

2018  
7.15

М.В. ГАЛЬПЕРИН

# ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ



ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ  
ОБРАЗОВАНИЕ

ФОРУМ

УДК 504.062(075)  
ББК20.18я723 Г15

*Рецензенты:*

кандидат физико-математических наук, директор Московского государственного техникума технологии, экономики и права им. Л. Б. Красина *В. В. Соколов*;  
доктор физико-математических наук, профессор, заместитель директора по научной работе Института глобального климата и экологии Росгидромета и РАН *С. М. Семенов*.

**Гальперин М. В.**

**Г15 Экологические основы природопользования:** Учебник. — М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2003. - 256 с: ил. - (Серия «Профессиональное образование»).

ISBN 5-8199-0042-1 (ФОРУМ) ISBN  
5-16-000988-4 (ИНФРА-М)

Учебник содержит базовые сведения по экологии и рациональному использованию природных ресурсов. Рассмотрены основные законы экологии и типы экологических систем, история образования современной биосферы, энергетические, материальные и информационные потоки в биосфере. Приведены подробные сведения о загрязнении окружающей природной среды, механизмах распространения и воздействии загрязняющих веществ на живые организмы и климат. Особое внимание уделено природоресурсному потенциалу Земли и его сохранению, принципам и методам рационального природопользования, экологическому мониторингу и регулированию, концепции и условиям устойчивого развития системы цивилизация — биосфера и международному сотрудничеству в области охраны природы и природопользования.

В учебник включён справочный материал, необходимый для понимания масштабов изучаемых явлений и дающий возможность широкому кругу читателей найти в книге ответы на наиболее часто встречающиеся вопросы, связанные с охраной окружающей среды.

Для студентов средних специальных учебных заведений, вузов, учащихся общеобразовательных школ и колледжей с углублённым изучением биологии и экономики, а также широкого круга читателей.

**УДК 504.062(075)  
ББК 20.18я723**

ISBN 5-8199-0042-1 (ФОРУМ)  
ISBN 5-16-000988-4 (ИНФРА-М)

© М. В. Гальперин, 2003  
© ИД «ФОРУМ», 2003

Блаженны кроткие, ибо они наследуют Землю. *Евангелие от Матфея, 5:5*

Всё связано со всем. Всё должно куда-то деваться. Природа знает лучше. Ничто не даётся даром.

*Барри Коммонер.  
«Замыкающийся круг»*

## Предисловие

Защита окружающей природной среды от деградации и загрязнения стала в настоящее время ключевой проблемой как для общества в целом, так и для каждой отдельной семьи. Явный дефицит соответствующих знаний у большинства граждан приводит к неприемлемым крайностям. С одной стороны, часто наблюдается полное пренебрежение к экологической безопасности, с другой — преувеличенный страх и необоснованное отрицательное отношение ко многим видам производственной деятельности. Эти две негативные тенденции успешно питают друг друга в обществе. Вместе с тем многие факторы в быту и производстве, представляющие действительно серьёзную угрозу для природных экосистем и здоровья людей, остаются вне поля зрения и граждан, и администрации.

Многие из тех, кто публично выступает по проблемам охраны окружающей среды, проявляют полную неосведомлённость в этих вопросах и просто непонимание значения употребляемых ими слов. Очень характерный пример: употребление слова «экология» в значении «состояние окружающей среды». Можно, например, услышать: «У нас в городе плохая экология». Тот, кто так говорит, по-видимому, считает, что в городе плохая математика, если покупателя обсчитывают на рынке. Другой пример: даже в официальных документах можно встретить странный способ измерять уровень загрязнения тоннами выброса загрязняющих веществ независимо от их природы. Но выброс из заводской трубы одной тонны сернистого газа или диоксида азота практически не будет иметь значения, тогда как выброс одной тонны диоксида есть тяжелейшая экологическая катастрофа. По

токсическому действию диоксин превосходит сернистый газ примерно в 100 миллионов раз!

Подобное положение приводит не только к неоправданным конфликтам в обществе, но и наносит прямой ущерб экономике и окружающей природной среде.

Только экологическое образование, включающее основы рационального природопользования, и развитие системного экологического мировоззрения может помочь радикально решить эту проблему в долгосрочной перспективе. Данная книга — попытка способствовать достижению этой цели.

Термин «природопользование» имеет два значения. Во-первых, под природопользованием подразумевается процесс использования природных ресурсов человеческим обществом. Во-вторых, это системная научная дисциплина, изучающая воздействие человеческой деятельности на природные ресурсы и разрабатывающая методы их защиты от истощения и деградации.

Любая человеческая деятельность связана с эксплуатацией природных ресурсов. И подобно тому как для строительства кораблей необходимо знание закона Архимеда, а для проектирования электрических машин — закона Ома, грамотное природопользование требует знания законов, по которым действуют природные системы. Эти законы изучает экология, которая в наше время из отрасли классической биологии превратилась в самостоятельную науку, изучающую системные связи не только внутри природных комплексов, но и между природой и человеческой цивилизацией. Поэтому первая часть данной книги содержит необходимый минимум сведений по экологии и природным процессам в оболочках Земли.

Вторая часть книги посвящена собственно природопользованию, а именно тем ресурсам, которые Земля предоставила человеку, негативным воздействиям, которые человек оказывает на них, и возможностям гармонизации взаимоотношений человека и среды его обитания.

В книгу включён определённый объём справочного материала. Во-первых, это сделано, чтобы дать учащимся или читателям конкретное представление о порядках величин, характеризующих изучаемые явления. Во-вторых, это даёт возможность использовать книгу как справочное издание по наиболее часто встречающимся на практике вопросам, связанным с охраной окружающей среды. Следует, однако, помнить, что юридическое

значение имеют только официальные документы и приведённые в них нормативы.

Для чтения книги достаточно знаний по химии, физике, биологии, географии и математике в объёме 9 классов средней школы.

Приведённый список литературы включает два раздела. В первом помещены данные общеобразовательных книг и учебников, которые автору показались наиболее квалифицированно и интересно написанными. Этот список неизбежно неполон и субъективен. Во втором разделе указаны основные научные издания, к которым автор обращался при подготовке данной книги и в которых можно найти подробные сведения по рассматриваемым проблемам.

Замысел книги возник у автора в результате обсуждения учебных программ с Т. Н. Синиловой. Написание и подготовка книги к изданию были бы невозможны без активной помощи В. В. Соколова и терпеливой поддержки Л. В. Трофимовской. Советы и замечания научного редактора книги Т. Г. Лапердиной трудно переоценить. Всем им автор выражает свою искреннюю признательность.

*М. Гальперин*

# ЧАСТЬ I ВВЕДЕНИЕ В ЭКОЛОГИЮ

## Глава 1 Основные понятия и законы

Можно поймать рыбу на червя, который поел короля, и поесть рыбы, которая питалась этим червём: так король способен совершить путешествие по кишкам нищего.

*Вильям Шекспир. «Гамлет»*

Покоя нет, есть только равновесье,  
Но в равновесье — противополопор:  
Так две стены, упавши друг на друга,  
Единый образуют свод.

*Максимилиан Волошин.  
«Путями Каина»*

### 1.1. Предмет экологии

Идея единства живых организмов со средой их обитания и необходимости гармоничного сосуществования человека и природы отчётливо прослеживается уже в самых древних религиях и законах. Однако на заре Нового времени, в эпоху Возрождения, возобладало представление о бесконечном могуществе человека — «царя природы», который имеет возможность и право неограниченной и бездумной эксплуатации природных ресурсов. Соответственно в XVI—XVIII веках объекты природы стремились, как правило, рассматривать независимо друг от друга и исключительно с точки зрения их возможной эксплуатации, хотя целый ряд экологических по своей сути закономерностей и

был установлен в эту эпоху. Только в конце XIX века наука вернулась к идее целостности природных комплексов. Это было непосредственно связано с работами Чарльза Дарвина по теории естественного отбора. Так как движущей силой отбора и эволюции является воздействие среды обитания на биологические виды и *популяции*, возникла объективная необходимость выделения *экологии* как части биологии, изучающей взаимодействие живых организмов с их средой обитания. Сам термин «экология» можно перевести с греческого буквально как «домоведение», и его впервые ввёл в употребление в книге «Общая морфология организма» (1866) немецкий биолог-эволюционист Эрнст Геккель (*Haeckel*, 1834-1919).

Со временем стало ясно, что предметом экологии должны быть не только биологические объекты, но и вся природная среда в совокупности. Основоположник современной *геохимии* и учения о *биосфере* Владимир Иванович Вернадский (1863—1945) первый указал на то, что живые организмы не только приспосабливаются в процессе биологической эволюции к природным условиям, но и сами в свою очередь очень сильно влияют на формирование геологического и геохимического облика Земли.

Экология стала наукой об экологических системах — экосистемах. *Экосистема есть связанная совокупность всех живых организмов и их неживого окружения в некоторых пространственных пределах.*

В экологии, также как и в других системных науках (например, в экономике), главное внимание уделяется не внутренним свойствам элементов системы, а связям между этими элементами и поведению системы в целом. Экономиста, вообще говоря, не интересуют подробности технологии производства материалов или энергии. Экономист исследует их потоки и связанное с ними денежное обращение. Точно так же эколог изучает взаимодействие между биологическими объектами и элементами природной среды нашей планеты или какой-то её части и потоки вещества и энергии в экосистемах.

Понятие экосистемы в определенных пределах безразмерно. Самая крупная известная нам экосистема — глобальная экосистема Земли — *биосфера*. В неё входят экосистемы отдельных океанов, материков и внутриконтинентальных морей. Внутри этих экосистем в свою очередь можно выделить экосистемы отдельных регионов и далее продолжить этот процесс вплоть до уровня отдельных организмов, некоторые из которых также мо-

гут рассматриваться в качестве экосистем (например, крупные деревья тропических лесов служат «домом» для огромного числа микроорганизмов, растений-паразитов, насекомых, птиц и других живых существ).

Таким образом, экосистемы разного уровня образуют иерархическую структуру (рис. 1.1). Особенно важным структурным уровнем в ней является *биогеоценоз* — система, состоящая из сообщества живых организмов (*биота*) и его *абиотического* окружения на ограниченном участке земной поверхности с однородными условиями (*биотоп*). Ещё в конце XIX века один из основоположников современного почвоведения и агрономии Василий Васильевич Докучаев (1846—1903) придавал особое значение представлению о *биоценозе* как сообществе живых организмов, сосуществующих на некоторой местности. Это понятие было расширено до *биогеоценоза* в 1944 г. Владимиром Николаевичем Сукачёвым (1880—1967).

При изучении любой системы возникает естественная необходимость указать её границы, то есть рассматривать её как *изолированную*. Как правило, это противоречит требованию учесть



Рис. 1.1. Иерархическая структура биосферы. На нижнем уровне находятся биогеоценозы, в состав каждого из которых входят биотоп и взаимодействующие друг с другом популяции живых организмов, образующие сообщество (биоту)

все существенные связи системы с необходимой полнотой. Любая система, в том числе экологическая, связана с внешним миром потоками вещества, энергии и информации, то есть является *открытой системой*. Иногда эти потоки пренебрежимо малы — это большая удача для исследователя. Но обычно приходится задавать эти потоки как *параметры* самой системы или *граничные условия* и тогда уже можно анализировать её как изолированную. Так, например, исследуя биосферу в целом, мы прежде всего задаём на её внешних границах потоки солнечной энергии и космических частиц, косвенно принимаем во внимание вращение Земли и наклон её оси, так как они вызывают смену дня и ночи и времён года, и учитываем внешние гравитационные поля (Солнца и Луны) как факторы, вызывающие океанские приливы и отливы.

На уровне биогеоценозов проблема границ может быть связана, в частности, с миграцией отдельных видов. Например, аисты и ласточки в силу своей прожорливости могут играть существенную роль одновременно в экосистемах Европы и Южной Азии или Африки, где они зимуют. Таким образом, серьезные изменения условий в местах обитания этих видов в Европе могут самым неожиданным образом повлиять на весьма удаленные биогеоценозы южных стран и наоборот.

При оценке степени влияния какого-либо фактора на экосистему огромную роль играет масштаб времени. Например, медленный дрейф материков (*тектоника плит*), меняющий облик Земли на протяжении миллионов лет, можно не принимать во внимание при анализе современного состояния биосферы, но он имеет важнейшее значение в истории её развития. Вместе с тем связанная с тектоникой плит вулканическая деятельность постоянно оказывает решающее влияние на многие экосистемы, а огромные выбросы пыли в верхние слои атмосферы при катастрофических извержениях вулканов вызывают глобальные изменения погодных условий на протяжении нескольких месяцев или лет.

Практически все современные экосистемы в той или иной степени испытали воздействие человека. Значительная часть континентальных экосистем — сельскохозяйственные угодья, города и промышленные регионы, лесопосадки — целенаправленно и искусственно создана человеком и в большинстве случаев продолжает существовать только благодаря его усилиям. Такие экосистемы называют *антропогенными* (буквально — рож-

денными человеком) в отличие от природных экосистем, на которые человек влияет непреднамеренно. К последним, конечно, следует относить и природные заповедники, хотя человек и вынужден защищать их от самого себя.

Человеческая цивилизация воздействует на природные экосистемы самым различным образом и, как правило, негативно:

- изымает у природных экосистем территорию и ресурсы (например, пресную воду), зачастую не с целью их эксплуатации, а просто в результате механического и химического загрязнения (мусор, твердые и жидкие отходы производства);
- непосредственно эксплуатирует их в качестве так называемых возобновимых природных ресурсов (сплошная рубка лесов, хищнические приёмы охоты и рыболовства);
- способствует разрушению почв, их эрозии и опустыниванию;
- преднамеренно и непреднамеренно изменяет видовой состав биоты;
- изменяет химический состав атмосферного воздуха, воды и почв (попросту говоря, их химически загрязняет), причем часто вносит в природную среду весьма опасные и ядовитые для всего живого, в том числе и человека, вещества;
- создаёт опасные физические и физико-химические факторы, перед которыми биота практически беззащитна (радиоактивное загрязнение!).

Этот список можно расширять и уточнять почти бесконечно. Принципиальным является то обстоятельство, что вследствие разнообразия факторов, действующих на экосистемы и внутри них, современная экология перестала быть сугубо биологической дисциплиной. В круг её задач вошло исследование потоков вещества, энергии и информации, не только природных, но и порожденных технологической и экономической деятельностью человечества, а одной из важнейших целей экологии стало определение условий экологической безопасности. Соответственно экология использует сведения и методы не только биологических наук, но и физики, химии, геологии, геофизики, метеорологии и климатологии с широким привлечением математического аппарата, зачастую весьма изощрённого.

## 1.2. Экологическая ниша

*Популяция*, то есть группа особей одного биологического вида, занимает в биогеоценозе свою *экологическую нишу*, которая определяет все условия бытия вида в экосистеме:

- пространственное местоположение;
- *трофический* (пищевой) *статус*, то есть что или кого он ест, и кто его ест или паразитирует на нём;
- наличие *симбионтов*, то есть «дружественных» видов, сосуществование с которыми помогает добывать пищу или защищаться от врагов;
- конкурентные отношения с другими видами из-за пищи или мест обитания;
- положение относительно других условий существования (водные ресурсы, охотничьи «уголья» и т. д.).

На рис. 1.2 условно показаны экологические ниши трёх видов травоядных животных — антилоп, зебр и слонов, — соседствующих на одних территориях. Их популяции входят в одни и те же биогеоценозы. При этом экологические ниши антилопы и зебры частично пересекаются между собой, но не совпадают с нишей слона. Антилопы и зебры часто пасутся и мигрируют вместе, едиными стадами, и имеют общих «врагов», от которых спасаются бегством. Но они питаются, как правило, различными видами трав, и пищевой конкуренции между ними почти нет. Слоны также *фитотрофы* (растительоядные), но поедают иные ярусы и типы растительности, у них нет естественных врагов, которые могли бы с ними справиться, поэтому при опасности

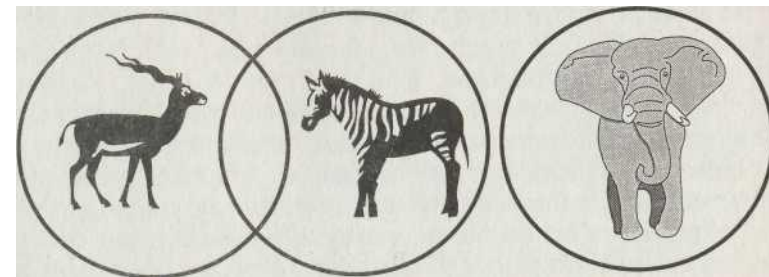


Рис. 1.2. Экологические ниши антилоп, зебр и слонов

они защищаются, яростно атакуют опрометчивого хищника. Отличия в образе жизни ведут к отличиям и в организации стада. Если стада антилоп и зебр возглавляются наиболее сильными самцами в репродуктивном возрасте, тщательно оберегающими свои «гаремы» от посторонних посягательств, то стадо слонов возглавляет *матриарх* — старшая самка, которая сама обычно уже не рождает, но тщательно опекает своих детей и внуков.

В равновесной экосистеме экологические ниши различных видов могут частично пересекаться, но никогда полностью не совпадают. Дело в том, что при полном или почти полном совпадении экологических ниш (или, иначе говоря, если два вида пытаются занять одну экологическую нишу) между ними возникает сильнейшая *конкуренция*, почти всегда ведущая к *элиминации*, то есть вымиранию, менее приспособленного вида. В пределах биогеоценоза можно говорить о *потенциальной* (или *фундаментальной*) и *реальной* (реализованной) экологических нишах. Первая — это ниша, которую вид может занять в экосистеме при отсутствии какой-либо конкуренции. Вторая — это те ресурсы, доступ к которым он реально имеет в условиях конкуренции с другими видами. Максимальный размер популяции, который может неопределённо долго существовать в экосистеме, иногда называют *ёмкостью экосистемы для данного вида*. Полностью захватить свою потенциальную нишу в некоторых экосистемах иногда удаётся *доминантам* — видам, преобладающим в данном сообществе. Часто при этом доминант оказывает решающее влияние на всю структуру системы, не только на биоту, но и на биотоп, например, в дубравах — дуб или в северных борах — сосна. Встречаются и ситуации, когда недоминирующие виды полностью занимают свою потенциальную экологическую нишу. Это, например, такие крупные животные, как медведи, слоны или носороги.

На каждую популяцию в биогеоценозе влияет огромное число факторов. Прежде всего, это *абиотические*, то есть не зависящие от живых организмов, факторы: температура, количество осадков и их распределение по сезонам (на суше), уровень *инсоляции*, то есть количество солнечного света, солёность воды в водоёмах и содержание в ней растворённого кислорода, питательные вещества — связанный азот, соединения углерода, фосфора и серы, соли некоторых металлов. К *биотическим* факторам относятся пищевые ресурсы, взаимоотношения с другими видами и, наконец, размеры самой популяции.

Характеристикой процветания популяции может служить её численность, а также скорость её роста или биологическая продуктивность (*биопродуктивность*).

Рассмотрим ситуацию, когда популяция имеет неограниченный доступ к пище, находится в наилучших для неё физических условиях и к тому же не испытывает сильного давления хищников или болезней. Понятно, что такая популяция будет размножаться с максимально возможной для неё скоростью. Её биопродуктивность будет ограничена только физиологическими особенностями составляющих её организмов.

Обозначим численность некоторого поколения  $X_n$ , где индекс  $n$  есть просто порядковый номер поколения. Тогда следующее,  $(n + 1)$ -е поколение будет иметь численность

$$X_{n+1} = KX_n, \quad (1.1)$$

где  $K$  есть коэффициент размножения или, что то же самое, биопродуктивности. Если рождаемость превышает смертность, то  $K > 1$ , и популяция растёт. Численность  $(n + m)$ -го поколения составит

$$X_{n+m} = K^m X_n, \quad (1.2)$$

и в этой формуле легко узнать геометрическую прогрессию.

Таким образом, *при благоприятных условиях и неограниченных ресурсах популяция будет расти по возрастающей геометрической прогрессии*. Первым, кто ясно указал на этот закон, был Томас Мальтус (*Malthus*, 1766—1834) в книге «Опыт о принципах народонаселения».

Однако такой неограниченный рост должен привести к истощению ресурсов. Применительно к человеческой популяции Мальтус предположил, что производство продуктов питания  $F$  может расти только в арифметической прогрессии

$$F_{n+m} = F_n + m\beta,$$

где  $\beta$  есть прирост производства за одно поколение.

Так как возрастающая геометрическая прогрессия рано или поздно обгоняет любую арифметическую прогрессию, то и продовольственные потребности народонаселения неизбежно должны обогнать возможности производства продуктов питания (рис. 1.3). А тогда человечество столкнётся с проблемой голода, и это приведёт к катастрофе. Именно этим Мальтус

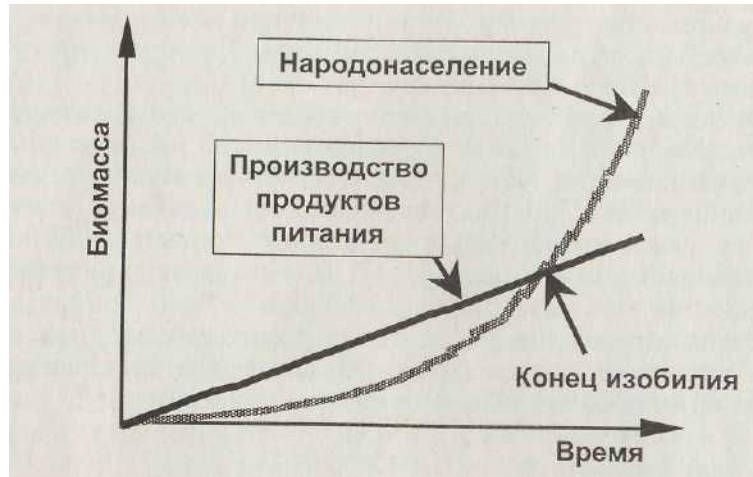


Рис. 1.3. Теория Мальтуса. Рост народонаселения идёт в геометрической прогрессии, а производство пищи — в арифметической. Поэтому рано или поздно человечество неизбежно ожидает голод. Мальтус был прав, когда предположил, что при неограниченных ресурсах популяция растёт в геометрической прогрессии

обосновывал необходимость регулирования численности населения. В этой части идеи Мальтуса подвергались острой и во многом справедливой критике, хотя опыт многих развивающихся стран подтвердил обоснованность его предупреждений, и в наше время проблема ограничения рождаемости в этих странах стала очень острой.

Мальтус был прав, когда предположил, что популяция должна расти в геометрической прогрессии до тех пор, пока потребляемые популяцией ресурсы не будут исчерпаны. Это безусловно справедливо не только для человеческой популяции, но и для любых живых организмов. Однако воспроизводство ресурсов и в экономике, и в природе происходит отнюдь не по арифметической прогрессии, а по гораздо более сложным законам. Кроме того, на рост популяций влияет множество факторов, а не только пищевые ресурсы.

Для каждого фактора, воздействующего на популяцию, можно выделить некоторый диапазон или область значений, в пределах которого популяция данного вида может существовать. Внутри этого диапазона в уравнениях (1.1) и (1.2)  $K > 1$ . Если популяция находится в равновесии со средой обитания, то  $K = 1$ . При  $K < 1$  популяция вымирает. Например, обычная комнатная фиалка по-

гибает в условиях как недостатка воды, так и при избыточном поливе. Причем дефицит влаги она переносит легче, чем избыток. Жители пустынь и сухих степей — кактусы вообще не требуют полива, им хватает влаги, поступающей из воздуха. Обитатели прудов и озёр — кувшинки и лилии — могут жить только в воде. По одним факторам популяция находится в зоне оптимума или нормы, по другим — может быть угнетена. Представление об *интервале или диапазоне толерантности* (буквально — терпимости) ввел в 1913 г. В. Шелфорд. Установленный им закон гласит, что для каждого организма можно указать минимум и максимум экологического фактора, диапазон между которыми есть диапазон толерантности организма к данному фактору. Внутри диапазона толерантности биопродуктивность популяции неотрицательна.

Можно построить графики, отражающие зависимости численности и скорости роста популяции или её биопродуктивности от интенсивности влияющего фактора. Они обычно имеют вид, показанный на рис. 1.4. На этих кривых можно выделить сравнительно узкие области максимальных численности и скорости роста — оптимум интенсивности фактора для популяции. Несколько шире область нормального существования. При малых, но положительных значениях биопродуктивности имеются две области угнетения, где интенсивность фактора либо слишком мала, либо слишком велика. *В любом случае экологическая ниша популяции должна находиться внутри всех интервалов толерантности.* Отрицательные значения биопродуктивности означают попросту вымирание популяции, которое будет идти тем быстрее, чем дальше интенсивность фактора выйдет за пределы диапазона толерантности.

Рассмотрим, что будет происходить с популяцией растений на некотором участке земли. На рис. 1.5 показаны интервалы толерантности по основным питательным веществам. Предположим, что сначала популяция находилась в положении А. В этом случае она будет расти по возрастающей геометрической прогрессии. По мере роста урожайности растения забирают из почвы всё больше питательных веществ. В конце концов по какому-либо из них будет достигнут нижний предел диапазона толерантности. В приведенном примере состав почвы постепенно сдвигается из положения А в точку Б, когда исчерпаны ресурсы химически связанного азота в форме, доступной растениям. Дальнейший рост урожайности стал невозможен. Внесение в почву, например, минеральных или фосфорных удобрений будет бессмысленно (а может



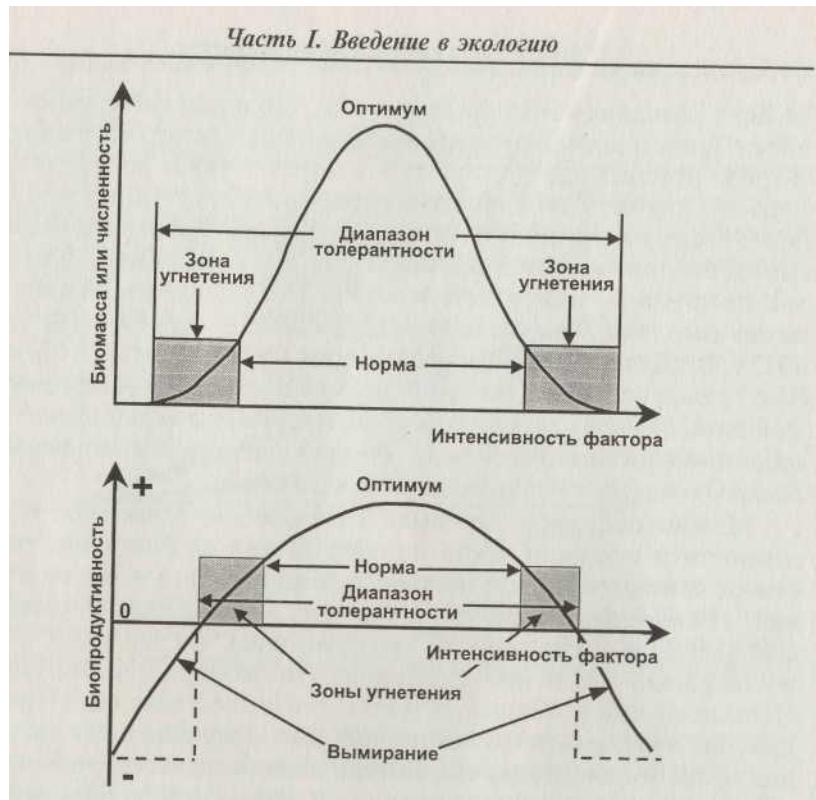


Рис. 1.4. Типичные зависимости численности (вверху) и биологической продуктивности популяции (внизу) от фактора среды обитания. Таким фактором может быть температура, наличие пищи или кислотность среды (см. гл. 4, п. 4.3)



Рис. 1.5. Рост популяции растений приводит к обеднению почвы. В результате из исходной позиции А популяция попадает в позицию Б, когда один из ресурсов (здесь — это связанный азот) оказывается исчерпан и становится лимитирующим фактором, препятствующим дальнейшему росту популяции. При этом другие ресурсы — в данном примере фосфор и минеральные вещества — далеки от исчерпания

быть и вредно), так как по ресурсам этих веществ популяция находится в зоне оптимума. Для увеличения урожайности требуется внесение именно азотных удобрений. Отсюда видно, что *равновесная популяция, сохраняющая свою численность или биомассу постоянными, всегда находится на краю диапазона толерантности по одному из факторов, на неё влияющих.*

Для каждой популяции можно найти тот единственный фактор, который в данной ситуации мешает росту её биопродуктивности. Впервые эту идею выдвинул основатель агрохимии Юстус Либих (*Liebig*, 1803—1873). Он изучал пути повышения урожайности сельскохозяйственных культур и обнаружил, что росту урожайности препятствует не просто нехватка питательных веществ в почве, но всегда можно указать тот один конкретный элемент, дефицит которого сдерживает рост урожая. Этот закон был сформулирован Либихом в 1840 г. как принцип минимума: «Вещество, находящееся в минимуме, управляет урожаем, и оно определяет величину и устойчивость его во времени». Переформулируя этот тезис в современных терминах, можно сказать, что *биопродуктивность популяции определяется единственным лимитирующим (ограничивающим) фактором, интенсивность которого близка к минимуму, необходимому организму.*

Блестящий пример действия закона Либиха приводит в своих «Записках сельского ветеринара» Джеймс Харриет. На одной скотоводческой ферме разразилась эпидемия непонятной и смертельной болезни телят. Никаких следов инфекции не было, телята содержались в прекрасных условиях и паслись на изобильных лугах. После мучительных размышлений ветеринар понял, что в почве этих лугов практически отсутствовал необходимый телятам микроэлемент — медь. После внесения в корм содержащих медь добавок все уцелевшие телята выздоровели в течение суток. В данном случае медь оказалась лимитирующим фактором, и телята оказались по этому фактору в зоне гибели.

Реальный организм или популяция подвергаются воздействию многих факторов, и поэтому рассмотренные «одномерные» законы существования видов в их экологических нишах нуждаются в дополнениях для «многомерного» случая:

- организмы могут иметь широкий диапазон толерантности по одному фактору и узкий — по другому;
- виды с широким диапазоном толерантности ко всем факторам наиболее широко распространены и легко осваива-

- ют новые места обитания (классические примеры таких видов — воробьи, крысы, вороны);
- диапазоны толерантности по отдельным факторам могут зависеть друг от друга (например, при дефиците в почвах связанного азота злакам и другим травам требуется больше воды);
  - в период размножения диапазоны толерантности у большинства видов сужаются, а диапазоны толерантности у детенышей, семян, яиц, эмбрионов, проростков и личинок уже, чем у взрослых организмов.

Узкий диапазон толерантности по какому-либо фактору обычно является признаком высокой специализации вида. Одним из таких факторов у *фитофагов* (растительноядных) является степень всеядности вида, которую можно определить по количеству потребляемых видов растений. Например, симпатичный сумчатый медведь коала питается почти исключительно листьями эвкалипта и соответственно живет только в эвкалиптовых лесах Австралии. Большая панда питается только побегами бамбука и потому получила прозвище «бамбуковый медведь». (Заметим, что, с точки зрения зоолога-систематика, и коала, и панда медведями не являются.) Противоположный случай — настоящие медведи, которые благодаря своей всеядности могут процветать в самых разнообразных условиях, если их не трогает единственный опасный для них хищник — человек. Точно так же большинство копытных животных могут процветать, питаясь самыми различными видами растений. Понятно, что специализированные виды имеют преимущество в стабильных экосистемах, к условиям которых они приспособлены лучше, чем виды-конкуренты с их широкими диапазонами толерантности. Однако такая специализация оказывается губительной, когда условия в экосистеме меняются.

### 1.3. Популяция в равновесии

Тот факт, что популяция в состоянии равновесия всегда находится на краю диапазона толерантности по лимитирующему фактору, заставляет задуматься об условиях, при которых равновесие популяции сохранится или она погибнет. Ведь получается, что природные популяции, находящиеся в равновесии со средой

обитания, всегда балансируют на грани вымирания! Физические условия, такие как температура, количество осадков или солёность природных вод, обычно практически не зависят от жизнедеятельности организмов и действуют как жесткие лимитирующие факторы. Поэтому, если один из таких факторов является лимитирующим, то популяция будет угнетена и действительно на грани вымирания. Следовательно, лимитирующий фактор у благополучной, вполне процветающей популяции должен зависеть от неё самой. Такими факторами могут быть потребляемые популяцией пищевые ресурсы, численность хищников или паразитов, внутривидовая конкуренция.

Рассмотрим в качестве примера случай, когда численность или биомасса ограничены каким-либо возобновляемым пищевым ресурсом. Равновесие возможно, когда скорость возобновления лимитирующего ресурса точно равна скорости его потребления, но каким образом и при каких условиях такой баланс поддерживается? Ответ на этот вопрос требует специального небольшого исследования, для которого рассмотрим простую математическую модель.

Обозначим время буквой  $t$ , численность популяции — через  $X$ , значение  $X$  в равновесии — через  $X_p$ . Положим, что интервал времени, за который происходит смена поколений в популяции, равен  $\Delta t = 1$ , и в момент времени  $t = n$  численность популяции была равна  $X_n$ . Согласно уравнению (1.1), в следующем поколении эта численность составит

$$X_{n+1} = KX_n.$$

При этом биопродуктивность популяции есть

$$X_{n+1} - X_n = \Delta X / \Delta t. \quad (1.3)$$

В равновесной популяции должно быть  $K = 1$ .

Представим теперь численность популяции в виде

$$X = X_p + x, \quad (1.4)$$

где  $x \ll X_p$  — малое по сравнению с  $X_p$  отклонение от равновесной численности. Предположим, что  $K$  линейно зависит от численности популяции. Эта зависимость выражается формулой

$$K = 1 + \alpha x, \quad (1.5)$$

где  $\alpha$  — некоторый коэффициент пропорциональности, значение которого зависит от вида лимитирующего фактора. Если

этот фактор — необходимый компонент питания (в примере на рис. 1.5 — это связанный химически почвенный азот), то при положительных значениях  $x$  его ресурс уменьшается, и, следовательно,  $K$  становится меньше единицы, а в формуле (1.3)  $\alpha < 0$ . Возможен и другой случай, когда  $\alpha > 0$ . Например, если фактором, препятствующим размножению, является слишком низкая плотность популяции (самцы и самки не могут отыскать друг друга). Такая ситуация угрожает, в частности, популяции уссурийских тигров.

Уравнение (1.1) с учётом формул (1.4) и (1.5) можно записать так

$$X_p + x_{n+1} = (1 + \alpha x_n)(X_p + x_n) = X_p + x_n + \alpha x_n X_p + \alpha x_n^2. \quad (1.6)$$

Приведём подобные члены и заметим, что, так как  $x \ll X_p$ , то и  $\alpha x_n^2 \ll \alpha x_n X_p$ , следовательно, слагаемым  $\alpha x_n^2$  в правой части (1.6) можно пренебречь. Получим

$$x_{n+1} \approx x_n(1 + \alpha X_p). \quad (1.7)$$

Это уравнение очень похоже на формулу (1.1), но не всегда соответствует геометрической прогрессии. Так как  $X_p > 0$ , то всё зависит от величин  $\alpha$  и  $(1 + \alpha X_p)$ . Рассмотрим возможные ситуации (рис. 1.6).

1. Случай  $\alpha > 0$ . Величина  $(1 + \alpha X_p) > 1$ , и последовательность  $x_n, x_{n+1}, x_{n+2}, x_{n+3}, \dots$  оказывается возрастающей геометрической прогрессией. Это значит, что равновесная численность популяции не может сохраниться. Любое отклонение от равновесия приводит в следующем поколении к ещё большему отклонению в том же направлении (рис. 1.6, а). Поэтому популяция либо погибнет, либо в конце концов данный фактор перестанет быть лимитирующим. Следовательно, подобная ситуация не может существовать в природе сколь-нибудь длительное время.

2. Случай  $\alpha < 0$ . Судьба популяции теперь будет зависеть от величины  $(1 + \alpha X_p)$ .

