Ecological Economics* 1997; 22: 285-287.
- F.L. Curzon, B. Ahlborn. Efficiency of a Carnot engine at maximum power output. *Am. Journ. Phys.* **43**, 22 - ?? (1975).

- Harries, J.E. (2000), 'Physics of the Earth Radiative Energy Balance', *Contemporary Physics*, vol. 41 (5), pp. 309-322.
- Georgescu-Roegen N. The Entropy Law and the Economic Process. Cambridge MA: Harvard University Press, 1971.
- J.M. Gordon, Y. Zarmi. Wind energy as a solar-driven heat engine: A thermodynamic approach. *Am. Journ. Phys.* **57** (11), 995 - 998 (1989).
- Axel Kleidon, Nonequilibrium thermodynamics and maximum entropy production in the Earth system. Applications and implications. *Naturwissenschaften* (2009) 96 (6) :653-677 DOI 10.1007/s00114-009-0509-x
- Lotka, A.J. (1925), *Elements of Physical Biology*, Williams and Wilkins, Baltimore.
- Lovelock, J. "Gaia: a new look at life on earth"(Oxford UP:1979,1)
- James Lovelock. *Homage to Gaia: The life of an independent scientist*. Oxford university Press, Oxford, 2000.
- James Lovelock. *The revenge of Gaia*. Allen Lane,... 2006?, 177 p.
- Morowitz, H.J. (1968), *Energy Flow in Biology. Biological Organisation as a Problem in Thermal Physics*, Academic Press, New York and London.
- J.F. Mulligan, H.G. Hertz. An unpublished lecture by Heinrich Hertz: "On the energy balance of the Earth". *Am. Journ. Phys.* **65** (1), 36 - 45 (1997).
- Newman, E.I. (1993), *Applied Ecology*, Blackwell Scientific Publications, London etc.
- Nicolis, G. and Prigogine, I. (1977), *Self-Organisation in Non-Equilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*, John Wiley & Sons, New York. Перевод: Г. Николис, И. Пригожин. Самоорганизация в неравновесных системах. От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. Мир, Москва, 1979.
- Odum, H.T. (1996), *Environmental Accounting. Emergy and Environmental Decision Making*, John Wiley & Sons, New York etc.



- Odum, H.T. and Odum, E.C. (1976), *Energy Basis for Man and Nature*, McGraw-Hill, New York *etc.* Перевод: Г. Одум и Э. Одум, Энергетический базис человека и природы. Прогресс, Москва, 1978.
- Hisashi Ozawa, Atsumu Ohmura, Ralph D. Lorenz, and Toni Pujol. The second law of thermodynamics and the Global climate system: a review of the maximum Entropy production principle. *Reviews of Geophysics*, 41, 4 / 1018, 2003.
- J. Peixoto, A. Oort. *Physics of climate*. American Institute of Physics, New York, 1992.
- Prigogine I. *From Being to Becoming. Time and Complexity in the Physical Sciences*. New York: Freeman & Company, 1980.
- Szent-Györgyi, *Introduction to a submolecular biology*. Academic Press, New York and London, 1960. Перевод: Альберт Сент-Дьердьи. Введение в субмолекулярную биологию. Наука, Москва, 1964.
- L. Sertorio. *Thermodynamics of complex systems (An introduction to eco-physics)*. World Scientific, Singapore, 1991.
- Ulanowicz, R.E. and B.M. Hannon. Life and the production of entropy. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, Vol. 232, No. 1267 (Nov. 23, 1987), pp. 181-192
- A. De Vos. *Endoreversible thermodynamics of solar energy conversion*. Oxford University Press, Oxford, 1992.
- A. De Vos, G. Flatter. The maximum efficiency of the conversion of solar-energy into wind energy. *Am. Journ. Phys.* **59** (8), 751 - 754 (1991).