

Глава 10

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 твердо-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, 2000, 2006).

10.1 Энергетический принцип эволюции

10.1.1 Термодинамика Земли

Всю Землю и верхние слои Земли отдельно можно рассматривать как *термодинамические системы*, существующие в неравновесных состояниях (Montgomery and Hipylito, 2023). Термодинамические законы являются весьма общими и применимы к любой системе (Nicolis and Prigogine, 1977; Prigogine, 1980), как бы большой и сложной она ни была, в то же время не требуя, чтобы мы знали структуру системы во всех деталях. Благодаря работам Пригожина (Nicolis and Prigogine,

1977; Prigogine, 1980), мы знаем, что устойчивые диссипативные структуры могут существовать в далеких-от-равновесия состояниях. Все биологические организмы и все искусственные вещи 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. Сама человеческая популяция является примером крупномасштабной диссипативной структуры. Однако мы только начинаем распознавать и описывать крупномасштабные структуры в верхних слоях Земли.

Земля может быть рассмотрена как *открытая сложная термодинамическая система*, и в самом грубом приближении может быть характеризована внутренней энергией U , температурой T и энтропией S . Общая теория неравновесных систем (Pokrovskii, 2018, 2020) позволяет записать (в условиях, когда при предположении, что работой внешних гравитационных сил, приводящих к деформации формы Земли, можно пренебречь по сравнению с другими слагаемыми) выражения для изменения внутренней энергии и энтропии Земли

$$dU = T dS + \sum_j \Xi_j d\xi_j + \sum_\alpha \mu_\alpha dn_\alpha. \quad (10.1)$$

$$T dS = \Delta Q - \sum_j \Xi_j \Delta\xi_j + \sum_\alpha \eta_\alpha \Delta n_\alpha. \quad (10.2)$$

Изменения термодинамических характеристик могут быть связаны как с потоками энергии ΔQ и веществ Δn_α через границы системы, так и с изменениями внутренней структуры системы, которая описывается внутренними переменными $\xi_1, \xi_2, \dots$. Последними слагаемыми в уравнениях (10.1) и (10.2) можно пренебречь, поскольку химический потенциал фотонов μ_α равен нулю, а обмен материальными частицами с космосом невелик.

Неравновесные структуры Земли создаются и поддерживаются, в конечном счете, Солнцем: Земля получает потоки радиационной энергии излучения и излучает тепло, в то время как поступающая энергия претерпевает множество преобразований при продвижении через систему (рис. 10.1). По современным оценкам (Harries, 2000; Kleidon, 2009), ежегодно на Землю поступает около $5.5 \cdot 10^{24}$ джоулей радиационной энергии; около трети этой величины отражается облаками и поверхностью Земли, а оставшая часть (около $3 \cdot 10^{24}$ джоулей ежегодно) поглощается атмосферой и поверхностью Земли, причём оценки

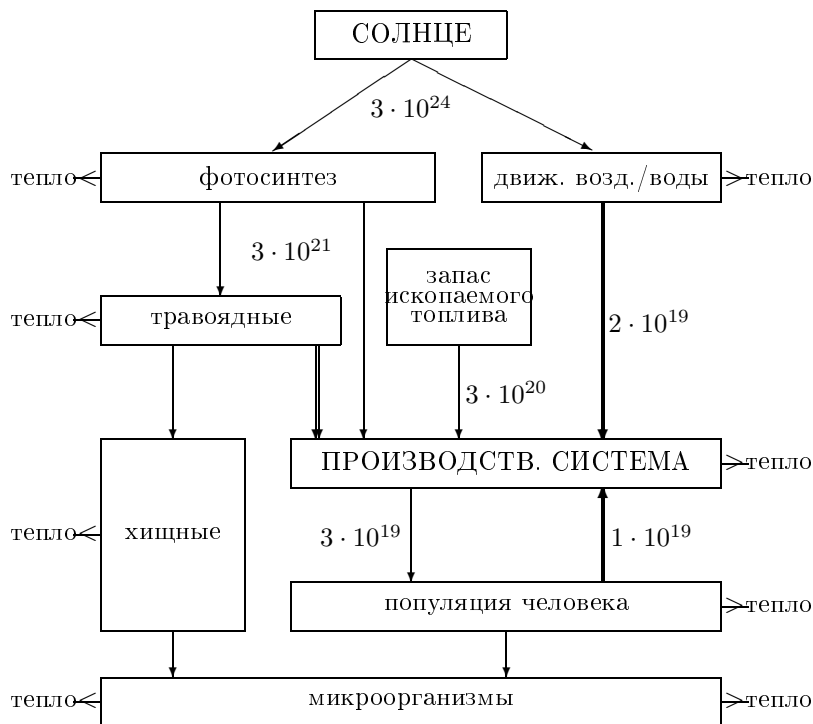


Рисунок 10.1 Энергетические потоки в земных системах

Показаны основные потоки химической энергии (одинарные линии) и механической энергии (двойные линии). Важнейшим механизмом усвоения солнечной энергии биосферой является фотосинтез. Солнечная энергия нагревает также земное вещество непосредственно, что приводит к конвективным потокам в атмосфере и океанах. Оценки потоков (Newman, 1993) в джоулях за год.

показывают, что фотосинтез является основным механизмом усвоения солнечной энергии. Поток внешней лучевой энергии приводит к изменениям термодинамических характеристик Земли в течение времени ее развития.

Энергетический поток от солнца почти уравновешен оттоком тепла (Hargies, 2000), так что значение полной энергии Земли U можно считать неизменным, но поскольку Земля получает солнечный поток вы-

сокоэнергетических фотонов (соответствующий температуре $6000^\circ K$ с химическим потенциалом $\mu = 0$) и излучает тепло при намного более низкой температуре $300^\circ K$, то отток энтропии значительно превышает приток. Оцененное многими исследователями (Ребане, 1985; Kleidon, 2009) изменение энтропии Земли отрицательно

$$dS = \frac{1}{T} \left(\Delta Q - \sum_j \Xi_j \Delta \xi_j \right) < 0. \quad (10.3)$$

Это свидетельствует о возникновении структурной и функциональной сложности системы, описываемой внутренними переменными $\xi_1, \xi_2, \dots$

Внутреннее производство энтропии связано с разрушением сложности системы. Чтобы создавать и поддерживать специальную сложность (далекие-от-равновесия объекты или диссипативные структуры), как в любой термодинамической системе (Morowitz, 1968; Nicolis and Prigogine, 1977; Prigogine, 1980), необходимы потоки энергии, проходящие через систему.

10.1.2 Потоки энергии

Жизнедеятельность любой биологической популяции основана на потоках энергии, поступающей к популяции через пищу и организм особей популяции. Можно рассматривать эти потоки как *биологически организованные потоки энергии*. Для популяции человека, биологически организованный поток энергии равен примерно $4 \cdot 10^9$ джоулей/год или $= 4 \cdot 10^6$ британских тепловых единиц в год на человека во всех столетиях человеческого существования.¹

Кроме того, что, человек, как биологическая популяция, имеет естественный биологический механизм для извлечения энергии из окружающей среды, сообщества людей извлекают энергию через производственный механизм. Наряду с биологически организованными потоками энергии, человеческая популяция контролирует *общественно организованные потоки энергии*. Производственная система играет роль механизма, привлекающего энергию от разнообразных источников, среди которых мы находим остатки прежних биосфер: лес, уголь, нефть; использование прямой и косвенной солнечной энергии в форме потоков воздуха и воды; энергию расщепления и синтеза атомных

¹Британская тепловая единица (British thermal unit, Btu) = 252 кал = 1053.36 джоулей $\approx 10^3$ джоулей.