Пусть  $1 > 1 + \alpha X_p \geq -1$  (то есть  $-2 \leq \alpha X_p < 0$ ). При  $(1 + \alpha X_p) \geq 0$  последовательность  $x_n, x_{n+1}, x_{n+2}, x_{n+3}, \dots$  есть убывающая геометрическая прогрессия, и отклонение численности популяции от равновесной стремится к нулю (рис. 1.6, б). Популяция может находиться в равновесии с данным фактором (или ресурсом) неограниченно долго. Если  $(1 + \alpha X_p) < 0$ , то последователь-

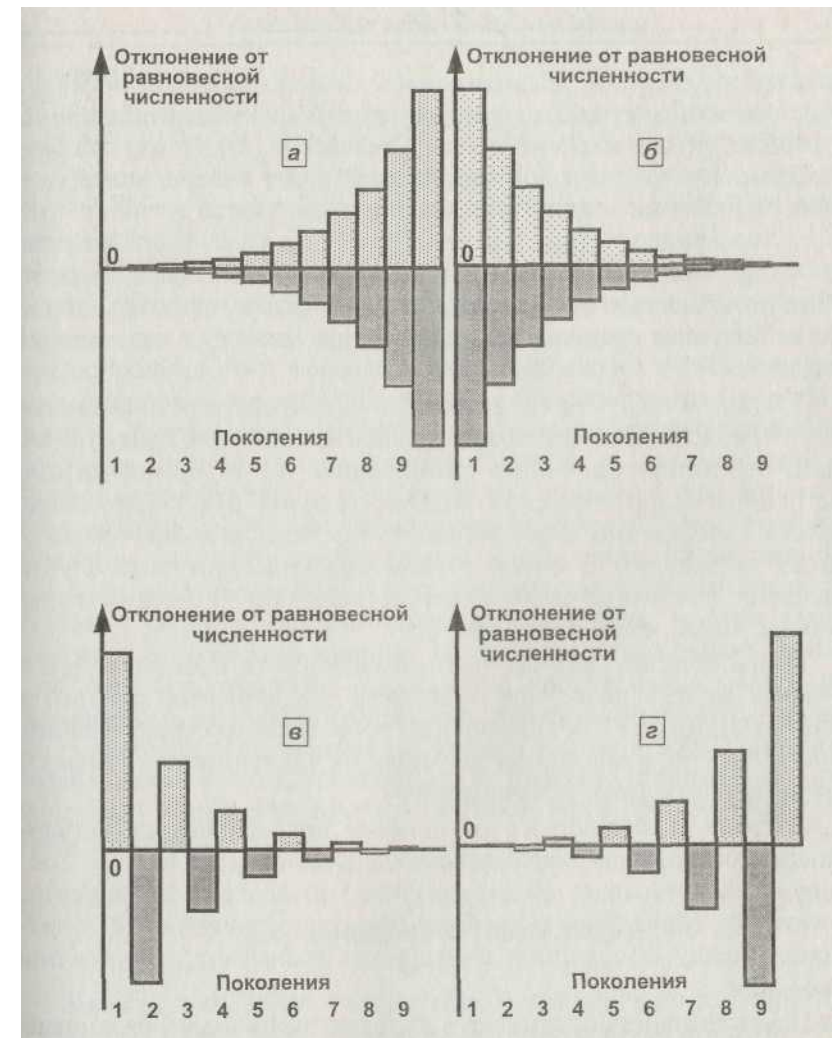


Рис. 1.6. Взаимодействие популяции с лимитирующим фактором или ресурсом. По горизонтали отложены порядковые номера поколений. Равновесная численность популяции соответствует нулевому значению отклонения от равновесия. Варианты развития: а — равновесие неустойчиво, при малейшем исходном отклонении от равновесия популяция либо растёт, либо вымирает; б — равновесие устойчиво, при любом знаке исходного отклонения численность плавно возвращается к равновесному значению; в — равновесие устойчиво, при любом знаке исходного отклонения численность возвращается к равновесному значению, совершая вокруг него затухающие колебания; г — равновесие неустойчиво, численность популяции совершает расходящиеся от равновесия колебания

ность  $x_n, x_{n+1}, x_{n+2}, x_{n+3}, \dots$  не является геометрической прогрессией, но, как и в предыдущем случае, численность популяции будет стремиться к равновесному значению  $X_p$ . После любого отклонения от равновесия численность будет совершать затухающие колебания около равновесного значения, постепенно к нему возвращаясь (рис. 1.6, в). При  $(1 + \alpha X_p) \equiv -1$  эти колебания будут незатухающими с постоянной амплитудой, равной начальному малому отклонению. В устойчивых природных биогеоценозах, как правило, реализуется именно одна из этих ситуаций.

Пусть  $(1 + \alpha X_p) < -1$  (то есть  $\alpha X_p < -2$ ). Численность будет совершать колебания с всё возрастающей амплитудой (рис. 1.6, г). Когда эта амплитуда станет сравнимой с  $X_p$ , то принятые при построении математической модели условия будут нарушены. Однако качественно неустойчивость численности она предсказывает правильно. В очень грубом приближении этот случай объясняет внезапные периодические всплески численности некоторых видов, например саранчи.

Таким образом, как это часто бывает, даже простая математическая модель позволила объяснить ряд сложных явлений и понять механизмы как длительного равновесного существования популяций, так и внезапных всплесков их численности с последующим почти полным исчезновением.

Состояние устойчивого равновесия поддерживается регулирующим механизмом *отрицательной обратной связи* ( $\alpha < 0$ ). Рост популяции уменьшает объём ресурса, что ведёт к сокращению популяции, вследствие чего объём ресурса увеличивается, и наоборот. Между популяцией и ресурсом возникает *динамическое равновесие*.

Неустойчивость возникает в двух принципиально различных случаях.

Во-первых, когда между действующим фактором и популяцией имеется *положительная обратная связь* ( $\alpha > 0$ ), то есть рост популяции ведёт к накоплению лимитирующего ресурса, а её убыль к снижению его объёма. Примерами могут служить процессы заболачивания и опустынивания. При заболачивании растительность способствует накоплению влаги в почве, что в свою очередь ведёт к росту растительной биомассы. При опустынивании снижение плотности растительного покрова ведёт к высыханию почвы, что ускоряет гибель растительности.

Во-вторых, неустойчивость возникает, когда отрицательная обратная связь между популяцией и ресурсом оказывается слишком сильной или глубокой. Чрезмерная реакция популяции на изменения объёма ресурса приводит к возрастающим колебаниям, всё более отдаляющим численность популяции от равновесного значения.

В процессе естественного отбора биологические виды выработали различные стратегии поддержания своих популяций в равновесии. Сильные организмы, обладающие высокой конкурентоспособностью, обитают в условиях своего оптимума, и их потенциальная и реальная ниши совпадают. Это «стратегия львов». Другие виды имеют меньшую конкурентоспособность, но также предпочитают условия, близкие к оптимальным по большинству факторов, и захватывают экологические ниши такого размера, какой им позволяют конкуренты. Это «стратегия шакалов». Наконец, третья группа видов предпочитает приспособиться к существованию при ограниченном потреблении ресурсов и (или) в малоблагоприятных условиях, но тем самым избежать острой конкуренции («стратегия верблюдов»). В чистом виде эти стратегии реализуются сравнительно редко, и в зависимости от условий один вид может использовать различные стратегии. Так, например, «лев» — сосна в бору становится «верблюдом» в зоне лесотундры. В пределах стабильных (*климаксовых*) сообществ обычно обитают виды, реализующие все типы адаптации.

## 1.4. Динамика популяций

Каждая популяция в экосистеме будет расти до тех пор, пока по одному из воздействующих на неё факторов не достигнет границы диапазона толерантности. Этот фактор и будет для неё лимитирующим. В этот момент популяция полностью займёт свою экологическую нишу в экосистеме, а её численность будет равна ёмкости экосистемы для данного вида. Если популяция находится далеко от границ толерантности, то она будет расти по геометрической прогрессии (1.1). Способность живого к быстрому росту очень велика. Например, потомство одной бактерии могло бы покрыть земной шар примерно за месяц, если бы не границы толерантности. Однако по мере приближения к этим границам, то есть заполнения экологической ниши, коэффициент размно-

жения популяции и скорость её роста будут меняться. Отдельным особям становится труднее добывать пищу (внутривидовая конкуренция), усилится давление хищников и паразитов, больше вероятность распространения болезней.

Популяции обычно реагируют на изменения условий обитания изменением уровней рождаемости и (или) смертности, то есть коэффициента  $K$  в уравнении (1.1). Многие виды избегают неблагоприятных последствий изменения среды, меняя своё местообитание. Если это нормальная сезонная миграция, то это нельзя считать изменением в биоте или численности популяции в биогеоценозе. Сезонные миграции свойственны не только перелётным птицам, но и многим млекопитающим на суше и в океане. Мигрируют в поисках пищи северные олени (карибу), травоядные в африканской саванне, киты и другие морские животные. Вслед за травоядными часто следуют охотящиеся на них хищники.

Рассмотрим ситуацию, когда популяция только заселяет или захватывает экологическую нишу и сначала имеет малую численность. Перепишем уравнение (1.1) в виде

$$X_{n+1} - X_n = KX_n - X_n = \Delta X / \Delta t = X(K - 1) \quad (1.8)$$

и предположим, что коэффициент размножения  $K$  пропорционален отклонению численности от равновесного значения  $X_p$  не только при малых отклонениях  $x = X - X_p$  (как в уравнении (1.5)), но и при больших значениях  $x$ . Тогда (для упрощения записи знак у  $\alpha$  изменён)

$$K = 1 + \alpha(X_p - X).$$

Подставляя это выражение в (1.8), получим в качестве модели развития популяции так называемое *логистическое уравнение*

$$\Delta X / \Delta t = X(K - 1) = \alpha(X_p - X)X. \quad (1.9)$$

Точное решение этого уравнения имеет вид:

$$t = (\ln |X / (X_p - X)|) / \alpha X_p + t_0. \quad (1.10)$$

В этой формуле  $\ln$  есть знак натурального логарифма. Формула показывает, в какой момент времени / численность достигнет значения  $X$ . При сделанных предположениях  $X$  никогда не достигает равновесного значения, но к нему асимптотически стремится (рис. 1.7, а). Исходная численность  $X_0$  не может быть

равна нулю, так как  $\ln 0 = -\infty$ , а в момент времени  $t = t_0$  численность в точности равна  $X_p/2$ . Таким образом, уравнение (1.9) описывает плавный переход популяции от одной равновесной численности к другой при изменении внешних условий.

В отличие от уравнения (1.7) в (1.9) учтено влияние и первой, и второй степени отклонения от равновесия, но при этом потеряна возможность детально рассмотреть поведение популяции вблизи равновесия. Эту трудность можно обойти, решая задачу приближенно, «по кускам», и сшивая эти решения посредине между исходной и равновесной численностями. Вблизи исходной точки можно считать, что численность будет меняться по геометрической прогрессии, так как лимитирующий фактор действует ещё слабо. Вблизи положения равновесия, когда лимитирующий фактор начинает действовать, можно использовать готовые решения уравнения (1.7). На рис. 1.7, а показаны и точное решение, и приближенное (*аппроксимация*) для случая плавного (или *монотонного*) изменения численности. Видно, что такой подход даёт очень неплохой результат, близкий к точному решению. Численность может не только плавно асимптотически подходить к равновесному значению, но и «проскочить» его и потом постепенно к нему вернуться (рис. 1.7, б). Такие ситуации наблюдаются при восстановлении популяций после катастроф (эпидемии, извержения вулканов) или при вторжении новых видов в биогеоценозы.

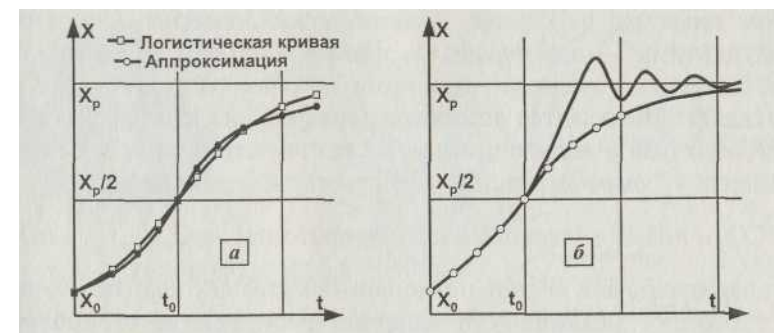


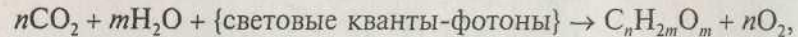
Рис. 1.7. Различные сценарии роста численности популяции  $X$  при заполнении экологической ниши.  $X_0$  — начальная численность,  $X_p$  — равновесная численность. В момент времени  $t_0$  популяция достигает половины равновесной численности. Слева показаны точное решение логистического уравнения и его аппроксимация, справа — два возможных сценария выхода популяции на равновесную численность

Процессы заполнения экологических ниш и противоположные им процессы вымирания популяций — сравнительно быстрые процессы. Но именно они в наибольшей степени ответственны за естественный отбор в популяциях, ведущий к образованию новых биологических видов.

### 1.5. Биогеоценоз в равновесии

Равновесное состояние экосистемы подразумевает отсутствие в ней перемен, радикально меняющих видовой состав биоты или условия существования отдельных видов. Однако реальные условия существования биогеоценозов постоянно претерпевают изменения. Следовательно, стоит определить тот наименьший интервал времени, в течение которого эти условия не должны меняться, чтобы в принципе можно было говорить о равновесном или стационарном состоянии экосистемы. Очевидно, что это время, за которое популяция, имеющая наибольшую среднюю продолжительность жизни, сохраняет свою численность. Например, для лесных экосистем — это время жизни господствующих (*доминирующих*) видов деревьев (сотни лет для широколиственных лесов).

Популяции в биогеоценозе образуют устойчивые пищевые или *трофические цепи и сети* (рис. 1.8). Первичным звеном в них обычно служат организмы — *продуценты, синтезирующие органическое вещество из косных, неорганических веществ*. Основными продуцентами — *автотрофами*, использующими для этого синтеза солнечную энергию, являются зелёные растения. Они осуществляют фотосинтез углеводов (сахаров) из атмосферного углекислого газа и воды с помощью светочувствительного зелёного пигмента — *хлорофилла* согласно суммарной реакции



которая протекает за счёт поглощения световых квантов по весьма сложному механизму и является реакцией восстановления. Солнечная энергия оказывается запасённой в виде химической энергии углеводов. Одновременно растения пополняют запас атмосферного и растворённого в воде кислорода, который используется для дыхания как животными, так и самими растениями в тёмное время суток. Этот кислород растения отнимают у воды.

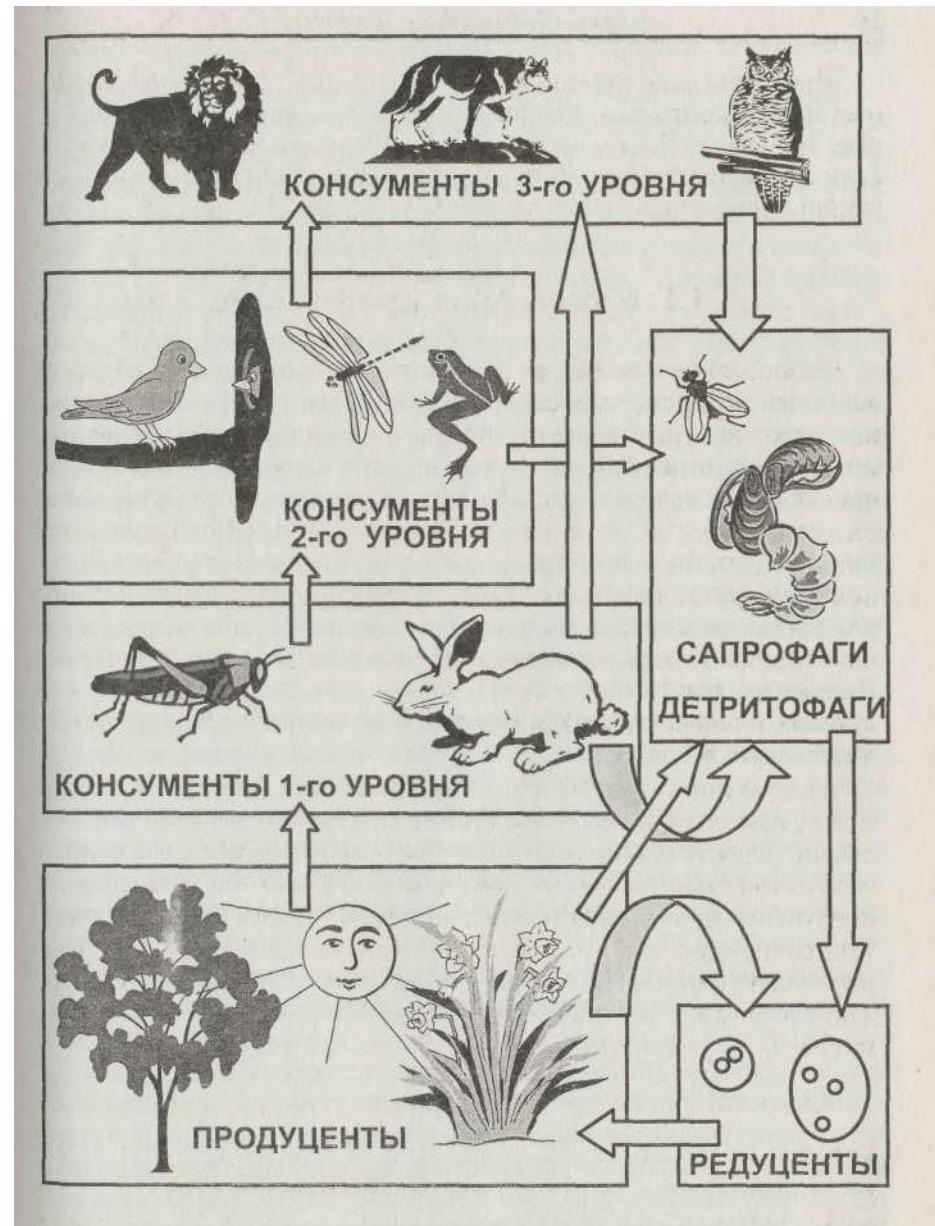


Рис. 1.8. Схема трофических сетей

При участии специфических катализаторов — ферментов растения синтезируют и другие органические вещества. Прежде всего, это белки — основной строительный материал живых организмов. Для построения белковых молекул растения нуждаются в химически связанном азоте (атмосферный, свободный азот не годится — его растения «не умеют» усваивать) и сере, так как цепочки белковых молекул примерно на 16 % состоят из азота, а сера служит связующим элементом между этими цепочками. Поэтому очень важную роль в экосистемах играют почвенные бактерии, химически связывающие атмосферный азот и тем самым делающие его доступным для растений. Помимо белков растения образуют множество других органических веществ, включая витамины, растительные жиры и жироподобные вещества. В них могут входить железо, сера, фосфор, фтор, молибден, хром, медь, селен и другие элементы. Фосфор не входит в состав белков, но входит в состав веществ, обеспечивающих потоки энергии во всех процессах, происходящих в живых клетках. Растения вбирают из почвы и важнейшие для клеточного метаболизма (обмена веществ) ионы калия и натрия, а также кальций и магний.

Помимо автотрофов органическое вещество в природе могут синтезировать *хемотробы* — бактерии, использующие не световую, а химическую энергию и живущие за счёт окисления соединений серы (например, сероводород  $H_2S$  служит им источником и водорода и энергии), азота или даже железа. Среди бактерий — хемотрофов много *анаэробов*, которые не нуждаются в контакте с атмосферой, и даже *облигатных анаэробов*, гибнущих в кислородной атмосфере.

Следующий трофический уровень занимают растительноядные животные — *фитофаги*, или *консументы* (потребители) 1-го уровня. Поедая растения, они получают как энергию, так и материал для построения, обновления и восстановления тканей собственного организма. В энергетических целях организм животного использует прежде всего углеводы (и, если они есть, жиры). В организме в результате сложной цепи превращений происходит окисление пищи вдыхаемым кислородом по суммарной реакции, обратной реакции фотосинтеза:



Таким образом, животные фактически используют солнечную энергию, запасенную растениями. Белки обладают значи-

тельно меньшей энергетической ценностью, чем углеводы, но именно белки (после расщепления на аминокислоты) идут на построение тканей животного. Избыток углеводов и растительных жиров организм накапливает впрок в виде жировых отложений, которые могут служить не только в качестве энергетического резерва, но у отдельных видов, живущих в пустынях и сухих степях, и в качестве запаса водорода для внутреннего производства воды (знаменитые горбы у верблюдов).

Консументы второго, третьего и выше трофических уровней являются хищниками, поедающими животных нижних трофических уровней, но почти все они восполняют запасы витаминов и микроэлементов, поедая в небольшом количестве некоторые виды растений. Некоторые хищники постепенно перешли на смешанную или даже растительную диету (например, многие виды медведей).

Внутри трофического уровня «горизонтальные» отношения между видами могут быть как конкурентными, так и нейтральными, когда виды никак не влияют на существование друг друга.

Особое место в пищевых сетях занимают *детритофаги* и *саннитофаги*, питающиеся полностью или в значительной мере мертвыми органическими остатками. Крупные их виды (вороны, грифы, шакалы, раки) питаются мертвыми животными, но не брезгают и свежей пищей, но основную роль в этом звене пищевых цепей играют черви, бактерии, грибы, микроскопические клещи и т. д., разлагающие не только и не столько останки животных, сколько мертвые растения, и создающие *гумус* или перегной. Совместно с бактериями и грибами — *редуцентами*, разлагающими органические остатки до уровня неорганических веществ, они и формируют плодородные почвы, обеспечивая замыкание пищевых цепей и круговорот питательных веществ в экосистеме.

Помимо взаимоотношений по типу «хищник — жертва» (при этом фитофаги выступают как хищники по отношению к растениям), нейтрализма и конкуренции между видами возможны связи «хозяин — паразит» и *симбиоз*. Паразит отличается от хищника тем, что он не заинтересован в гибели хозяина, хотя и может её вызвать, причём часто погибает вместе с хозяином. Симбиоз — это взаимоотношения между видами, выгодные для обоих видов-партнеров или для одного из них, но безвредные для другого.

■ . Паразиты, к которым следует отнести прежде всего возбудителей различных заболеваний, подобно хищникам регулируют

плотность популяций. Особенно важна их регулирующая функция по отношению к видам, не имеющим других естественных врагов, например крупным хищникам.

Пример очень тесного симбиоза в растительном мире — лишайники, тело которых состоит из гриба и водоросли, находящиеся в теснейшем взаимодействии. Многие лесные грибы помогают питанию деревьев, по имени которых они названы — подосиновик, подберезовик, дубовик. Очень важен симбиоз между растениями и животными-опылителями, роль которых выполняют многие насекомые (пчёлы, бражники и т. д.), а также некоторые мелкие виды летучих мышей и даже птиц (колибри в тропических лесах Амазонки). Яркие цветы и нектар — это способы привлечь опылителей. Классический пример симбиоза — содружество рака-отшельника с актинией, которая не может самостоятельно передвигаться и укрепляется на его спине. Ядовитая и хищная актиния — отличный сторож и кормилец для рака, служащего для неё транспортным средством.

Структура пищевой сети показывает только связи между трофическими уровнями в экосистеме, но не величины биомассы на этих уровнях и потоков энергии и вещества. Относительные значения биомассы и потоков могут быть изображены в виде соответствующих пирамид (рис. 1.9).

Важнейшей характеристикой трофического уровня в экосистеме является его биопродуктивность. Обозначим биомассу уровня как  $M$  и время как  $t$  и для упрощения положим:

- потребляемые ресурсы не ограничены;
- прирост биомассы в единицу времени, или биопродуктивность, прямо пропорциональна самой биомассе и равна  $KM$ , где  $K$  — положительная относительная скорость роста биомассы  $M$  при отсутствии хищников (рождаемость и смертность от старости прямо пропорциональны количеству особей в популяциях, образующих  $M$ );
- хищники «выедают» биомассу  $M$  с постоянной скоростью  $v$  (причём травоядные — фитофаги играют роль хищников по отношению к растениям).

Теперь можно написать уравнение для изменения биомассы  $\Delta M$  за интервал времени  $\Delta t$ :

$$\Delta M = (KM - v) \Delta t.$$

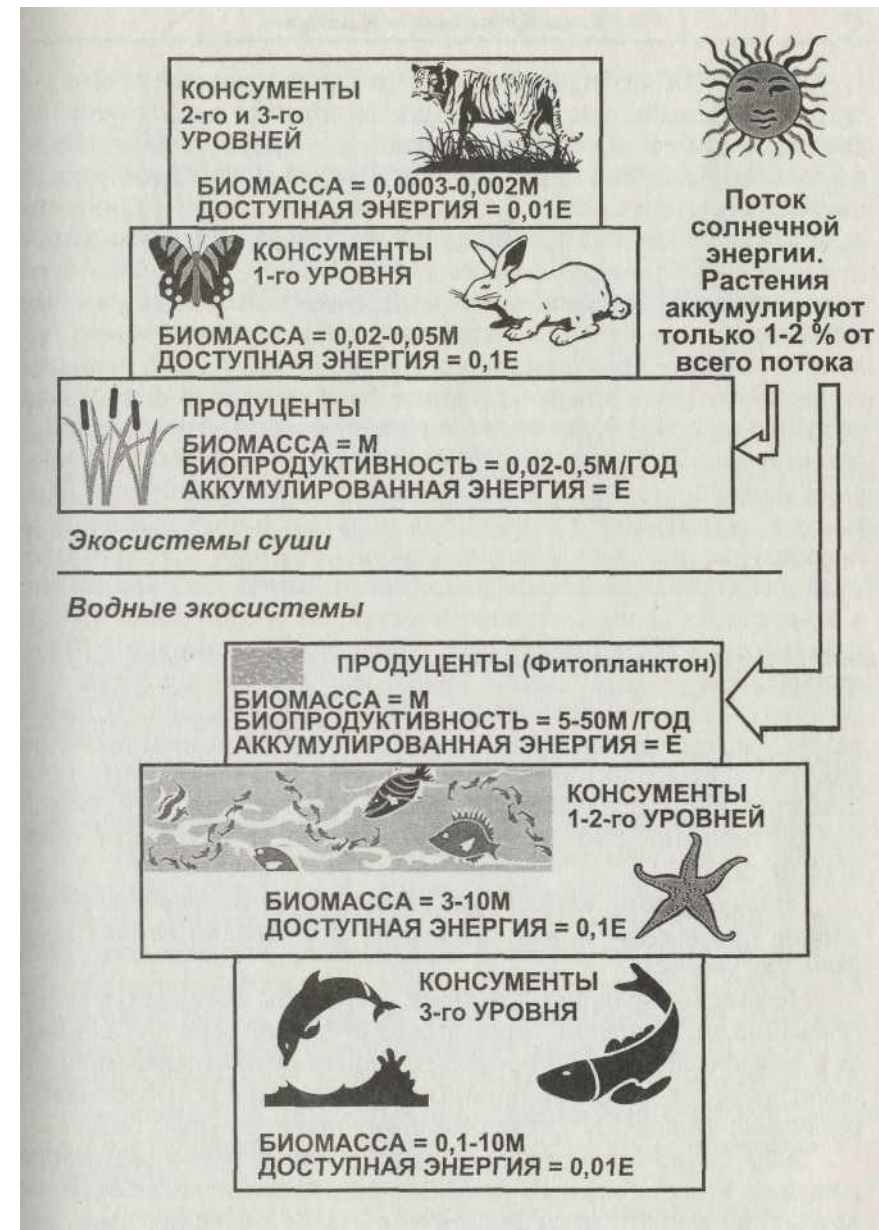


Рис. 1.9. Экологические пирамиды



Это простое уравнение отражает два очень важных обстоятельства. Во-первых, так как биомасса  $M$  остаётся постоянной только если  $AM = 0$ , в состоянии равновесия скорость «выедания» должна быть в точности равна биопродуктивности жертв, то есть  $v = KM$ . Во-вторых, если биопродуктивность жертв велика, то равновесие между хищниками и жертвами может поддерживаться при малой абсолютной биомассе жертв. Важно соотношение скоростей роста биомасс, а не самих биомасс! Поэтому в водных экосистемах, где одноклеточные водоросли (*фитопланктон*) являются главным продуцентом, пирамида биомасс часто оказывается опрокинутой или может иметь бочкообразную форму, как показано на рис. 1.9. На этом рисунке приведены относительные значения биомасс и доступной энергии для различных трофических уровней. Принято, что продуценты имеют единичную биомассу и аккумулируют единичную энергию. Биопродуктивность продуцентов на суше меньше единицы, то есть производимая ими за год биомасса меньше ранее накопленной. Соответственно в экосистемах суши на каждом следующем трофическом уровне и биомасса, и доступная энергия оказываются примерно в 10 раз меньше, чем на предыдущем. Иначе дело обстоит в водных экосистемах. Годовая биопродуктивность фитопланктона во много раз больше его собственной биомассы в данный момент времени. Поэтому фитопланктон оказывается способен прокормить консументов, биомасса которых выше его собственной, и равновесное соотношение биомасс здесь разительно отличается от такового на суше.

Таким образом, *необходимым условием равновесия биогеоценоза является равновесие между хищниками и жертвами на всех трофических уровнях.*

Механизм эволюции действует так, чтобы обеспечить существование вида в целом. В результате место, которое вид занимает в трофической сети, определяет зависимости выживаемости и смертности от возраста организма и заставляет вырабатывать различные «подходы» к собственному потомству (рис. 1.10).

Виды, становящиеся легкой добычей хищников и врагов или живущие в нестабильных условиях, практически не заботятся о потомстве, но зато производят его в огромном количестве. Это прежде всего продуценты — наземные растения и фитопланктон в океане. Среди консументов первого уровня к ним относятся насекомые, все виды зоопланктона, большинство рыб-фитофагов. Для таких видов характерна огромная смертность семян,

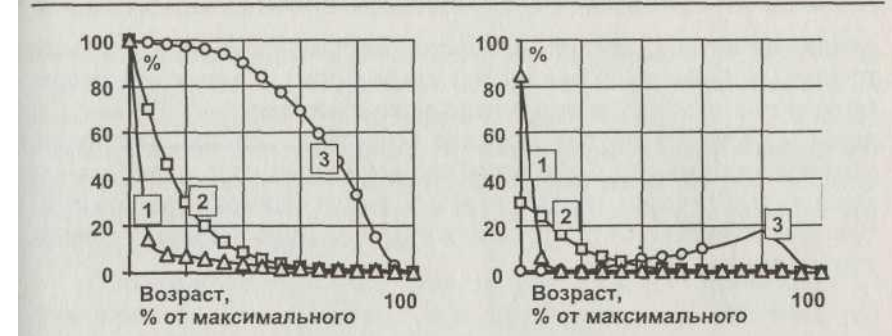


Рис. 1.10. Графики выживаемости (слева) и смертности (справа). График выживаемости показывает % особей, оставшихся в живых к данному возрасту. График смертности показывает % особей, умирающих в данном возрасте. Нетрудно заметить, что смертность есть производная от выживаемости, взятая с обратным знаком. 1 — насекомые, растения, планктон и мелкие водные виды; 2 — мелкие птицы и звери (например, воробьиные, ящерицы, грызуны и многие другие травоядные); 3 — крупные млекопитающие и птицы, занимающие доминирующее положение в экосистемах (например, слоны, носороги, крупные хищники, человек, орлы)

молодняка или личинок. Быстрая смена поколений обеспечивает возможность быстрого обновления генофонда и ускоренной адаптации популяции.

Следующую группу составляют виды, не доминирующие в экосистемах и имеющие смертность, мало зависящую от возраста. Эти виды выработали механизмы защиты потомства от врагов, такие как *мимикрия* — маскировка (например, некоторые виды насекомых, змеи, земноводные, мелкие млекопитающие), поиск и строительство нор и гнезд — убежищ (например, птицы, многие черепахи, мышевидные грызуны), отвратительный запах и ядовитые выделения кожи (многие виды жаб и лягушек, землеройка, скунс), наконец, навыки коллективной самозащиты (ласточки, чайки, вороны, многие виды обезьян). Особи этих видов погибают совершенно случайным образом и практически не доживают до старости. Они сравнительно быстро размножаются и проявляют умеренную заботу о своём потомстве и его обучении.

По своему месту в экосистемах перечисленные виды — обычно «шакалы» или «верблюды».

Доминирующие виды — «львы» размножаются медленно и долго заботятся о молодняке. В большинстве случаев они долго обучают своё сравнительно немногочисленное потомство добы-

ванию пищи и уходу от опасности. Среди этих видов крупные птицы (например, орлы, аисты, альбатросы) и млекопитающие (крупные приматы, в том числе человекообразные обезьяны и человек, киты и другие морские животные, слоны, носороги, крупные хищники). При этом сходные признаки вырабатываются у генетически весьма далёких видов. Например, доминирующие в океане акулы стали живородящими подобно млекопитающим.

## 1.6. Динамика биogeоценозов и экосистем

Равновесие биogeоценозов и экосистем — динамическое, и на всех уровнях постоянно происходят периодические колебания численности и состава популяций, обычно не выходящие из некоторых пределов. Эти колебания могут быть связаны с внешними воздействиями — сменой времён года, фазами Луны и циклами активности Солнца — и могут возникать при взаимодействиях по типу «хищник — жертва» внутри самой экосистемы.

Биота умеренных и полярных широт полностью приспособилась к сезонным колебаниям температуры и осадков. Выработанные механизмы адаптации весьма разнообразны. У многолетних растений зимой почти прекращается рост, и многие из них сбрасывают листву, так как фотосинтез при отсутствии жидкой воды и малом световом дне невозможен. Возникающий зимний дефицит пищи действует на животный мир в большей мере, нежели пониженная температура как таковая. Многие животные впадают в зимнюю спячку, большинство птиц улетают в тёплые края. Размножение практически всех видов приурочено к определенным сезонам таким образом, чтобы максимум пищевых ресурсов совпадал со временем выращивания молодняка.

Фазы Луны влияют в наибольшей степени на организмы, обитающие в *литорали*, то есть береговой зоне океана, где действуют приливы и отливы. Это связано с тем, что высота прилива зависит от взаимного расположения Земли, Луны и Солнца. Месячные циклы жизнедеятельности наземных организмов — во многом наследие тех времён, когда их далёкие предки впервые стали выходить из океана на сушу и вели земноводный образ жизни.

Отчётливо прослеживается и влияние циклов солнечной активности на биоту, хотя механизмы этого влияния неясны до сих пор. Пример такого влияния показан на рис. 1.11. Наиболее правдоподобной представляется гипотеза о геомагнитной природе подобных явлений, выдвинутая одним из пионеров исследований солнечно-земных связей Александром Леонидовичем Чижевским (1897-1964).

Однако колебания размеров популяций могут происходить и самопроизвольно в системе «хищник — жертва». Впервые теорию подобных колебаний разработали независимо друг от друга в 1925—1928 гг. А. Лотка (*Lotka*) и В. Вольтерра (*Volterra*). Смысл её сводится к тому, что при слишком сильном размножении хищников жертвы уничтожаются ими очень быстро. Запасы пищи у хищников уменьшаются, и соответственно падает численность хищников. В результате число жертв снова растёт, и следом снова растёт число хищников. Процесс периодически повторяется — в системе устанавливаются колебания (рис. 1.12). Впервые эта теория послужила объяснением колебаний улова

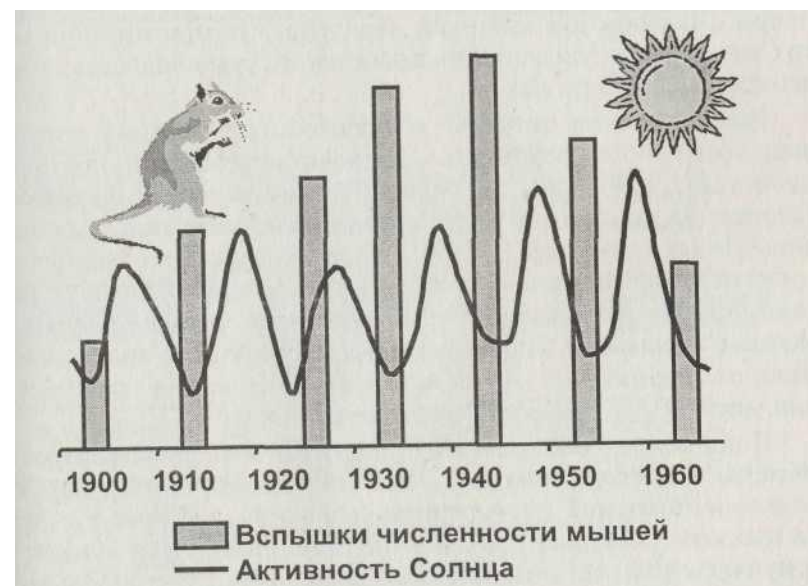


Рис. 1.11. Колебания солнечной активности, рассчитанной по числу солнечных пятен (число Вольфа), и вспышки численности мышевидных грызунов на европейской части России в первой половине XX века. Связь очевидна

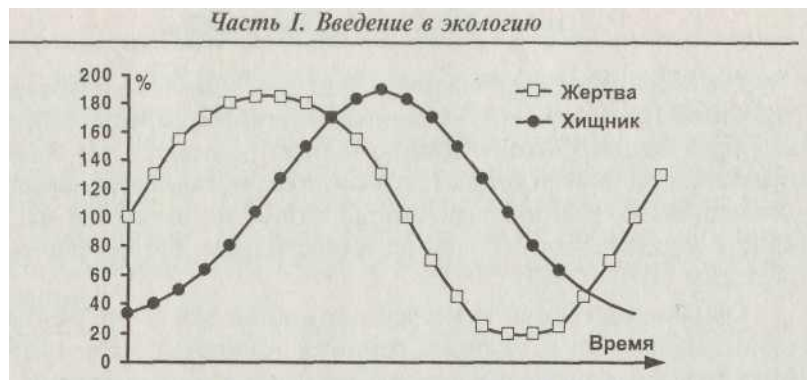


Рис. 1.12. Колебания в системе «хищник — жертва». Средние численности приняты за 100 %

различных видов рыб в Адриатическом море, и последующие наблюдения подтвердили её применимость во многих других случаях. Условиями возникновения автоколебаний оказываются, во-первых, быстрое размножение хищников при наличии пищи и, во-вторых, сравнительно «узкая специализация» и хищников, и жертв. Именно численность хищников должна быть лимитирующим фактором для жертвы и численность жертв — лимитирующим фактором для хищника. Понятно, что при наличии многих видов-жертв численность хищника не будет зависеть от численности одного из них.