E/N , джоуль на человека в год

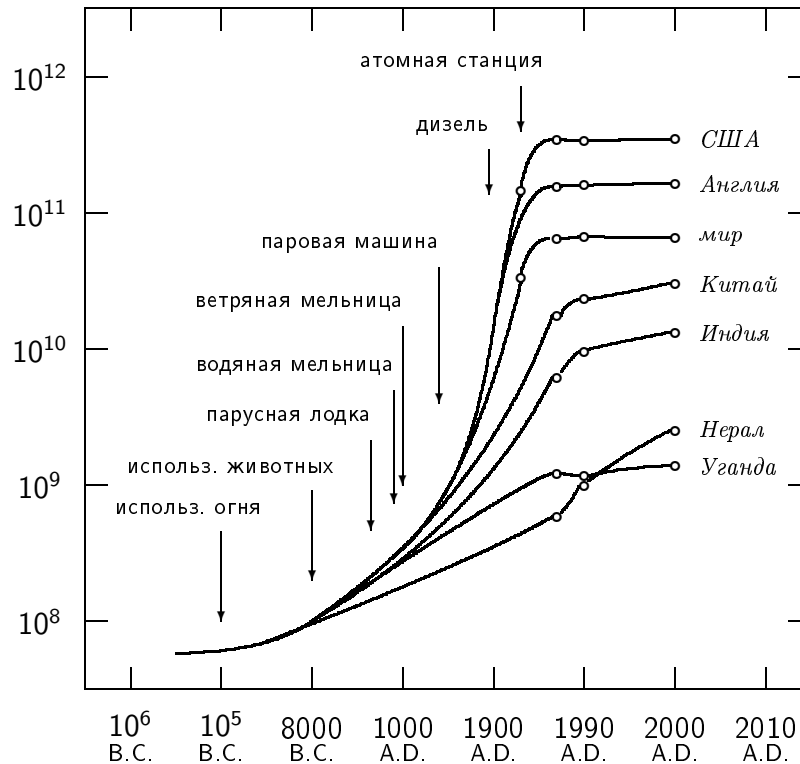


Рисунок 10.2 Общественно-организованный поток энергии

Увеличение потребления энергии связано с изобретением все более и более сложных устройств для использования энергии (ветер, проточная вода, уголь, нефть...). Числа, показанные пустыми кружечками, не включают работу животных, которая должны быть добавлена к потокам. Эта поправка существенна для Уганды и Непала, но может быть опущена для других стран. Значения для точек взяты из Статистического ежегодника энергии (*Energy Statistics Yearbook*, 1993 и последующие выпуски).

ядер. Эти источники энергии через различные приспособления используются для преобразования веществ естественной окружающей среды в предметы искусственной окружающей среды, создавая полезную для людей сложность. Механизм использования энергии людьми был рассмотрен в предыдущих главах в некоторых возможных деталях.

Величины общественно-организованного потребления энергии из традиционных и коммерческих источников для некоторых стран и для всего мира в целом показаны на рис. 10.2. Уже в течение сельскохозяйственной эры общественно-организованный поток энергии на душу населения достигает величины биологически 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 $4 \times 10^8 Btu \approx 4 \times 10^{11}$ джоулей на человека ежегодно в 2000 году, что в 100 раз превышает биологически организованный поток энергии.

10.1.3 Принцип эволюции

Утверждается (Lotka, 1925; Печуркин, 1982; Odum, 1996; Зотин и Зотин, 1999), что справедлив *энергетический принцип эволюции*, согласно которому популяции и их ассоциации (экосистемы), способные извлекать наибольшее количество энергии из окружающей среды, имеют преимущество для выживания. Действительно, непосредственные оценки *сопоставимого стандартного обмена*, который является мерой поступающей с пищей на единицу массы организма энергии², свидетельствуют, что в процессе макроэволюции животные (беспозвоночные и позвоночные) приобретают способность усваивать все большие количества энергии (Зотин, 2018a, 2018b).

Можно утверждать, что энергетический принцип эволюции, который также называют принципом максимальной мощности (Odum, 1996), является справедливым для популяции человека при учёте того, что популяция использует два потока энергии, описанные в предыдущем разделе. Действительно, исследование производства в предыдущих главах демонстрирует, что принцип, по которому развивается производство, может быть сформулирован как принцип максимально-

²Фактически, *сопоставимый стандартный обмен* a вычисляется по формуле $a = Q/M^{0.75}$, где Q – скорость потребления кислорода животным в состоянии относительного покоя при 20°C, M – масса организма (Зотин и Зотин, 1999).

го поглощения доступных ресурсов. Фактически этот принцип развития является принципом эволюции, сформулированным указанными исследователями: траектория развития системы определяется стремлением системы использовать наибольшее количество доступной энергии.

В применении к популяции человека это формальное утверждение является следствием действий многих предпринимателей, стремящихся получить наибольшую прибыль. Реальный путь развития производственной системы определен доступностью труда и энергии. эволюция системы, в конечном счете, определена ростом рабочей силы и возможностями привлечения дополнительного количества внешней энергии, так что система уравнений эволюции производственной системы (5.36) сдержит две важные величины: темпы потенциальные роста трудозатрат и замещающей работы, $\dot{\nu}(t)$ и $\dot{\eta}(t)$, которые должны быть заданы как экзогенные функции времени, но, как обсуждалось в разделах 2.4.2 и 2.5.5, фактически, эти величины являются эндогенными характеристиками в проблеме развития популяции человека.

Всё большее количество энергии используется человеческой популяцией через усовершенствования технологии. Обладание огромным количеством энергии позволяет человеческой популяции выживать во всех климатических зонах Земли и распространиться по всему земному шару. Кроме того, как можно видеть из истории человечества, нации, которые обладали методами использования доступной энергии, приобретали преимущество перед другими нациями. Можно обратиться к классическим примерам: индустриальная революция и процветание Великобритании начались с изобретения паровой машины, которая позволила в большом количестве использовать химическую энергию, хранящуюся в угольных запасах. Мировая история может быть переписана как история борьбы за контроль над потоками энергии.

В начале 21-ого столетия главными первичными источниками энергии являются остатки прежних биосфер: нефть, газ, уголь. Предполагается, что потребность в энергии увеличится, однако, пик эры ископаемых топлив проходит. Потребление ископаемого топлива будет расти медленнее, чем суммарные первичные энергетические потребности. Будущее развитие человечества связано с доступной энергией. Только изобилие доступной энергии обеспечило бы преуспевающее развитие человеческой популяции. Можем ли мы получать энергию непосредственно от Солнца, которое дает Земле $3 \cdot 10^{24}$ джоулей ежегодно, или же мы сможем найти новые источники энергии?

10.1.4 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 большего 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 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. 10.1.

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 для некоторой подсистемы

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

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

(10.4)

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 солнечной энергии, чем другие, и воздействуют на другие части, совершая работу

$$dA_{out} = dA_{in} - dE + T dS. \quad (10.5)$$

Источником этой работы 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, получаемой от Солнца.

10.2 Динамика отдельной популяции

Группа подобных организмов, связанных друг с другом процессами кооперации и воспроизводства, образует сложную динамическую структуру — *популяцию*. Хотя никакая популяция не может существовать без окружающей среды, с которой она взаимодействует и от которой она получает ресурсы для существования, можно рассматривать динамику отдельной популяции, если ввести некоторые средние характеристики влияния среды и окружающих популяций. Однако удобно начать с изучения упрощенных математических моделей отдельных популяций, учитывая влияние других популяций и окружающей среды через некоторые средние параметры. При самом простом подходе, характеристикой популяции является численность особей, и динамика популяции рассматривается как динамика численности особей популяции.

10.2.1 Балансовое уравнение

Изменение численности и состава популяции определяется четырьмя основными демографическими процессами: рождение, смерть, иммиграция, и эмиграция. Мы опускаем на время процессы перемещения особей (процессы иммиграции и эмиграции), так что изменение численности особей популяции N в единицу времени определяется уравнением баланса

$$\frac{dN}{dt} = B - D. \quad (10.6)$$

В этом уравнении, величины B и D , соответственно, числа особей, рожденных и умерших за единицу времени. Чтобы сделать уравнение более удобным для интерпретации, вводят относительные величины — коэффициенты рождения и смертности, соответственно,

$$b = \frac{B}{N}, \quad d = \frac{D}{N}. \quad (10.7)$$

Теперь, уравнение баланса (10.6) может быть написано в другой форме, с которой начинается описание (Lotka, 1925; Volterra, 1931; Murray, 1989) динамики численности популяции

$$\frac{dN}{dt} = (b - d)N. \quad (10.8)$$

Форма уравнения (10.8) является весьма общей, и это уравнение может быть применено к любой биологической популяции. Однако коэффициенты b и d определены обстоятельствами жизни особей и окружающей средой, в которой обитают особи популяции. Так, эти коэффициенты могут зависеть от числа особей той же самой популяции N и/или от некоторых дополнительных переменных, и особенности развития популяции определяются характеристиками окружающей среды.

10.2.2 Экспоненциальный рост

Темп роста является внутренней характеристикой популяции, и в самом простом случае, когда популяция развивается при изобилии пищи, пространства и других ресурсов, можно предположить, что темп роста является постоянным

$$b - d = r.$$

Тогда, уравнение (10.8) определяет решение

$$N(t) = N(0) \exp rt. \quad (10.9)$$

Можно наблюдать, что некоторые популяции в течение ограниченного периода развиваются по экспоненциальному закону, который, конечно, не может быть справедлив в течение всего времени развития. Чтобы описать эмпирические зависимости, можно предположить, что темп роста зависит от времени, но это не решение проблемы: зависимость от времени должна быть включены через некоторые переменные.

10.2.3 Ограниченный рост – логистическая кривая

Во многих случаях рост популяции ограничен некоторыми факторами (пища, ограниченность ареала обитания, болезни и т. д.), которые определяют некоторое предельное значение численности $\bar{N}$. В этом случае коэффициент рождаемости-смертности не постоянен и может быть аппроксимирован в виде

$$b - d = r \left(1 - \frac{N}{\bar{N}} \right), \quad (10.10)$$

где r есть внутренняя, биологическая скорость роста популяции.

Аппроксимация (10.10) определяет известное уравнение Ферхюльста-Пёрла (Verhulst, 1838; Pearl, 1927; см. также, например, Murray, 1989), которое имеет вид

$$\frac{dN}{dt} = r \left(1 - \frac{N}{\bar{N}} \right) N, \quad (10.11)$$

Это уравнение имеет стационарную точку $\bar{N}$, которая устойчива, поскольку $\frac{dN}{dt} < 0$ при $N > \bar{N}$ и $\frac{dN}{dt} > 0$ при $N < \bar{N}$.

Для того чтобы найти явное решение уравнения (10.11), запишем это уравнение в виде

$$\frac{dN}{N} - \frac{dN}{N - \bar{N}} = r dt.$$

Интегрирование этого соотношения, при $N < \bar{N}$ и $N > \bar{N}$, дает, соответственно, решения

$$\begin{aligned} \ln N - \ln(\bar{N} - N) &= rt + \ln A \\ \ln N - \ln(N - \bar{N}) &= rt + \ln A \end{aligned}$$

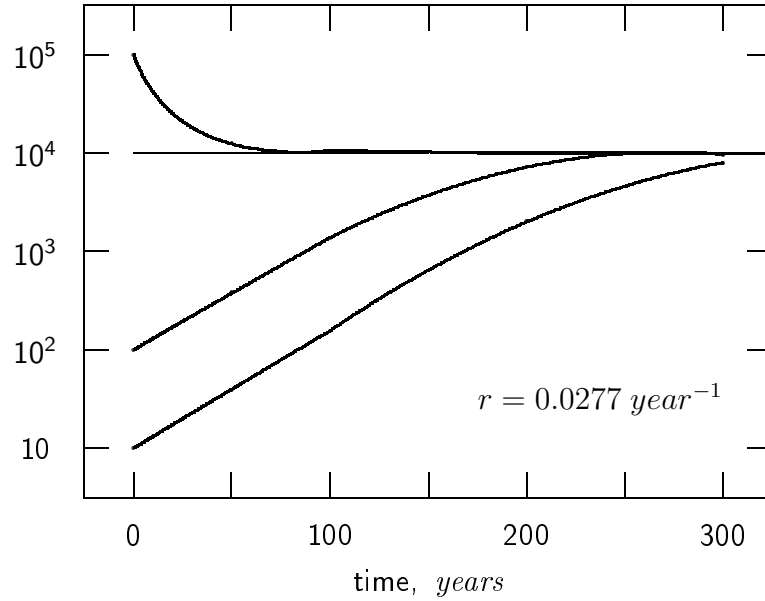


Рисунок 10.3 Эволюция численности популяции

Траектории эволюции, вычисленные по уравнению (10.6), приближаются к линии $N = \bar{N}$ сверху при $N > \bar{N}$ или снизу при $N < \bar{N}$. Вычисления выполнены при $r = 0.0277 \text{ year}^{-1}$, $\bar{N} = 10^4$, и различных начальных значениях $N(0)$.

Можно выразить величину A через начальное значение $N(0)$, так что имеем

$$N(t) = \frac{\bar{N} N(0) \exp rt}{\bar{N} - N(0) + N(0) \exp rt}. \quad (10.12)$$

Эта формула верна как для $N < \bar{N}$, так и $N > \bar{N}$. Уравнение (10.11) описывает набор ограниченных траекторий, называемых логистическими кривыми; все траектории при больших временах, когда $t \rightarrow \infty$, приближаются к асимптотической линии $N = \bar{N}$, как это показано на рис. 10.3. При малых временах численность популяции изменяется как

$$N(t) = N(0) \left[1 + \left(1 - \frac{N(0)}{\bar{N}} \right) rt \right]. \quad (10.13)$$

10.2.4 Миграция

Особи популяции распределены по определенной области, как говорят, *области среды обитания с площадью S* , и при равной численности, но обитающие на областях, различных по площади, особи находятся в различных ситуациях, хотя бы потому, например, что доступные ресурсы зависят от размера области. Чтобы сформулировать закон развития, независимый от размера области, нужно рассмотреть, вместо общего числа особей N , плотность заселения $n = N/S$, которая является, конечно, функцией времени и пространственных координат

$$n = n(t, x, y).$$

Законы развития, обсуждаемые в предыдущем разделе, следует считать локальными законами, в то время как коэффициенты b и d сохраняют значение чисел рождения и смерти для одной особи, относящиеся к определённой области. Теперь, следует принять во внимание, что плотность численности меняется не только из-за рождений и смертельных случаев, но также и из-за миграции особей, движении особей из одной области в другую в поисках пищи и убежищ.

Отдельная особь популяции движется через ареал обитания, и такое движение может быть рассмотрено как движение подобное движению броуновской частицы. Можно ввести плотность вероятности $W(x, y)$, таким образом, что величина

$$W(x, y) \, dx dy$$

является вероятностью того, что особь переместится за единицу времени из начальной точки в малый квадрат с координатами x, y . В изотропном случае, плотность вероятности зависит только от одного аргумента r , так что величина

$$2\pi W(r) r dr$$

является вероятностью того, что особь переместится за единицу времени из начальной точки в кольцо между r и $r dr$.

Средне-квадратичное перемещение особи за единицу времени

$$a^2 = 2\pi \int_0^\infty W(r) r^3 dr \quad (10.14)$$

было названо Тимофеевым-Ресовским (см. Свирежев, 1987) *радиусом индивидуальной активности*. Если эта величина оказывается намного

меньшей, чем типичный масштаб области ($a \ll R$) (предполагая, что единица времени сопоставима со временем жизни поколения), можно полагать, что популяция расселена однородно в рассматриваемой области. Иначе, следует явно принимать во внимание размер области и неоднородность заселения.

Плотность численности популяции в момент $t + \Delta t$ в точке x, y может быть выражена через плотность численности в момент t во всех точках области среды обитания следующим образом

$$n(t + \Delta t, x, y) = n(t, x, y) + \Delta t \int_{-\infty}^{+\infty} [n(t, x', y') - n(t, x, y)] W(x' - x, y' - y) dx' dy'.$$

Область интегрирования полагаем бесконечной, принимая, что радиус активности особи намного меньше, чем типичный масштаб области.

При предположении, что вклады от точек x', y' являются тем более существенными, чем меньше расстояние между этой точкой и точкой x, y , можно учитывать только первые члены разложения плотности

$$n(t, x', y') - n(t, x, y) = \frac{\partial n}{\partial x}(x' - x) + \frac{\partial n}{\partial y}(y' - y) + \frac{\partial^2 n}{\partial x^2}(x' - x)^2 + 2 \frac{\partial^2 n}{\partial x \partial y}(x' - x)(y' - y) + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2}(y' - y)^2 + \dots$$

Используя свойство симметрии функции вероятности, находим соотношение

$$\Delta n = \frac{1}{4} a^2 \left(\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} \right) \Delta t. \quad (10.15)$$

Из этого соотношения следует уравнение миграции

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} \right), \quad (10.16)$$

где $D = a^2/4$ - коэффициент миграции. Записанное выше уравнение является уравнением диффузии на плоской поверхности, и коэффициент миграции является тем же самым, что и коэффициент диффузии.

К правой стороне уравнения (10.16), должен быть добавлен источник, который связан с рождениями и смертельными случаями особей, например, в форме, присутствующей в уравнении (10.11)

$$\frac{\partial n}{\partial t} - D \left(\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n}{\partial y^2} \right) = r \left(1 - \frac{n}{\bar{n}} \right) n. \quad (10.17)$$

Можно также предположить, что существует некоторая задержка миграции в форме, использованной, например, в работе Форта и Мендеса (Fort and Méndez, 1999).

Чтобы описывать распространение особей популяции из некоторой точки, следует написать уравнение миграции в форме

$$\frac{\partial n}{\partial t} - D \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial n}{\partial r} \right) = n(0) \delta(r), \quad (10.18)$$

где $\delta(r)$ – точечная дельта-функция, r – радиальная координата. Решение записанного выше уравнения

$$n(t, r) = \frac{n(0)}{(4\pi Dt)^{3/2}} \exp \left(-\frac{r^2}{4Dt} \right)$$

описывает распространение особей из начальной точки $r = 0$.

10.2.5 Волна в логистической популяции

Рассмотрим, следуя Свирежеву (1987), распространение особей популяции по ареалу. Рассмотрим для простоты распространение популяции по одномерной области и будем интересоваться смещением границы популяции.