Рассмотренные ситуации и процессы относятся к устойчивым состояниям экосистем. Но внутри экосистем постоянно происходят изменения — периодически меняются физические условия, на экосистему могут обрушиваться стихийные или антропогенные катастрофы, а вслед за этим нарушается равновесие, меняются численность и даже состав популяций. Следовательно, само понятие устойчивости не эквивалентно равновесию и нуждается в уточнении. Например, построив простую модель динамики популяций в п. 1.4, мы установили, что могут быть состояния устойчивого и неустойчивого равновесия.

Понятие устойчивости можно пояснить на примере простой системы, показанной на рис. 1.13. Треугольная призма находится в поле тяготения с ускорением свободного падения  $g$  и лежит на плоскости боковой гранью  $a$  (положение А). Приложим к левому ребру призмы направленную вверх силу/так, чтобы грань  $a$  оказалась наклонена под углом  $\pi/8$  ( $22,5^\circ$ ), — призма займёт положение Б. Это положение и неустойчиво, и неравновесно. Однако, если действие силы/прекратится, то призма вернётся в

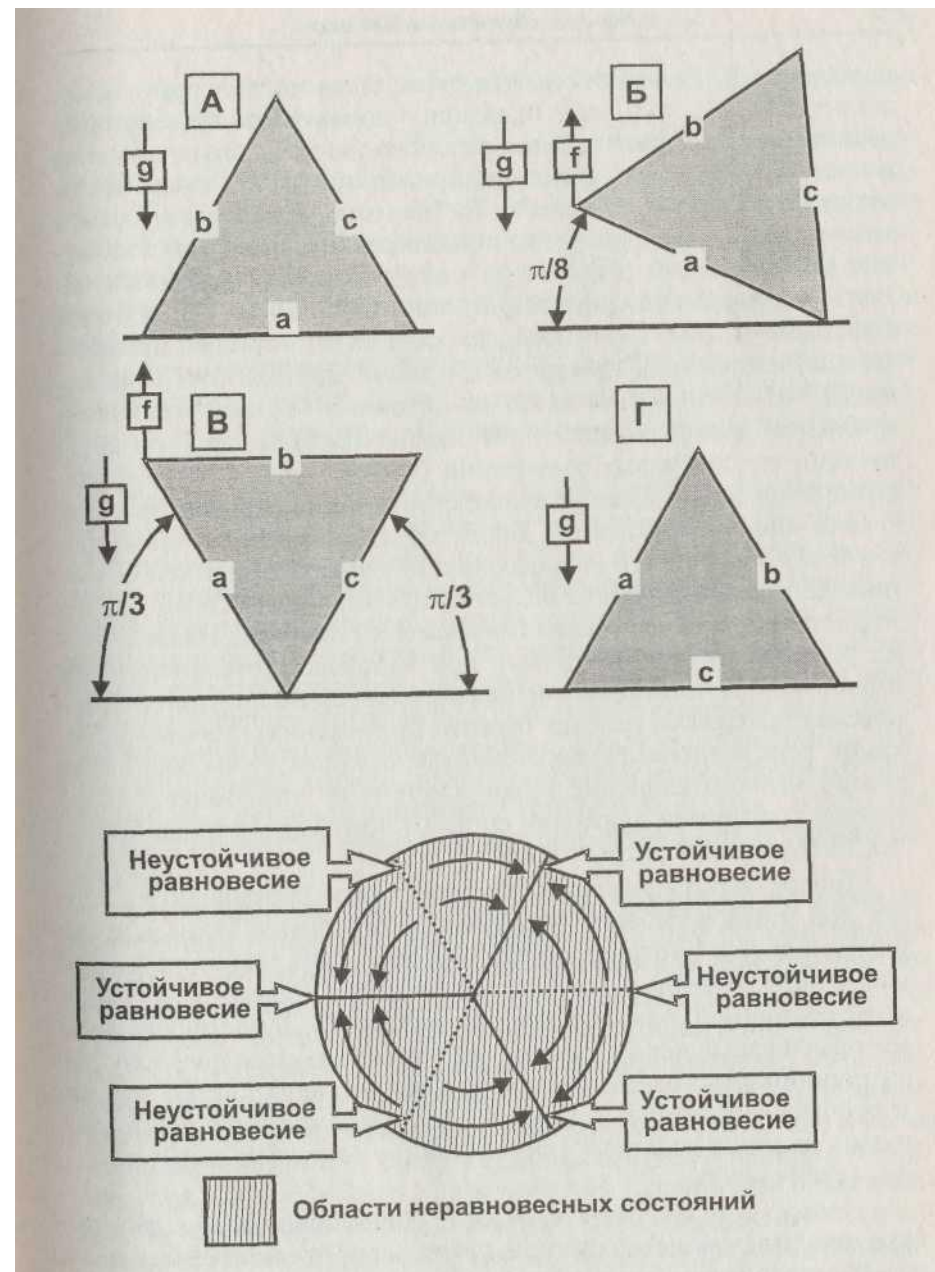


Рис. 1.13. Простой пример системы, имеющей по три состояния устойчивого и неустойчивого равновесия и шесть областей неравновесных состояний

положение А. Если же под действием силы наклон грани  $a$  составит  $1/3$  ( $60^\circ$ ), то призма окажется в положении неустойчивого равновесия В. Под действием тяжести она из этого положения может либо вернуться в положение А, либо занять новое положение устойчивого равновесия Г. Таким образом, призма может занимать три положения устойчивого равновесия и три положения неустойчивого равновесия, между которыми находятся области неравновесных состояний, как это показано на круговой диаграмме на рис. 1.13. Любая точка, соответствующая неравновесному состоянию, находится в области притяжения (*аттрактивной области*) одной из точек устойчивого равновесия (*аттрактора*). Сами области притяжения отделены друг от друга точками неустойчивых равновесий (точки *бифуркации*), направление движения из которых непредсказуемо, если оно не определено внешними силами. Таким образом, мы можем сказать, что точка устойчивого равновесия с прилегающими к ней областями её притяжения есть область устойчивости системы, а размер этой области есть *запас устойчивости системы*. Наша система устойчива в малом (то есть при небольших отклонениях от равновесия) и неустойчива в большом (когда отклонения от равновесия выходят за границу области притяжения). Точки бифуркации есть равновесия, неустойчивые в малом, — любое, сколь угодно малое отклонение уводит систему от этой точки. Иначе говоря, траектории движения системы всегда направлены от точек бифуркации к аттракторам.

Теперь легко применить эти понятия к биогеоценозам. До тех пор, пока колебания численности отдельных видов и даже видовой состав биоты меняются под действием внешних факторов в таких пределах, что система способна вернуться к исходному состоянию, она сохраняет устойчивость. В настоящее время практически нет экосистем, не испытывающих постоянного антропогенного воздействия, и положение таких систем можно уподобить ситуации Б на рис. 1.13. Способность системы вернуться после снятия нагрузки в исходное состояние и есть её запас устойчивости.

После разрушения устойчивого биогеоценоза на данном пространстве происходит последовательная преемственная смена биогеоценозов, пока наконец не возникнет такой, который способен находиться в равновесии неограниченно долго. Этот процесс может занимать длительное время, но существенно, что

он необратим. Процесс последовательной смены биогеоценозов называется *сукцессией*.

Конечным результатом сукцессии является установление стационарного *климаксового* или зрелого сообщества (биогеоценоза). В зависимости от степени первичного нарушения равновесия сукцессия может привести как к восстановлению исходного устойчивого биогеоценоза, так и к образованию нового климаксового сообщества на данной территории. В первом случае можно говорить, что точка бифуркации не пройдена и система сохранила устойчивость. Во втором — система вышла за пределы устойчивости. Выход за эти пределы ведёт к потере устойчивости, то есть к радикальной смене одного устойчивого биогеоценоза другим.

При полном разрушении экосистемы происходит первичная сукцессия. Обычно это бывает на территориях, изначально лишенных не только растительности, но и почвы. Первичную сукцессию можно наблюдать после вулканических извержений, отступления ледника или на отвалах рудников. Вторичная сукцессия происходит в случаях, когда разрушения экосистемы носят менее катастрофический характер, и почвы и растительность хотя бы частично сохранились. Так, после сведения леса и распашки, впоследствии заброшенные сельскохозяйственные угодья могут вновь зарости лесом (восстановление исходного биогеоценоза, система сохранила устойчивость) или покрыться степной растительностью (образование нового климаксового сообщества).

Устойчивое внутреннее состояние динамического равновесия системы часто называют *гомеостазом*. Чем больше видовое разнообразие экосистемы на всех трофических уровнях, тем она устойчивее и выше её способность поддерживать гомеостаз. Это происходит потому, что при большом разнообразии видов звенья трофической сети оказываются дублированными, большинство потенциальных экологических ниш многократно перекрывают друг друга, тогда как реальные экологические ниши высоко специализированы, и сильна межвидовая конкуренция. Поэтому, если даже колебания климатических условий или ограниченное вмешательство человека вызовут снижение численности какого-либо вида, то его место быстро будет занято конкурентами, способными функционально заменить его в экосистеме. Устойчивыми должны быть все трофические уровни, и способность экосистемы к самовосстановлению обычно зависит от наименее

устойчивого уровня. Наличие хотя бы одного слабого трофического уровня с малой способностью к восстановлению ослабляет устойчивость системы в целом.

В незрелой системе, находящейся в начальной стадии сукцессии и далекой от равновесия, число видов мало, это в основном продуценты, и размер экологических ниш близок к потенциальному. Ёмкость экосистемы не заполнена. Постепенно она заполняется, и видовое разнообразие растёт, пока не достигает возможного максимума. Таким образом, *максимум видового разнообразия на всех трофических уровнях есть признак зрелости биогеоценоза и одновременно условие его устойчивости.*

## Глава 2 Разнообразие экосистем

Пойми земли меняющийся вид:  
...Земля морей и полуостровов,  
Здесь вздутая, здесь сдавленная узко  
В парче лесов и в панцире хребтов  
Жемчужница огромного моллюска.  
Максимилиан Волошин. «Ангел  
времён»

### 2.1. Атмосферная циркуляция и климатические условия суши

В зависимости от условий на земном шаре сформировалось множество различных типов экосистем. Для материковых экосистем основными абиотическими факторами являются уровень инсоляции, то есть количество солнечной энергии, падающей на единицу площади, годовая сумма атмосферных осадков и их распределение по сезонам, то есть факторы климатические.

Инсоляция зависит от времени года, географической широты местности и состояния атмосферы (рис. 2.1). Поток солнечных лучей, приходящийся на единицу площади поверхности, зависит от географической широты и времени года:

$$S \approx S_0 \cos \varphi \cos \alpha,$$

где  $S_0$  — поток, падающий под прямым углом к поверхности Земли,  $\varphi$  — широта местности,  $\alpha \leq 23,5^\circ$  — угол, зависящий от наклона земной оси и времени года<sup>1</sup>. Значение  $S_0$  также зависит от времени года, так как в декабре Земля находится в перигелии, то есть в ближайшей к Солнцу точке своей орбиты, и получает

<sup>1</sup> Точная формула для Земли, лишенной атмосферы, выглядит так:  $S = S_0(a/R)^2(\sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \psi)$ , где  $a$  — расстояние до Солнца в данный момент,  $R$  — среднее расстояние от Солнца до Земли,  $\delta$  — склонение Солнца, то есть угол между направлением на Солнце и плоскостью экватора,  $\psi$  — часовой угол, который отсчитывается на запад от плоскости меридиана до плоскости, проходящей в данный момент через Солнце и полюсы мира.



Рис. 2.1. Равномерный по сечению поток параллельных солнечных лучей равномерно освещает поверхность Земли, так как одно и то же количество энергии попадает на разные площади и проходит через различную толщу атмосферы

на 7 % больше энергии, чем в июне, когда она находится в афелии и наиболее удалена от Солнца. Поток в высоких широтах ослабляется не только за счёт распределения энергии на большей площади. Чтобы достичь поверхности Земли, солнечная радиация должна пройти через толщу атмосферного воздуха, которая зависит от широты и сезона. В тропических широтах эта зависимость почти отсутствует, но чем ближе к одному из полюсов, тем она выражена сильнее.

Если бы плотность воздуха была постоянной по высоте и равной его плотности у поверхности Земли, то такая *однородная атмосфера* имела бы высоту всего около 8 км. В действительности плотность воздуха с высотой убывает, и потому реальная атмосфера простирается на тысячи километров вверх<sup>2</sup>.

Солнечные лучи, пройдя атмосферу, нагревают земную поверхность, которая в свою очередь отдаёт теплоту прилегающим к ней нижним слоям атмосферы. При нагревании плотность воздуха уменьшается, и он стремится подняться в соответствии с законом Архимеда. Этому препятствует гравитационное уменьшение плотности с высотой, вызванное тяготением Земли. Если

<sup>2</sup> Плотность воздуха у поверхности Земли примерно 1,25 кг/м<sup>3</sup>. На высоте 10 км — 0,41 кг/м<sup>3</sup>, 20 км — 0,09 кг/м<sup>3</sup>, 300 км — 10<sup>-11</sup> кг/м<sup>3</sup>, но только на высотах, больших 20 000 км, плотность атмосферы приближается к плотности вещества в межпланетном пространстве.

считать воздух идеальным газом, подчиняющимся уравнению состояния

$$PV = RT, \quad (2.1)$$

в котором  $P$  — давление,  $V$  — объём,  $R$  — универсальная газовая постоянная и  $T$  — абсолютная температура, то *основное уравнение статики атмосферы* будет иметь вид

$$\Delta P = -gP \Delta z / RT, \quad (2.2)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения и  $z$  — высота над поверхностью Земли. Это уравнение выражает равновесие сил, действующих на слой воздуха, — архимедовой подъёмной силы с одной стороны и земного тяготения — с другой. Решение уравнения (2.2) есть барометрическая формула, позволяющая вычислить давление на высоте  $z$  по известному давлению на уровне моря  $P_0$ :

$$P = P_0 \exp(-gz/R\theta), \quad (2.3)$$

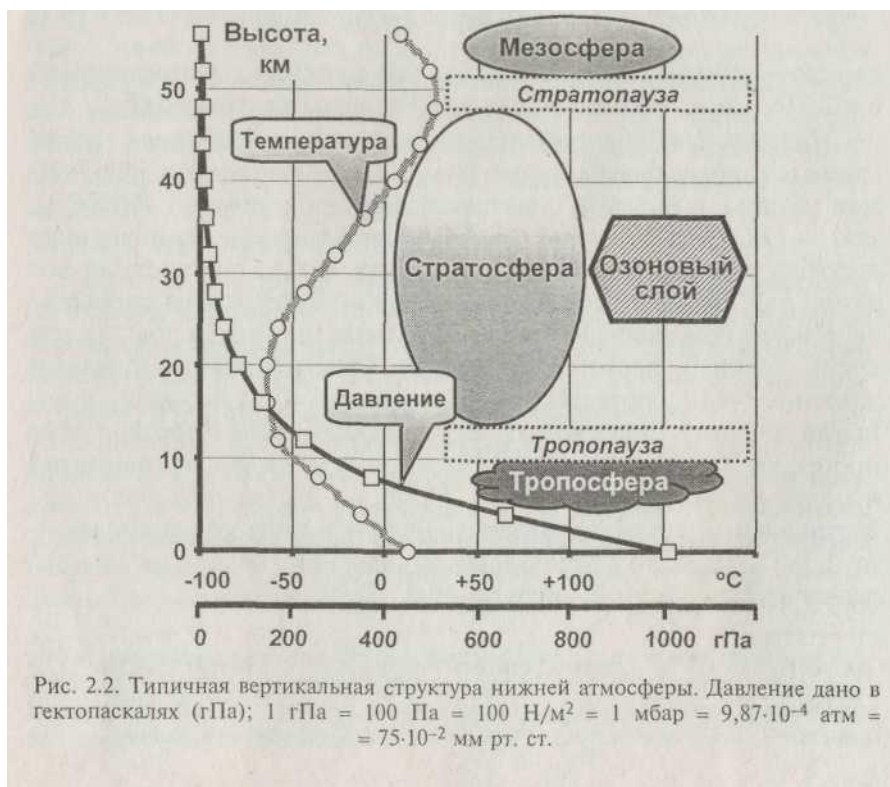
где  $\exp$  — обозначение показательной функции с основанием  $e$ ,  $e \approx 2,718$  и  $\theta$  — некоторая температура в толще слоя воздуха.

Нижний слой атмосферы, называемый *тропосферой*, подогревается снизу поверхностью Земли, и температура в нём должна убывать с высотой с *вертикальным градиентом*<sup>3</sup> 1 °C/100 м. Это — *сухоадиабатический градиент температуры*, относящийся к сухому воздуху. В реальной атмосфере всегда присутствует водяной пар. При подъёме и охлаждении он будет конденсироваться, и высвобождающаяся скрытая теплота испарения воды (а она очень велика!) подогревает воздух. Одновременно снижается давление, что в соответствии с уравнением (2.1) приводит к дополнительному охлаждению. В результате взаимодействия этих процессов градиент температуры уменьшается и для *стандартной атмосферы* составляет 0,66 °C/100 м. В реальной атмосфере вертикальный градиент может меняться в широких пределах — от 1,5 °C/100 м до отрицательных значений, когда температура даже растёт с высотой, порядка -0,2 °C/100 м.

<sup>3</sup> Вертикальный градиент температуры, то есть её производная по высоте  $dT/dz$ , — величина почти всегда отрицательная, как это видно из рис. 2.2. В метеорологии принято брать её с обратным знаком. Это значит, что, например, при градиенте 1 °C/100 м температура *снижается* на 1 °C при *подъёме* на 100 м.

Типичные зависимости температуры и давления от высоты показаны на рис. 2.2. Снижение температуры происходит до высоты 7—15 км, где температурный градиент становится близка к нулю. Располагающийся здесь слой высотой около километр; называется *тропопаузой*. Он отделяет тропосферные воздушные массы от *стратосферы*. Выше него, в стратосфере, температур; растёт и на высоте около 50 км, в *стратопаузе*, достигает значений, близких к поверхностной температуре. Выше стратопаузы располагаются весьма разреженные слои мезосферы и термосферы.

Пока температурный градиент меньше  $0,7 \text{ }^\circ\text{C}/100 \text{ м}$ , атмосфера устойчива, и вертикальное перемешивание воздуха практически отсутствует. При совсем малых значениях температурного градиента и особенно при *инверсии* (смене) его знака слой холодного воздуха оказывается внизу, ниже слоя тёплого воздуха. Такой слой называется инверсионным, а состояние атмосферы —



ры — сверхустойчивым. Подобные явления часто наблюдаются ясными ночами, когда поверхность Земли быстро остывает вследствие собственного инфракрасного излучения (*радиационное выхолаживание*).

С ростом температурного градиента воздух у поверхности Земли становится всё легче по сравнению с вышележащими слоями и под действием архимедовой силы начинает всплывать. Атмосфера становится *неустойчивой*, — в ней развивается *конвекция* — вертикальные движения, которые заставляют тёплый воздух подниматься вверх, а холодный — опускаться. Возможно и *нейтральное* состояние атмосферы, когда температурный градиент таков, что архимедовы силы плавучести уравновешены давлением. Такое нейтральное состояние возникает и при сильных ветрах, разрушающих термическую конвекцию, но, в свою очередь, вызывающих перемешивание.

Конвективный подъём работает как насос, заставляя соседние массы воздуха замещать воздух, поднимающийся вверх. Так возникает горизонтальная составляющая атмосферной циркуляции — ветер.

Атмосферная циркуляция в тропосфере обеспечивает перенос тепла из экваториальной и тропической зон к полюсам и тем самым формирует климатические зоны Земли. Общая циркуляция атмосферы содержит отчетливо выраженные взаимодействующие между собой *циркуляционные ячейки*. В низких широтах, возле экватора преобладают *ячейки Гадлея* (Hadley, 1685—1768). Здесь насыщенные водяным паром массы теплого воздуха поднимаются на большую высоту, при этом охлаждаясь. Сконденсировавшаяся влага образует мощные грозовые облака высотой в несколько километров, и в этой зоне влажных тропиков выпадает много осадков. Выделившаяся при образовании облаков скрытая теплота испарения не даёт поднимающимся воздушным массам быстро остывать, поэтому в экваториальной области высота тропосферы максимальна (рис. 2.3). Лишённый влаги и остывший воздух на больших высотах растекается в горизонтальном направлении и опускается вблизи Северного и Южного тропиков, то есть на широтах  $15\text{—}30^\circ$  обоих полушарий, формируя область субтропических *антициклонов* и образуя на континентах пояса пустынь. Ячейки Гадлея замыкаются ветровой системой *пассатов*, возвращающих воздух в экваториальную зону. Пассаты обоих полушарий сходятся у экватора, образуя зону *внутритропической конвергенции*.

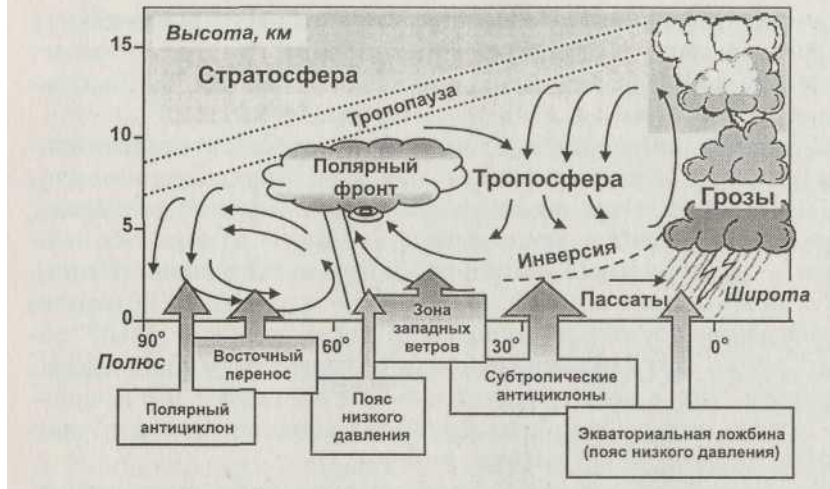


Рис. 2.3. Схема циркуляции атмосферы в вертикальном разрезе по меридиану от полюса до экватора. Стрелки указывают меридиональные составляющие господствующих движений воздушных масс

Сухой воздух субтропических антициклонов, образующих области высокого давления, растекается не только к экватору (пассаты), но и в сторону полюсов, образуя циркуляционную ячейку средних широт. Проходя над поверхностью, он снова подогрывается и набирает влагу, пока не сталкивается с полярным фронтом холодного воздуха вблизи полярного круга. Здесь он поднимается и замыкает ячейку. Полярный фронт — подвижное образование, иногда он может и отсутствовать. Вблизи полюсов холодный воздух образует области высокого давления, из которых растекается в сторону умеренных широт, причём эти потоки отклоняются в восточном направлении. Полярные ячейки выражены слабо, и циклоны проникают даже в очень высокие широты, но, миновав полярные круги (66,5° широты), быстро ослабевают.

Если бы Земля не вращалась вокруг своей оси, то практически вся атмосферная циркуляция протекала вдоль меридианов. Вращение Земли приводит к возникновению инерционной силы Кориолиса (*Coriolis*, 1792—1843). Дело в том, что в соответствии с законом инерции воздух стремится двигаться прямолинейно, но вращающаяся Земля поворачивается под ним. Таким образом, на каждую частицу воздуха, движущуюся вдоль меридиана

со скоростью  $v$ , с точки зрения наблюдателя, связанного с Землёй, воздействует ускорение

$$a = 2\omega v \sin \varphi, \quad (2.4)$$

где  $\omega$  — угловая скорость вращения Земли ( $7,29 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ ) и  $\varphi$  — географическая широта<sup>4</sup>. Из формулы (2.4) видно, что ускорение

и сила Кориолиса максимальны на полюсах и равны нулю на экваторе.

Ускорение Кориолиса поворачивает ветры, дующие от экватора, в западном направлении, а ветры, дующие от полюсов, — на восток. В результате получается картина, показанная на рис. 2.4 вверху.

В средних широтах, где инсоляция достаточно велика, чтобы вызвать значительные перепады давления и, следовательно, ветры, на каждую частицу воздуха действуют и сила перепада давления, и сила Кориолиса. Эти силы должны уравнивать друг друга, так как в целом объёмы воздуха не получают больших горизонтальных ускорений. Выполнение этого условия возможно только, если ветер будет дуть вдоль *изобар*, то есть линий равного давления, что и происходит в действительности, начиная с высоты несколько сот метров. Этот ветер носит название *геострофического*. Сила Кориолиса искривляет траектории воздуха и закручивает их в подвижные атмосферные вихри синоптического масштаба (100—2000 км) с вертикальными осями — *циклоны* и *антициклоны*, вращение которых создаёт центробежную силу. Господствующий западный перенос увлекает эти вихри с собой, поэтому направление ветра в каждой точке может часто меняться. В центрах циклонов воздух поднимается, и давление пониженное, в антициклонах воздух опускается, и давление повышенное (рис. 2.4, внизу). Трение замедляет вращение атмосферных вихрей вблизи поверхности, и направление ветра отклоняется здесь в сторону низкого давления. Таким образом, в этих вихрях поддерживается равновесие между четырьмя силами: перепадом давления, силой Кориолиса, центробежной силой и силой трения.

<sup>4</sup> Интересно, что Гадлей за полвека до Кориолиса понял, что отклонение ветра от меридионального направления и, в частности, западный перенос в умеренных широтах — следствие вращения Земли. Но честь строгого физического объяснения эффекта и его количественной оценки принадлежит Кориолису.



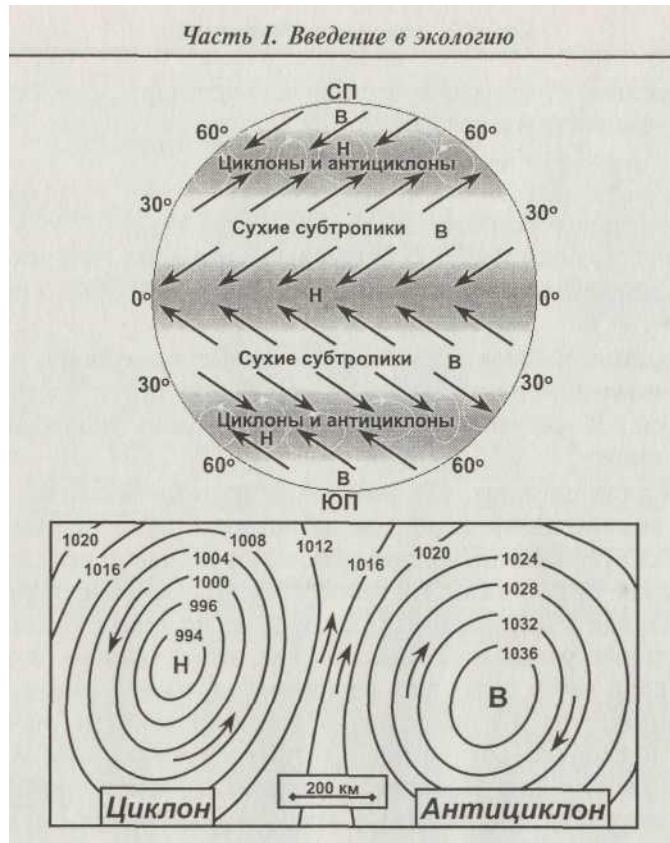


Рис. 2.4. Схема распределения давления и ветра над поверхностью Земли (вверху) и соседствующие циклон и антициклон на карте погоды (внизу). Н — низкое давление, В — высокое давление, СП и ЮП — полюсы. Стрелки указывают направление ветра

Прилегающий к поверхности Земли слой воздуха, в котором вследствие трения о поверхность ветер меняет свою скорость и направление, называется *пограничным слоем*. Его верхняя граница лежит там, где ветер становится геострофическим. Именно в этом слое происходит основное распространение антропогенных загрязняющих веществ.

В целом атмосферная циркуляция обеспечивает перемещение тепла от экватора к полюсам и облачных масс с океанов на континенты, формируя климаты Земли. Значительную роль в этих процессах играют и океанические течения, способные переносить огромное количество тепла. Например, Гольфстрим в Атлантическом океане работает в качестве «отопительной системы»

Центральной и Северной Европы, повышая здесь температуру примерно на 10 °С по сравнению с лежащими на тех же широтах областями Канады или Восточной Сибири.

Помимо температуры воздуха, важнейшим климатообразующим фактором является количество осадков.

Мерой интенсивности осадков служит глубина слоя воды, который мог образоваться на подстилающей поверхности за заданное время (например, за год), если бы не было стока и испарения. Единицей измерения суммы осадков служит 1 мм. Сумма осадков, равная 1 мм, соответствует одному литру воды, выпавшему на одном квадратном метре площади, или тысяче тонн воды на одном квадратном километре.

На диаграмме рис. 2.5 показаны характерные значения температур и годовых норм осадков для некоторых основных типов экосистем. Для формирования определенного типа климата и соответствующего биогеоценоза важны не только количества осадков и солнечного тепла, но и соотношение между ними. Дело в том, что количество доступной растениям воды зависит от отношения количества осадков к скорости испарения. Ско-

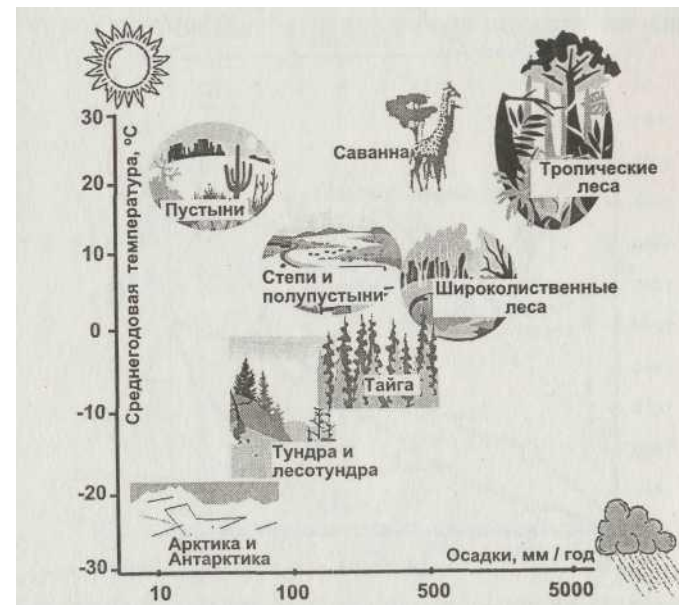


Рис. 2.5. Климатические условия основных типов природных экосистем суши

рость испарения, или *испаряемость*, есть глубина слоя воды, который может испариться за единицу времени, например, за год.

Суммарную испаряемость, также как сумму осадков, можно выразить в мм в год. Поэтому отношение  $W = J/R$ , где  $J$  есть интенсивность осадков, а  $R$  есть испаряемость, называют *коэффициентом увлажнения*.

Между суммой осадков и испаряемостью как физическими характеристиками существует принципиальная разница. Сумма осадков есть реальное количество воды, выпавшей в данном месте. Испаряемость есть максимальное количество воды, которое в принципе могло бы испариться с открытой водной поверхности. Могло бы, но совершенно не обязательно реально испаряется. Например, в юго-восточной Сахаре годовая сумма осадков не превышает 1 мм, тогда как испаряемость составляет несколько метров. Выпавшие осадки впитываются почвой и собираются в водоёмы, поэтому реальное испарение бывает много меньше испаряемости, и коэффициент увлажнения, больший 0,3, обычно вполне достаточен для развития процветающей растительности.

Коэффициент увлажнения  $W$  показывает, насколько выпадающие осадки способны возместить потерю влаги. При одинаковом количестве осадков коэффициенты увлажнения могут силь-

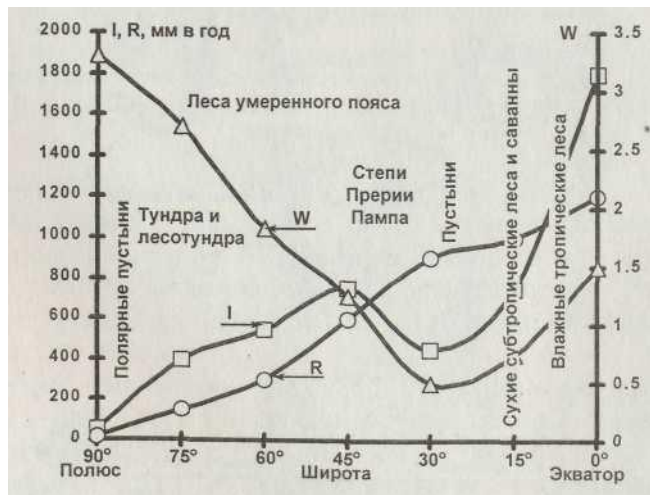


Рис. 2.6. Зональное распределение осадков  $I$ , испаряемости  $R$ , коэффициента увлажнения  $W$  основных типов экосистем

но отличаться. Например, в некоторых пустынях, таких как Гоби или Кара-Кум, выпадает столько же осадков, как и в заполярной тундре. Однако в пустыне растительность страдает от дефицита воды, а в тундре — от избытка. Для растительности важно также, чтобы вода была доступна, то есть находилась в жидкой фазе, а не в виде льда или снега. Широтное распределение увлажнения и экосистем показано на рис. 2.6. Значительную роль в жизни экосистем играет и распределение осадков по сезонам (рис. 2.7).

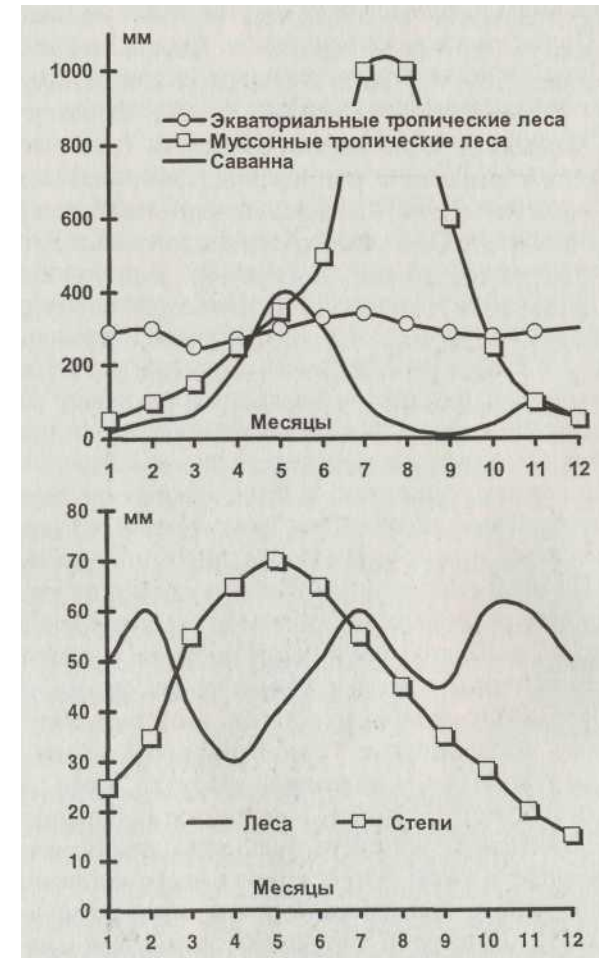


Рис. 2.7. Сезонный ход осадков (мм за месяц) в тропических (вверху) и умеренных (внизу) широтах

## 2.2. Природные экосистемы суши

Экосистемы, находящиеся в суровых абиотических условиях, прежде всего по температуре и дефициту жидкой воды, как правило, имеют мало видов на всех трофических уровнях и, соответственно, малый запас устойчивости. Пищевые цепи здесь очень упрощены, и потеря одного звена может легко вызвать крах всей системы. В этих экосистемах много видов-«верблюдов», многие виды находятся в зонах угнетения по абиотическим факторам. Примеры таких экосистем — тундра, пустыни и полупустыни. Даже незначительное вмешательство человека приводит в таких биогеоценозах к тяжёлым последствиям.

Иная ситуация наблюдается во влажных тропических лесах (влажных джунглях). Тропические леса сосредоточены в основном в экваториальной области Африки и Южной Америки (бассейны рек Амазонки, Ориноко и Конго), а также в Юго-Восточной Азии и на Зондских островах между Индийским и Тихим океанами. Коэффициент увлажнения здесь очень велик, несмотря на высокую температуру, так как годовые нормы осадков составляют от 3 000 до 10 000 мм в год. Температура в течение года почти не меняется, и уровень освещенности также. Солнечный свет падает почти вертикально, проходя через сравнительно меньшую толщину атмосферы и распределяясь на меньшей площади, чем в более высоких широтах. В результате возникают чрезвычайно благоприятные условия для фотосинтеза, что приводит к развитию мощной и самой разнообразной многоярусной растительности. На этой основе возникают сложнейшие трофические сети и огромное разнообразие видов на всех трофических уровнях. Благодаря изобилию солнечной энергии и влаги для этих экосистем характерны высокие скорости сукцессии и устойчивость к колебаниям видового состава, поэтому они обладают значительной способностью сопротивляться антропогенным воздействиям. Однако при сплошной вырубке лесов на большой площади устойчивость теряется, и происходит бифуркация: экосистема восстанавливается очень медленно или не восстанавливается совсем. Дело в том, что основная масса органического вещества тропического леса сосредоточена в растительности, а не в почве, как это характерно для других экосистем. Связано это с очень большой скоростью разложения мертвой органики в условиях высокой влажности и температуры. Поэтому запасы пита-

тельных веществ в почвах малы. После сведения леса тропические ливни быстро смывают остатки почвы, и восстановление леса оказывается невозможно.