Уравнение (10.17) для этого случая может быть написано в форме

$$\frac{\partial n}{\partial t} - D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} = F(n), \quad (10.19)$$

где функция роста локальной плотности популяции $F(n)$ может иметь, например, такую же форму как в уравнении (10.17) с некоторым предельным значением $\bar{n}$, в то время как полагаем:

$$F(0) = F(\bar{n}) = 0, \quad 0 < \bar{n} < \infty$$

$$F'(n) < F'(0) = r > 0, \quad n > 0.$$

Чтобы исследовать движение границы, представим плотность популяции, которая зависит как от времени t , так и от координаты x , в виде функции единственного аргумента

$$n(t, x) = n(x + vt) = n(\xi). \quad (10.20)$$

Это представление означает предположение, что плотность популяции не меняет свою форму и перемещается к левой стороне со скоростью v . При этом справедливы новые граничные условия

$$n(-\infty) = 0, \quad n(+\infty) = \bar{n}.$$

Представление (10.20) позволяет преобразовать уравнение (10.19) к виду

$$v \frac{\partial n}{\partial \xi} = D \frac{\partial^2 n}{\partial \xi^2} + F(n). \quad (10.21)$$

Это уравнение может быть переписано в форме системы двух уравнений первого порядка

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial \xi} &= p, \\ \frac{\partial p}{\partial \xi} &= \frac{v}{D} p - \frac{1}{D} F(n). \end{aligned}$$

Система уравнений имеет две стационарные точки

$$p = 0, \quad n = 0;$$

$$p = 0, \quad n = \bar{n}.$$

Уравнение траектории на фазовой плоскости n, p имеет следующую форму

$$\frac{\partial p}{\partial n} = \frac{v}{D} - \frac{1}{pD} F(n). \quad (10.22)$$

Это уравнение и выражение для коэффициента миграции являются очевидными следствиями самой простой версии описания, которое может быть обобщено различным образом.

10.2.6 Структура популяции

Особи каждой популяции различаются по возрасту, полу и многим другим признакам. Поведение особей с различными признаками различно, так что для более детального описания развития популяции (Полуэктов, 1974) следует различать численности особей определенных групп, например, ввести плотности численности особей мужского и женского пола, N^{σ} и N^{φ} , соответственно, так что

$$N(t) = N^{\sigma}(t) + N^{\varphi}(t).$$

Далее, для более аккуратного описания следует ввести возраст особи τ и плотность численности особей мужского и женского пола, $N^{\sigma}(t, \tau)$ и $N^{\varphi}(t, \tau)$, соответственно, так что, например, $N^{\sigma}(t, \tau) d\tau$ есть число особей мужского пола, имеющих возраст от τ до $\tau d\tau$ в момент времени t . Конечно, справедливы соотношения

$$N^{\sigma}(t) = \int_0^{\infty} N^{\sigma}(t, \tau) d\tau, \quad N^{\varphi}(t) = \int_0^{\infty} N^{\varphi}(t, \tau) d\tau.$$

Изменение численности при рождении и убывании особей описывается, очевидно, уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{dN^{\sigma}(t, \tau)}{dt} &= -d^{\sigma}(t, \tau)N^{\sigma}(t, \tau), \\ \frac{dN^{\varphi}(t, \tau)}{dt} &= -d^{\varphi}(t, \tau)N^{\varphi}(t, \tau) \end{aligned} \quad (10.23)$$

с условиями

$$\begin{aligned} N^{\sigma}(t, 0) &= \int_0^{\infty} b^{\sigma}(t, \tau')N^{\varphi}(t, \tau')d\tau', \\ N^{\varphi}(t, 0) &= \int_0^{\infty} b^{\varphi}(t, \tau')N^{\sigma}(t, \tau')d\tau'. \end{aligned}$$

В этих уравнениях введены зависящие от пола и возраста коэффициенты рождаемости и смертности.

Для того, чтобы вернуться к более грубому описанию, следует проинтегрировать уравнения (10.23) по переменной τ от 0 до ∞ с учётом записанных выше условий, что определяет

$$\begin{aligned} \frac{dN^{\sigma}(t)}{dt} &= \int_0^{\infty} b^{\sigma}(t, \tau)N^{\varphi}(t, \tau)d\tau - \int_0^{\infty} d^{\sigma}(t, \tau)N^{\sigma}(t, \tau)d\tau, \\ \frac{dN^{\varphi}(t)}{dt} &= \int_0^{\infty} b^{\varphi}(t, \tau)N^{\sigma}(t, \tau)d\tau - \int_0^{\infty} d^{\varphi}(t, \tau)N^{\varphi}(t, \tau)d\tau. \end{aligned} \quad (10.24)$$

В более общем случае, каждой особи популяции может быть приписано несколько признаков, так что особи популяции распределяются по группам (доменам).

10.3 Взаимодействующие популяции

В некоторых случаях, популяция, которая является объектом нашего интереса, оказывается очень тесно связанной с другими выделенными популяциями, что вызывает необходимость исследования системы сосуществующих популяций. В самом простом случае, можно рассмотреть две популяции, каждая из которых характеризуется численностью особей, как самую простую модель биоценоза (biocoenosis). В этом случае, можно написать в общей форме

$$\begin{aligned}\frac{dN_1}{dt} &= F_1(N_1, N_2), \\ \frac{dN_2}{dt} &= F_2(N_1, N_2).\end{aligned}$$

Поведение популяций может быть весьма разнообразным при различных спецификациях функций записанных в правой части уравнений. Подобным образом можно выделить и рассматривать несколько взаимодействующих популяций.

10.3.1 Модель конкурирующих популяций

Если особи двух популяций используют одну и ту же пищу, темп роста каждой популяции зависит, очевидно, от численности каждой из популяций. В простейшем случае можно записать

$$\begin{aligned}\frac{dN_1}{dt} &= (r_1 - c_{11}N_1 - c_{12}N_2)N_1, \\ \frac{dN_2}{dt} &= (r_2 - c_{21}N_1 - c_{22}N_2)N_2,\end{aligned}\tag{10.25}$$

где r_1 и r_2 — биологические коэффициенты рождения-смертности для каждой из популяций, $c_{jk} > 0$ — коэффициенты взаимодействия и самовоздействия популяций. В случае, когда количество пищи неограниченно, численность каждой из популяций изменяется по экспоненциальному закону со своими собственными коэффициентами роста r_1 и r_2 , но в случаях, когда взаимное влияние оказывается существенным, поведение популяций становится более сложным.

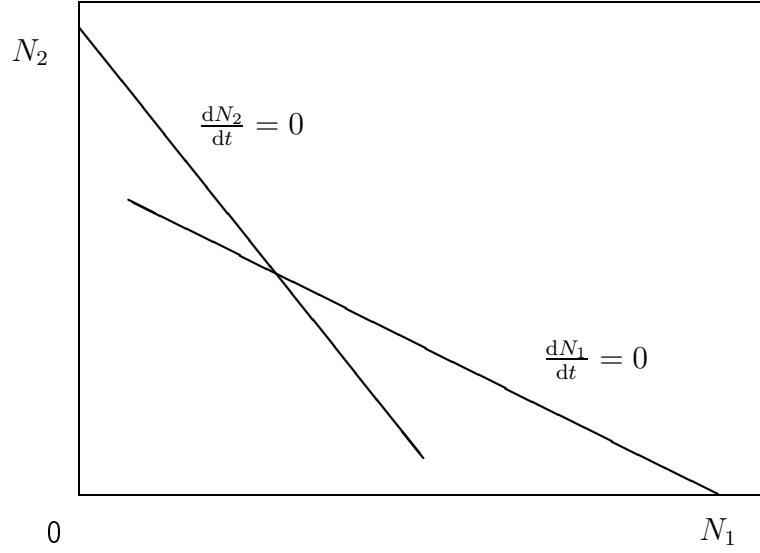


Рисунок 10.4 Фазовое пространство конкурирующих популяций

Точки пересечения прямых друг с другом и с координатными осями являются стационарными точками, устойчивость которых зависит от значений коэффициентов c_{jk} в уравнениях (10.25).