Севернее и южнее влажных тропических лесов в областях с коэффициентом увлажнения 0,3—0,7 располагаются тропические лесостепи — саванны. Для них характерна сильная сезонная неравномерность выпадения осадков (рис. 2.7) и постоянство температур. Дожди выпадают в основном весной и частично осенью. Между дождливыми сезонами имеются два длинных сухих сезона — зимний и летний. Обширные травянистые пространства саванн сочетаются с отдельными деревьями, кустарником и редколесьем. Растительность хорошо приспособлена к особенностям увлажнения. Деревья (пальмы, акации и баобабы) большей частью сбрасывают листву в сухой сезон, спасаясь от потерь влаги. Травы, растущие от корней, быстро отрастают после высыхания, стравливания травоядными животными и даже степных пожаров. Травоядные животные саванн специализированы по питанию. Жирафы объедают верхушки деревьев, слоны питаются нижерасположенными листьями и побегами, антилопы, зебры и газели — преимущественно травой. Вслед за кочующими в поисках свежей зелени стадами травоядных передвигаются хищники — львы, гепарды, гиены. В сухие сезоны, в особенности при запаздывании весенних дождей, многие популяции оказываются на грани гибели. Именно запасы воды здесь являются лимитирующим фактором для всего сообщества. Поэтому, несмотря на большое видовое разнообразие, оно легко теряет устойчивость, особенно на территориях, граничащих с пустынями. В настоящее время антропогенная нагрузка на саванны чрезмерно велика из-за перевыпаса скота, распашки больших территорий, истребления древесной растительности и браконьерской охоты на экзотических животных.

К югу и к северу от саванн, на широтах обоих тропиков располагаются обширные зоны с коэффициентами увлажнения, меньшими 0,25, — зоны пустынь и сухих степей — полупустынь. Именно здесь находятся Сахара, Аравийская пустыня, Атакама и пустыни Австралии, где в некоторых местах коэффициент увлажнения близок к нулю. Несколько севернее расположены пустыни и полупустыни (сухие степи) Центральной Азии. Суммарно пустыни занимают около 1/6 площади материков.

Наиболее безводные — тропические пустыни, имеющие в основном каменистую поверхность, очищенную ветром от песка. Только около 1/10 этих пустынь покрыто песчаными дюнами. В пустынях, расположенных севернее, таких как Гоби, зимой стоят суровые морозы, но годовая норма осадков несколько выше. Во всех пустынях сильно выражен суточный ход температуры. Открытая поверхность нагревается днём, но ночью быстро остывает, отдавая тепло главным образом за счёт инфракрасного излучения (*радиационное выхолаживание*). Резкие колебания температуры способствуют выпадению росы, служащей часто основным, если не единственным источником влаги. Растения и животные пустынь выработали специальные механизмы удержания воды. У растений имеется мощная система корней, а листья бывают покрыты восковым налётом, препятствующим высыханию. Большая часть животных ведёт ночной образ жизни. Многие из них в сухие периоды впадают в спячку, зарываясь в песок или вырывая норы.

Почвы пустынь могут быть очень богатыми минеральными веществами, и только отсутствие воды делает их бесплодными. Человек превращает пустыни в высокопродуктивные угодья, создавая системы искусственного орошения. Случай, когда эти системы не отнимают воду у других регионов, может быть, единственный пример положительного антропогенного воздействия человека на природу. Замечательный пример таких систем — долина Нила в Египте, процветающая на искусственном орошении много тысяч лет при нулевых осадках. Вместе с тем имеется множество и обратных примеров, когда неустойчивые экосистемы пустынь разрушаются вследствие выпаса скота и езды без дорог.

К природным экосистемам умеренных поясов Земли относятся степные экосистемы Евразии, Северной Америки (пре-рии), Южной Америки (пампасы) и вельды Южной Африки. Как правило, сезонное распределение осадков здесь благоприятно для растительности, так как основная масса осадков выпадает весной и в начале лета (рис. 2.7). Почвы степей покрыты густыми многолетними травами, препятствующими высыханию и стабилизирующими почвенный покров. Плодородие почв способствует процветанию многочисленных видов редуцентов и детритофагов, что в свою очередь обеспечивает плодородие. Мощный растительный покров даёт пищу большому числу травоядных, включая насекомых, грызунов, птиц и крупных животных. Бла-

годаря этому степные экосистемы имеют большой запас устойчивости. Однако в высшей степени благоприятные условия для жизни и ведения сельского хозяйства издавна привлекали человека. В результате основная часть территории степей распахана и занята монокультурными посевами. Во многих случаях это привело к ветровой и водной эрозии почв и их истощению.

Материки и материковые биогеоценозы умеренного и субарктического поясов сосредоточены почти полностью в Северном полушарии.

Лиственные леса умеренных широт располагаются к северу от зоны степей в Северном полушарии и частично перемежаются со степными биоценозами, образуя прекрасные лесостепные ландшафты в Европе и Северной Америке. Умеренные температуры и достаточные осадки создают благоприятные условия для дуба, тополя, берёзы, платана, бука и других ценных древесных пород. Лесостепные экосистемы благодаря большому видовому разнообразию и мощным почвам очень устойчивы. Ежегодный листопад обогащает почвы питательными веществами. В зрелых лиственных и смешанных лесах подобно тропическому лесу растительность образует много ярусов: кроны светолюбивых деревьев прикрывают тенелюбивые породы кустарников и деревьев, а наземный ярус образуют травы, хвощ, папоротник, лесные цветы (ландыши, фиалки) и другие низкорослые растения. Важной частью экосистемы являются многочисленные грибы и другие почвенные детритофаги. Многочисленные крупные и мелкие хищники, — лисы, волки, рыси, ласки, хорьки, совы, ястребы и соколы, — регулируют численность мышей и других грызунов, а также птиц и более крупных травоядных. Особо важна роль мелких птиц (синицы, дятлы), хищных насекомых (стрекозы, божьи коровки и др.) и летучих мышей, истребляющих в огромном количестве насекомых-фитофагов. Экосистемы лиственных лесов обычно быстро восстанавливаются при рубке, но плохо выдерживают другие виды антропогенных воздействий. Неосмотрительное осушение болот вызывает снижение уровня грунтовых вод и усыхание корней. Кислотное атмосферное загрязнение буквально сжигает листву. Неконтролируемое применение химических инсектицидов ведёт к гибели не столько насекомых-«вредителей», сколько к отравлению и гибели их естественных врагов — птиц и хищных насекомых; в результате вместо подавления опасных для леса насекомых получается всплеск их численности. Вблизи больших городов эти леса испытывают

чрезмерную рекреационную нагрузку (попросту говоря, устройство пикников приводит к замусориванию почвы и уничтожению лесных цветов и грибов, являющихся важными симбионтами для других видов). Поэтому, например, почти исчезли дубовые леса, когда-то покрывавшие значительную часть Европы.

Зона лиственных лесов постепенно переходит в зону северных бореальных лесов (тайги), населённую преимущественно хвойными породами (ель, сосна, пихта, лиственница и кедровая сосна, часто называемая дальневосточным кедром). Зимы здесь суровы и длительны, лето короткое, но теплое и с большим световым днём, что создаёт благоприятные условия для интенсивного фотосинтеза. Листья — иглы этих пород хорошо сохраняют влагу в условиях суровой зимы с малой влажностью воздуха (лиственница сбрасывает иглы на зиму). Видовое разнообразие бореальных лесов существенно ниже, чем у лиственных и смешанных, ввиду суровых климатических условий. Для этих лесов характерно угнетенное состояние растительности в нижних ярусах, где господствуют мхи и обширные сфагновые болота. Почвы сравнительно бедны и имеют кислотный характер. Это предопределяет чувствительность этих экосистем к кислотности осадков. В тайге обитает много животных-фитофагов (зайцы, олени, лоси, белки) и многочисленные насекомые, способные наносить деревьям губительный ущерб. Поэтому птицы, прилетающие на время гнездования и выведения птенцов, играют важную роль в экосистеме. Велика роль и хищников (волков, лисиц, рысей, росомах, разнообразных куниц, сов и филинов), регулирующих численность травоядных животных. Тайга в целом — устойчивая экосистема, способная восстанавливаться за несколько десятков лет. Громадный ущерб тайге наносят не столько массовые рубки, сколько возникающие по неосмотрительности людей гигантские лесные пожары, охватывающие иногда тысячи квадратных километров.

В субарктической области вблизи Северного полярного круга располагается тундра — травянистый биоценоз, занимающий около 20 % всей поверхности материков. Растительный покров тундры состоит из лишайников (ягель), мхов, трав (прежде всего, осоки) и низкорослых кустарников. Эти растения приспособлены к недостатку света и жидкой воды большую часть года, сильным холодным ветрам и низким температурам. В подпочвенных слоях тундры на глубине около метра находится мощный слой льда — вечная мерзлота, препятствующий просачиванию

воды в глубь почвы. Этот слой вместе с малой испаряемостью создаёт условия для заболачивания. Летом тундра покрывается сетью мелких водоёмов, служащих основой для размножения огромного количества мошкеры и убежищем для огромных стай перелетных насекомоядных птиц, как правило, водоплавающих. В тундре обитает немного видов мелких травоядных животных: лемминги, полярные зайцы, мыши и суслики. Однако размеры популяций этих животных огромны. Многочисленные стада северных оленей летом пасутся в тундре, но зимой откочевывают к югу, в лесотундру — пограничную зону между тундрой и тайгой. Овцебыки, обитающие в Гренландии и на северных островах Канады, — единственные крупные постоянные травоядные обитатели тундры. Численность мелких травоядных и птиц контролируется хищниками — волком, рысью, песцом, горностаем и полярной совой. В прибрежных зонах тундры располагаются лежбища крупных морских млекопитающих — моржей, тюленей, морских котиков. Все биотические процессы в тундре протекают очень медленно и, как правило, в течение только короткого лета, поэтому для восстановления повреждённых почвы или растительности требуются сотни лет. Малое разнообразие видов также обуславливает малый запас устойчивости этих чрезвычайно ранимых экосистем. Например, бездумная охота на хищников быстро приводит к развитию эпизоотии и массовой гибели их жертв — травоядных. Поэтому разработка нефтегазовых месторождений и строительство трубопроводов должны вестись здесь с особой осторожностью.

Полярные пустыни Арктики и Антарктики, образующие полярные шапки Земли, — наиболее безжизненные пространства Земли. Здесь жизнь неразрывно связана с кромкой льдов, возле которой обитают питающиеся рыбой тюлени и пингины и самый мощный хищник на суше — белый медведь. Только такие крупные животные могут выдержать эти суровые условия.

### 2.3. Уникальные свойства воды и водные экосистемы

Воду считали простым элементом до тех пор, пока в 1781 — 1784 гг. Генри Кавендиш (*Cavendish*, 1731 — 1810) не показал, что она образуется при сгорании водорода, и Антуан Ла-

вуазье (*Lavoiser*, 1743—1794) не определил её состав. Существование водных экосистем, да и биосферы в целом, полностью зависит от уникальных свойств воды как одного из главных минералов Земли.

Вода бесцветна и прозрачна в тонких слоях и выглядит голубовато-зелёной (бирюзовой) в толстых. Благодаря этому фотосинтез может идти в достаточно глубоких слоях воды.

Молекулы воды сильно электрически поляризованы (рис. 2.8), и поэтому ей свойственны чрезвычайно мощное взаимное притяжение молекул, очень высокая диэлектрическая проницаемость, и она является уникальным и почти универсальным растворителем для солей. Её молекулы притягивают, окружают и отделяют ионы от кристаллов солей, образуя комплексы *гидратированных ионов*. Например, положительные ионы металлов притягивают отрицательные («кислородные») концы молекул воды, создавая и удерживая вокруг себя слой из них не только в растворе, но даже в кристаллах после выпаривания. Вода обладает очень сильным поверхностным натяжением и способностью подниматься по капиллярам. Всё это делает воду уникальным средством для транспортировки питательных веществ как внутри живых организмов, так и вне них.

Вода имеет парадоксальную зависимость плотности от температуры (рис. 2.8). Закон «все тела при нагревании расширяются» вблизи точки замерзания для неё неверен. Максимум плотности жидкой воды — при 4 °С. Более того, при замерзании, то есть переходе в кристаллическое состояние, вода не уменьшает, а почти на 1/10 увеличивает свой объём. Благодаря этому образующийся на водоёмах лёд не опускается на дно, а остаётся на поверхности, предохраняя водоёмы от промерзания. Без этого свойства вся вода Земли, скорее всего, быстро собралась бы в полярные ледяные шапки, и жизнь стала бы невозможна.

Теплоёмкость воды, её теплоты испарения и плавления очень велики. Вследствие большой теплоёмкости воды океаны и моря, медленно накапливая и отдавая тепло, существенно уменьшают перепады температуры и смягчают климат планеты. Испаряясь с поверхности океанов, вода запасает энергию в виде теплоты парообразования и впоследствии отдаёт её при образовании облаков и выпадении осадков. Таким образом, климатообразующее влияние воды невозможно переоценить.

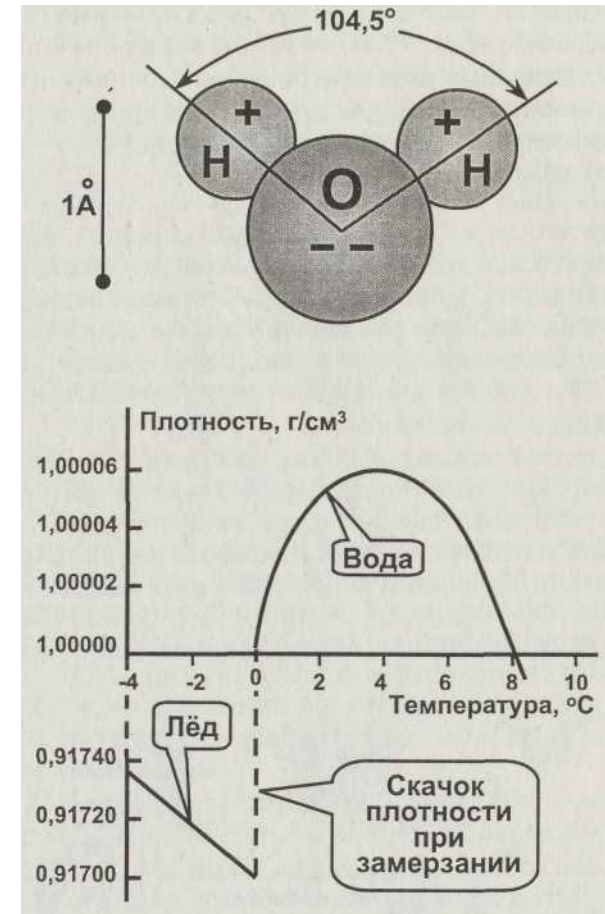


Рис. 2.8. Структура молекулы воды и зависимость плотности льда и воды от температуры. Рядом с молекулой воды показан в том же масштабе отрезок длиной в 1 Å (ангстрем) =  $10^{-10}$  м

Вода была колыбелью жизни на Земле, и водные экосистемы составляют большую часть биосферы.

Пять основных факторов влияют на биоту водных экосистем:

- солёность, то есть процентное содержание (по весу) растворённых в воде солей, главным образом  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$  и  $\text{MgSO}_4$ ;

- прозрачность, характеризуемая относительным изменением интенсивности светового потока с глубиной;
- концентрация растворённого кислорода;
- доступность питательных веществ, прежде всего соединений химически связанного азота и фосфора;
- температура воды.

Морские экосистемы характеризуются высокой солёностью, а материковые воды (воды суши) — низкой. По степени солёности можно выделить и промежуточные биотопы: эстуарии (приустьевые зоны), где воды рек смешиваются с морской водой, и прибрежные болота. Некоторые внутренние моря, например Балтийское море и его заливы, по своим свойствам являются скорее эстуариями, чем истинными морями.

В морских экосистемах, занимающих примерно 71 % поверхности Земли, основным продуцентом является фитопланктон, состоящий из микроскопических водорослей и бактерий (рис. 2.9). Для успешной жизнедеятельности фитопланктон нуждается в освещении, поэтому в принципе размещается в верхнем *эвфотическом* слое воды на глубинах не более 200 метров. Основным лимитирующим фактором в этом слое оказывается

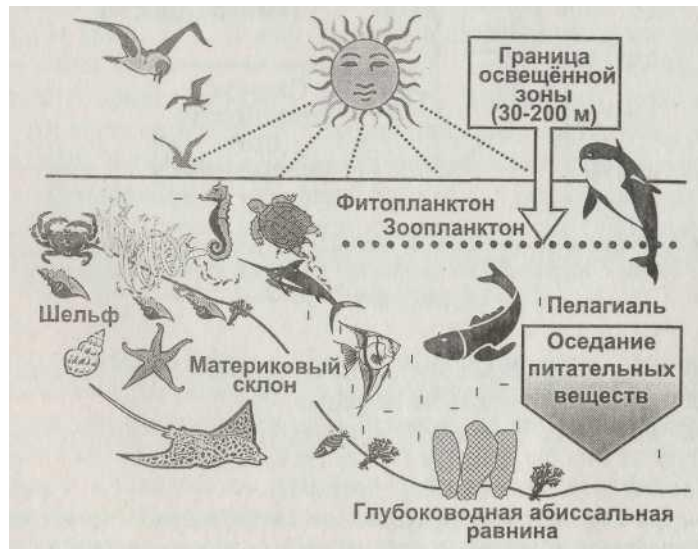


Рис. 2.9. Структура океанических экосистем

наличие питательных веществ, прежде всего связанного азота, фосфора и минеральных веществ. Из этого слоя питательные вещества оседают вглубь в результате нескольких процессов: «дождь» мёртвых организмов, миграция зоопланктона по вертикали, диффузия растворённого органического вещества. Тем самым обеспечивается питание глубоководной биоты. В распределении питательных веществ по акватории океанов велика роль океанических течений, переносящих смываемые с континентов вещества в зоны открытого моря. В этой связи в океанах можно выделить две зоны: *континентальный шельф* и *пелагическую зону (пелагиаль)*, то есть область открытого моря. Континентальный шельф представляет собой сравнительно мелкое подводное продолжение материковых плит и занимает не более 1/10 поверхности океана. Однако удельная, на единицу площади поверхности, биологическая продуктивность шельфа в несколько раз выше, чем у открытого моря. Высокой продуктивности шельфа способствуют два обстоятельства, приводящие к обогащению его вод питательными веществами. Во-первых, именно сюда стекают континентальные воды, несущие смываемые с суши минеральные и органические вещества. Во-вторых, когда ветер отгоняет теплые поверхностные слои воды от берега, на глубине возникает противотечение, и холодные глубинные воды поднимаются к поверхности вдоль береговой линии континента, принося с собой ранее осевшие питательные вещества (рис. 2.10). Это явление называют *апвеллинг*.

Области активного вертикального перемешивания и повышенной продуктивности есть и далеко от берегов, например, возле экватора, в зоне пассатов. Огромные центральные области океанов вблизи Северного и Южного тропиков, где вертикальное перемешивание вод очень слабо, можно уподобить сухим степям не только по географической широте, но и по их малой биопродуктивности. Напротив, в умеренных и субполярных широтах сезонные колебания температуры и течения способствуют перемешиванию, и биопродуктивность океана возрастает.

Эстуарии, лиманы, прибрежные заболоченные территории являются одними из наиболее продуктивных экосистем. На первый, обывательский взгляд эти земли бесполезны и только являются рассадником всевозможных кровососущих насекомых. Поэтому до сих пор существует тенденция к их «улучшению» путём дорогостоящих мелиоративных работ. На самом деле их роль огромна, и они нуждаются в строгой охране. Во-первых, здесь

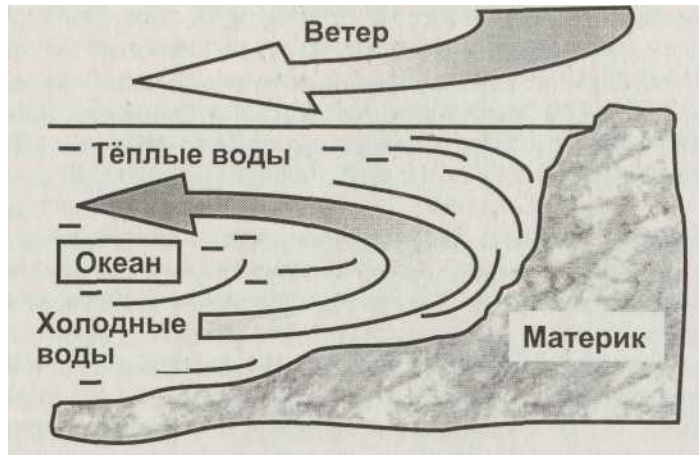


Рис. 2.10. Формирование апвеллинга. Вместе с холодными придонными водами к поверхности поднимаются скопившиеся у дна питательные вещества, что вызывает быстрый рост биоты

нерестится более 70 % наиболее ценных в промысловом отношении рыб и других морских организмов. Поэтому «освоение» этих территорий приводит к огромному экономическому ущербу за счёт истощения рыбных промыслов. Во-вторых, они блестяще выполняют функции бесплатных и очень эффективных очистных сооружений для стекающих с континента загрязнённых вод, предохраняя от гибели чувствительные прибрежные и шельфовые морские экосистемы. В-третьих, они служат местами обитания для гигантского количества птиц и животных, в том числе редких видов.

Прибрежные болотные системы занимают только около 5 % всей площади болот. Основная часть болот располагается внутри континентов, и они являются пресноводными экосистемами, играющими ключевую роль в естественном регулировании водотока рек умеренного пояса. Болотные экосистемы находятся в неразрывной связи с лесными биогеоценозами. Почвы болот почти постоянно покрыты водой, поэтому растительные остатки здесь не перегнивают до конца, и вместо гумуса на дне болот образуется *торф*. По мере роста слоя торфа болото зарастает сфагновым мхом. И торф, и мох обладают уникальной способностью впитывать, накапливать и сохранять влагу. В периоды избыточного увлажнения, — во время таяния снегов и затяжных дождей, — они собирают воду, а в сухие периоды постепенно отдают

её ручьям, мелким речкам и проточным озёрам, поддерживая уровень воды в реках и, самое главное, уровень грунтовых вод на огромных пространствах. При этом болота служат мощными естественными фильтрами для накопленной в них воды, практически полностью очищая её от естественных и антропогенных загрязнителей, таких как остатки удобрений, фекалии, ядохимикаты и даже остатки нефтепродуктов. На Европейской территории России именно верховые болота питают крупнейшие реки — Волгу, Дон, Днепр, Западную и Северную Двину. Проведение мелиоративных работ, осушение болот и добыча торфа как естественного удобрения или топлива в конечном счёте оказываются, как правило, абсолютно неоправданными, так как ведут к гибели лесов и разрушению водного режима.

В реках и пресноводных водоёмах основными лимитирующими факторами для живых организмов являются концентрации растворённого кислорода и питательных веществ — связанного азота, фосфора и минеральных солей.

Развитие основных продуцентов — фитопланктона и укоренённых водных растений зависит от количества питательных веществ. Так как для фотосинтеза нужен свет, фитопланктон концентрируется в верхнем слое воды. Поэтому продуктивность всей экосистемы зависит от поступления в этот слой питательных веществ. Они либо смываются дождями и талыми водами с берегов, либо поднимаются вверх вследствие активного перемешивания воды, когда взмучивается ил, то есть осевшие на дно органические остатки. Зоопланктон (микроскопические черви и ракообразные, инфузории, бактерии, одноклеточные жгутиконосцы) питается фитопланктоном и в свою очередь служит пищей для рыб и насекомых. Для жизнедеятельности консументов, — зоопланктона и рыб, — требуется кислород, поступление которого также зависит от скорости и глубины перемешивания воды. Таким образом, перемешивание воды является важнейшим фактором, так как от него зависит и поступление питательных веществ для фитопланктона, и концентрация кислорода.

Типичная экосистема пресноводного водоёма умеренных Широт показана на рис. 2.11. В мелководной прибрежной зоне — *литорали* обитают многочисленные продуценты — как свободно плавающие, так и укоренённые водные растения. Здесь много Насекомых и их личинок, здесь обитают лягушки, черепахи, водоплавающие птицы и млекопитающие. Здесь же охотничьи угодья аистов и цапель. *Пелагиаль* — это поверхностный слой от-



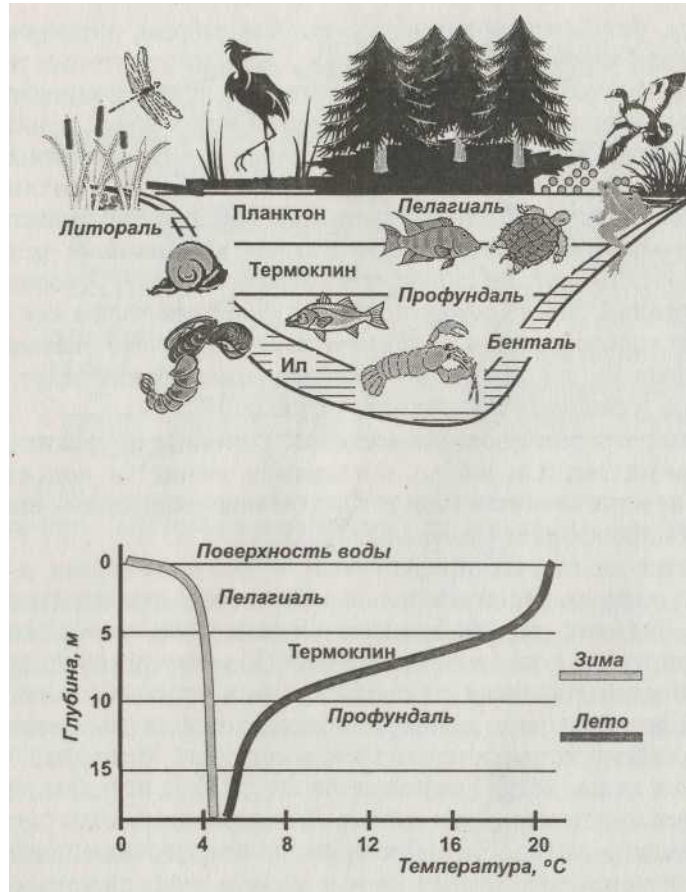


Рис. 2.11. Типичная экосистема пресноводного водоёма умеренных широт

крытых вод, где обитают планктонные организмы и поедающие планктон рыбы. *Профундаль* — слабо освещенная зона, где живут хищные и придонные рыбы. *Бенгаль* — дно, покрытое илом. Здесь обитают многочисленные детритофаги и редуценты — моллюски, черви, раки и личинки насекомых. В нижней части рис. 2.11 показаны характерные зависимости температуры от глубины. Весной и осенью, когда эти зависимости сменяют друг друга, происходит активное вертикальное перемешивание воды, и верхние слои обогащаются питательными веществами, а профундаль — кислородом. Перемешивание имеет такой сезонный

характер в большинстве равнинных водоёмов умеренного климатического пояса. Весной, при таянии льда и снега холодные тяжёлые воды стремятся опуститься на дно, а относительно более тёплые, придонные — подняться наверх. Аналогичный процесс происходит и осенью. Отсюда — весеннее «цветение» воды в прудах, озёрах и водохранилищах. Летом и зимой слои холодной и тёплой воды располагаются устойчиво (устойчивая *термическая стратификация*), и перемешивание почти отсутствует. Ледяной покров также препятствует растворению кислорода.

При быстром течении и активном перемешивании воды кислород имеется в достаточном количестве, и все трофические уровни приходят в равновесие. Это ситуация, типичная для рек с быстрым течением. Крупные озёра, в которых наблюдаются такие условия, представляют собой особую ценность как резервуары чистой пресной воды. К ним относятся, прежде всего, Байкал, а также Ладожское и Онежское озера.

Большинство водных экосистем обладают огромным запасом устойчивости и высокой способностью к самоочищению. Однако уровень антропогенных воздействий, которым они подвергаются, непомерно высок.

Для пресноводных водоёмов большую опасность представляет собой смыв удобрений с окружающих водоём полей и попадание неочищенных фекальных вод от скотоферм. При слабом перемешивании и избытке питательных веществ масса фитопланктона быстро растёт. Одновременно растёт и численность консументов — зоопланктона и рыб, потребляющих кислород, а также скорость окисления органических остатков бактериями. В результате возникает дефицит кислорода, ограничивающий численность консументов. Водоём зарастает синезелёными водорослями. Такая сукцессия называется *эвтрофикацией*. При особо крупных масштабах загрязнения эвтрофикация может угрожать. Даже таким большим водоёмам, как Балтийское море.

Особая роль в очистке воды принадлежит двустворчатым фильтрующим моллюскам. Именно они очищают воду от избытка органических загрязнителей, попадающих в водоёмы со сточными водами. При попадании в воду токсичных веществ моллюски первые «принимают удар на себя» и погибают, после чего экосистема теряет способность к самоочищению от органических загрязнений. Поэтому эффект от совместного и одновременного загрязнения водоёмов и рек органическими и токсичными веще-

ствами оказывается гораздо худшим, чем просто сумма этих воздействий (*синэргетический эффект*).

Другая грозная опасность — загрязнение воды нефтепродуктами. Образованная ими маслянистая мономолекулярная пленка на поверхности воды препятствует газообмену между водой и атмосферой и, прежде всего, поступлению в воду кислорода и углекислого газа. Эта опасность угрожает не только пресноводным, но и морским акваториям. Достаточно заметить, что разлитие одной тонны нефтепродуктов приводит к 100%-ному загрязнению нескольких квадратных километров водной поверхности. Отсюда ясно, почему аварии крупных нефтеналивных танкеров, перевозящих до 100 тысяч тонн нефти, ведут к тяжёлым экологическим катастрофам. Не меньшую опасность представляет собой массовое рутинное загрязнение водоёмов от сброса отработанных масел, промывки нефтеналивных ёмкостей и тому подобных действий, которые безусловно должны рассматриваться как серьёзное правонарушение.

## 2.4. Особенности антропогенных экосистем

Антропогенные экосистемы, как правило, оказываются весьма далёкими от естественного равновесия. При этом возможны несколько типичных ситуаций.

Прежде всего, это эксплуатируемые человеком природные экосистемы, находящиеся под большой *антропогенной нагрузкой*. Если антропогенная нагрузка снимается, то предоставленные самим себе они возвращаются в равновесное состояние. В таком положении находятся леса, систематически подвергающиеся массовой рубке, многие пастбищные угодья. После уничтожения значительной части природной растительности человек покидает эти территории с тем, чтобы вернуться, когда в результате сукцессии растительность восстановится.

Однако при чрезмерной нагрузке экосистема теряет устойчивость, и в таких случаях бездумная эксплуатация природных ресурсов зачастую ведёт к экологическим катастрофам. Страшный пример такого рода — судьба Аральского моря. Это огромное озеро питалось всегда водами двух больших рек — Амударьи и Сырдарьи — и вместе с ними образовывало устойчивую систему. Во второй половине XX века воды этих рек стали разбирать на орошение хлопковых плантаций, Аральское

море стало быстро высыхать, и к настоящему времени его экосистема практически погибла. Это в свою очередь привело к социальной и гуманитарной катастрофе в окрестностях Арала. Другой пример — строительство гидроэлектростанций без учёта последствий для водных экосистем. В подобных случаях нерестилища ценных пород рыб оказываются уничтоженными, а окружающие земли — подтопленными. На месте зрелых природных равновесных экосистем, как правило, возникают бедные малопродуктивные незрелые сообщества, далекие от естественного равновесия. Наконец, заброшенные карьеры и места открытых разработок полезных ископаемых оказываются пустынными территориями, на которых происходит первичная сукцессия.

Другой тип антропогенных биогеоценозов — искусственно созданные и удерживаемые в неравновесном положении системы. Это — пахотные земли и другие сельскохозяйственные угодья. Как правило, они засеваются одной культурой. Для получения максимального урожая человек стремится сохранить только два трофических уровня — собственно культурное растение — продуцент и детритофагов и редуцентов в почве, необходимых для поддержания плодородия. Видовое разнообразие становится минимальным, а экологическая ниша культивируемых растений — максимальной. Понятно, что эта ситуация крайне неустойчива. Культивируемые растения не способны захватить полностью экологическую ёмкость системы, и фитофаги стараются захватить пустующие ниши, а дикорастущие растения — конкурировать с выращиваемыми культурами. Человек называет первых «сельскохозяйственными вредителями», а вторых — «сорняками» и вступает с ними в тяжёлую борьбу, длящуюся с переменным успехом уже несколько тысячелетий.

## 2.5. Продуктивность экосистем

По мере того, как человечество с упрямством, достойным лучшего применения, превращает лицо Земли в сплошной антропогенный ландшафт, всё большее практическое значение приобретает оценка продуктивности различных экосистем. Человек научился получать энергию для своих производственных и бытовых нужд самыми различными способами, но энергию для собственного питания он может получать только через фотосинтез.

В пищевой цепи человека в основании почти всегда оказываются продуценты, преобразующие энергию Солнца в энергию биомассы органического вещества. Ибо это как раз та энергия, которую впоследствии могут использовать консументы и, в частности, человек. Одновременно те же самые продуценты производят необходимый для дыхания кислород и поглощают углекислый газ, причём скорость газообмена продуцентов прямо пропорциональна их биопродуктивности. Следовательно, в обобщенном виде вопрос об эффективности экосистем формулируется просто: какую энергию может запасти растительность в виде биомассы органического вещества? На верхнем рис. 2.12 приведены значения удельной (на  $1 \text{ м}^2$ ) продуктивности основных типов экосистем. Из этой диаграммы видно, что сельскохозяйственные угодья, создаваемые человеком, отнюдь не самые продуктивные экосистемы. Наивысшую удельную продуктивность дают болотистые экосистемы — влажные тропические джунгли, эстуарии и лиманы рек и обычные болота умеренных широт. На первый взгляд, они производят бесполезную для человека биомассу, но именно эти экосистемы очищают воздух и стабилизируют состав атмосферы, очищают воду и служат резервуарами для рек и почвенных вод и, наконец, являются местами размножения для огромного числа рыб и других обитателей вод, используемых в пищу человеком. Занимая 10 % площади суши, они создают 40 % производимой на суше биомассы. И это без каких-либо усилий со стороны человека! Именно поэтому уничтожение и «окультуривание» этих экосистем есть не только «убийство курицы, несущей золотые яйца», но и может оказаться самоубийством для человечества. Если обратиться к нижней диаграмме рис. 2.12, то можно видеть, что вклад пустынь и сухих степей в продуктивность биосферы ничтожен, хотя они уже занимают около четверти поверхности суши и благодаря антропогенному вмешательству имеют тенденцию к быстрому росту. В долгосрочной перспективе борьба с опустыниванием и эрозией почв, то есть превращение малопродуктивных экосистем в продуктивные, — вот разумный путь для антропогенных изменений в биосфере.

Удельная биопродуктивность открытого океана почти столь же низка, как у полупустынь, а его огромная суммарная продуктивность объясняется тем, что он занимает более 50 % поверхности Земли, вдвое превосходя всю площадь суши. Попытки использовать открытый океан в качестве серьёзного источника про-

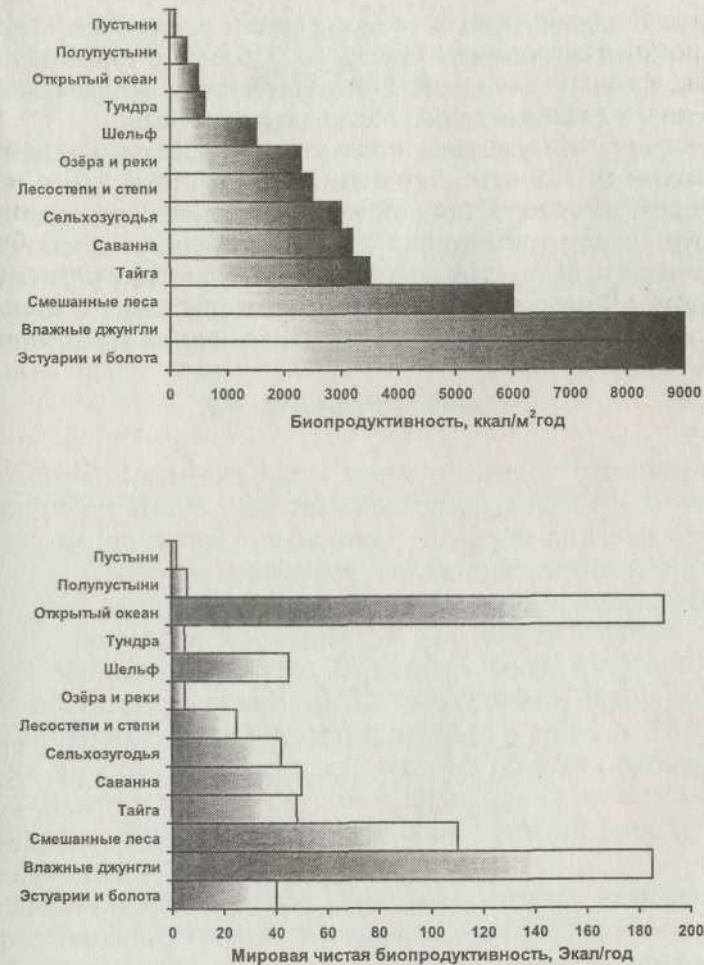


Рис. 2.12. Биопродуктивность экосистем как энергия, накопленная продуцентами в процессе фотосинтеза. Мировое производство электроэнергии составляет около 10 Экал/год, а всего человечество потребляет 50–100 Экал/год; 1 Экал (эксакалория) = 1 миллион миллиардов ккал =  $10^{18}$  ккал

дуктов питания в ближайшее время вряд ли могут быть экономически оправданы именно в силу его низкой удельной продуктивности. Однако роль открытого океана в стабилизации Условий жизни на Земле столь велика, что охрана его от загрязнения, особенно нефтепродуктами, совершенно необходима.