Для установившихся ситуаций, мы имеем систему уравнений

$$\begin{aligned} (r_1 - c_{11}N_1 - c_{12}N_2)N_1 &= 0, \\ (r_2 - c_{21}N_1 - c_{22}N_2)N_2 &= 0. \end{aligned} \quad (10.26)$$

Система уравнений (10.26) определяет три (без учёта тривиального решения $N_1 = 0, N_2 = 0$) стационарные точки

$$\begin{aligned} N_1 &= 0, & N_2 &= \frac{r_2}{c_{22}}, \\ N_1 &= \frac{r_1}{c_{11}}, & N_2 &= 0, \\ N_1 &= \frac{r_1 c_{22} - r_2 c_{12}}{c_{11} c_{22} - c_{12} c_{21}}, & N_2 &= \frac{r_1 c_{11} - r_2 c_{21}}{c_{11} c_{22} - c_{12} c_{21}}. \end{aligned} \quad (10.27)$$

Предполагается, что коэффициенты c_{jk} имеют такие значения, что знаменатель записанных в последней строке выражений не равен нулю. Рисунок 10.4 показывает определенные уравнениями (10.26) прямые в фазовом пространстве. При произвольных начальных значениях $N_1(0)$ и $N_2(0)$ значения численностей популяций стремятся к стационарным точкам, которыми являются точки пересечения прямых друг с другом и с координатными осями. Чтобы исследовать поведение системы около стационарных точек (10.27), можно представить численность популяций как

$$N_1 = N_1^{(s)}(1 + x_1), \quad N_2 = N_2^{(s)}(1 + x_2), \quad (10.28)$$

где $N_1^{(s)}$ и $N_2^{(s)}$ - значения численности популяций в одной из стационарных точек ($s = 1, 2, 3$). Малые по сравнению с единицей величины x_1 и x_2 удовлетворяют уравнениям

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= -c_{11}N_1^{(s)}x_1 - c_{12}N_2^{(s)}x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} &= -c_{21}N_1^{(s)}x_1 - c_{22}N_2^{(s)}x_2 \end{aligned}$$

Рассматривая три случая отдельно, находим, что устойчивость системы в стационарных точках зависит от знаков коэффициентов c_{jk} . Можно убедиться, что, в зависимости от начальных значений и значений параметров, одна из популяций выживает, или же две популяции могут сосуществовать в случае, если последняя стационарная точка устойчива. Условие устойчивости оказывается условием сосуществования.

10.3.2 Модель жертва-хищник

Основные предположения о сосуществовании двух популяций, особи одной из которых питаются особями другой популяции, пришли в голову итальянского математика Вито Вольтерра, когда он познакомился с огромным объемом данных, свидетельствующих о пульсациях некоторых разновидностей рыб в Адриатическом море. Пульсации имели временное поведение близкое к периодическому, и не было никаких оснований связать эти пульсации с какими либо географическими причинами или изменением климата. Эти наблюдения легли в основу предложенной Вито Вольтерра модели жертва-хищник (Volterra, 1931).

Рассмотрим две взаимодействующие популяции – жертву и хищника, особи одного из которых (жертва) является пищей для особей другой популяции (хищник). Пусть N_1 и N_2 являются численностями популяций жертвы и хищника. Можно принять, для простоты, что ресурсы первой популяции (жертвы) не ограничены, но особи второй популяции (хищник), очевидно, не могут жить без пищи, обеспечиваемой особями первой популяции, так что, в случае, если отсутствует какое-либо другое взаимодействие между особями двух популяций, можно записать

$$\begin{aligned}\frac{dN_1}{dt} &= r_1 N_1, \quad r_1 > 0, \\ \frac{dN_2}{dt} &= -r_2 N_2, \quad r_2 > 0,\end{aligned}$$

где $r_1 > 0$ и $r_2 > 0$ - биологические коэффициенты рождения-минус-смертность для обеих популяций в отсутствии взаимодействия. В этом случае, численность популяции "жертва" растет, а численность популяции "хищник" уменьшается по экспоненциальной зависимости со своими темпами роста r_1 и падения r_2 . Принимая во внимание взаимодействие популяций, к уравнениям добавляем нелинейные слагаемые

$$\begin{aligned}\frac{dN_1}{dt} &= r_1 N_1 - \gamma_1 N_1 N_2, \quad \gamma_1 > 0, \\ \frac{dN_2}{dt} &= -r_2 N_2 + \gamma_2 N_1 N_2, \quad \gamma_2 > 0.\end{aligned}\tag{10.29}$$

В случаях, когда взаимное влияние существенно, эффективный коэффициент роста уменьшается для первой популяции и увеличивается для второй популяции.

Для установившихся ситуаций, система уравнений (10.29) превращается в систему алгебраических уравнений

$$\begin{aligned}r_1 N_1 - \gamma_1 N_1 N_2 &= 0, \\ -r_2 N_2 + \gamma_2 N_1 N_2 &= 0,\end{aligned}$$

которая определяет, что, кроме тривиальной точки $N_1 = 0, N_2 = 0$, имеется ещё только одна стационарная точка

$$N_1 = \frac{r_2}{\gamma_2}, \quad N_2 = \frac{r_1}{\gamma_1}.\tag{10.30}$$

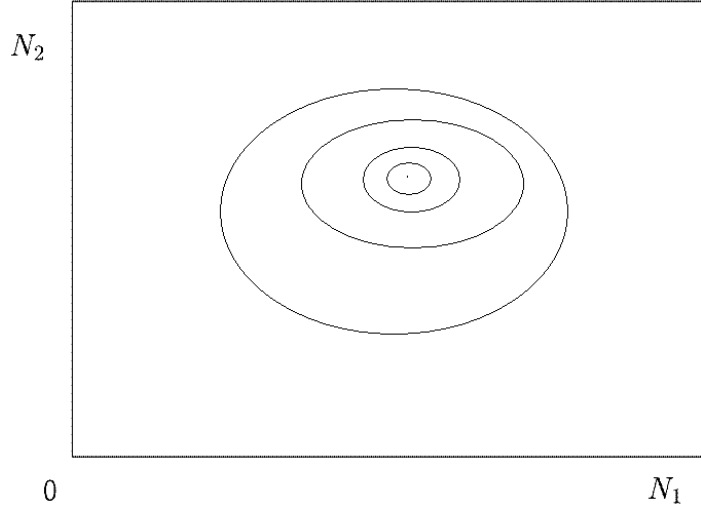


Рисунок 10.5 Эволюция системы жертва-хищник

Траектории системы представляют замкнутые кривые окружающие стационарную точку. При малых отклонениях от стационарной точки кривые оказываются эллипсами.

Уравнение для траектории эволюции системы в фазовом пространстве является следствием уравнений (10.29)

$$\frac{dN_1}{dN_2} = \frac{N_1}{N_2} \frac{r_1 - \gamma_1 N_2}{-r_2 + \gamma_2 N_1}. \quad (10.31)$$

Можно разделить переменные в записанном выше уравнении

$$-r_2 \frac{dN_1}{N_1} + \gamma_2 dN_1 = r_1 \frac{dN_2}{N_2} - \gamma_1 dN_2$$

и найти уравнение траектории движения системы на фазовой поверхности

$$\gamma_2 N_1 - r_2 \ln N_1 = r_1 \ln N_2 - \gamma_1 N_2 + \ln A, \quad (10.32)$$

где A - постоянная интегрирования, которая определяется начальными значениями.

Удобно рассмотреть вначале траекторию развития близкую к стационарной точке (10.30), для чего переменные можно представить в

виде

$$N_1 = \frac{r_2}{\gamma_2}(1 + x_1), \quad N_2 = \frac{r_1}{\gamma_1}(1 + x_2), \quad (10.33)$$

где x_1 и x_2 являются малыми по сравнению с единицей.

Теперь, уравнение траектории (10.32) может быть упрощено. Можно использовать приближенное равенство

$$\ln(1 + x) \approx x - \frac{1}{2}x^2,$$

чтобы найти

$$r_2 x_1^2 + r_1 x_2^2 = 2(\ln A - \ln A_0), \quad \ln A_0 = r_1 \left(1 - \ln \frac{r_2}{\gamma_2}\right) + r_2 \left(1 - \ln \frac{r_1}{\gamma_1}\right),$$

где A - постоянная интегрирования для произвольной траектории, тогда как A_0 - постоянная интегрирования для траектории, которая проходит через стационарную точку, так что правая сторона записанного выше уравнения зависит только от начальных значений $x_1(0)$ и $x_2(0)$.

Можно видеть, что вблизи стационарной точки система движется по замкнутой кривой – эллипсу. Чтобы определять направление движения, можно упростить уравнения (10.29) и получить уравнения

$$\frac{dx_1}{dt} = -r_1 x_2, \quad \frac{dx_2}{dt} = r_2 x_1. \quad (10.34)$$

Траектории развития популяций при малом отклонении от стационарной точки представляют замкнутые линии, как это показано на графике рис. 10.5, где траектории развития изображены для первоначальных значений $N_1(0)$ и $N_2(0)$. Различными способами можно показать, что при произвольных начальных значениях, траектория движения также является замкнутой кривой.

10.3.3 Динамика и термодинамика биогеоценоза

Рассмотренные ранее в этом разделе модели описывают типичное взаимодействие двух популяций, и по этой схеме могут быть сформулированы математические модели эволюции любого числа взаимодействующих популяций. Рассматривая M взаимодействующих популяций с плотностью численности n_j (индекс j пробегает значения от 1 до M), мы можем записать, обобщая рассмотренные случаи (10.20) и

(10.24), систему взаимосвязанных уравнений с учётом процессов миграции,

$$\frac{\partial n_j}{\partial t} = \left(r_j - \sum_{k=1}^M c_{jk} n_k \right) n_j + D_j \left(\frac{\partial^2 n_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n_j}{\partial y^2} \right), \quad j = 1, 2, \dots, M, \quad (10.35)$$

где D_j - коэффициент миграции особей популяции j . Коэффициенты r_j и c_{jk} могут принимать произвольные знаки, определяющие тип поведения популяции; изученные в предыдущих разделах уравнения (10.25) и (10.29) являются частными случаями системы (10.35) для простого случая $M = 2$.

Система уравнений (10.35) применима для описания сложной пространственно-временной картины развития системы взаимодействующих популяций — биоценоза (biocenosis). Более полное описание мы получим, если в набор переменных включим переменные, описывающие наличие органических и неорганических веществ в окружающей среде: воздух, вода, минералы и прочее. При включении минеральных (гео) составляющих рассматриваемая система приобретает название *биогеоценоз* (biogeocenosis). Очевидно, что существует множество частных случаев, представляющих интерес для исследования: статьи об этом публикуются в различных научных журналах.

С точки зрения термодинамики как *биоценоз* (biocenosis), так и *биогеоценоз* (biogeocenosis) можно рассматривать как открытую термодинамическую систему, которая, впрочем, не выделена неизменной границей. Существование каждого *биоценоза* или *биогеоценоза* основано на энергии, поступающей в систему из окружающей среды прежде всего через пищу и организмы особей; что определяет естественный механизм извлечения энергии из окружающей среды — *биологически организованный поток энергии*. Кроме этого может возникнуть поток энергии, обусловленный совместной деятельностью особей популяции — *общественно организованный поток энергии*, который имеет существенное значение для единственной популяции — популяции человека (см. следующий раздел). Все потоки энергии исходят, в конечном счете, через различные превращения и преобразования: фотосинтез растений, различные трофические цепи и так далее от Солнца. После многочисленных химических превращений и пространственных перераспределений некоторые вещества выводятся из организма.

Экосистема (биоценоз или биогеоценоз), так же как и отдельный организм, описанный в девятой главе, может быть характеризована термодинамическими функциями состояния, которые можно предста-

вить как сумму термодинамических характеристик особей с возможными добавочными слагаемыми от эффекта взаимодействия особей в популяции. Для выделенной популяции с N особями записываем свободную энергию Гиббса, энтропию и энтальпию

$$G = NG_{\text{ind}} + G_{\text{soc}}, \quad S = NS_{\text{ind}} + S_{\text{soc}}, \quad H = NH_{\text{ind}} + H_{\text{soc}}. \quad (10.36)$$

Символами с индексами ind обозначены термодинамические величины отдельных особей; символами soc — добавочные слагаемые к термодинамическим функциям определяемые совместной, общественной деятельностью особей, которая, как уже было отмечено, пренебрежимо мала для всех популяций, кроме популяции человека. Термодинамические характеристики определены при заданных температуре и давлении, которые предполагаются постоянными. Текущее неравновесное состояние системы существенно определяется внутренними переменными; среди множества внутренних переменных мы находим переменные, описывающие (с точки зрения термодинамики) крупномасштабные диссипативные структуры.

Рассматриваемое приближение, когда каждая популяция характеризуется только плотностью численности индивидуумов, грубо; для более детального описания особям каждой популяции могут быть приписаны признаки пола, возраста и другие характеристики, и введены соответствующие переменные.

Способность извлекать энергию из окружающей среды является особенностью экосистемы. *Энергетический принцип развития*, который был сформулирован различными исследователями (Lotka, 1925; Печуркин, 1982; Odum, 1996), утверждает, что направление развития популяции (биогеоценоза) таково, что обеспечивает большую способность извлекать энергию из окружающей среды. Те популяции и их ассоциации (экосистемы), способные извлекать большее количество энергии из окружающей среды, получают преимущество для выживания.

10.4 Особенности развития популяции человека

Человеческое общество является, прежде всего, одной из биологических популяций, вроде популяции мух, или слонов, или кошек, или еще каких-либо особей. Однако есть нечто, что отличает человеческую популяцию от прочих и позволяет нам выделить это сообщество для специального рассмотрения. Люди не довольствуются той пищей и теми убежищами, которые они находят готовыми в естественной окружающей среде, люди создали и поддерживают систему производства для того, чтобы иметь пищу, одежду, убежища и другие необходимые вещи, так что человеческая популяция оказывается уникальной популяцией. Популяция человека развивается совместно с развитием общественной производственной системой, которая основана на управляемом использовании энергии. Конечно, следует полагать, что истоки особенностей человеческой популяции находятся в биологических особенностях человека, в особенностях строения его мозга, способности человека к рефлексии. Последнее означает, что человек думает не только о вещах, которые он воспринимает своими органами чувств, но также и о своих мыслях по поводу ощущений.

10.4.1 Эмпирические факты о популяции человека

Открытие и изучение останков древнего человека позволяет утверждать, что человек появился в Африке около трёх миллионов лет назад (Leakey, 1981), и с того отдалённого времени распространился почти по всей территории Земли. Изучение останков древних людей позволяет прояснить картину эволюции и расселения человека. Предполагаемая история спотыкающегося движения человека через морские проливы и горные хребты во времени от двух миллионов до пятисот тысяч лет назад была проанализирована и воспроизведена на основе компьютерной модели (Mithen and Reed, 2002).

Методы ДНК-генеалогии (изучение мутаций в Y-хромосоме человека) позволили выяснить (Клёсов и Тюняев, 2010), что все живущие сейчас люди являются потомками небольшой однородной группы людей, которая выжила после какой-то планетарной катастрофы, случившейся около 65 тысяч лет назад. Причиной катастрофы было, возможно, падение на Землю крупного небесного тела (Юрковец, 2015; Юрковец и Василенко, 2017). В течение последующих тысячелетий

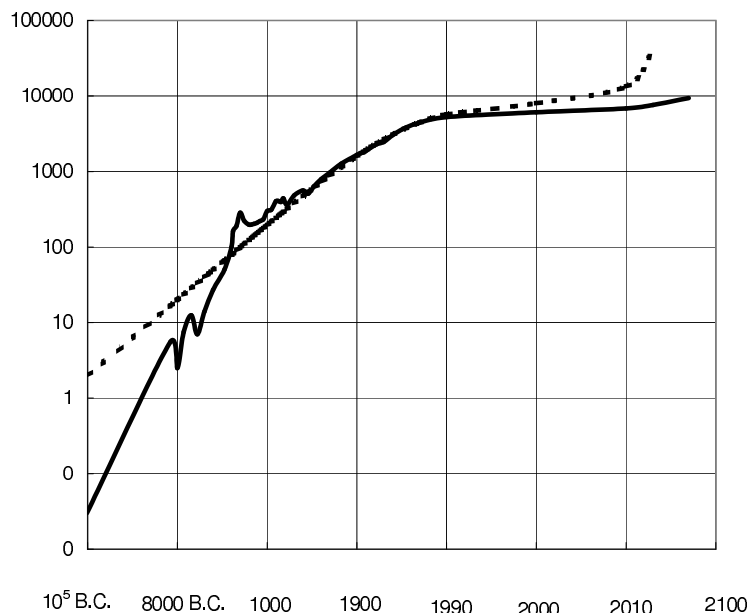


Рисунок 10.6 Рост популяции человека

Численность населения Земли в миллионах человек. Сплошная линия изображает средние значения между наибольшими и наименьшими оценками, найденными на <http://www.census.gov/ipc/www/worldhis.html>. Пунктирная линия нарисована по соотношению (10.37).

человек современного вида заселил Европу и Азию (Клёсов и Тюняев, 2010).

Оценки численности популяции N на Земле по различным источникам показаны на рис. 10.6. В течение последних четырёх тысяч лет население Земли увеличилось от 30 миллионов до почти 7 миллиардов. Быстрый рост происходил в некоторые моменты истории, обозначаемые как культурная революция (около 10^6 лет назад), агрокультурная революция (около 10^4 лет назад) и промышленная революция, которая явно проявилась в 17 - 18 веках. Изменение численности человечества в течение четырёх тысячелетий может быть аппроксимировано (Шкловский 1987, раздел 25) гиперболическим законом:

$$N(T) = \frac{2 \cdot 10^{11}}{2030 - T}, \quad (10.37)$$

где T — время в годах нашего летоисчисления. Зависимость (10.37) воспроизведена на рис. 10.6. Разумеется, как отмечает Шкловский, не следует придавать сингулярности при $T = 2030$ какого либо глубокого смысла: после 2000 года, как видно из сравнения кривой с эмпирическими данными, аппроксимация не применима.

По-видимому, невозможно объяснить, не ссылаясь на общественную производственную систему — способ приспособления человека к условиям существования — увеличение популяции человека от очень маленькой группы миллион лет назад до приблизительно 6 миллиардов в 2000 году. Огромный рост численности людей свидетельствует об эволюционном успехе популяции человека по сравнению с другими биологическими популяциями, населяющими Землю. В отличие от других популяций, человек создал общественную производственную систему, которая созидает и поддерживает искусственную среду обитания человека.