Нельзя недооценивать и вклад лесов умеренного пояса и тайги в жизнеспособность биосферы. Особенно существенна их относительная устойчивость к антропогенным воздействиям по сравнению с влажными тропическими джунглями.

Тот факт, что удельная продуктивность сельскохозяйственных угодий до сих пор в среднем намного ниже, чем у многих природных экосистем, показывает, что возможности роста производства продуктов питания на существующих площадях ещё далеко не исчерпаны. Пример — заливные рисовые плантации, в сущности — антропогенные болотные экосистемы, с их огромными урожаями, получаемыми при современной агротехнике.

## Глава 3 Биосфера

...Явления жизни и явления мертвой природы, взятые с геологической, то есть планетной, точки зрения, являются проявлением единого процесса.

*В. И. Вернадский. «Живое вещество»*

### 3.1. Предыстория

Биосферой называют часть земного шара, в пределах которой существует жизнь. Для этой особой оболочки Земли наиболее важными являются три условия. Во-первых, в ней имеется много воды в жидком состоянии, что автоматически подразумевает наличие достаточно плотной атмосферы и определенный диапазон температур. Во-вторых, на неё падает мощный поток лучистой энергии от Солнца. В-третьих, в ней имеются выраженные поверхности раздела между веществом в различных фазовых состояниях — газообразном, жидком и твёрдом. На высотах более 6—7 км, а также в центральных областях Антарктиды метаболизм (то есть обмен веществ) оказывается невозможен, и там жизнь существует только в виде спор бактерий и грибов. Это так называемые парабиосферные области.

В современной биосфере солнечная энергия включается в биологический круговорот только через фотосинтез, осуществляемый организмами — носителями хлорофилла, а именно зелеными и пурпурными бактериями, синезелёными водорослями, фитопланктоном и высшими растениями. Все эти организмы обитают в зоне, куда попадают лучи Солнца. Это атмосфера, поверхность суши, верхний слой почвы и верхние слои воды. В водных экосистемах органическое вещество оседает в глубокие слои, перенося туда энергию и, тем самым, создавая возможность для жизни на больших глубинах. В почве также происходит вертикальный перенос вещества, а вместе с ним и энергии. Что обеспечивает существование многочисленных редуцентов и Детритофагов.

К настоящему времени накоплено множество доказательств того, что биосфера, да и наша планета в целом, обрела современный вид в результате длительной эволюции. Согласно более или менее общепринятой гипотезе Канта — Лапласа, развитой Отто Юльевичем Шмидтом (1891—1956), Земля, другие планеты и Солнце образовались в результате гравитационного сжатия газопылевого облака около 4,6 миллиардов лет назад. Солнечная система — относительно молодое образование во Вселенной, возраст которой по современным представлениям составляет 15—25 миллиардов лет. Наша планета относится к группе внутренних, близких к Солнцу и сравнительно небольших планет. Главным процессом в её эволюции, незавершённым до сих пор, является гравитационное разделение веществ в её недрах, при котором тяжёлые вещества опускаются к центру Земли, а лёгкие — поднимаются к поверхности. Так сформировались ядро и оболочки Земли (рис. 3.1).

Согласно современным взглядам, в центре Земли образовалось внутреннее твёрдое ядро. Его материал состоит в основном из железа, которое, несмотря на высокую температуру, удержи-

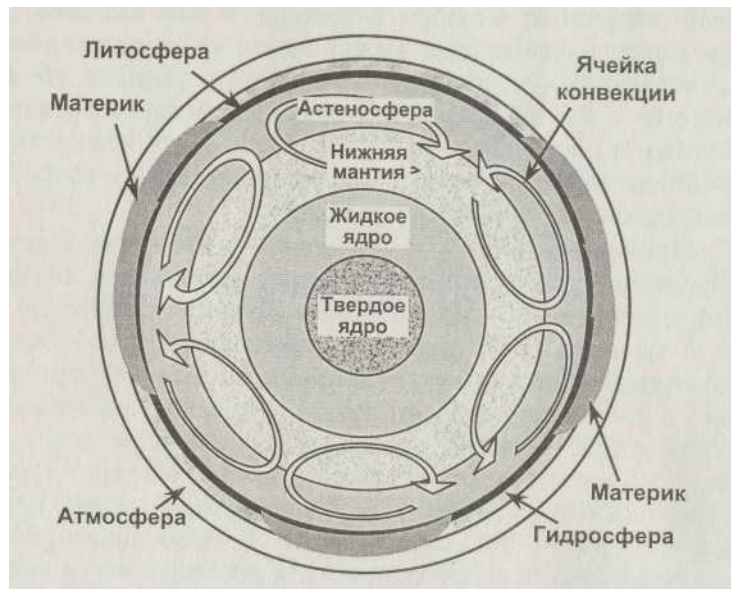


Рис. 3.1. Схема строения Земли по современным взглядам. Относительные размеры не соблюдены

вается в твёрдом состоянии благодаря гигантскому давлению. Радиус твёрдого ядра — около 1300 км. Вокруг него, на глубине от 3 до 5 тысяч км располагается жидкое ядро. Мантия простирается от твёрдой поверхности Земли до глубины 3000 км и состоит главным образом из силикатов, то есть кислородных соединений кремния и алюминия. Наружная её часть вместе с земной корой на глубинах до 80 км называется литосферой. Под литосферой имеется слой толщиной около 300 км с пониженными жесткостью и вязкостью, называемый астеносферой. В 1912 г. немецкий геофизик Альфред Вегенер (*Wegener*, 1880—1930) показал, что земная кора состоит из отдельных литосферных плит, медленнодвигающихся друг относительно друга («дрейф материков») и как бы «плавающих» поверх астеносферы. Материковая кора существенно отличается от океанической. Первая сложена из менее тяжелых минералов и достигает 75 км в глубину. Океаническая кора гораздо тоньше — порядка 10 км и состоит из тяжелых базальтов.

Первоначально при образовании Земля была холодной, но при дальнейшем сжатии потенциальная энергия тяготения, переходя в тепло, и энергия распада долгоживущих радиоактивных изотопов урана, калия и тория вызвали разогрев её недр. Главный вклад (не менее 70 %) в нагревание был внесён гравитацией. За счёт теплового излучения в космос Земля потеряла за всю свою историю примерно 1/3 накопленного тепла. Благодаря нагреву вещество мантии ведёт себя как жидкость с гигантской вязкостью, в которой развиваются медленные конвективные потоки, образующие замкнутые ячейки (рис. 3.1). Скорости движения этих потоков составляют 1—10 см/год. Внешне эти, чрезвычайно медленные по сравнению с человеческой историей, процессы проявляются в движении на поверхности Земли литосферных плит и материков относительно друг друга и его следствиях — вулканизме и землетрясениях. Литосферные плиты надвигаются друг на друга, и в этих местах растут особо высокие горные цепи, такие как Гималаи или Кордильеры. Посредине океанических плит находятся срединно-океанические хребты — это как раз области восходящих потоков в мантии. Именно здесь происходит наращивание океанической коры, которая Раздвигается потом в горизонтальном направлении, образуя на Дне океанов абиссальные равнины. Атлантический океан, например, зародился примерно 200 млн лет назад и растёт со скоростью 1—2 см/год. Глубоководное Красное море — зародыш но-

вого океана, который образуется по мере того, как Аравийский полуостров дрейфует на север от Африки, вызывая землетрясения в Иране и Средней Азии. Океаническая кора, сталкиваясь с материковыми плитами, заглубляется под них, наращивая их толщину. На линиях этого столкновения возникают гигантские глубоководные океанические желоба шириной в десятки и длиной в сотни и тысячи километров с глубинами более 6 км. Наибольшая глубина (11 020 м) найдена в Марианском желобе на востоке Филиппинского моря.

Энергия трения плит друг об друга выделяется в виде тепла, и жидкая лава, извергаемая континентальными вулканами, не есть материал астеносферы или верхней мантии, а есть результат плавления горных пород за счёт этой энергии.

Новорожденная Земля не имела ни атмосферы, ни гидросферы<sup>3</sup>. В первый период её существования, о котором у нас нет каких-либо прямых данных, вероятно, имел место активный вулканизм с обильным излиянием базальтовой лавы. При этих извержениях образовались первичные атмосфера, океан и земная кора, сходная с современной океанической корой. При дегазации изверженных лав выделялись водяной пар, окиси углерода  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ , метан  $\text{CH}_4$ , азот  $\text{N}_2$  (в небольшом объёме), аммиак  $\text{NH}_3$ , сероводород  $\text{H}_2\text{S}$ , сернистый газ  $\text{SO}_2$ , хлор  $\text{Cl}_2$  и хлористый водород  $\text{HCl}$  (пары соляной кислоты), а также другие газы в относительно малых количествах. Первичная атмосфера была тонкой и почти не препятствовала потере тепла, поэтому средняя температура на Земле не превышала 5 °C. Благодаря этому водяной пар конденсировался, превращаясь в воду и образуя гидросферу. При этом аммиак, хлористый водород, соединения серы и углекислый газ обильно растворялись в формировавшемся океане. В результате реакций этих веществ с материалом дна образовывались соли, и таким образом мировой океан изначально становился солёным. Рост объёма мирового океана за счёт вулканизма продолжается и до сих пор.

Лабораторные исследования показали, что в этом тёплом океане могло происходить множество химических реакций, ведущих к образованию аминокислот — «кирпичиков», из которых строятся белки, и других органических соединений. Эта эпоха

<sup>3</sup> Возможно кратковременное существование газовой оболочки, состоявшей в основном из лёгких газов — водорода и гелия, но эта оболочка быстро улетучивалась в окружающий космос и навсегда терялась Землёй.

(зона) «химической эволюции» продолжалась примерно миллиард лет и получила название *катархея*. С конца катархея начинается история биосферы, основные события которой показаны на рис. 3.2. Вероятно, важнейшим этапом химической эволюции явилось появление в начале зона *архея* веществ, способных к автокаталитическому синтезу, то есть молекул, способствующих появлению собственных копий. Скорее всего, это происходило путём деления материнской молекулы на дочерние и последующей достройки этих дочерних молекул. Среди этих органических молекул уже происходил естественный отбор на выживаемость, который привёл к образованию конгломератов, состоявших из молекул с разными функциями. Так или примерно так возникли первые живые организмы около 4 млрд лет назад.

В первичных атмосфере и гидросфере кислород полностью отсутствовал. И это — очень важное обстоятельство. С одной стороны, в присутствии кислорода — мощнейшего окислителя органические молекулы не могли существовать, так как они почти мгновенно превратились бы в воду и углекислый газ. С другой стороны, тонкая бескислородная атмосфера не защищала поверхность Земли от жёсткого ультрафиолетового излучения Солнца, губительного для органического вещества. Поэтому жизнь возникла в океане, под защитой толщи воды. Примерно 3,5 млрд лет тому назад появляются первые одноклеточные организмы, владеющие фотосинтезом, — синезелёные водоросли и бактерии. С этого момента живое вещество становится геохимическим фактором, сильнейшим образом влияющим на облик Земли. Освоившие фотосинтез организмы-продуценты непосредственно используют солнечную энергию, они захватывают мировой океан и в громадных количествах начинают выделять кислород. Наличие в гидросфере растворённого свободного кислорода создаёт возможность для появления организмов, живущих за счёт окисления органических и неорганических веществ. Часть этих организмов становится редуцентами, разлагающими аммиак с выделением молекулярного азота  $\text{N}_2$ , который, будучи практически нерастворим в воде, поступает в атмосферу. Через некоторое время выделяется группа организмов-консументов, потребляющих готовую органику продуцентов. Здесь разделяются биологические царства. Продуценты не нуждаются в свободном движении, и от них происходит царство растений, а консументы должны иметь возможность двигаться в поисках пищи, и от них берёт начало царство животных.

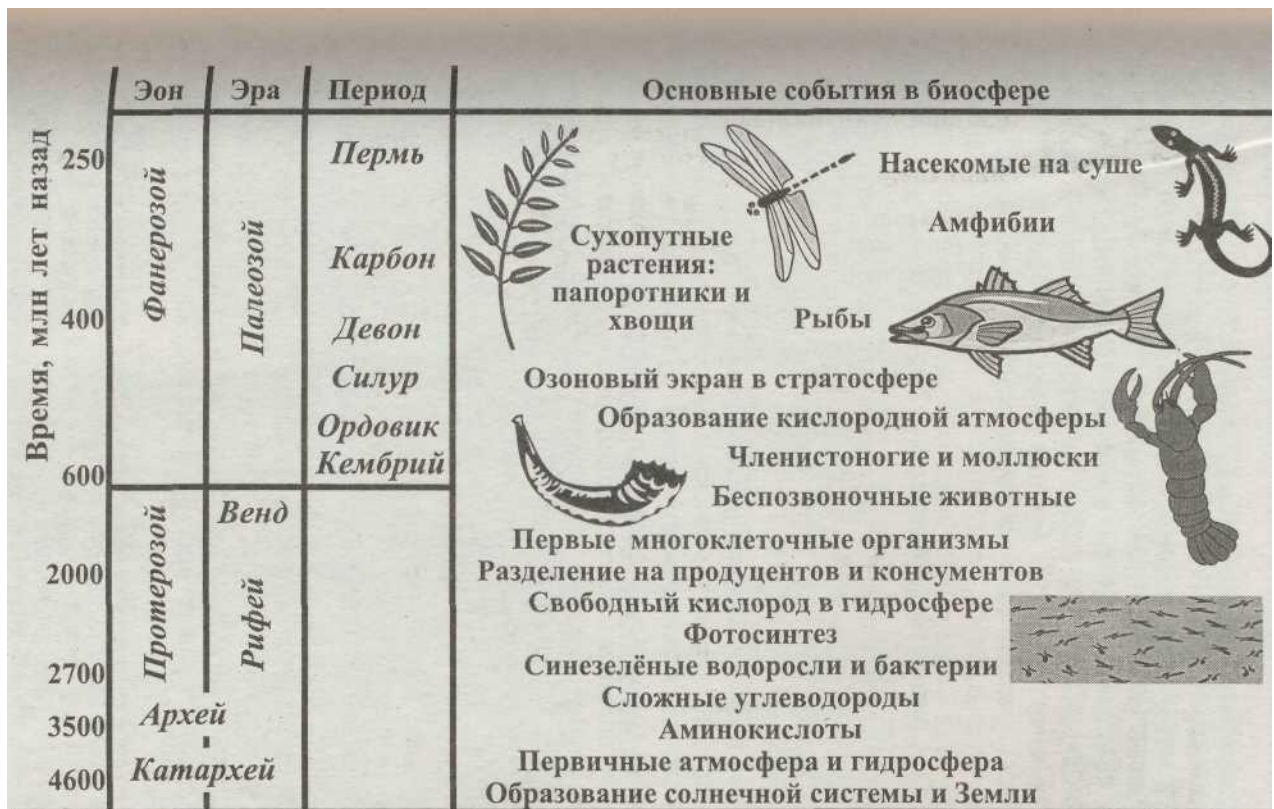
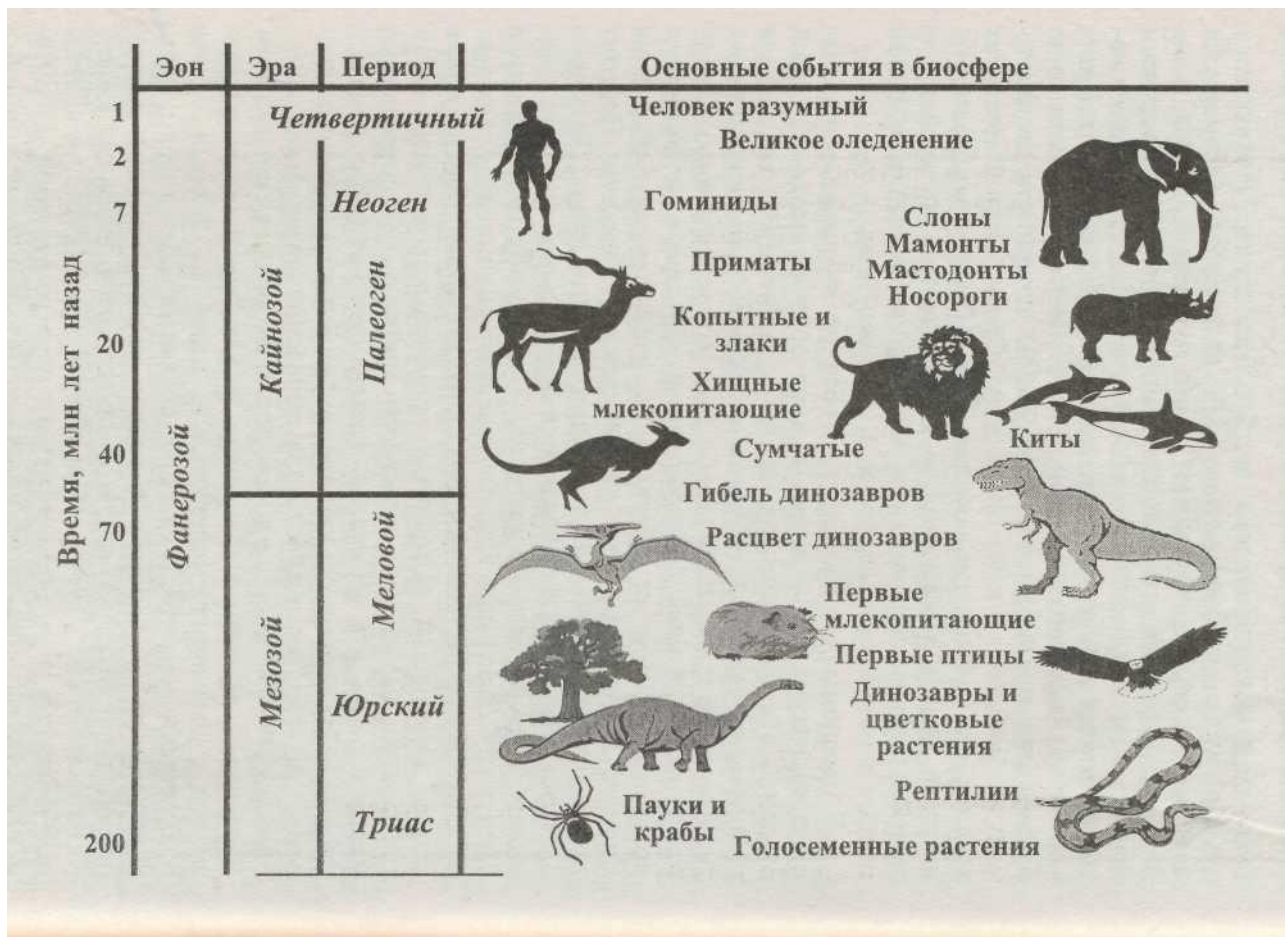
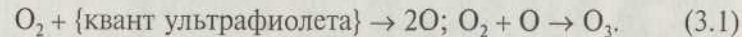


Рис. 3.2. Хронология биосферы

Благодаря метаболизму живых организмов океана на протяжении *протерозоя* происходит постепенная смена первичной атмосферы на вторичную, состав которой близок к современному. Уменьшаются концентрации аммиака и углекислого газа, их сменяют свободные азот и кислород. Свободный кислород окисляет CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S и SO<sub>2</sub>, и их концентрации в атмосфере становятся ничтожными. В верхних слоях атмосферы молекулы кислорода O, расщепляются и образуют озон O<sub>3</sub> согласно реакциям:



Озоновый слой начинает перехватывать жёсткое ультрафиолетовое излучение Солнца, и у живой материи появляется возможность выхода на сушу. Это и происходит примерно 500 миллионов лет назад<sup>6</sup>.

К этому времени жизнь в океане буквально кипит. Уже появились многочисленные моллюски и ракообразные, прибрежная зона заросла гигантскими водорослями, и, наконец, уже существуют первые хордовые, от которых произойдут все позвоночные. Переход от внешнего скелета (панциря) к внутреннему носил принципиальный характер. Ослабление пассивной защиты компенсировалось усилением подвижности и ловкости; кроме того, исчезла необходимость в периодической полной линьке при росте организма, что дало большую экономию дефицитных строительных веществ. Рост подвижности привёл к необходимости иметь хорошее устройство управления, то есть к появлению и развитию головного мозга<sup>7</sup>. Первыми сушу стали осваивать растения и насекомые, появились двоякодышащие рыбы, способные жить и на воздухе, и в воде, от которых, по-видимому, произошли земноводные (*амфибии*). В *девоне* суша полностью заселяется, и видообразование происходит всё ускоряющимися темпами. Через 200 млн лет на Земле уже господствуют динозавры — потомки первых пресмыкающихся. Как и почему они

<sup>6</sup> Судя по всему, в *протерозое* одновременно росли и плотность атмосферы, и содержание кислорода. И то, и другое резко увеличило её способность защищать поверхность Земли от метеоритного дождя, что также немаловажно.

<sup>7</sup> Головоногие моллюски, осьминоги и кальмары, вовсе отказались от скелета, что привело к интенсивному развитию совершенной нервной системы и мозга и соответственно высоких «умственных способностей», за которые они получили прозвище «приматы моря».

практически полностью погибли 70 млн лет назад, до сих пор идут споры. Остаётся непонятным, почему катастрофа, постигшая динозавров, не отразилась столь же существенно на остальной биоте? Так или иначе, господство в животном царстве на суше захватили теплокровные млекопитающие, а в растительном — цветковые растения, и биосфера стала приобретать современный вид.

Важнейший вывод, который можно сделать, прослеживая историю биосферы и анализируя её современный элементный состав, состоит в том, что живые организмы влияют на абиотические условия на Земле в такой же степени, как эти условия влияют на биоту. И, следовательно, биосфера представляет собой единую динамическую систему из живых организмов и абиотической среды их обитания, пронизанную глубокими обратными связями, изменения в которой происходят в/Ходе общей эволюции — биологической, химической и физической.

### 3.2. Потоки энергии в биосфере

Существование биосферы основано на непрерывном движении вещества и информации внутри живых организмов и между организмами и окружающей их средой. Это движение требует энергии, и каждый организм и биосфера в целом работают как тепловые машины. При этом они, естественно, подчиняются основным законам (началам) термодинамики.

Первое начало термодинамики, или закон сохранения энергии, гласит, что «энергия инвариантна по отношению к любым процессам». Это означает, что энергия может переходить из одной формы в другую, но её суммарное количество остаётся постоянным. Например, свет может перейти в тепло или в потенциальную химическую энергию, запасённую в органическом веществе растения в процессе фотосинтеза, но общее количество энергии при этом останется тем же<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Строго говоря, во Вселенной постоянной остаётся сумма энергии и массы, так как масса превращается в лучистую энергию при ядерных реакциях, например, в недрах Солнца и других звёзд или в атомном реакторе. Вместе с тем энергичный квант излучения может превратиться в пару материальных частиц электрон — позитрон. Впрочем, в биосфере подобные превращения не происходят.



Второй закон (начало) термодинамики гласит, что в изолированной системе при любых превращениях энергии часть её рассеивается и становится недоступной для дальнейших превращений в пределах данной системы. Если речь идёт о тепловой энергии, то рассеянная энергия переходит в хаотическое движение частиц окружающей материи (например, в тепловое движение молекул). В частности, тепло может быть передано от более холодного тела к более тёплому только с затратой механической или иной не тепловой энергии, которая при этом будет рассеяна (другая формулировка второго начала). Таким образом, любые процессы, связанные с превращениями энергии, ведут к переходу части энергии в энергию хаоса в системе.

Мерой хаотичности, или неупорядоченности, изолированной системы служит величина, названная *энтропией*. В любой изолированной системе идут процессы рассеяния энергии внутри системы, и, следовательно, энтропия растёт (третья формулировка второго начала). Когда энтропия изолированной системы достигает максимума, температура во всей системе выравнивается, процессы в ней замирают, остаётся только хаотическое движение, и систему настигает «тепловая смерть»<sup>9</sup>. Из второго начала следует, что для возникновения и роста в системе упорядоченных структур требуется поступление извне концентрированной энергии, которой соответствует температура выше температуры хаотического движения в системе. Часть поступающей энергии пойдёт на увеличение внутренней потенциальной энергии этих структур, а часть — рассеется в виде хаотического движения в остальной системе, вне упорядоченных структур (рис. 3.3). Энергия этого хаотического движения соответствует наиболее низкой температуре в системе и не может быть использована в пределах системы. Структурно упорядоченная часть системы сбрасывает образующуюся в ней энтропию вовне вместе с рассеянной энергией.

В биосфере продуценты непосредственно используют концентрированную энергию солнечного света и 1/10 часть энергии захваченных фотонов преобразуют в потенциальную химическую энергию фотосинтезированного живого вещества, а 9/10 расходуют на испарение влаги и собственный обмен веществ, и

<sup>9</sup> Можно рассматривать второе начало термодинамики и как выражение того обстоятельства, что любая система стремится к состоянию устойчивого равновесия, при котором энтропия системы достигает абсолютного максимума.

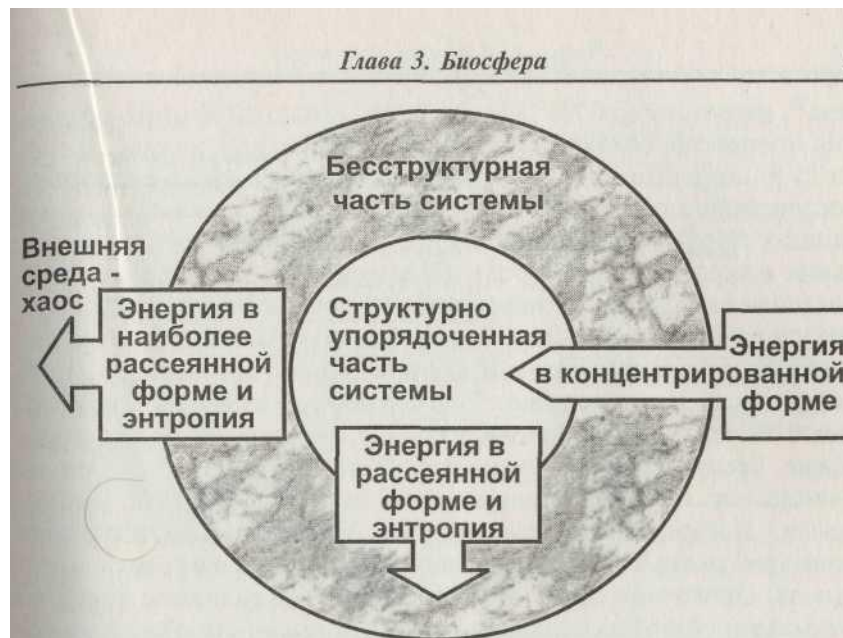


Рис. 3.3. Потoki энергии и энтропии в «двухступенчатой» открытой термодинамической системе

эти 9/10 рассеиваются в виде низкотемпературного тепла. Консументы, сапрофаги и детритофаги расходуют химическую энергию, полученную с пищей, примерно в тех же пропорциях. Это правило «10 %» впервые было установлено Р. Л. Линдеманом (Lindeman, 1916—1942), и оно, в сущности, означает, что в конце концов вся полученная экосистемой энергия рассеивается в виде низкотемпературного тепла. Таким образом, эффективность (или «коэффициент полезного действия» организмов как тепловых машин) примерно одинакова на всех трофических уровнях и составляет около 10 %.

На рис. 3.4 показаны потоки энергии в тепловой машине Земли. На внешнюю область атмосферы падает поток солнечного излучения  $S_0$ , равный  $1396 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$  или примерно  $1/3 \text{ ккал} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  (солнечная постоянная). Этот поток пересекается диском Земли площадью  $\pi R^2$ , где  $R$  — радиус Земли, но распределяется по всей поверхности Земли  $4\pi R^2$  (см. рис. 2.1). Поэтому поток солнечной энергии, перпендикулярный поверхности Земли, в среднем составляет только  $349 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ . Он имеет спектр длин электромагнитных волн, соответствующий излучению абсолютно чёрного

тела<sup>10</sup>, нагретого до 6000 °К (рис. 3.5)<sup>11</sup>. Около 30 % этого излучения отражается облаками и атмосферой обратно в космос, и около 15 % поглощается в атмосфере. Помимо облаков в рассеянии, поглощении и отражении солнечной радиации велика роль мельчайших твёрдых *аэрозольных* частиц<sup>12</sup> с размерами меньше нескольких микрон (микрометров). Примерно 3 % радиации Солнца поглощается озоном и кислородом озонового слоя атмосферы — это ультрафиолетовая часть солнечного излучения, и 12 % захватывается углекислым газом (CO<sub>2</sub>) и водяным паром (рис. 3.5). На поверхность Земли попадает 55 % солнечного излучения, из которых 5 % отражается обратно в космос, не задерживаясь в атмосфере. Всего непосредственно отражается в космос 35 %. Эта величина есть средняя отражательная способность, или *альбедо*, Земли. Поглощённая поверхностью Земли энергия составляет примерно половину радиации, попадающей в верхние слои атмосферы. Около половины этой поглощённой радиации (энергии *инсоляции*) уходит на испарение воды с поверхности океанов и образование облаков, а вторая половина — на собственно нагрев поверхности. И только малая доля — примерно 1,5 % захватывается растениями и непосредственно используется для поддержания жизни.

Помимо солнечной радиации поверхность Земли подогревается потоком тепла, поступающим из недр Земли, но этот поток пренебрежимо мал по сравнению с потоком радиации Солнца.

<sup>10</sup> Абсолютно чёрное тело — тело, поглощающее всё излучение, попадающее на его поверхность. При этом такое тело обладает и наибольшей способностью к излучению при данной температуре. Пример абсолютно чёрного тела — отверстие печи: попавшие в него лучи не могут выйти обратно, но у горячей печи из него идёт максимальный поток излучения.

<sup>11</sup> Здесь и далее расчёты температур основаны на законе Стефана — Больцмана, согласно которому интенсивность излучения с поверхности абсолютно чёрного тела  $E = \sigma T^4$ , где  $\sigma$  — постоянная Больцмана, равная  $5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт · м<sup>-2</sup> · К<sup>4</sup>, и  $T$  — абсолютная температура в градусах Кельвина, К. Длины электромагнитных волн  $\lambda_{\max}$ , соответствующие максимумам спектров излучения, определяются законом Вина  $\lambda_{\max} [\text{мкм}] = 2897/T$ .

<sup>12</sup> Основным источником атмосферных аэрозольных частиц является океан. При обрушении волн образуются микроскопические капельки солёной воды, которые быстро высыхают, образуют частицы солей и рассеиваются атмосферными вихрями в толще атмосферы. Немалую роль играют и выбросы вулканического пепла, ветровая эрозия (выветривание открытых почв), большие лесные пожары и, наконец, промышленные и технологические выбросы.

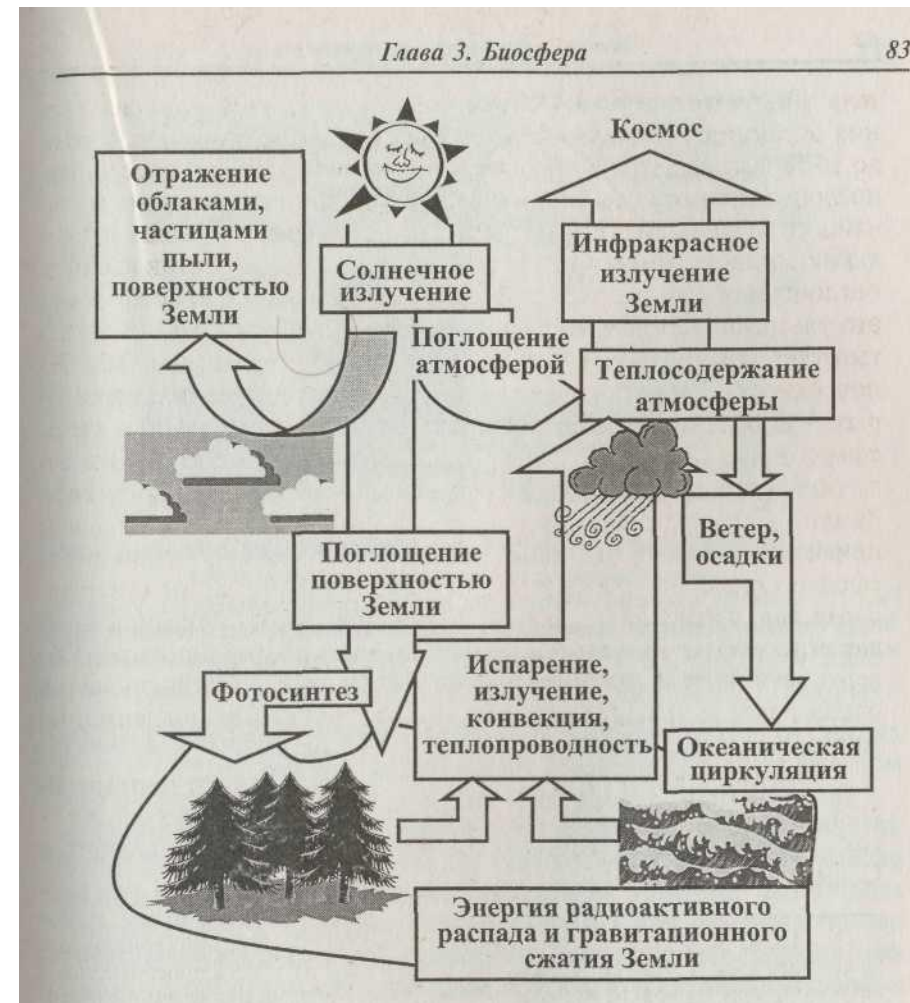


Рис. 3.4. Тепловая машина атмосфера — Земля. Поверхность Земли является главным источником нагрева и циркуляции атмосферы, хотя сама получает почти всю энергию от Солнца. Вклад радиоактивности и гравитационного сжатия Земли в общий баланс энергии ничтожен

Разными путями поглощённая поверхностью энергия радиации возвращается в атмосферу (рис. 3.4). Накопленная облаками теплота испарения попадает в воздух при образовании осадков, а энергия нагрева передаётся атмосфере через конвективные потоки тепла, инфракрасное излучение поверхности и, в очень небольшой доле, через теплопроводность. Энергия теплосодержания атмосферы расходуется на образование атмосферной цирку-

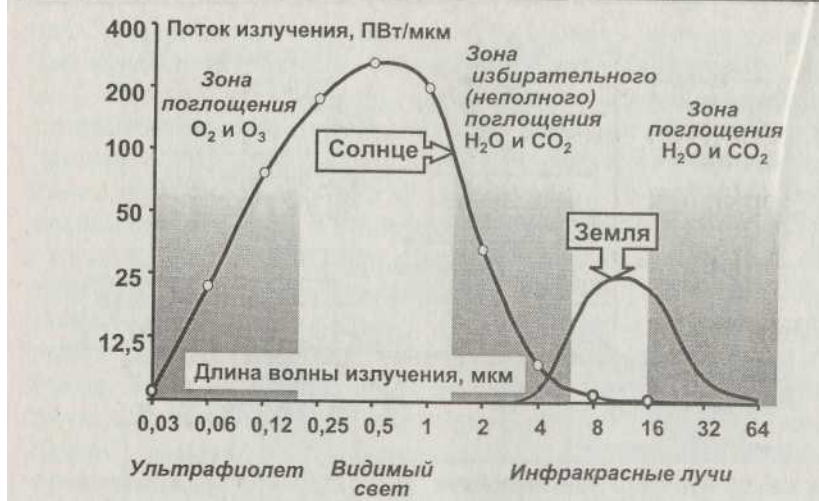


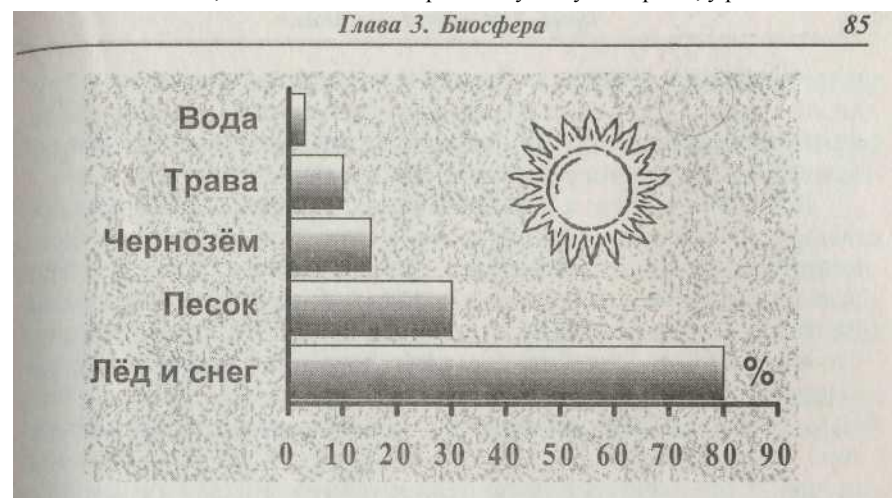
Рис. 3.5. Спектры излучения Солнца (на верхней кромке атмосферы Земли) и Земли. Затемнены области спектров, где происходит поглощение излучения указанными на рисунке атмосферными газами. Мощностъ излучения выражена в петаваттах на мкм длины волны; 1 ПВт (петаватт) =  $10^{15}$  Вт

ляции, то есть преобразуется в кинетическую энергию ветров и морских волн и далее через трение снова в тепло.