10.4.2 Законы роста популяции человека

Чтобы описать изменение численности популяции человека, можно начать с простого балансового уравнения (10.8), которое, впрочем, применимо к любой биологической популяции. Особенности развития популяции человека следует связать с обстоятельствами жизни особей популяции, влияющими на коэффициенты рождаемости и смертности, соответственно, b и d .

Рассматривая развитие популяции человека, Мальтус (Maltus, 1798) нашел³, что, если рост популяции ничем не сдерживается, то числен-

³В первой главе первого издания своей книги Мальтус пишет (в моем переводе): "Повсеместно отмечалось, что население всех новых колоний, основанных в здоровых странах, где было много места и пищи, постоянно увеличивалось с поразительной быстротой. Некоторые колонии Древней Греции за не очень продолжительный период более чем сравнялись со своими родительскими государствами по численности и мощи. И если не останавливаться на отдаленных примерах, то европейские поселения в Новом свете убедительно свидетельствуют об истинности замечания, которое, насколько мне известно, действительно никогда не подвергалось сомнению. Обилие богатой земли, которую можно получить практически за бесценок, является настолько мощной причиной роста населения, что преодолевает все остальные препятствия. ... Следствием объединения этих благоприятных обстоятельств стала стремительность роста, вероятно, не имеющая аналогов в истории. Было обнаружено, что во всех северных колониях численность населения удвоилась за двадцать пять лет. ... В Нью-Джерси период удвоения, по-видимому, составил двадцать два года, а в Род-Айленде - еще меньше. В отдаленных поселениях, где жители занимались исключительно сельским хозяйством и не знали роскоши, было обнаружено, что за пятнадцать лет их численность удвоилась, что является самым экстраординарным примером увеличения. Вдоль морского побере-

ность популяции удваивается каждые 25 лет, что позволяет утверждать, что в этих условиях справедлив экспоненциальный рост (10.9) со значением темпа роста

$$r \approx 0.0277 \text{ year}^{-1}, \quad (10.38)$$

так что $1/r \approx 36.1$ год есть время, за которое численность популяции возрастает в $e \approx 2.72$ раз. Постоянная Мальтуса определяет некоторый временной масштаб, значение которого, возможно, нуждается в уточнении. Масштаб времени также близок ко времени жизни одного поколения.

Со времён Мальтуса стало понятно, что наличие доступных ресурсов ограничивает рост популяции человека, и изучение природы и характера ограничений оказалось центральным и плодотворным в исследовании проблемы роста популяции человека. Человек живёт в окружении, которое сам сконструировал по своим потребностям. Человек строит жилища, в которые поступает тепло и вода, производит одежду и пищу. Всё это, в том числе и нематериальные ценности (системы знаний, организационные конструкции, этические правила, произведения искусства, ...), представляет общественное богатство, которое может быть учтено в условных денежных единицах и обозначено символом W . Совокупность всех вещей, составляющих общественное богатство, можно определить как *искусственную среду обитания*, которая является важным атрибутом человеческого существования и должна быть включена в рассмотрение. Изложенные выше соображения определяют общее направление развития популяции человека через простой механизм эволюции: сохраняются и накапливаются вещи и идеи, которые необходимы или полезны для выживания человека.

Удобным инструментом в этом случае оказалась описанная в разделе 10.2.3 математическая модель, установленная вначале для биологических популяций (Verhulst, 1838; Pearl, 1927) и нашедшая широкое применение при описании особенностей роста популяции человека⁴. Уравнение (10.11) может служить исходным пунктом при интерпретировании динамики развития; численность популяции не превышает предельное значение численности $\bar{N}$, которое предполагается не постоянным, а меняющимся с течением времени. Рост популяции че-

режья, которое, естественно, должно было быть заселено первым, период удвоения составил около тридцати пяти лет; а в некоторых приморских городах численность населения была абсолютно неизменной.

⁴См. работы Турчина (Turchin, 2007), Коротаева и др. (2007), Нефедова (2007). История вопроса изложена в книге Коротаева и др. (2007) и в очерке Турчина (2009).

ловека следует рассматривать как результат размножения особей и одновременного роста общественного богатства, увеличивающего предельное значение численности популяции $\overline{N}$, возможное значение которого определяется достигнутым уровнем технологического и организационного развития, которое позволяет человеку иметь удобства в получении пищи, устройстве жилища, защите от болезней и другие преимущества перед другими популяциями.

Количественной мерой достигнутого уровня жизни может служить суммарная величина богатства, приходящегося на одного человека W/N , и можно предположить, что существует функция

$$\overline{N} = Nf\left(\frac{W}{N}\right). \quad (10.39)$$

Возможное значение численности $\overline{N}$ увеличивается с увеличением общественного богатства на душу населения W/N . В древние времена скорость роста общественного богатства была очень мала и значение численности населения N было близко к значению возможной численности $\overline{N}$; отношение $N/\overline{N}$ было близко к единице, и отклонение этой величины от единицы может быть связано линейно с общественным богатством на одного человека (Pokrovskii, 1999). Для более детального описания следует рассмотреть отдельно поведение коэффициентов рождаемости и смертности, каждый из которых по предположению зависит от благосостояния – общественного богатства на одного человека W/N . В соответствии с наблюдениями можно полагать (Pokrovskii, 2018, глава 12), что влияние благосостояния приводит к уменьшению как коэффициента рождаемости, так и коэффициента смертности по сравнению с некоторыми неопределёнными естественными значениями, которые считаем равными, предполагая, что в естественных условиях численность популяции не меняется. Коэффициент рождаемости-смертности $b - d$ может проявлять немонотонную зависимость, что позволяет объяснить наблюдаемые колебания темпа роста популяции человека.

Исключительное значение для понимания законов развития имеют исследования эволюции локальных популяций в прошлом. Было замечено, что развитие локальных популяций, как правило, носит циклический характер, для объяснения которого, кроме переменных так или иначе связанных с накопленным богатством, исследователи привлекают другие переменные, связанные с описанием структуры общества и перераспределением ресурсов. Простые модели структурно-демографической теории позволяют описать возрастание и падение численности локальных популяций человека (Коротаев и др., 2007;

Нефедов, 2007; Турчин, 2007). Можно думать, что найденные закономерности могут быть использованы при описании будущего развития человечества, на основании чего может быть предложен надлежащий социальный механизм регулирования роста популяции.

При изучении проблемы следует иметь в виду, что суммарное общественное богатство распределено неравномерно, как внутри популяции, так и по отношению к различным локальным популяциям. К тому же следует принимать во внимание, что на современном этапе развития общественной производственной системы часть национального богатства W , учитываемая в статистических отчётах, не только не способствует выживаемости особей популяции, но и иногда прямо нацелена на уничтожение индивидуумов. Всё это приводит к тому, что среднее значение величины W/N не соответствует истинному значению благосостояния для большинства индивидуумов.

10.4.3 Термодинамика популяции человека

Популяция человека, также как и любая биологическая популяция (см. раздел 10.3.3), может быть рассмотрена как термодинамическая система, которая находится в некоторой окружающей среде и взаимодействует с ней на уровне особей. Популяция человека, как термодинамическая система, обменивается веществом и энергией с окружением, то есть является открытой термодинамической системой, существующей в неравновесном состоянии. Однако в отличие от множества биологических популяций, человек, кроме естественного биологического механизма извлечения энергии из окружающей среды через пищу и организмы индивидуумов, научился извлекать полезную для себя энергию через производственную систему, которая играет роль механизма, привлекающего энергию от разнообразных источников, среди которых остатки прежних биосфер: лес, уголь, нефть; прямая и косвенная солнечная энергия в форме потоков воздуха и воды; энергия расщепления и синтеза атомных ядер.

Для введения термодинамических характеристик популяции человека мы исходим из представления (10.36), которое пригодно для любой биологической популяции. Используя обозначения для индексов, введенные в разделе 10.3.3 для различения величин, относящихся к отдельным особям и их общественной организации, перепишем свободную энергию Гиббса G , энтропию S и энтальпию $H = G + TS$

$$G = NG_{\text{ind}} + G_{\text{soc}}, \quad S = NS_{\text{ind}} + S_{\text{soc}}, \quad H = NH_{\text{ind}} + H_{\text{soc}}. \quad (10.40)$$

Для множества популяций, которые взаимодействуют с окружающей

средой только через тела особей, последние слагаемые в соотношениях (10.40), которые описывают вклад в термодинамические характеристики совместной, общественной деятельности особей, малы и могут быть опущены. Однако эти слагаемые оказываются существенными для популяции человека.