Водяной пар, углекислый газ и отчасти метан  $\text{CH}_4$  и некоторые другие атмосферные примеси перехватывают инфракрасное излучение как Солнца, так и Земли (рис. 3.5). Эти атмосферные примеси действуют подобно прозрачной крыше парника, раскинутого над Землёй, пропуская к Земле коротковолновую часть спектра и задерживая у Земли длинноволновое тепловое излучение. Отсюда и их название — *парниковые газы*. Возникающий благодаря ним *парниковый эффект* играет важнейшую роль в тепловом балансе Земли.

Так как в среднем температура Земли не меняется, Земля должна излучать в космос из верхней атмосферы столько же энергии, сколько получает от Солнца и других, не столь значимых, источников. Спектр длин электромагнитных волн, излучаемых в космос верхней атмосферой Земли, соответствует излучению абсолютно чёрного тела с температурой около 250 °К. Если бы не было парникового эффекта, то и температура Земли упала бы до 250 °К (то есть до -23 °С), и жизнь на Земле вряд ли была бы возможна, по крайней мере в её нынешних формах. Однако уходящее излучение поверхности Земли, продвигаясь вверх,

Рис. 3.6. Альbedo, или способность отражать лучистую энергию, у различных



типов поверхности. Указан % отражаемой энергии

многократно поглощается и переизлучается парниковыми газами (в том числе в обратном направлении), и на каждом уровне температура и уходящий поток энергии снижаются. Поэтому средняя температура поверхности Земли удерживается на уровне 288 °К (15 °С), и спектр её излучения соответствует этой температуре (рис. 3.5).

Весьма вероятно, что переходы от периодов потепления на Земле к ледниковым периодам и обратно тесно связаны с колебаниями концентраций парниковых газов и пылевых — аэрозольных частиц в атмосфере. Важную роль в этих процессах играют отличия в альbedo различных типов поверхности. Из рис. 3.6 ясно, что рост площади ледников и отчасти песчаных пустынь ведёт к росту альbedo Земли в целом, тогда как увеличение гаоЩади океана и растительности — к его (альbedo) уменьшению.

Парниковые газы «согревают» Землю, аэрозольные частицы, отражая обратно в космос солнечное излучение, её «остужают». В периоды временного усиления вулканической деятельности °Держание частиц в атмосфере резко растёт, поэтому средняя температура на Земле начинает падать. При этом растут ледники ° прежде всего полярные шапки Земли возле её полюсов. Рост Полярных шапок и сокращение площади океана увеличивают ^ьbedo Земли, что ускоряет процесс охлаждения. Одновременно Уменьшается испарение с поверхности океана, поэтому падают °Держание водяного пара в воздухе и облачность. Это приводит

к уменьшению альбедо, то есть росту нагрева поверхности Земли, и в какой-то момент процесс начинает идти в обратном направлении, пока вся система тепловой машины Земли не вернётся в состояние, близкое к исходному.

Возможен толчок и в обратном направлении, если какой-либо фактор приведёт к потеплению. Таким фактором может быть, например, антропогенный рост концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере вследствие сжигания человеком огромных количеств ископаемого топлива — нефти, угля и природного газа. Из рис. 3.5 видно, что именно  $\text{CO}_2$  в наибольшей мере препятствует тепловому излучению Земли в космос. Наблюдаемый рост концентрации  $\text{CO}_2$ , составляющий примерно 0,3 % в год, приводит к уменьшению альбедо Земли. Соответственно будет расти средняя температура. Если начнётся интенсивное таяние полярных шапок и гренландского ледника, то скорость уменьшения альбедо ещё более возрастёт и соответственно ещё более возрастёт средняя температура на Земле. Этому процессу отчасти противостоят растворение избытка  $\text{CO}_2$  в океане и поглощение его растительностью, но их может оказаться недостаточно. Такое развитие событий может привести ко многим крайне нежелательным последствиям, которые будут обсуждаться в главе четвёртой.

### 3.3. Вода, кислород и углерод в биосфере

Благодаря энергии гравитационного сжатия Земли и непрерывному поступлению солнечной энергии стало возможным образование упорядоченной структуры оболочек Земли и их глубокое разделение по элементному составу (рис. 3.7). Исследователь из соседней галактики, получивший образцы вещества из этих оболочек, сначала решит, что они взяты из разных миров.

Вещество биосферы — «живой оболочки Земли» состоит почти исключительно из углерода, водорода и кислорода (более 98 %) с небольшой примесью азота, кальция, калия, магния, кремния, фосфора и серы, которые наш воображаемый исследователь сначала вполне мог счесть за случайное загрязнение пробы. Скорее всего, он решил бы, что имеет дело с формальдегидом ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) и его полимерами. При более подробном исследовании он сделает вывод, что имеет дело с веществом, состав которого приближенно определяется формулой  $\text{H}_{2960}\text{O}_{1480}\text{C}_{1480}\text{N}_{16}\text{P}_2\text{S}$ .

Состав литосферы совсем иной, углерода и водорода в ней сравнительно немного, а господствуют алюмосиликаты, то есть соединения типа  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  или  $\text{CaAl}_2\text{Si}_4\text{O}_{12}$ , где калий и кальций могут быть заменены другими щелочными или щелочноземельными металлами или железом.

Гидросфера — царство воды  $\text{H}_2\text{O}$ , в которой содержится примерно 3,5 % растворённых солей, диссоциированных на положительные ионы  $\text{Na}^+$  (77 % всех катионов),  $\text{K}^+$  (1,7 %),  $\text{Mg}^{2+}$  (18 %) и  $\text{Ca}^{2+}$  (3,3 %) и отрицательные ионы  $\text{Cl}^-$  (90,3 % всех анионов),  $\text{SO}_4^{2-}$  (9,3 %) и  $\text{HCO}_3^-$  (0,4 %).

Наконец, атмосфера — это смесь азота (77 %), кислорода (21 %), водяного пара (около 1 %), аргона (0,93 %) и углекислого газа (менее 0,05 %) с очень малой примесью других газов.

Узнав, что все пробы взяты из тесно взаимодействующих между собой оболочек одной планеты, исследователь обратил бы внимание, что ближе всего к составу биосферы материал гидросферы. Отсюда он сделал бы правильный вывод, что именно вода была той средой, где зародилось вещество биосферы. Ему также стало бы ясно, что только очень длительные процессы, связанные с огромными затратами постоянно приходящей извне энергии, могли привести к наблюдаемому накоплению углерода в биосфере, так как его содержание в веществе остальных оболочек несопоставимо мало. Эти процессы действительно происходят, и обусловлены они взаимосвязанными круговоротами основных компонентов биосферы: воды, кислорода и углерода (рис. 3.8).

Вся вода (1,5 млрд  $\text{км}^3$ ) проходит цикл расщепления при фотосинтезе примерно за 2 млн лет. В этом цикле участвует ничтожная часть всей воды, вовлечённой в геофизический круговорот воды в природе, показанный на рис. 3.9, при котором вода не подвергается биохимическому расщеплению при фотосинтезе, а только испаряется с поверхности и выпадает в виде осадков. Общая масса воды на Земле составляет примерно  $1,5 \cdot 10^{18}$  тонн. Молекулы воды, попавшие в верхние слои атмосферы, частично расщепляются солнечным коротковолновым излучением на кислород и водород. Тяготения Земли не хватает, чтобы удержать лёгкий водород, и он рассеивается в космосе. Ювенильные («молодые») воды поступают из вулканов и гейзеров и компенсируют эту диссипацию (рассеяние) водорода из верхней атмосферы. Возможно также, что утечка водорода в космос частично компенсируется «протонным дождём», исходящим от Солнца.

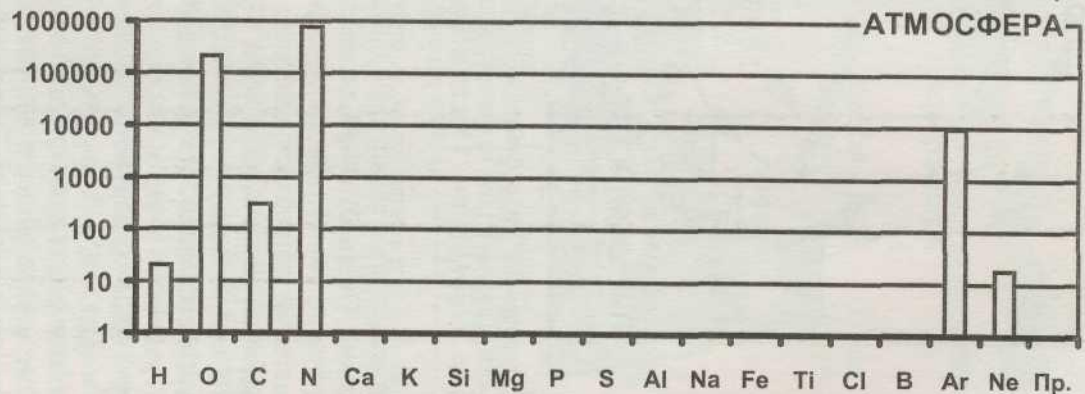
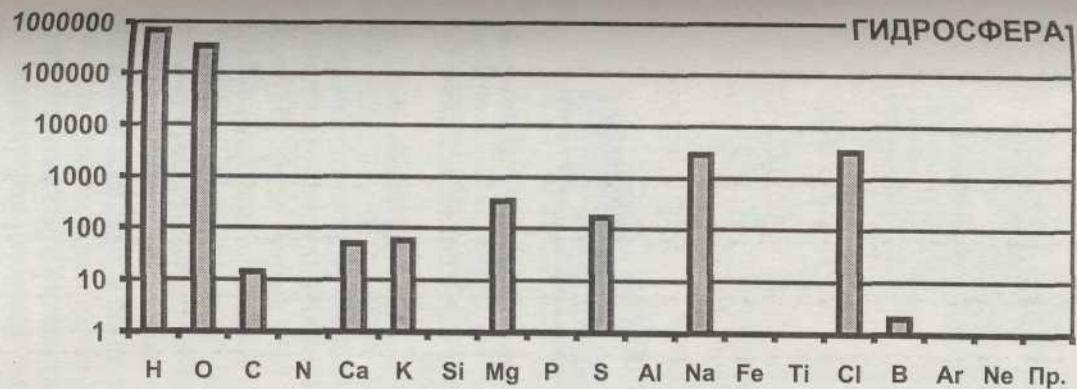
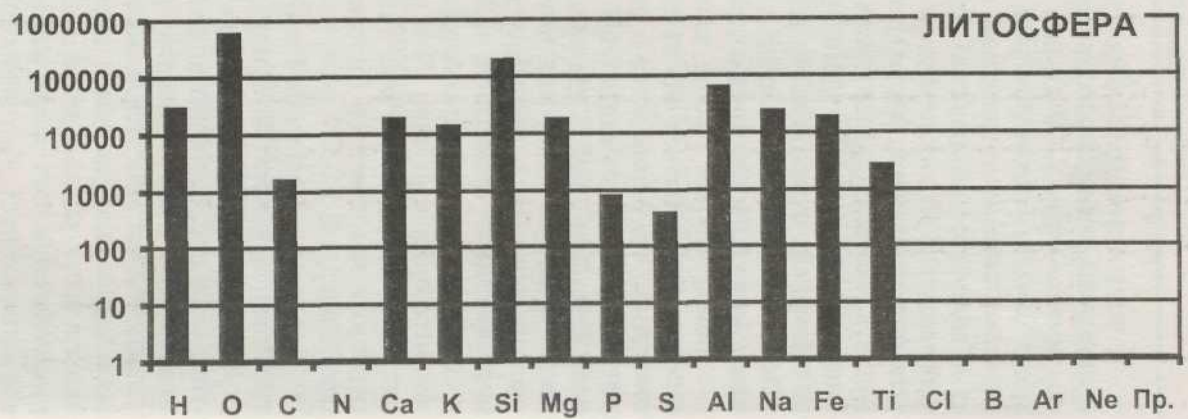
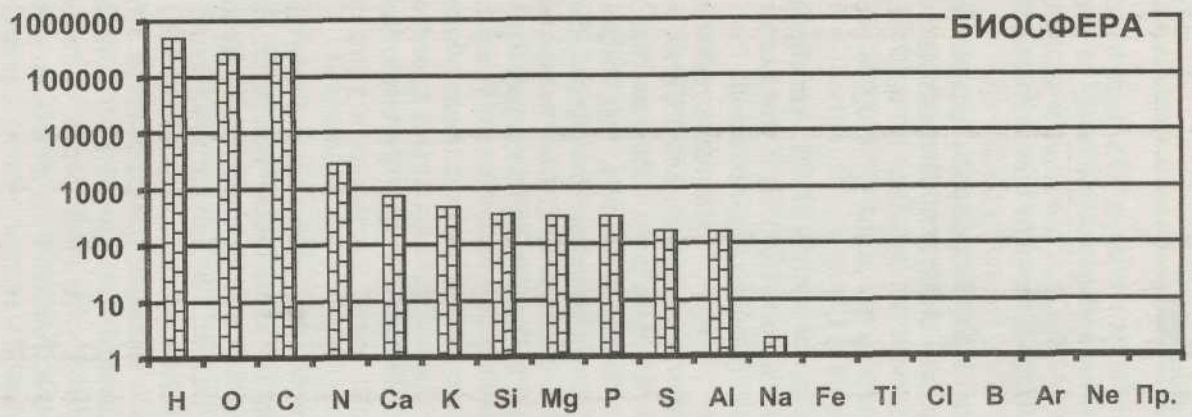


Рис. 3.7. Относительное содержание элементов в наружных оболочках Земли. Столбики на диаграммах соответствуют количеству атомов элементов на миллион атомов вещества данной оболочки

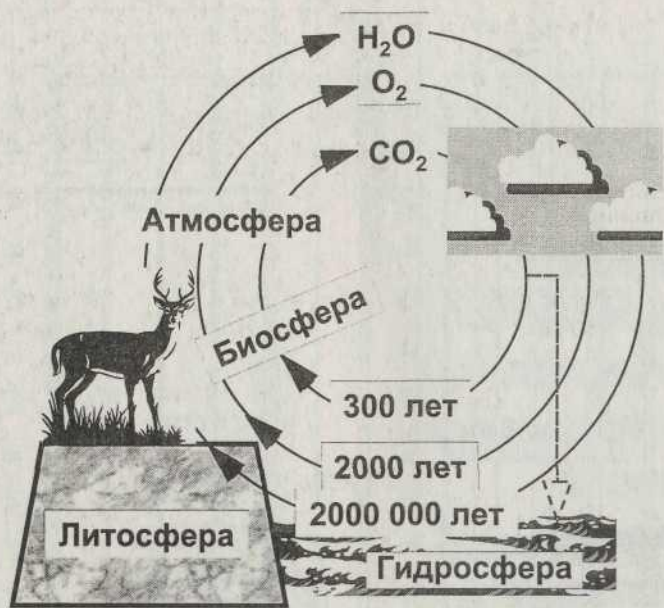


Рис. 3.8. Упрощенная схема биосферного круговорота воды, кислорода и углекислого газа. Геофизический круговорот воды, при котором она не участвует в фотосинтезе, показан на рис. 3.9 и происходит примерно за 2000 лет, то есть в 1000 раз быстрее

Только сравнительно небольшая часть воды, усваиваемой растениями (и животными) подвергается химическому расщеплению (рис. 3.10). Чтобы произвести 10 кг биомассы, большинство растений потребляет примерно 1000 литров воды. Из этой, пропущенной через корни, воды 991 литр идёт на испарение с поверхности листьев, что необходимо растению в первую очередь для охлаждения. Из оставшихся 10 литров 7,5 остаются в тканях растения в виде химически свободной воды, и только 1,5 литра воды подвергаются расщеплению в процессе фотосинтеза и вместе с  $\text{CO}_2$  и выделенными из раствора минеральными веществами формируют собственно органические ткани (так называемое «сухое вещество»). Именно энергия, затраченная на расщепление этой воды, оказывается запасена в тканях растения и может использоваться в пищевой сети экосистемы.

Круговорот кислорода непосредственно связан с круговоротом воды и других веществ, прежде всего углерода (рис. 3.11). Весь кислород воздуха проходит через живое вещество за 2000 лет

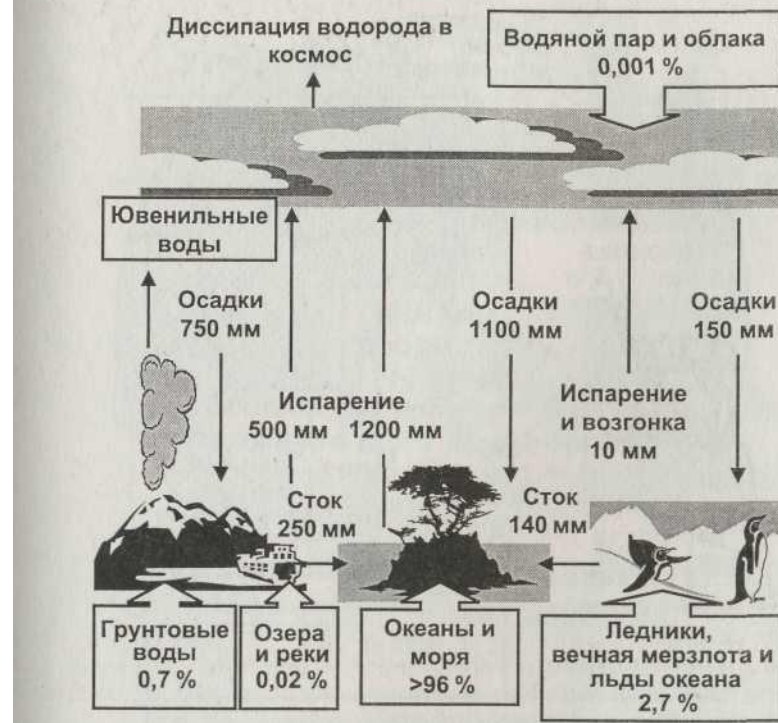


Рис. 3.9. Геофизический круговорот воды на Земле. Указано распределение воды между основными резервуарами в процентах и основные среднегодовые потоки в мм слоя воды, равномерно распределенного по поверхности резервуара-источника или приёмника. Все приведённые численные оценки приблизительны

и представляет собой, в конечном счёте, кислород воды, расщеплённой растениями в процессе фотосинтеза или, в малой доле, жестким солнечным излучением в верхней атмосфере. Баланс кислорода в атмосфере поддерживается за счёт дыхания, окисления горных пород и процессов горения при лесных и степных пожарах и сжигании топлива человеком. Небольшая часть кислорода, истраченного в этих процессах на образование  $\text{CO}_2$ , попадает в океан и оседает на дно в составе известняковых отложений вместе с  $\text{CaCO}_3$ . Кислород участвует в химических превращениях и формировании потоков всех существенных элементов в биосфере, в том числе серы и фосфора, однако только малая доля потоков самого кислорода вовлекается в эти реакции. Поэтому они не оказывают существенного влияния на его собст-

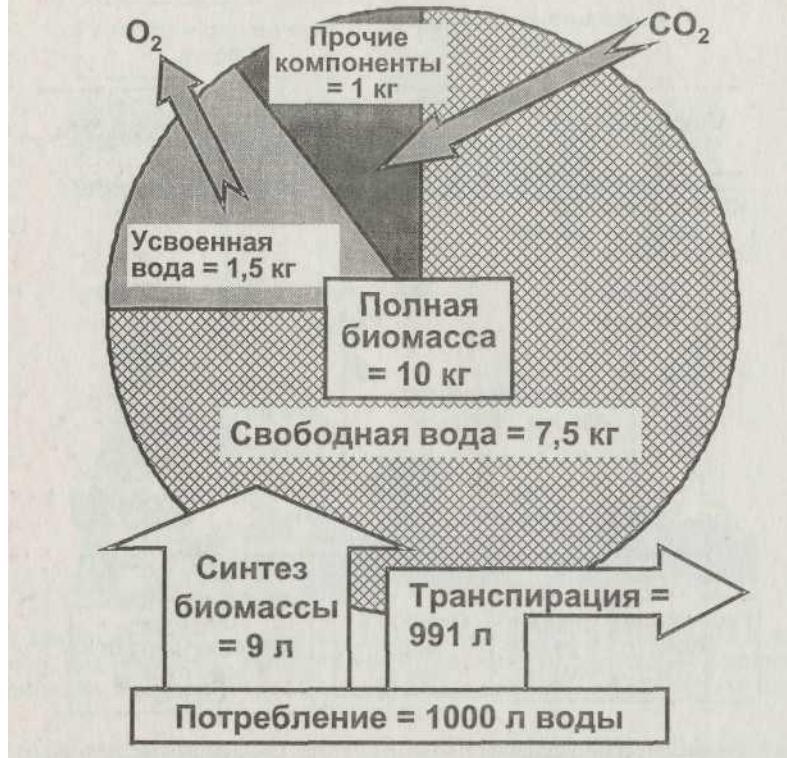


Рис. 3.10. Типичный водный баланс растений. Основная часть воды, взятой корнями растения из почвы, идёт на транспирацию, то есть испаряется с поверхности листьев при дыхании

венный круговорот. Помимо формирования химической структуры биосферы кислород играет важнейшую роль в защите жизни от жёсткого ультрафиолетового излучения Солнца (см. рис. 3.5 и реакции (3.1)).

Круговорот углерода — главного элемента, из которого строятся каркасы всех органических молекул, показан на рис. 3.12. Диоксид углерода выдыхается животными и растениями и вновь вовлекается в фотосинтез за 300 лет. Он хорошо растворяется в воде, и часть его образует при этом слабую угольную кислоту, которая диссоциирует на ионы водорода  $H^+$ , гидрокарбонат-ион  $HCO_3^-$  и карбонат-ион  $CO_3^{2-}$ . Концентрации  $CO_2$  в воздухе и в водном растворе в принципе должны находиться в равновесии, однако часть диоксида углерода фиксируется водными организмами и

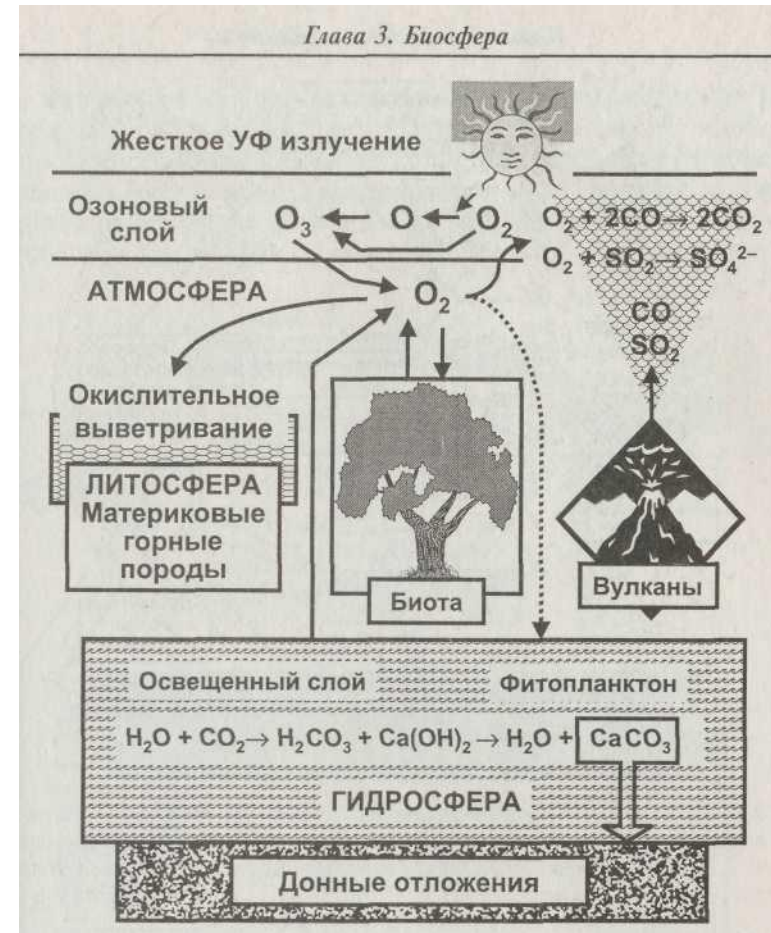


Рис. 3.11. Основные потоки кислорода на Земле

осаждается на дно в виде известняков (карбонат кальция  $CaCO_3$ ). Поэтому существует сдвиг в сторону поглощения  $CO_2$  океаном. Углерод известняковых отложений может вернуться в атмосферу при медленном растворении дождями через десятки миллионов лет, если известковые породы окажутся на суше. Таким образом океан способен регулировать атмосферную концентрацию углекислого газа. Внимательно присмотревшись к оценкам потоков Углерода на рис. 3.12, можно заметить, что потоки, поступающие в атмосферу, слегка отличаются от потоков, идущих из атмосферы. Именно этот небольшой разбаланс, возникающий из-за сжигания горючих ископаемых, и ведёт к накоплению  $CO_2$  в атмосфере и росту парникового эффекта.

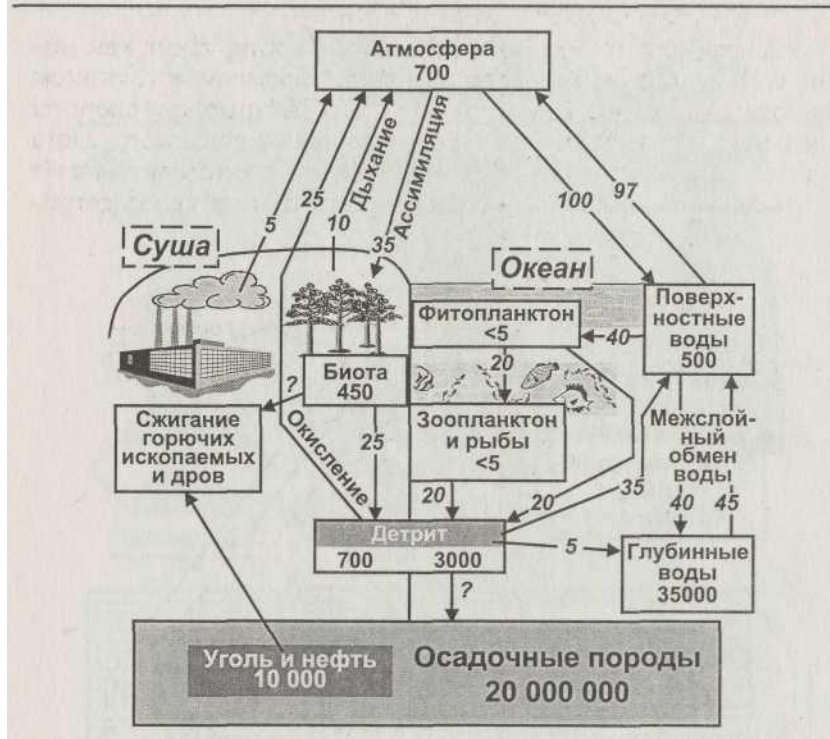


Рис. 3.12. Круговорот углерода в биосфере. Содержание углерода в резервуарах дано в млрд тонн (прямой шрифт), интенсивность потоков между резервуарами в млрд тонн в год (курсив)

### 3.4. Азот в биосфере

Азот — обязательный компонент аминокислот и, следовательно, всего живого вещества. Пути превращений азота в биосфере чрезвычайно запутаны (рис. 3.13). Свободный атмосферный азот трудно вступает в реакции, поэтому большинство живых организмов нуждается в получении азота в химически связанном состоянии. Химически связанный азот поглощается корнями растений в растворенном состоянии, прежде всего в виде нитратов и нитритов аммония, щелочных и щелочноземельных металлов, например, в виде  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$  (селитры) и  $\text{NH}_4\text{NO}_2$ ,  $\text{KNO}_2$ ,  $\text{NaNO}_2$ . Эти соли образуются в почвах и воде в результате разложения детрита — органических остатков расте-

ний и животных и отходов их жизнедеятельности, таких как мочевина  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  и навоз. Детрит служит основным источником фиксированного азота. Так образуются его быстрые круговороты в отдельных экосистемах, однако часть фиксированного азота выводится из этих круговоротов. На суше это происходит за счёт того, что легко растворимые соединения азота и материал детри-

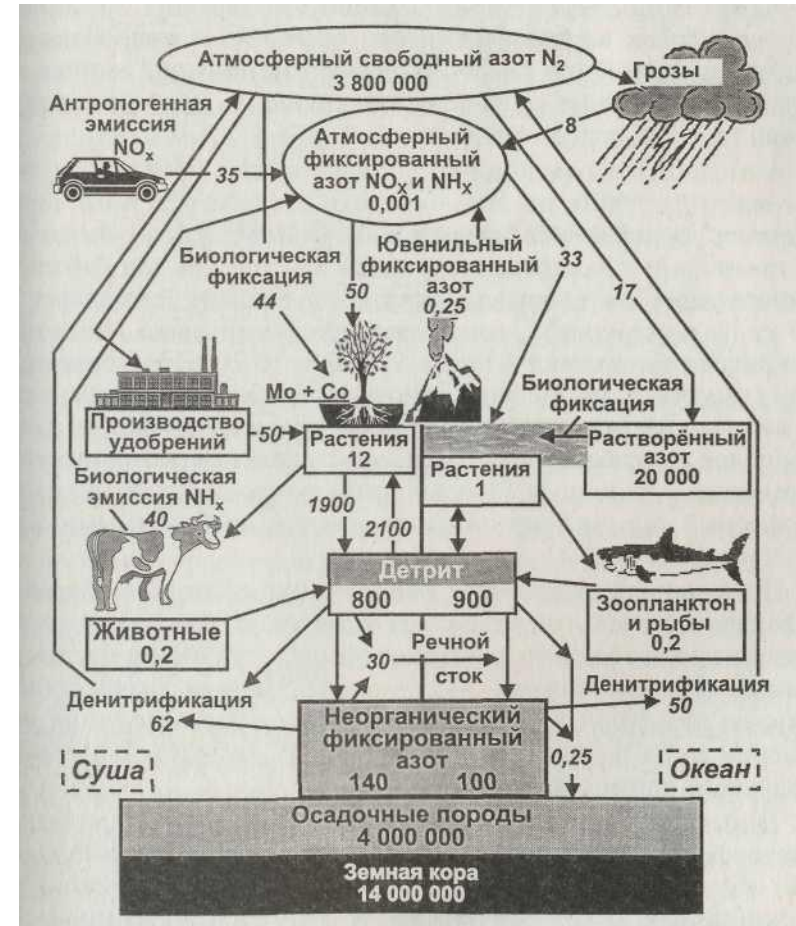


Рис. 3.13. Круговорот азота в биосфере. Содержание азота в резервуарах дано в млрд тонн (прямой шрифт), интенсивность потоков между резервуарами в млн тонн в год (курсив). Все цифры суть очень грубые приблизительные оценки (кроме содержания свободного азота в атмосфере). Окисленная и восстановленная формы связанного азота обозначены соответственно как  $\text{NO}_x$  и  $\text{NH}_x$



та вымываются из почв и вместе с речным стоком уходят в океан. Там они попадают в круговорот морских экосистем, откуда медленно выводятся на дно, в осадочные породы. Эта постоянная убыль должна компенсироваться, что и происходит за счёт деятельности множества микроорганизмов, способных фиксировать свободный азот («биологическая фиксация» на рис. 3.13).

Азотфиксирующие микроорганизмы делятся на две группы: живущие самостоятельно и симбионты высших растений, причём степень взаимозависимости растений и микроорганизмов может быть самой различной. Свободноживущие азотфиксаторы, — синезелёные водоросли и бактерии, — непосредственно используют солнечную энергию.

Азотфиксаторы-симбионты сосуществуют с небольшим числом видов растений, но это — широко распространенные виды, например, ольха и бобовые растения. Они являются основными поставщиками фиксированного азота на суше. Выход фиксированного азота на площадях, занятых бобовыми, составляет до 350 кг на гектар за год, тогда как свободноживущие почвенные азотфиксаторы не дают больше 15—30 кг. В системах болотного типа, например, на заливных рисовых полях синезелёные водоросли оказываются хорошим источником фиксированного азота. Молибден и кобальт являются необходимыми компонентами ферментов, с помощью которых азотфиксаторы захватывают атмосферный  $N_2$ , поэтому они оказываются необходимыми микроэлементами почвы.

Деятельность азотфиксирующих организмов биосферы за миллиарды лет её существования неизбежно привела бы к исчезновению свободного азота атмосферы, если бы не многочисленные микроорганизмы — *денитрификаторы*, извлекающие энергию для своей жизнедеятельности за счёт разложения соединений азота и выделения свободного  $N_2$ , в конце концов попадающего в атмосферу.

Некоторое количество связанного азота всегда присутствует в атмосфере в виде газообразного аммиака  $NH_3$  и нитратных солей, образующих аэрозольные частицы. В природе источниками этих примесей являются гроззовые разряды, в которых при очень высоких температурах окисляется свободный азот, и вулканы. Кроме того, аммиак, являющийся продуктом жизнедеятельности многих организмов, испаряется с поверхности Земли. Все эти соединения возвращаются на поверхность при вымывании до-

ждями или поглощаются поверхностью снова при соприкосновении (сухое осаждение).

Цивилизация существенно усилила поступление связанного азота в биосферу. При высокотемпературных процессах сгорания топлива на электростанциях и в транспортных двигателях азот воздуха окисляется и в виде окислов попадает в атмосферу. Производство и использование азотных удобрений достигло огромных масштабов. В результате антропогенные потоки связанного азота стали примерно равны природным. Уже сейчас это приводит к серьёзным локальным и региональным последствиям. Какие изменения это может вызвать в биосфере в целом, предсказать очень трудно.

### 3.5. Фосфор и сера в биосфере

Фосфор и сера, хотя и содержатся в живом веществе в малых количествах, но являются совершенно необходимыми его компонентами.

Фосфор не входит в состав белка, но является важнейшим компонентом молекул *аденозиндифосфата* (АДФ) и *аденозинтрифосфата* (АТФ). Во всех клеточных организмах усвоение энергии происходит благодаря реакциям, в которых АТФ переходит в АДФ и обратно, высвобождая энергию, содержащуюся в питательных веществах. В сравнительно больших количествах фосфор входит в состав костей, зубов и других твёрдых тканей животных. Наконец, фосфор является непременным компонентом *дезоксирибонуклеиновой кислоты ДНК* — носителя наследственной информации.

Из шести основных элементов живого вещества фосфор, вероятно, самый дефицитный (рис. 3.7). Он практически отсутствует в атмосфере и гидросфере вне организмов и органических остатков. Круговорот фосфора замыкается между отложениями на материках и дне водоёмов и живыми организмами (рис. 3.14, верхний рисунок). Растворимые соединения фосфора усваиваются растениями и так попадают в пищевые сети биоты. Отмершие остатки и продукты жизнедеятельности живых организмов попадают в почву или растворяются в воде, снова становясь доступными для растений. Однако некоторая часть фосфора оказывается захороненной на дне водоёмов суши и океана в донных отложениях и осадочных породах. Этот фосфор имеет возмож-

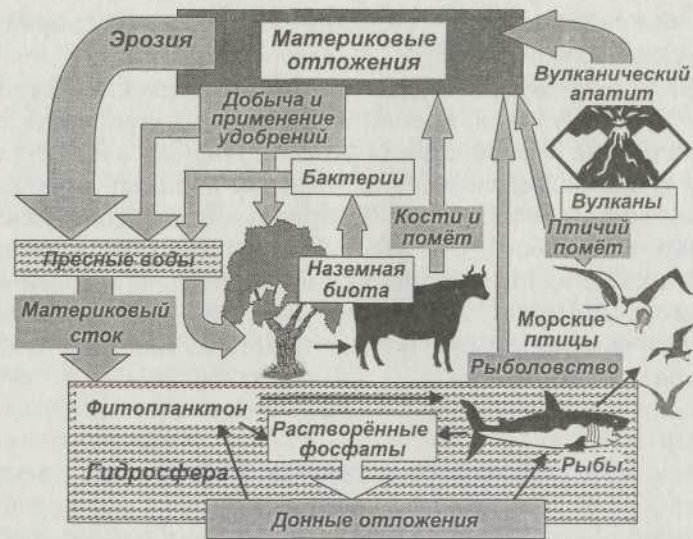


Рис. 3.14. Поток фосфора (вверху) и серы (внизу) в биосфере

ность вернуться на поверхность Земли только через миллионы лет в результате тектонических движений земной коры.

Убыль фосфора из биосферы пополняется за счет литосферного фосфора при вулканической деятельности, а его распространение по поверхности Земли связано с эрозией материковых отложений и стоком материковых вод в океан и морскими течениями. Вынос фосфора в океан компенсируется отчасти обратными потоками с моря на континенты. Особая роль принадле-

жит морским птицам, оставляющим груды своего помёта на суше. Эти многолетние отложения служили долго единственным источником фосфорных удобрений. Вылавливая и потребляя огромное количество рыбы и морепродуктов, человек также способствует возвращению на сушу приблизительно 100 тыс. тонн фосфора ежегодно.

Вовлечение фосфора в биосферный круговорот резко увеличилось в XX веке за счёт добычи и применения фосфорных удобрений, мировое годовое производство которых составляет около 2 млн тонн. В конечном счёте, это приводит к попаданию огромного количества избыточного фосфора в водоёмы — от мелких озёр до океана в целом — и способствует их *эвтрофикации*. Вопрос заключается в том, нужно ли природе и человечеству в такое количество синезелёных водорослей?

Атомы серы служат звеньями, связывающими друг с другом полипептидные цепи аминокислот, из которых строятся молекулы белков. Сера обеспечивает упорядоченность пространственной конфигурации белка подобно тому, как сварные швы соединяют стальные балки в ажурные конструкции железнодорожных мостов или Эйфелевой башни в Париже и Шуховской башни в Москве. Без этих серных связей молекулы белков превратились бы в беспорядочные клубки и не могли бы функционировать.

Круговорот серы в биосфере показан на рис. 3.14 внизу. Сера в отличие от фосфора в значительном количестве присутствует в океане в окисленном виде в составе сульфат-иона  $SO_4^{2-}$ . *Серобактерии* в океане, почве и болотах восстанавливают её из окисленного состояния и выделяют в атмосферу газообразный сероводород  $H_2S$ . Сероводород сравнительно быстро, за время порядка нескольких минут или десятков минут, окисляется в воздухе с образованием сернистого газа  $SO_2$ . Дополнительными природными источниками сероводорода и сернистого газа являются вулканы, горячие источники и гейзеры. Сернистый газ хорошо растворяется в облачной воде с образованием сернистой кислоты  $H_2SO_3$ , которая в свою очередь быстро окисляется и превращается в серную кислоту. Поэтому, попав в облака, где всегда присутствуют аммиак, щелочные или щелочноземельные металлы, сера быстро переходит снова в сульфатную форму и вместе с дождём или снегом выпадает из облаков на землю.

При высыхании облачных капель и брызг, образующихся при обрушении морских волн, в атмосфере остаются сульфатные частицы с размерами 0,01 — 10 микрометров. Эти частицы прак-

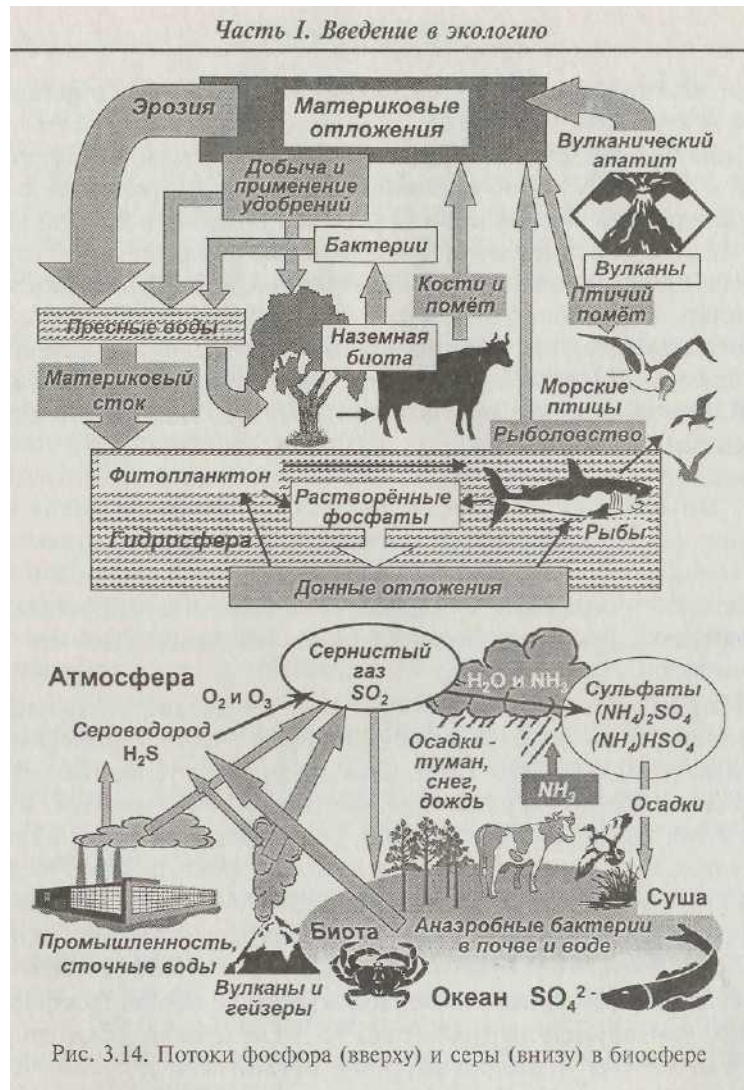


Рис. 3.14. Поток фосфора (вверху) и серы (внизу) в биосфере

ность вернуться на поверхность Земли только через миллионы лет в результате тектонических движений земной коры.

Убыль фосфора из биосферы пополняется за счет литосферного фосфора при вулканической деятельности, а его распространение по поверхности Земли связано с эрозией материковых отложений и стоком материковых вод в океан и морскими течениями. Вынос фосфора в океан компенсируется отчасти обратными потоками с моря на континенты. Особая роль принадле-

жит морским птицам, оставляющим груды своего помёта на суше. Эти многолетние отложения служили долго единственным источником фосфорных удобрений. Вылавливая и потребляя огромное количество рыбы и морепродуктов, человек также способствует возвращению на сушу приблизительно 100 тыс. тонн фосфора ежегодно.

Вовлечение фосфора в биосферный круговорот резко увеличилось в XX веке за счёт добычи и применения фосфорных удобрений, мировое годовое производство которых составляет около 2 млн тонн. В конечном счёте, это приводит к попаданию огромного количества избыточного фосфора в водоёмы — от мелких озёр до океана в целом — и способствует их *эвтрофикации*. Вопрос заключается в том, нужно ли природе и человечеству такое количество синезелёных водорослей?

Атомы серы служат звеньями, связывающими друг с другом полипептидные цепи аминокислот, из которых строятся молекулы белков. Сера обеспечивает упорядоченность пространственной конфигурации белка подобно тому, как сварные швы соединяют стальные балки в ажурные конструкции железнодорожных мостов или Эйфелевой башни в Париже и Шуховской башни в Москве. Без этих серных связок молекулы белков превратились бы в беспорядочные клубки и не могли бы функционировать.

Круговорот серы в биосфере показан на рис. 3.14 внизу. Сера в отличие от фосфора в значительном количестве присутствует в океане в окисленном виде в составе сульфат-иона SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. *Серобактерии* в океане, почве и болотах восстанавливают её из окисленного состояния и выделяют в атмосферу газообразный сероводород H<sub>2</sub>S. Сероводород сравнительно быстро, за время порядка нескольких минут или десятков минут, окисляется в воздухе с образованием сернистого газа SO<sub>2</sub>. Дополнительными природными источниками сероводорода и сернистого газа являются вулканы, горячие источники и гейзеры. Сернистый газ хорошо растворяется в облачной воде с образованием сернистой кислоты H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, которая в свою очередь быстро окисляется и превращается в серную кислоту. Поэтому, попав в облака, где всегда присутствуют аммиак, щелочные или щелочноземельные металлы, сера быстро переходит снова в сульфатную форму и вместе с дождём или снегом выпадает из облаков на землю.

При высыхании облачных капель и брызг, образующихся при обрушении морских волн, в атмосфере остаются сульфатные частицы с размерами 0,01 — 10 микрон. Эти частицы прак-

тически невесомы и могут реять в воздухе очень долго, переносимые ветрами на огромные расстояния. Рано или поздно они вымываются осадками или осаждаются на землю, будучи вынесены к её поверхности турбулентными потоками воздуха. Такая же судьба постигает и молекулы сернистого газа, не успевшие превратиться в сульфаты. Попав на поверхность, сернистый газ реагирует с её материалом и также превращается в сульфаты.

Органическое топливо — уголь и нефть — содержит много, от 0,5 до 5 %, серы. Поэтому при его переработке и сжигании в атмосферу выбрасываются огромные объёмы сернистого газа, концентрации которого во многих регионах многократно превосходят естественный уровень, что вызывает закисление дождей, почв и водоёмов с тяжёлыми последствиями для многих биогеоценозов.

### 3.6. Потоки информации в биосфере

Потоки энергии и вещества в биосфере неразрывно связаны с потоками информации. Возможно, что способность воспринимать, накапливать и использовать информацию является одной из главных особенностей живого вещества. Эта способность неразрывно связана с построением упорядоченных структур, то есть со способностью живой природы, используя поступающую извне энергию, уменьшать свою энтропию<sup>13</sup>.

Благодаря биологической эволюции живые организмы выработали множество механизмов *адаптации*, то есть приспособления к условиям жизни. Более того, само строение и физиология организмов есть результат адаптации. Первое, чему должны были научиться живые организмы, — это различать в окружающей среде молекулы и частицы, пригодные в пищу, от инертных или опасных. Так возникли *хемотрецепторы*, сохраненные у растений и высших животных в виде вкуса и обоняния. Это уже информационная связь организма с внешним миром. Как только образовалась живая клетка и в ней специализированные орга-

<sup>13</sup> Чем сложнее упорядоченная структура системы, тем больше данных требуется для её описания, то есть больше её информационное содержание. Одним из выдающихся достижений науки XX века можно считать понимание, что энтропия, взятая со знаком минус, характеризует количество информации, содержащейся в системе.

неллы, потребовался обмен информацией между ними. Первоначально обмен веществ и энергией внутри клетки являлся одновременно и обменом информационными сигналами. Однако нуклеиновые кислоты (ДНК и информационная РНК) стали выполнять преимущественно информационные функции. По мере усложнения органических структур появились гормоны и гормоноподобные вещества с их чисто информационно-командными функциями. Специализированные железы внутренней секреции, генерирующие эти вещества, образовали эндокринную систему управления организмом. Мольные концентрации гормонов в живом организме ничтожны — они находятся в пределах  $1(\Gamma^2—10^9$ , но их оказывается достаточно для управления важнейшими внутренними процессами.

С увеличением размеров животные уже не могли обходиться только химическими информационными связями. Слишком медленными оказываются процессы передачи информации. Так появилась нервная система, использующая быстрые электрические сигналы, и новые органы чувств (*рецепторы*) — зрение и слух, дающие информацию об окружающей среде на больших расстояниях и практически мгновенно. Увеличение количества и качественные изменения поступающей извне информации, а также необходимость согласованных движений всех органов тела привели к образованию центральной нервной системы. При этом железы внутренней секреции, занимающие наивысшее положение в эндокринной системе — *гипоталамус* и *гипофиз*, расположились в головном мозге (скорее мозг возник вокруг них) и обеспечивают согласование действий нервной и эндокринной систем.

Вероятно, ещё до образования нервной системы появились механизмы информационных связей между отдельными особями в популяции. Первоначально это были химические информационные связи, которые широко используются и высшими животными. Специализированными органами таких связей являются *экзокринные железы*, выделяющие во внешнюю среду *феромоны* — вещества, несущие информацию к другим особям данного вида. К настоящему времени широко изучены феромонные связи у многих видов насекомых, особенно общественных — пчёл, муравьёв, саранчи. Чувствительность обоняния к этим веществам поразительна. По-видимому, в некоторых случаях переносчиком сигнала оказываются единичные молекулы. Существуют феромоны немедленного действия, влияющие непосредственно на нервную систему. Это феромоны тревоги или опасности, фе-

ромоны — указатели пути к пище, феромоны — аттрактанты («привлекатели»), действующие в периоды спаривания и размножения. Другие феромоны воздействуют через эндокринную систему и вызывают физиологические изменения в организме. Таким образом регулируется рост молодых особей в стаях саранчи, регулируется состав колоний пчёл, муравьёв и термитов (когда нужно, в колонии появляются рабочие особи, особи — солдаты или матки — царицы колоний). Существуют явные доказательства того, что феромоны есть и у млекопитающих, в том числе и у человека. Возможно, что именно с феромонами связаны мгновенно и «интуитивно» возникающие чувства симпатии или антипатии между людьми.

Огромная чувствительность свойственна не только обонятельным рецепторам. У многих видов развита предельно допустимая чувствительность зрения и слуха. Например, глаза кошки или совы реагируют на одиночные кванты света, а острота слуха у многих животных ограничивается молекулярными шумами.

С развитием нервной системы у животных появилась способность обмена зрительными и звуковыми сигналами, а следом за тем и способность к обучению потомства. Эта последняя способность неразрывно связана с появлением головного мозга и свободной, незаполненной изначально памяти. Накопленная живым организмом информация разделилась на врождённую, переданную химическим путём от предков, и приобретённую, полученную сигнальным путём за счёт обучения и собственного опыта.

Важнейшим свойством живого вещества, принципиально отличающим его от косной материи, является передача наследственной информации из поколения в поколение. Эта связь осуществляется с помощью генетического кода, носителями которого служат нуклеиновые кислоты.

*Генофонд*, или совокупность всей наследственной информации, накопленной в процессе эволюции, является величайшей ценностью на Земле. К настоящему времени наукой описано более 1,5 млн видов и предполагается, что всего на Земле обитает порядка 10 млн видов.

Принципиальным адаптационным шагом в эволюции оказался переход от вегетативного к половому размножению. Дело в том, что под воздействием внешних факторов, прежде всего радиационного фона, химических веществ и вирусной инфекции, в спиралях дезоксирибонуклеиновой кислоты возникают нару-

шения или *мутации*, то есть наследственная информация может портиться. При вегетативном, бесполом размножении у популяции нет иного способа исправить эти нарушения кроме гибели носителей вредных мутаций. Половое размножение даёт возможность корректировать ошибки, возникшие в генетическом коде, так как вероятность одинаковых нарушений у обоих родителей мала. Именно поэтому опасны браки между кровными родственниками, когда вероятность одинаковых хромосомных дефектов у обоих родителей резко возрастает, и, напротив, потомство отдалённых генетических линий бывает особенно сильным и жизнеспособным.

Среди множества вредных или даже *летальных* (то есть смертельных) мутаций появляется некое число полезных, дающих преимущества организмам-носителям. Так путём проб и ошибок происходит естественный отбор.

При вегетативном размножении говорить об индивидуальном биологическом возрасте особи в принципе бессмысленно. Понятие возраста особи возникает вместе с половым размножением, причём механизм запрограммированного старения появился, скорее всего, на поздних этапах эволюции. Такие древние виды, как крокодилы, черепахи или акулы, ещё этого механизма, по-видимому, не имеют. Они потенциально бессмертны и погибают от болезней, врагов или в силу изменения условий обитания. Запрограммированное старение и смерть от старости — пример адаптационного признака, полезного для вида в целом, но не для отдельного организма. Они обеспечивают смену поколений и отбор генофонда в популяции, позволяющие ей эффективно адаптироваться к постепенным изменениям среды обитания.

## ЧАСТЬ II

# ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

## Глава 4

### Загрязнение окружающей среды и проблема отходов

... Человек, освобождая силы  
Извечных равновесий вещества, Сам  
делается в их руках игрушкой.

*Максимилиан Волошин.  
«Путьями Каина»*

Грязноватая окраска всех предметов, тусклый  
воздух, земля, усыпанная золой и пылью,  
... густые клубы дыма, медленно выползавшие  
из высоких труб и заволакивавшие окрест-  
ность, — всё указывало на быстрое приближе-  
ние к большому фабричному городу...

*Чарльз Диккенс. «Посмертные записки  
Пиквикского клуба»*

#### 4.1. Основные типы загрязняющих веществ и их характеристики

Любая производственная деятельность связана с появлением отходов. «Безотходность» природных циклов — это миф, который опровергается огромными пластами геологических отложений, возникших в результате деятельности живых организмов. Отходы производства, попадая в природную среду, практически всегда изменяют её химический состав или физические свойства и, следовательно, являются загрязняющими веществами.

Ландшафты и экосистемы наиболее заселённых местностей и весь современный облик биосферы сформировались под антропогенным воздействием. К сожалению, предсказать дурные последствия человеческой деятельности обычно можно, но никогда нельзя сказать с уверенностью, что учтены все возможные опасности. Поэтому упомянутые здесь и ниже, в пятой главе, источники загрязнения, опасные вещества и технологии, разрушительные для природных экосистем, — это только наиболее распространённые виды отрицательных антропогенных воздействий на природу. Попытка строго классифицировать эти воздействия — невыполнимая задача, но по характеру условно их можно разделить по преимуществу на физико-химические, биологические и физико-механические.

Примеры физико-химического загрязнения — выбросы в атмосферу и водоёмы загрязняющих веществ (в том числе радиоактивных).

Примеры биологического загрязнения — загрязнение воды и почвы нечистотами, содержащими болезнетворные микроорганизмы, и антропогенная интродукция (внедрение) биологических видов, чужеродных для биоценоза и губительных для его природных обитателей.

Примеры физико-механического загрязнения — засорение атмосферы частицами пыли из-за неправильной распашки земель, ведущей к *эрозии*, то есть разрушению почв, или шумовое загрязнение городской среды.

По времени и степени создаваемого ущерба антропогенные воздействия можно разделить на кратковременные аварии и *перманентные* (постоянные или долговременные) *нагрузки* на экосистемы, длительность которых превышает или сопоставима со временем сукцессии. При этом аварийные нагрузки могут иметь и весьма долговременные последствия. Хотя последствия катастрофических аварий обычно производят наиболее сильное впечатление, основной экологический ущерб приносит перманентное загрязнение окружающей среды.

Химическое загрязнение может носить двоякий характер.

Во-первых, это антропогенное изменение природных циклов имеющихся в природе веществ и сдвиг их биогеохимических циклов и концентраций. Пример: выброс огромных количеств окислов углерода, серы и азота при сжигании ископаемого топлива.

Во-вторых, это распространение в природных средах синтетических веществ, в том числе особо ядовитых, в принципе в природе не существующих (*ксенобиотики*). Примеры: утечки диоксинов<sup>14</sup> и использование ядохимикатов в сельском хозяйстве. Подобные вещества особо опасны тем, что в экосистемах могут отсутствовать механизмы их разложения или консервации, а живые организмы не обладают способностью к их уничтожению при попадании во внутренние органы.

Для загрязняющих веществ вводят нормативы, называемые *предельно допустимыми концентрациями (ПДК)*.

ПДК устанавливаются отдельно по каждой среде. Кроме того, для воздуха ПДК устанавливаются в зависимости от времени воздействия. Под *разовой ПДК* для воздуха обычно понимают концентрацию, допустимую в течение не более 20 минут. *Среднесуточная ПДК* — это концентрация вредного вещества в воздухе *населённых мест*, которая не должна оказывать на человека прямого или косвенного воздействия при неограниченно долгом (годы) вдыхании. Поэтому среднесуточная ПДК есть основной норматив для оценки качества воздуха. В качестве отдельного норматива вводится *ПДК рабочей зоны*. Эту ПДК определяют, учитывая продолжительность рабочего времени, и за соблюдением этой нормы должны следить органы охраны труда. Особо устанавливаются ПДК для продуктов питания.

Согласно природоохранному законодательству Российской Федерации, «нормирование в области охраны окружающей среды осуществляется в целях государственного регулирования воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду, гарантирующего сохранение благоприятной окружающей среды и обеспечение экологической безопасности. Нормирование в области охраны окружающей среды заключается в установлении нормативов качества окружающей среды, нормативов допустимого воздействия на окружающую среду при осуществлении хозяйственной и иной деятельности, иных нормативов в

Наиболее печально известен тетрадибензопарадиоксин, выделяющийся при производстве многих пестицидов и разложении полихлордифенила. Последний широко используется при производстве пластмасс, трансформаторных масел, красок и лаков. Абсолютно смертельная доза диоксина для приматов 70 мкг/кг веса тела (это в 20 раз меньше смертельной дозы цианистого калия!) — 5 мг этого вещества, то есть 1 мм<sup>3</sup>, смертельны для взрослого человека при пероральном отравлении. В малых дозах диоксин — сильный канцероген и мутаген, провоцирует сердечную недостаточность.

области охраны окружающей среды, а также государственных стандартов и иных нормативных документов в области охраны окружающей среды. Нормативы и нормативные документы в области охраны окружающей среды разрабатываются, утверждаются и вводятся в действие на основе современных достижений науки и техники с учетом международных правил и стандартов в области охраны окружающей среды»<sup>15</sup>. Под воздействием здесь подразумевается любая деятельность, вносящая физические, химические или биологические изменения в природную среду.

Первоначально ПДК устанавливались, исходя из «отсутствия практического влияния на здоровье человека». Однако этот критерий оказался слишком неопределённым и недостоверным, так как он не учитывал генетических и долгосрочных последствий воздействия загрязнения. Например, стало ясно, что многие *канцерогены*, то есть вещества, вызывающие рак, опасны при любых концентрациях, а их действие проявляется спустя много лет. В других случаях накопление вещества в пищевых цепях превращает его вполне безопасные для человека концентрации в природной среде в смертельно опасные в пищевых продуктах (см. гл. 5, рис. 5.9). Кроме того, многие вещества, практически безвредные для человека при наблюдаемых концентрациях, наносят громадный ущерб природной среде. Поэтому нормы ПДК постоянно пересматриваются в сторону их уменьшения.

Гипотеза, на которой основывается установление ПДК, состоит в том, что существует *порог вредного действия* как некая доза получаемого организмом вещества, начиная с которой в нём (организме) возникают изменения, выходящие за пределы физиологических и приспособительных реакций, или скрытая (временно компенсированная) патология. Таким образом, пороговая доза вещества (или пороговое действие вообще) — это граница, переход которой вызывает в биологическом объекте негативные изменения, которые не могут быть компенсированы механизмами *гомеостаза* (механизмами поддержания внутреннего равновесия организма).

Для факторов, с которыми биота сталкивалась на протяжении миллионов лет эволюции, эта гипотеза существования порога вредного действия вполне справедлива. Фактически она основана на понятии диапазона толерантности и законе Шел-

<sup>15</sup> Статья 19 Закона РФ №7-ФЗ «Об охране окружающей среды» от 10 января 2002 г. Примерно такие же нормы применяются и в других странах.

форда (см. п. 1.2). Однако, для многих ксенобиотиков пороговой концентрации, по-видимому, не существует. Они опасны в любой концентрации и в этом смысле ничем не лучше, чем возбудители чумы или чёрной оспы. Такие вещества мы обычно называем ядовитыми, и для их характеристики используется понятие *токсичности*. Токсичность есть способность вещества нарушать жизненно важные физиологические функции организма, то есть мера несовместимости вещества с жизнью.

Количественно токсичность определяется *токсической дозой* вещества (отнесенной, как правило, к массе тела животного или человека), вызывающей определенный токсический эффект (*интоксикацию* или отравление). Чем токсическая доза вещества меньше, тем выше его токсичность. Обычно токсичность характеризуют абсолютно *летальной* (смертельной) *дозой*  $DL_{100}$  или *среднесмертельной дозой*  $DL_{50}$ . Здесь цифры в индексе указывают вероятность (в %) гибели подопытного животного. Значения токсических доз зависят от путей поступления вещества в организм.

В табл. 4.1, 4.2 и 4.3 приведены данные о ПДК некоторых распространённых загрязняющих веществ в природных средах<sup>16</sup>, а в табл. 4.2 и данные об их токсичности. Можно видеть, что ПДК для веществ, существующих, пусть в незначительных количествах, в незагрязнённых средах, в сотни и тысячи раз выше, чем ПДК для ксенобиотиков, таких как диоксины, бериллий или «тяжёлые металлы» и их соединения — ртуть, ванадий, кадмий, свинец и т. д. В табл. 4.4 перечислены основные источники загрязняющих веществ и характер их воздействия на здоровье человека и природные объекты.

Как правило, и люди, и природные объекты одновременно подвергаются действию нескольких загрязняющих веществ. Чтобы учесть совместное действие нескольких загрязняющих веществ, рассчитывается общий относительный уровень загрязнения  $S$  как сумма относительных уровней загрязнения по каждому из них:

$$S = \sum S_i = C_1 / \text{ПДК}_1 + C_2 / \text{ПДК}_2 + C_3 / \text{ПДК}_3 + \dots \quad (4.1)$$

где  $C_i$  — фактическая концентрация  $i$ -го вещества, а  $\text{ПДК}_i$  — его

<sup>16</sup> Эти данные, собранные из различных источников, могут незначительно отличаться от норм, принятых в России в настоящее время, и приведены здесь как ориентировочные исключительно с иллюстративной целью.

предельно допустимая концентрация. Нормой считается, если выполняется условие

$$S \leq 1. \quad (4.2)$$

Этот подход предполагает, что загрязняющие вещества действуют независимо друг от друга. Проблема в том, что при одновременном воздействии нескольких веществ возможен *синергетический эффект*, состоящий в том, что совместное действие нескольких веществ больше суммы их воздействий по отдельности. Это означает, что при одновременном присутствии нескольких загрязнителей ПДК по каждому из них должен быть снижен. Однако вопрос о синергетическом действии загрязняющих веществ исследован пока недостаточно, и применяется простая норма (4.2).

Таблица 4.1. ПДК некоторых загрязняющих веществ в воздухе для населённых мест по данным ВОЗ и нормативам РФ (1 пг =  $10^{-12}$  г, 1 нг =  $10^{-9}$  г, 1 мкг =  $10^{-6}$  г)

Вещество	Единица измерения	Разовая ПДК ( $\leq 20$ минут)	Среднесуточная ПДК
Диоксины	пг/м <sup>3</sup>	$\ll 1$	$\ll 1$
Диоксид азота NO <sub>2</sub> (N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	мкг/м <sup>3</sup>	85	40
Оксид азота NO	мкг/м <sup>3</sup>	400	60
Пары азотной кислоты HNO <sub>3</sub>	мкг/м <sup>3</sup>	400	150
Аммиак NH <sub>3</sub>	мкг/м <sup>3</sup>	200	40
Нитрат аммония NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	мкг/м <sup>3</sup>	—	300
Серная кислота H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	мкг/м <sup>3</sup>	300	100
Сероводород H <sub>2</sub> S	мкг/м <sup>3</sup>	8	—
Серы диоксид SO <sub>2</sub>	мкг/м <sup>3</sup>	500	50
Озон O <sub>3</sub>	мкг/м <sup>3</sup>	160	30
Оксид углерода CO (угарный газ)	мкг/м <sup>3</sup>	5000	3000
Синильная кислота HCN	мкг/м <sup>3</sup>	—	10
Белок белково-витаминного концентрата (БВК)	мкг/м <sup>3</sup>	—	1



Продолжение табл. 4.1

Вещество	Единица измерения	Разовая ПДК ( $\leq 20$ минут)	Среднесуточная ПДК
3,4-бенз(а)пирен	нг/м <sup>3</sup>	—	1
Инертные частицы (пыль)	мкг/м <sup>3</sup>	$\leq 500$	150
Бериллий в любых формах	нг/м <sup>3</sup>	—	10
Ванадий и его оксид V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	мкг/м <sup>3</sup>	—	2
Никель в любых формах	мкг/м <sup>3</sup>	—	$\leq 1$
Железо (в окислах)	мкг/м <sup>3</sup>	—	40
Марганец в любых формах	мкг/м <sup>3</sup>	10	$\leq 1$
Ртуть (неорганические формы)	нг/м <sup>3</sup>	—	300
Кадмий в любых формах	нг/м <sup>3</sup>	—	300
Таллий в любых формах	нг/м <sup>3</sup>	—	400
Кобальт в любых формах	мкг/м <sup>3</sup>	—	1
Медь в любых формах	мкг/м <sup>3</sup>	3	$\leq 4$
Свинец (без тетраэтилсвинца)	нг/м <sup>3</sup>	1000	300
Тetraэтилсвинец	нг/м <sup>3</sup>	—	3
Мышьяк (неорганические формы)	мкг/м <sup>3</sup>	—	3
Сурьма в любых формах	мкг/м <sup>3</sup>	—	10
Хром в любых формах	мкг/м <sup>3</sup>	$\leq 1$	$\leq 1$
Цинк в любых формах	мкг/м <sup>3</sup>	—	50
Фенол	мкг/м <sup>3</sup>	10	3
Формальдегид	мкг/м <sup>3</sup>	35	3
Гексахлорциклогексан	мкг/м <sup>3</sup>	30	30
Капролактam (пары, аэрозоль)	мкг/м <sup>3</sup>	60	60
Фтор (в газовой фазе)	мкг/м <sup>3</sup>	20	5
Хлор	мкг/м <sup>3</sup>	100	30
Пары соляной кислоты HCl	мкг/м <sup>3</sup>	200	200

Таблица 4.2. Предельно допустимые концентрации некоторых загрязняющих веществ в питьевой воде по данным ВОЗ и нормативам РФ (содержание в 1 литре воды, 1 пг = 10<sup>-12</sup> г, 1 нг = 10<sup>-9</sup> г, 1 мкг = 10<sup>-6</sup> г, 1 мг = 10<sup>-3</sup> г)\*

Вещество	ПДК	Показатель вредности/класс опасности**
Диоксины, пг/л	20	C/1
Нефтепродукты, мкг/л	100	
Поверхностно-активные вещества (ПАВ), мкг/л	500	
Фенолы, мкг/л	250	
Алюминий (Al <sup>3+</sup> ), мкг/л	500	C/2
Барий (Ba <sup>2+</sup> ), мкг/л	100	C/2
Бериллий (Be <sup>2+</sup> ), нг/л	200	C/1
Бор (В), мкг/л	500	C/2
Железо (Fe), суммарно, мкг/л	300	O/3
Кадмий (Cd), суммарно, мкг/л	1	C/2
Марганец (Mn), суммарно, мкг/л	100	C/3
Медь (Cu <sup>2+</sup> ), мг/л	1	C/3
Молибден (Mo), суммарно, мкг/л	250	C/2
Мышьяк (As), суммарно, мкг/л	50	C/2
Никель (Ni), суммарно, мкг/л	100	C/3
Ртуть (Hg), неорганические формы, нг/л	500	C/1
Свинец (Pb), суммарно, мкг/л	30	C/2
Селен (Se), суммарно, мкг/л	10	C/2
Хром (Cr <sup>6+</sup> ), мкг/л	50	C/3
Цинк (Zn), суммарно, мг/л	5	O/3
Нитраты (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), мг/л	45	O/3
Сульфаты (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ), мг/л	500	O/4
Фториды (F <sup>-</sup> ), мкг/л	700	C/2

Продолжение табл. 4.2

Вещество	ПДК	Показатель вредности/ класс опасности**
Хлориды (Cl <sup>-</sup> ), мг/л	350	O/4
Цианиды (CN <sup>-</sup> ), мкг/л	35	C/2
Линдан, мкг/л	2	C/1
ДДТ (сумма изомеров), мкг/л	2	C/2

\* ПДК для рыбохозяйственных водоёмов устанавливается ниже ПДК для питьевой воды в 2–10 раз, так как учитывается возможность накопления ядовитых веществ в пищевых цепочках человека (см. гл. 5, рис. 5.9).

\*\* Показатели вредности:  
«С» – санитарно-токсикологический, то есть установленный, исходя из содержания микроорганизмов или токсичности;  
«О» – органолептический, то есть установленный по прозрачности, цвету, наличию запаха, вкусу и жёсткости.  
Класс опасности определяется по 50%-й летальной (смертельной) дозе DL<sub>50</sub>, выраженной в мг на 1 кг массы тела:  
15 ≥ DL<sub>50</sub> – «1» (чрезвычайно опасное вещество), 150 ≥ DL<sub>50</sub> ≥ 15 – «2» (высокоопасное вещество),  
5000 ≥ DL<sub>50</sub> ≥ 150 – «3» (умеренно опасное вещество), DL<sub>50</sub> ≥ 5000 – «4» (малоопасное вещество).

Таблица 4.3. Предельно допустимые концентрации некоторых загрязняющих веществ в почвах по данным ВОЗ и нормативам РФ (содержание в 1 кг сухо-воздушной почвы, 1 нг = 10<sup>-9</sup> г, 1 мкг = 10<sup>-6</sup> г, 1 мг = 10<sup>-3</sup> г)

Вещество или смесь	ПДК	Лимитирующий показатель
Диоксины, нг/кг	≤ 5	Воздушная миграция
Атразин, мкг/кг	500	Переход в растения
Бензол, мкг/кг	300	Воздушная миграция
Бенз(а)пирен, мкг/кг	20	Воздушная миграция
ГХЦГ (линдан и гексахлоран), ДДТ, мкг/кг	100	Переход в растения
ГХВД (гексахлорбугадиен), мкг/кг	500	Переход в растения
Гептахлор, 2,4-дихлорфенол, мкг/кг	50	Переход в растения
Диурон, изопропилбензол, мкг/кг	500	Транслокация
Карбофос, мкг/кг	2	Переход в растения
Кельтан и линурон, мкг/кг	1	Переход в растения
Марганец, суммарно, мкг/кг	1	Санитарный
Ванадий, мкг/кг	100	Санитарный
Медь, мкг/кг	3	Санитарный

Продолжение табл. 4.3

Вещество или смесь	ПДК	Лимитирующий показатель
Метатион, мг/кг	1	Транслокация
Метафос, мкг/кг	100	Переход в растения
Монурон, мкг/кг	300	Транслокация
Мышьяк, мг/кг	2	Переход в растения
Никель, мг/кг	4	Санитарный
Нитраты, мг/кг	130	Водная миграция
Патанол, мкг/кг	250	Переход в растения
Пиримор, мкг/кг	300	Водная миграция
Политриазин, мкг/кг	100	Санитарный
Полихлоркамфен, полихлорпинен, мкг/кг	500	Переход в растения
Пропанид, мкг/кг	1,5	Переход в растения
Рогор, мкг/кг	300	Переход в растения
Ронит, мкг/кг	800	Транслокация
Ртуть, мг/кг	2	Переход в растения
Свинец, мкг/кг	20	Санитарный
Севин, мкг/кг	50	Переход в растения
Симазин, мкг/кг	200	Переход в растения
Сурьма, мкг/кг	4	Водная миграция
Суперфосфат, мкг/кг	200	Водная миграция
Удобрения в гранулах комплексные, мкг/кг	120	Водная миграция
Удобрения жидкие комплексные, мкг/кг	80	Водная миграция
Фенурон, мкг/кг	1,8	Водная миграция
Фозалон, мкг/кг	500	Переход в растения
Формальдегид, мкг/кг	7	Санитарный
Фталофос, хлорамп, мкг/кг	50	Переход в растения
Хлорофос, мкг/кг	500	Переход в растения
Хром шестивалентный, мкг/кг	50	Переход в растения
Цинк, подвижные формы, мкг/кг	23	Транслокация

Таблица 4.4. Основные типы загрязняющих веществ, их источники и характер воздействия на людей и природные объекты

Вещество	Основные источники	Основные объекты и характер воздействия
Радиоактивные вещества	Аварии на атомных станциях, при транспортировке и переработке отходов. Свалки и зараженные уголья	Биологические объекты - прямое поражение и по пищевым цепям. Лучевая болезнь, канцерогенез, генетические последствия
Ртуть	Сжигание органического топлива. Производство хлора, пластмасс, бумаги, соды. Электролиз, обработка руд, амальгамирование. Свалки: термометры, ртутные лампы	Медленное отравление почв и пресноводных водоемов. Поражение нервной системы и почек с летальным исходом. Особо опасно образование метилртутных соединений в пресной воде от сбросов и атмосферных выпадений
Свинец	Цветная металлургия, автотранспорт, свалки	Поражение нервной системы, печени и кроветворных органов, обогащение и накопление в пищевых цепях
Кадмий	Цветная металлургия, свалки	Канцерогенез
Мышьак	Цветная металлургия, свалки	Особо ядовит в соединениях
Удобрения, пестициды	Производство, транспортировка, хранение и применение	Отравление людей и животных непосредственно и по пищевым цепям с тяжелыми генетическими последствиями
Окислы серы	Тепловая энергетика, металлургия, нефтехимия и т. д.	Закисление почв и водоемов, деградация и гибель лесов, респираторное воздействие на людей, коррозия металлов
Окислы азота	Автотранспорт, тепловая энергетика, металлургия и другие высокотемпературные процессы и технологии	Закисление почв и водоемов, образование озонового смога. При попадании в организм человека с пищей превращаются в нитрозамины - сильнейшие канцерогены
Аммиак и аммоний	Аммонийные удобрения, животноводство, нечистоты	Эвтрофикация водоёмов, респираторное воздействие на людей
Пыль	Тепловая энергетика, металлургия, карьеры и терриконы, производство цемента, эрозия почв	Респираторное воздействие на людей, угнетение растительности, повышенный износ техники
Диоксины и другие органические вещества	Химическое и биохимическое производство, аварии на химических и электротехнических установках	Особо опасные и опасные ядовитые вещества, в малых концентрациях - сильные канцерогены и мутагены
Болезнетворные микроорганизмы	Неочищенные сточные воды, свалки (грызуны - крысы и мыши)	Холера, чума, дизентерия, сальмонеллёзы, инфекционный гепатит
Хлорфторуглероды	Аэрозольные распылители, холодильные установки, электротехническая и электронная промышленность	Безвредны для биоты. Попадая в стратосферу, разрушают озоновый слой

Опасность, исходящая от загрязняющего вещества, зависит не только от характера его воздействия, величины эмиссии (то есть выброса в окружающую среду) и ПДК, но и от параметров его распространения.