Численность популяции можно непосредственно связать с потоком энергии в систему. При рассмотрении динамики численности используем тождество

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{H}{N} \right) = \frac{1}{N} \frac{dH}{dt} - \frac{H}{N^2} \frac{dN}{dt},$$

которое с учётом определения (10.35) и предположения о том, что характеристики отдельной особи не меняются ($H_{\text{ind}} = \text{const}$), приводит к соотношению

$$\frac{1}{N} \frac{dN}{dt} = \frac{1}{H_{\text{soc}}} \frac{dH_{\text{soc}}}{dt} - \frac{N}{H_{\text{soc}}} \frac{d}{dt} \left(\frac{H_{\text{soc}}}{N} \right). \quad (10.41)$$

Это соотношение показывает, что (с учётом сделанных предположений) темп роста популяции меньше темпа роста общественного потока сторонней энергии H_{soc} на величину темпа роста потребления отдельными индивидами доли общественного потока энергии H_{soc}/N .

Некоторая доля энергии сторонних источников используется непосредственно, другая доля, описанная в разделе 8.4.2, через различные приспособления используется для преобразования веществ естественной окружающей среды в предметы искусственной окружающей среды, создавая полезную для людей сложность. При создании сложности часть энергии рассеивается в форме тепловой энергии.

Уравнение (10.41) является представлением *энергетического принципа развития* для популяции человека: темп роста численности популяции определяется темпом роста привлечения популяцией энергии, если привлеченная энергия на одного индивида неизменна. Траектория эволюции системы определяется стремлением системы использовать наибольшее количество доступной энергии. Предшествующая история человечества подтверждает справедливость энергетического принципа развития. Всё большее количество энергии используется человеческой популяцией через усовершенствования технологии. Обладание огромным количеством энергии позволяет человеческой популяции выживать во всех климатических зонах Земли и распространиться по всему земному шару. Кроме того, как можно видеть из истории человечества, нации, которые обладали методами использования доступной энергии, приобретали преимущество перед другими нациями.

Можно обратиться к классическим примерам: индустриальная революция и процветание Великобритании начались с изобретением паровой машины, которая позволила в большом количестве использовать химическую энергию, хранящуюся в угольных запасах. Мировая история может быть переписана как история борьбы за контроль над потоками энергии.

Литература

- Зотин А.А. (2018а) Энергетическая макроэволюция беспозвоночных животных // Изв. РАН. Сер. биол. 2018. № 1. С. 5-15.
- Зотин А.А. (2018б) Энергетическая макроэволюция позвоночных животных // Изв. РАН. Сер. биол. 2018. № 4. С. 341-351.
- Зотин А.И., Зотин А.А. (1999) Направление, скорость и механизмы прогрессивной эволюции (Термодинамические основы биологической эволюции). М.: Наука, 1999. 320 с.
- Клёсов А.А. и Тюняев А.А. (2010) *Происхождение человека: по данным археологии, антропологии и ДНК-генеологии*. Белые альвы, Бостон-Москва
- Коротаев А.В., Комарова Н.Л. и Халтурина Д.А. (2007) *Законы истории. Вековые циклы и тысячелетние тренды: Демография, экономика, войны*. 2-е изд. УРСС, Москва.
- Нефедов С.А. (2007) *Концепция демографических циклов*. Издательство УГГУ, Екатеринбург.
- Печуркин Н.С. (1982) *Энергетические аспекты надорганизменных систем*, Наука, Новосибирск.
- Полуэктов Р.А., ред. (1974) *Динамическая теория биологических популяций*. Наука: Главная редакция физико-математической литературы, Москва.
- Ребане К.К. (1985) *Энергия, энтропия, среда обитания*. Знание, Москва.
- Свирижев Ю.М. (1987) *Нелинейные волны, диссипативные структуры и катастрофы в экологии*. Наука: Главная редакция физико-математической литературы, Москва.
- Шкловский И.С. (1987) *Вселенная, жизнь, разум* / Под ред. Н. С. Кардашева и В. И. Мороза, 6-е изд., доп.- М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.

- Юрковец В.П. (2015) Климатическая катастрофа гаплогруппы "Бета" Вестник Академии ДНК-генеалогии Volume 8, No. 3, 376-432
- Юрковец В.П. и Василенко С.И. (2017) ДНК-генеалогия, палеоклимат и геоморфология Гидродинамический карст Вестник Академии ДНК-генеалогии Volume 10, No. 3 1412-1442
- Cavalli-Sforza L.L. (2000) *Genes, peoples and languages*. Penguin.
- Harries J.E. (2000) Physics of the Earth Radiative Energy Balance. *Contemporary Physics*, vol. 41 (5), pp. 309-322.
- Fort J. and Méndez V. (1999) Time-delayed theory of the Neolithic transition in Europe. *Phys. Rev. Letters* 82 (4), 867 - 870.
- Jorgensen S.E. and Fath B.D. (2004) Application of thermodynamic principles in ecology. *Ecological Complexity* 1 267-280.
- Kleidon A. (2009) Nonequilibrium thermodynamics and maximum entropy production in the Earth system: Applications and implications. *Naturwissenschaften* 96 (6), 653-677.
- Leakey R.E. (1981) *The Making of Mankind*. Elsevier-Dutton Publishing Company, Inc.
- Lotka A.J. (1925) *Elements of Physical Biology*, Williams and Wilkins, Baltimore.
- Lovelock J. (1979) *Gaia: a new look at life on earth*. Oxford university Press, Oxford.
- Lovelock J. (2000) *Homage to Gaia: The life of an independent scientist*. Oxford university Press, Oxford.
- Lovelock J. (2006) *The Revenge of Gaia: Earth's Climate Crisis & The Fate of Humanity*. Allen Lane, UK.
- Malthus T.R. (1798) *An Essay on the Principles of Population, as it Affects the Future Improvement of Society*. J. Johnson, London.
- Mithen S. and Reed M. (2002), Stepping out: a computer simulation of hominid dispersal from Africa. *Journal of Human Evolution*, vol. 43, pp. 433-462.
- Montgomery C. and Hopylito I. (2023) Resurrecting Gaia: harnessing the Free Energy Principle to preserve life as we know it. *Front. Psychol.* 14:1206963. doi: 10.3389/fpsyg.2023.1206963
- Morowitz H.J. (1968) *Energy Flow in Biology: Biological Organisation as a Problem in Thermal Physics*. Academic Press, New York and London.

- Murray J.D. (1989) *Mathematical Biology*. Springer-Verlag, Berlin etc.
- Newman E.I. (1993) *Applied Ecology*, Blackwell Scientific Publications, London etc.
- Odum H.T. (1996) *Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making*. John Wiley & Sons, New York.
- 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.
- 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.
- Pearl R. (1927) The growth of population. *Quart. Rev. Biol.*, vol.2, pp. 532 - 548.
- Pokrovski V.N. (2003) Energy in the theory of production. *Energy*, Vol. 28 (8), pp. 769-788.
- Pokrovski V.N. (1999) *Physical Principles in the Theory of Economic Growth*. Ashgate Publishing, Aldershot.
- Pokrovskii V.N. (2018) *Econodynamics: The Theory of Social Production, The 3rd Ed.*. Springer, Dordrecht-Heidelberg-London-New York, 2018 <https://www.springer.com/gp/book/9783319720739> . Перевод в двух книгах: Покровский В.Н. (2019) *Экономодинамика: Теория общественного производства*. URSS: ЛЕНАНД, Москва. Покровский В.Н. (2019) *Экономодинамика: Теория общественного производства. Дополнительные главы*. URSS: ЛЕНАНД, Москва.
- Pokrovskii V.N. (2020) *Thermodynamics of Complex Systems: Principles and applications*. IOP Publishing, Bristol, UK.
- Prigogine I. (1980) *From Being to Becoming: Time and Complexity in the Physical Sciences*. Freeman & Company, New York.
- Schrödinger E. (1944) *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*. Cambridge University Press, Cambridge. Перевод: Э. Шредингер *Что такое жизнь? Физический аспект живой клетки*. Перевод с английского А. А. Малиновского, Г. Г. Порошенко под редакцией Ю. А. Данилова, *Издание третье, дополненное и исправленное*. Регулярная и хаотическая динамика, Москва-Ижевск, 2002.

- Turchin P. (2003) *Historical Dynamics: Why States Rise and Fall*. Princeton University Press, Princeton, NJ. Расширенный перевод: П.В. Турчин, *Историческая динамика: На пути к теоретической истории*. УРСС, Москва, 2007.
- Turchin P. (2009) Long-term population cycles in human societies. In: R.S. Ostfeld and W.H. Schlesinger, eds, *The Year in Ecology and Conservation Biology*, pages 1-17. Ann. N.Y. Acad. Sci. 1162. Перевод: Долгосрочные колебания численности населения в исторических обществах. <http://elementy.ru/lib/430806>
- Verhulst P.F. (1838) Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement, *Corr. Math. et Phys.*, vol. 10, pp. 113 - 121.
- Volterra V. (1931) *Lessons sur la mathematique de la lutte pour la vie*. Marcel BreLOT, Paris. Перевод: В. Вольтерра, *Математическая теория борьбы за существование*. Наука, Москва. 1976.