Пространственный масштаб распространения загрязнения зависит от того, в какую среду оно попало и от *времени жизни* загрязняющего вещества в этой среде. В атмосфере загрязняющие вещества разносятся ветрами со скоростями от 1 до 20 м/с (а 4—70 км/час), в проточных водах они распространяются со скоростью течений, в стоячих водах и почвах их распространение зависит от скоростей *диффузии* — это доли см/с в воде и сантиметры в год — в почвах.

*Время жизни загрязняющего вещества в природной среде — это среднее время существования в этой среде молекул или атомов вещества до их распада, трансформации или выведения за пределы среды.* Если распад вещества носит абсолютно случайный характер, то это время, за которое количество молекул вещества уменьшается в  $e = 2,718... \text{ раз}^{17}$ . Используется также понятие времени жизни в некоторой среде (например, в атмосфере) относительно конкретного процесса, например, физико-химического распада или вымывания дождями.

Под *временем пребывания вещества в данной среде* (атмосфера, вода или почва) *будем понимать* другую величину, а именно *время, за которое концентрация вещества становится меньше предельно допустимой концентрации или просто ниже порога обнаружения*<sup>TM</sup>. Существенно, что *время жизни не зависит от исходного количества вещества*, то есть от величины его выброса, или эмиссии, тогда как *время пребывания зависит и от времени жизни, и от эмиссии.*

Время жизни вещества в данной среде зависит от двух факторов: скорости его химической (или физической в случае радиоактивного распада) трансформации или разложения в природной среде и скорости его механического выведения. Например, выброшенное в атмосферу из заводской трубы опасное органиче-

<sup>17</sup> Это означает, что распад есть так называемый пуассоновский случайный процесс, в котором моменты наступления событий (в данном случае - распад молекул вещества или их ухода из среды) не зависят друг от друга. Абсолютно точным пуассоновским процессом является радиоактивный распад.

<sup>18</sup> Иногда под временем пребывания подразумевают время жизни, что неизбежно вносит путаницу.

ское химическое соединение под действием кислорода воздуха может окисляться, превращаясь в углекислый газ и воду, и одновременно осаждаться на почву (время жизни в атмосфере), где подвергается иному набору воздействий (время жизни в почве).

В табл. 4.5 приведены типичные масштабы пространственного распространения загрязняющих веществ и времена их пребывания в природных средах.

Таблица 4.5. Дальность распространения от источника и время пребывания в природных средах основных типов загрязняющих веществ

Тип загрязнителя	Дальность атмосферного переноса от источника	Время пребывания в среде		
		Атмосфера	Воды	Почвы
Радиоактивные вещества	0-5000 км при авариях	0-100 ч	Месяцы	Сотни лет
	0-300 км от постоянных источников*	0-5 ч	Месяцы	Сотни лет
Ртуть	Глобальная шкала. 0-50 км: особо опасные концентрации	Годы, десятки и сотни лет в биосфере; мигрирует из среды в среду; возможно накопление в воде		
Свинец, кадмий, мышьяк и др. металлы, переносимые частицами	0-500 км	5-20 ч	Месяцы	Годы
Удобрения, пестициды	От десятков км до глобального распространения	От часов до десятков лет в биосфере; мигрируют из среды в среду; возможно накопление в воде		
Окислы серы	0-5000 км	100 ч	**	
Окислы азота	0-10 000 км	До 200 ч	^	**
Аммиак и аммоний	0-2000 км	50 ч	**	**
Пыль и сажа	0-1000 км	10-100 ч		—
Диоксины, синтетические органические вещества, белок белково-витаминного концентрата	От десятков км до глобального распространения	От часов до десятков лет в биосфере; мигрируют из среды в среду. Диоксины и многие другие синтетические вещества почти не поддаются разложению		

\* Радиоактивные инертные газы могут распространяться в глобальном масштабе. \*\* В водоёмах и почвах быстро включаются в нормальные биогеохимические циклы, вследствие чего воздействие на водоёмы и почвы неоднозначно. Соединения серы практически не опасны (и даже могут быть полезны) для щелочных почв и водоёмов, лежащих на щелочных породах, но могут быть опасным загрязнением для кислых почв и особенно для биоты водоёмов, лежащих на кислых породах. Окислы азота и соединения аммония при попадании в водоёмы вызывают их эвтрофикацию, но могут способствовать росту плодородия почв, обогащая их связанным азотом.

## 4.2. Распространение загрязняющих веществ и рациональное размещение производства

После *первичной эмиссии* или сброса загрязняющее вещество попадает в воздух, воду или на почву<sup>19</sup>. В дальнейшем оно может переходить многократно из среды в среду (рис. 4.1) — в этом случае говорят о *вторичной эмиссии*, или *реэмиссии*, в данную среду (пример реэмиссии — испарение в воздух ранее выпавшего на почву вещества). Распространение загрязнений по поверхности Земли происходит в атмосфере и в воде. Оно может быть локальным — в пределах нескольких десятков километров, региональным — до нескольких тысяч километров и глобальным — по всему земному шару. Закономерности распространения загрязняющих веществ должны строго учитываться при планировании размещения производства.

*Атмосферные примеси* (загрязняющие вещества — частный случай примеси) перемещаются в атмосфере благодаря *атмосферной циркуляции* (см. п. 2.1). При переносе они могут подвергаться химическому распаду или трансформации (а также радиоактивному распаду), вымываться из атмосферы осадками и



Рис. 4.1. Загрязняющее вещество после эмиссии из источника переносится в воздухе и воде, одновременно подвергаясь химическим превращениям. Из атмосферы оно может осаждаться вследствие захвата поверхностью (сухое поверхностное осаждение), гравитационного оседания и вымывания осадками

<sup>19</sup> В последнее время началось и засорение околоземного космического пространства, но пока, к счастью, этот вопрос не приходится рассматривать как экологическую проблему.

осаждаться на поверхность как под действием собственного веса (*гравитационное осаждение*), так и вследствие *поверхностного сухого осаждения*. Гравитационное осаждение свойственно только очень тяжёлым газам и крупным частицам пыли.

Примеси могут менять в атмосфере своё агрегатное состояние, в частности, переходить из газовой фазы в аэрозольную. *Аэрозольными, или эоловыми, частицами* называют мельчайшие пылинки, всегда присутствующие в атмосферном воздухе. Размеры этих частиц меняются в диапазоне 0,01—10 мкм<sup>20</sup>, причём частицы с размерами меньше 1—2 мкм ведут себя как практически невесомая примесь (броуновские частицы) и влияют на прохождение света только на очень больших расстояниях, создавая дымку.

Другая возможность изменения агрегатного состояния вещества в атмосфере — захват примеси облачными каплями или растворение в них. Дождевые капли и падающие снежинки весьма эффективно захватывают и выводят большинство примесей на подстилающую поверхность и для многих видов загрязняющих веществ выпадение с осадками является практически единственным механизмом выведения из атмосферы.

Поверхностное сухое осаждение связано со многими процессами. Это может быть физическая *адсорбция*, при которой молекулы газа или частицы прилипают к поверхности под действием взаимного притяжения молекул, растворение примеси в поверхностной воде, захват примеси растительностью или её химическое взаимодействие с поверхностью. Параметром сухого осаждения является его скорость

$$v_d = \Delta D / C \Delta t, \quad (4.3)$$

где  $\Delta D$  — количество примеси, захваченное поверхностью за интервал времени  $\Delta t$ , и  $C$  — концентрация примеси у самой поверхности. Если примесь равномерно распределена в столбе воздуха высотой  $H$ , то она будет захвачена поверхностью за время  $\Delta t = H/v_d$ , и, следовательно, выпадения её будут равны  $\Delta D = v_d C / H$ . Скорость сухого осаждения зависит от типа примеси и свойств поверхности, но не зависит от концентрации при-

<sup>20</sup> Частицы крупнее 10 мкм = 10<sup>-2</sup> мм могут задерживаться в воздухе только при пыльных бурях. В обычных ситуациях они быстро выпадают под действием собственного веса.

меси. Значения  $v_d$  варьируются в широких пределах — от 0 до 50 мм/с.

Два процесса, протекающие одновременно, ответственны за распространение атмосферных примесей: ветровой перенос, или *адвекция*, и *турбулентная диффузия*. Молекулярная диффузия — слишком медленный процесс по сравнению с ними и потому не играет существенной роли. Турбулентная диффузия — результат движений атмосферных вихрей. Размер этих вихрей меняется от сантиметров до тысяч километров (циклоны, антициклоны, ячейки Гадлея — см. п. 2.1), и они возникают вследствие совместного действия конвекции, силы Кориолиса и трения воздуха о поверхность и подвижных слоев воздуха друг о друга. Атмосферная турбулентность практически отсутствует у поверхности, возрастает с высотой примерно до половины пограничного слоя и потом затухает на верхней его границе до сравнительно малой интенсивности.

Рациональное размещение предприятий основывается на расчётах распространения примесей в атмосфере. Покинув источник, струя примеси движется по ветру и одновременно благодаря диффузии расширяется (рис. 4.2). Состояние атмосферы решающим образом влияет на это движение. Особую роль играют температурные инверсии. Если слой тёплого воздуха распола-

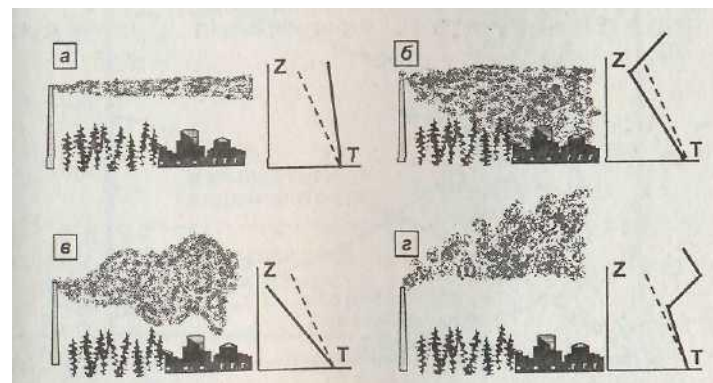


Рис. 4.2. Основные типы дымовых струй: а — при устойчивом состоянии атмосферы; б — приподнятая инверсия прижимает струю к поверхности; в — при неустойчивой стратификации атмосферы; г — низкая инверсия отделяет струю от поверхности. На графиках показано изменение температуры  $T$  с высотой  $Z$  (сплошная линия) и изменения температуры в равновесной — нейтральной атмосфере, когда температурный градиент равен 0,7 °С/100 м (штриховая линия)

гается над слоем холодного и граница между слоями находится выше источника, то такая приподнятая инверсия запирает примесь у поверхности земли. При слабом ветре это приводит к скоплению загрязняющих примесей у поверхности вблизи источника — наихудшая ситуация с точки зрения загрязнения воздуха. Когда источник — труба расположен выше инверсионного слоя, то примесь распространяется вверх. Это одна из главных причин строительства высотных труб.

Если источник приподнят над поверхностью, то примеси требуется некоторое время, чтобы достичь поверхности. Поэтому максимум приземной концентрации примеси возникает не непосредственно «под трубой», а на некотором расстоянии. Соответствующие зависимости показаны на рис. 4.3. При удалении от источника примесь рассеивается как по вертикали, так и в горизонтальном направлении, поэтому максимум приземной концентрации уменьшается. Это вторая причина строительства высотных труб.

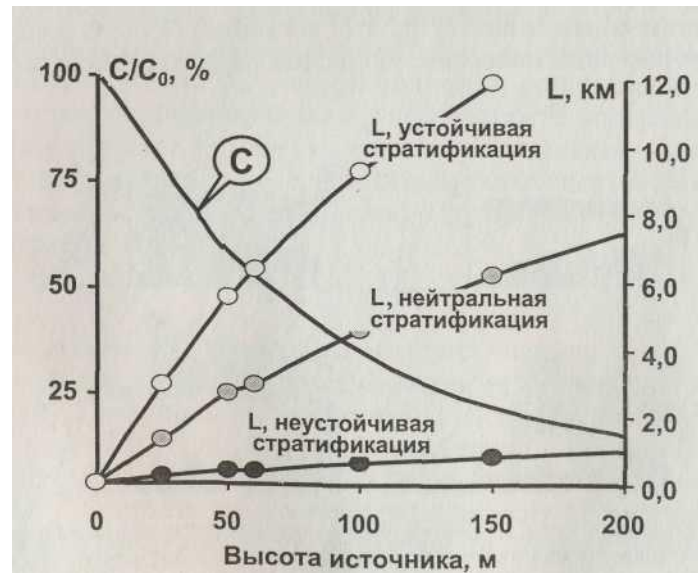


Рис. 4.3. Зависимости максимальной приземной концентрации  $C$  и расстояния от источника  $L$ , на котором она возникает, от высоты источника.  $C_0$  — концентрация возле поверхностного источника

На расстояниях от источника, превышающих «50 км, высота источника перестаёт влиять на вертикальное рассеяние примеси, и кончается область *локального переноса*. Отсюда начинается *региональный перенос* примеси, в котором основную роль играют циклоны и антициклоны. Эти вихри создают чрезвычайно сложную картину движения атмосферных масс и, соответственно, примесей, так как на вращательное движение внутри вихрей накладывается поступательное движение самих вихрей. Вертикальное распределение примеси теперь зависит от турбулентности, скорости сухого осаждения и осадков и обычно имеет вид, показанный на рис. 4.4. Поверхностное сухое осаждение выедаёт примесь вблизи поверхности, и максимум концентрации смещается вверх. Турбулентное рассеяние доставляет примесь вниз, к поверхности, и здесь возникает подвижное равновесие между



Рис. 4.4. Типичная зависимость концентрации атмосферной примеси от высоты на большом расстоянии от источника

потоком сухого осаждения и турбулентным диффузионным потоком.

Если время пребывания примеси в атмосфере достаточно велико — больше недели, то примесь рассеивается в глобальном масштабе, постепенно распределяясь во всей атмосфере по горизонтали и проникая в верхние слои атмосферы.

Существует и другой механизм глобального распространения загрязняющих примесей в атмосфере — через повторную эмиссию примеси с подстилающей поверхности после её осаждения (реэмиссия). Многие летучие вещества при охлаждении осаждаются на поверхность Земли непосредственно или вместе с захватившими их частицами атмосферного аэрозоля. Впоследствии при повышении температуры они испаряются и снова оказываются в атмосфере. Реэмиссия может происходить и за счёт подъёма частиц с поверхности при сильном ветре.

Помимо атмосферного рассеяния загрязняющие вещества переносятся реками, морскими течениями и талыми водами. Эти механизмы взаимосвязаны. Смытые с поверхности суши или попавшие в грунтовые воды загрязняющие вещества оказываются в реках и с речной водой попадают в моря и океаны. Особенно от этого страдают внутренние моря, например Балтийское, Чёрное и Средиземное.

### 4.3. Кислотное загрязнение, тропосферный озон и связанные с ними загрязняющие вещества

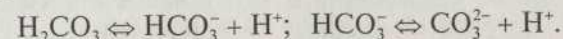
Множество технологических процессов, особенно связанных с получением энергии, основано на окислении углеводородов. Если бы топливо состояло только из углеводородов, а воздух — из кислорода, то при полном сгорании в атмосферу попадали бы только углекислый газ и пары воды. Однако в топливе всегда есть примеси, а в воздухе — азот, да и само сгорание не всегда оказывается полным. В результате в атмосфере оказывается целый набор загрязняющих веществ, основную массу которых составляют окислы серы и азота, способные образовывать сильные кислоты. Этих вещества в природной среде интенсивно взаимодействуют с аммиаком, поэтому аммиак как загрязнитель всегда рассматривается в рамках проблемы кислотного загрязнения.

Окислы азота и остатки органического топлива — летучие органические соединения (ЛОС) провоцируют образование тропосферного озона — сильного окислителя, поражающего растения и опасного для здоровья человека<sup>21</sup>.

Процессы, порождаемые в природе кислотообразующими веществами, называют закислением природной среды. Соединения серы являются важнейшим фактором антропогенного закисления природной среды. Кислотность среды (обычно говорят о водных растворах) определяется концентрацией свободных ионов водорода  $H^+$ . В химически чистой воде при 20 °С концентрация  $H^+$  составляет  $10^{-7}$  моль/л<sup>22</sup>. В химии концентрацию  $H^+$  принято выражать в виде водородного показателя:

$$pH = -\lg C,$$

где  $C$  есть мольная концентрация водородных ионов и  $\lg$  — десятичный логарифм. Таким образом, для чистой («нейтральной») воды  $pH = 7$ . Если  $pH < 7$ , то среда будет кислой, если  $pH > 7$  — щелочной. В природной среде всегда присутствует углекислый газ, образующий при растворении в воде слабую угольную кислоту  $H_2CO_3$ , частично диссоциирующую в воде:



Вследствие этого для незагрязнённых осадков  $pH = 5,6$ , то есть чистые природные дожди имеют слабокислотный характер. Поверхностные природные воды благодаря растворённым в них веществам, как правило, нейтральны или имеют слабощелочную реакцию, в частности, для вод мирового океана характерное значение  $pH \approx 8,1$ . Реакцию, близкую к нейтральной, имеют и незагрязнённые почвы.

При закислении водоёмов и почв  $pH$  содержащейся в них воды уменьшается. Для многих видов, населяющих хвойные леса и озёра умеренного климатического пояса, диапазон толерантности по  $pH$  ограничен снизу значением 6 (рис. 4.5). Уже при таком сравнительно малом закислении начинают нарушаться микробиологические процессы и угнетаются популяции водорослей — основных первичных продуцентов. Виды-консументы,

<sup>21</sup> Не путать со стратосферным озоном, абсолютно необходимым для существования жизни на Земле!

<sup>22</sup> Моль — количество граммов вещества, численно равное его атомному весу. Для ионов водорода 1 моль  $\approx$  1 г.



Рис. 4.5. Диапазоны толерантности к закислению обитателей пресноводных водоёмов. При pH < 5 водоём «умирает»

находящиеся выше в трофических пирамидах, лишаются корма и одновременно подвергаются прямому действию закисления: разрушаются панцири ракообразных, повреждаются жабры у рыб. Вся трофическая сеть оказывается нарушенной. При pH < 5 экосистема водоёма погибает.

Помимо прямого негативного воздействия на биоту закисленные воды переводят в растворимые формы опасные для биоты вещества, содержащиеся в подстилающих породах, например алюминий и другие металлы. Соединения окисленного азота способствуют эвтрофикации водоёмов, причём не только пресноводных, но и целых морей, например Балтийского моря.

Находящиеся в воздухе сернистый ангидрид, озон и азотная кислота представляют собой и непосредственную угрозу для живых организмов. Эти вещества вызывают прямой ожог растительности, а в больших концентрациях опасны и для человека, и животных. В частности, гибель деревьев вдоль автомобильных дорог с интенсивным движением — прямое следствие озонового ожога. В городах в жаркую погоду образуется озоновый смог,

вызывающий удушье, способное привести к смерти людей, страдающих сердечно-сосудистыми и лёгочными заболеваниями.

В Западной и Центральной Европе, а также во многих регионах европейской части России, концентрации озона, превышающие ПДК, отмечаются летом над обширными территориями. Зимой наблюдаются значительные превышения ПДК по сернистому газу.

Несмотря на меры, принятые в последнее десятилетие в развитых странах, выбросы окислов серы и азота остаются гигантскими. Схема кислотного загрязнения природной среды и оценки выбросов веществ, участвующих в кислотном загрязнении, приведены на рис. 4.6. Масштабы загрязнения можно видеть на рис. 4.7. В Центральной и Южной Европе за год выпадает около 2 г серы в окисленной форме на квадратный метр в год, что в пересчёте на сульфаты составляет примерно 6 г/м год. Если бы эти сульфаты не нейтрализовались аммиаком и гумусом почвы, то такой поток серной кислоты давно превратил бы эти регионы в пустыню. Вопрос в том, сколько времени ещё природные системы способны выдерживать такой стресс?!



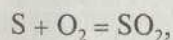
Рис. 4.6. Схема антропогенного закисления природной среды. Оценки глобальной антропогенной эмиссии соединений серы  $Q_S$  и азота  $Q_N$  приводятся в миллионах тонн самих этих элементов, так как при эмиссии они могут входить в состав различных веществ. Эмиссия летучих органических соединений ЛОС  $Q_{ЛОС}$  дана в миллионах тонн





Рис. 4.7. Выпадения окисленной серы в Европе и её окрестностях. Уровни выпадений приведены в мг серы на квадратный метр за 1999 год по данным международной программы ЕМЕП

Основными источниками выбросов в атмосферу окислов серы являются технологические процессы, связанные со сжиганием ископаемого топлива и руд тяжёлых металлов. Каменный уголь и нефть содержат от 0,3 до 5 % серы, и при сжигании в топках электростанций угля или получаемого из нефти мазута происходит окисление этой серы



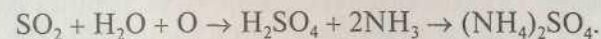
при котором выделяется ядовитый, с острым запахом сернистый газ  $SO_2$ . Он активно соединяется с молекулами воды и окисляется до серного ангидрида  $SO_3$ , который чрезвычайно быстро образует серную кислоту и частицы её солей — сульфатов, содержащие сульфат-ион  $SO_4^{2-}$ . Таким образом, сера в атмосферу попадает в виде газа  $SO_2$  (95—99 %) или в виде сульфатных солей (1—5 %).

Так как окислы серы опасны для технологического оборудования, то при подготовке содержащего много серы топлива его подвергают *обессериванию*. Однако сам этот последний процесс может быть источником значительных выбросов. В частности, природный газ часто содержит много сероводорода  $H_2S$ ,

который разрушительно действует на стенки газопроводов и компрессорное оборудование. В этих случаях газ должен обессериваться практически на месте добычи, а  $H_2S$  — немедленно утилизироваться. Такова ситуация, например, на богатых месторождениях природного газа в Оренбургской области и на севере Каспия.

Другой важный источник антропогенных окислов серы в атмосфере — металлургия. В процессе производства чёрных металлов производится обжиг руд и коксование угля. Назначение этих высокотемпературных процессов, в частности, удаление серы, которая и попадает в атмосферу в виде  $SO_2$ . Цветная металлургия «соревнуется» с энергетикой по количеству выбрасываемых в атмосферу окислов серы. Руды многих цветных металлов — *колчеданы* — являются сульфидными солями:  $CuS$ ,  $Cu_2S$ ,  $NiS$ ,  $ZnS$ ,  $Ag_2S$  и  $PbS$ . При получении этих металлов колчеданы предварительно обжигают, и сера переходит в  $SO_2$ . В отличие от чёрной металлургии и энергетики сернистый газ в этом процессе получается в высокой концентрации. Это делает экономически эффективным производство серной кислоты путём утилизации  $SO_2$ . К сожалению, крупнейшие предприятия цветной металлургии Северного полушария расположены далеко от других промышленных центров (Норильск, например), и транспортные расходы по вывозу столь агрессивного продукта, как серная кислота, оказываются слишком велики.

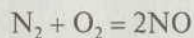
В атмосфере сернистый газ соединяется с водой и окисляется, образуя пары серной кислоты, которая быстро вступает в реакции с аммиаком или другими катионами, образуя микрочастицы ( $\leq 1$  мкм) солей-сульфатов по схеме



Атом кислорода, участвующий в этой реакции, может быть получен от любого из веществ-окислителей, всегда имеющихся в атмосфере. Время жизни  $SO_2$  относительно процесса окисления и превращения в сульфаты составляет от десятков минут в тёплом и влажном воздухе до нескольких суток на сухом морозе. Кроме антропогенных сульфатов в воздухе всегда присутствуют частицы сульфатов, принесённые с океанов или возникшие в результате выветривания почв:  $Na_2SO_4$ ,  $MgSO_4$  и  $CaSO_4$ . Эти частицы играют ключевую роль в образовании облаков, где они служат ядрами конденсации при образовании капель. Увеличение концентрации сульфатных частиц за счёт антропогенных суль-

фатов приводит к заметному перераспределению осадков вблизи промышленных центров.

Антропогенная эмиссия окислов азота связана с высокотемпературными процессами сжигания органического топлива. При обычных температурах азот воздуха не соединяется с кислородом, но при температурах свыше 500 °С реакция



начинает идти, некоторое количество азота успевает окислиться, и NO выбрасывается в атмосферу с отходящими газами электростанций, металлургических печей и выхлопными газами автомобилей<sup>23</sup>. Одновременно с NO автотранспорт выбрасывает в воздух ЛОС и, при плохой регулировке двигателей, угарный газ — оксид углерода CO. Природным источником ЛОС является лесная растительность.

В атмосфере соединения серы и азота, а также ЛОС участвуют в сложных химических процессах, упрощённая схема которых показана на рис. 4.8. Образование тропосферного озона есть результат циклических превращений окислов азота. В воздухе оксид азота NO окисляется и превращается в NO<sub>2</sub> (точнее — в комплекс N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) под действием озона и свободных радикалов.

Свободные радикалы — это химически высокоактивные осколки молекул, образующиеся в тропосфере под действием мягкого ультрафиолетового излучения Солнца, которое свободно проходит озоновый слой в стратосфере<sup>24</sup>. К ним относятся осколки молекул воды OH<sup>25</sup> и осколки молекул летучих углеводородов ЛОС, в избытке поставляемых в атмосферу автомобилями и лесами. Активность свободных радикалов столь велика, что их время жизни в атмосфере исчисляется долями секунды, но солнечные лучи рождают их вновь и вновь.

Диоксид азота NO<sub>2</sub> частично дополнительно окисляется и соединяется с водой, образуя в конце концов пары азотной кис-

<sup>23</sup> Помимо NO в атмосферу попадает целый набор других окислов азота — N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>C>5 и т. д. Их относительное количество невелико, и соответственно не велика и роль в тропосферных процессах. Но закись азота N<sub>2</sub>O, попадая в стратосферу, может способствовать разрушению озонового слоя.

<sup>24</sup> Озоновый слой полностью задерживает только «жесткий ультрафиолет», содержащий наиболее энергичные кванты излучения.

<sup>25</sup> Не путать с гидроксил-ионом OH<sup>-</sup>, существующим только в жидкой воде и растворах!

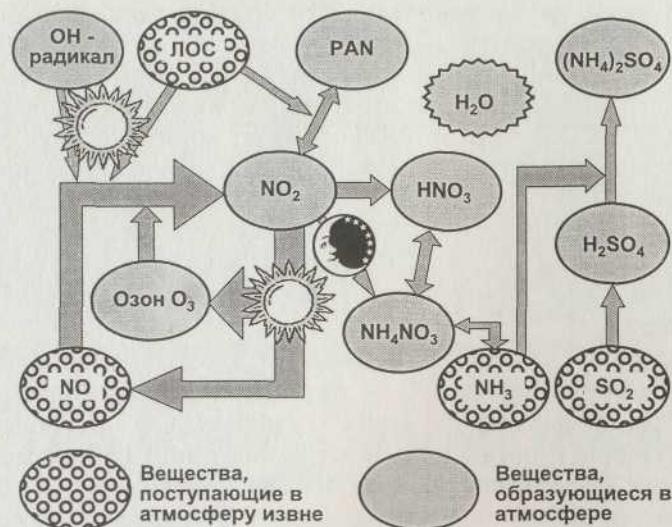
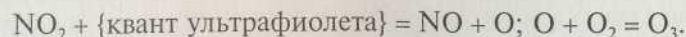


Рис. 4.8. Упрощённая схема химических превращений соединений серы и азота и образования озона в тропосфере. Окисленный азот попадает в атмосферу в основном в виде оксида — NO, сера — в виде диоксида SO<sub>2</sub>, а восстановленный азот — в виде аммиака NH<sub>3</sub>. Большую роль в образовании озона играет природная и антропогенная эмиссия ЛОС. Атмосферная влага — H<sub>2</sub>O — неизменная участница многих реакций. Знаками Солнца и Луны на схеме отмечены реакции, протекающие исключительно на свету или в темноте соответственно

лоты HNO<sub>3</sub> и микрочастицы её солей — нитратов, главным образом, нитрата аммония NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>. Но основная масса NO<sub>2</sub> под действием солнечного света распадается, отщепляя свободный атом кислорода, который, присоединяясь к молекуле кислорода, образует молекулу озона



Ночью ультрафиолета нет, а потому NO<sub>2</sub> не распадается, и нет свободных радикалов. Концентрация озона постепенно снижается, — он расходуется на окисление NO. С восходом Солнца скорость окисления NO возрастает, так как появляются свободные радикалы. Одновременно начинается распад NO<sub>2</sub>, что приводит к быстрому росту концентрации озона. Когда концентрация свободных радикалов невелика, NO окисляется главным образом озоном, и устанавливается равновесие



При больших концентрациях свободных радикалов они начинают конкурировать с озоном в окислении NO, и большая часть NO окисляется уже без участия озона. В этом случае один атом окисленного азота, многократно меняя степень окисления азота от NO к NO<sub>2</sub> и обратно, порождает много молекул озона в замкнутом кольце реакций. Таким образом, свободные радикалы ответственны за многократный рост концентраций озона. Поэтому скопления автотранспорта, который одновременно выбрасывает в воздух и NO, и ЛОС, создают многократный рост концентрации озона, приводящий к образованию *городского озонового смога*.

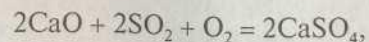
Вместе с NO и ЛОС автотранспорт может выбрасывать в атмосферу оксид углерода CO — угарный газ, весьма опасный загрязнитель, вызывающий удушье<sup>26</sup>. Выбросы CO — проблема больших городов с интенсивным движением автотранспорта. Спасительным является отчасти то обстоятельство, что CO быстро (минуты или десятки минут) окисляется в атмосфере, превращаясь в CO<sub>2</sub>.

При взаимодействии NO<sub>2</sub> и паров углеводородов, выбрасываемых автотранспортом, образуется пероксиацетилнитрат ПАН (PAN) — сильное слезоточивое вещество. ПАН может вызывать у людей, живущих вблизи автомобильных трасс, раздражение слизистых оболочек глаз и верхних дыхательных путей.

Наиболее опасным веществом, образующимся при сгорании органического топлива, является 3,4-бенз(α)пирен — один из самых сильных канцерогенов, известных медицине.

Основным методом борьбы с кислотным загрязнением является предотвращение выбросов SO<sub>2</sub>, ЛОС, NO и других окислов азота (обычно обобщённо называемых NO<sub>x</sub>). В стационарных источниках используются методы нейтрализации отходящих газов, в частности, сжигание угля в кипящем слое, содержащем негашеную известь.

Суммарно происходящие в кипящем слое реакции можно записать в виде:



причем образующийся нелетучий и нерастворимый CaSO<sub>4</sub> удаляется вместе с золой.

<sup>26</sup> Угарный газ, соединяясь в лёгких с гемоглобином, блокирует доставку кислорода в организме.

Нефтяное топливо подвергают предварительному обессереванию. Эти процессы позволяют существенно снизить эмиссию окислов серы, но не окислов азота. Чтобы снизить образование городского озонового смога, автомобили снабжают каталитическими реакторами, в которых происходит окисление СО и ЛОС. Обязательное использование этих реакторов связано с необходимостью полного запрета на использование тетраэтилсвинца для повышения качества бензина, так как это соединение очень быстро выводит из строя катализатор. Запрет использования тетраэтилсвинца необходим и с точки зрения уменьшения выбросов свинца и в настоящее время введён во многих странах.

#### 4.4. Пыль, тяжёлые металлы и ядовитые химические соединения

Аэрозольные частицы, или пыль, попадают в атмосферу в результате многих природных процессов. Главным источником природных аэрозольных частиц является мировой океан. При обрушении волн в воздухе оказывается множество мелких капель, поднимаемых ветром. Эти капли быстро высыхают, и в воздухе остаются частицы морской соли. Другой источник атмосферных частиц — ветровой подъём пыли с открытой поверхности континентов, пустынь и полупустынь. Множество частиц остаётся в атмосфере в результате извержений вулканов. Аэрозольные частицы играют огромную роль в формировании климата Земли. Они служат ядрами конденсации при образовании облаков и ответственны за рассеяние и частичное отражение солнечного света.

Мелкие частицы, диаметром меньше 0,1 мкм, ведут себя в атмосфере как невесомый газ с большим, в десятки и сотни часов, временем жизни (рис. 4.9). Они выпадают на поверхность в основном под действием осадков. Крупные частицы с размером более 2 мкм осаждаются на поверхность под действием и собственного веса, и осадков. Особенно долгоживущими являются частицы с размерами около 1 мкм, которые почти невесомы и слабо захватываются осадками.

Хозяйственная деятельность человека привела к значительному росту запыления атмосферы. В п. 4.3 были рассмотрены процессы образования сульфатных и нитратных аэрозольных ча-

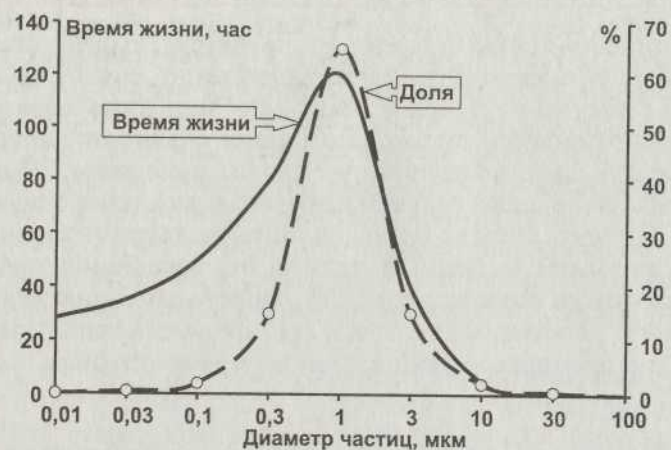


Рис. 4.9. Зависимость времени жизни частиц в атмосфере от их диаметра и процентная доля частиц различного диаметра вдали от источников

стиц в результате окисления отходящих газов, выбрасываемых тепловыми установками и транспортом. Это мелкие, невесомые частицы. Более крупные антропогенные аэрозольные частицы попадают в атмосферу непосредственно как продукт процессов сжигания топлива или мусора (зола и сажа), так и при подъёме пыли транспортом и при сельскохозяйственных, горных и строительных работах. Плохо отрегулированные двигатели, особенно дизельные, также выбрасывают в атмосферу частицы сажи и другие продукты неполного сгорания. На электростанциях и в промышленности основная масса крупных частиц, диаметром более 5 мкм, эффективно улавливаются фильтрами и центрифужными сепараторами (циклонами). Мелкие частицы, особенно диаметром менее 1 мкм, плохо поддаются улавливанию. Поэтому вдали от источников доля частиц с диаметрами около 1 мкм велика.

Важным свойством атмосферных аэрозольных частиц является огромная площадь их поверхности. Для умеренно загрязненной континентальной атмосферы суммарная площадь поверхности частиц, находящихся в воздухе над некоторой территорией, составляет около 10 % от площади этой территории. И только благодаря ничтожным размерам частиц атмосфера сохраняет прозрачность.

Антропогенные аэрозольные частицы не только загрязняют атмосферу сами по себе, но являются носителями других, гораздо более опасных загрязняющих веществ, таких как *тяжёлые ме-*

таллы и ядовитые долгоживущие органические соединения. С точки зрения химика эти две группы веществ — совершенно разные сущности. Но по своим источникам, поведению в природной среде и воздействию на неё они имеют много общего. И тяжёлые металлы, и устойчивые органические соединения попадают в природную среду не только при их производстве, но и при их использовании и при утилизации отходов. И те, и другие могут находиться в атмосфере в виде паров или, что бывает чаще, оседать на поверхности аэрозольных частиц и переноситься вместе с этими частицами-носителями. И те, и другие могут находиться в биосфере очень долго, накапливаясь в пищевых цепях. Наконец, многие из них являются ксенобиотиками, и все они — опасные яды даже в очень малых концентрациях.

В литературе, посвященной проблеме загрязнения природной среды, ванадий, никель, железо, марганец, ртуть, кадмий, таллий, кобальт, медь, свинец, олово, мышьяк, сурьму, селен, хром и цинк условно называют *тяжёлыми металлами*, хотя с точки зрения химика не все эти элементы являются истинными металлами.

Большинство тяжелых металлов в природе доступно для растений и бактерий только в очень малых концентрациях. Железо, медь, цинк, селен, марганец, молибден и некоторые другие элементы в микродозах необходимы для живых организмов. Они опасны только в больших, избыточных концентрациях. Свинец, кадмий, мышьяк, ртуть и их соединения, по-видимому, ядовиты для большинства высших животных и многих растений в любых концентрациях<sup>27</sup>.

Промышленное извлечение тяжёлых металлов из руд принципиально изменило их геохимические циклы, и концентрации многих металлов в природной среде повысились в десятки и сотни раз. Пока эти металлы находятся в связанном состоянии в своих природных депо — рудах и минералах, их количества в биосферных циклах ничтожны. Проблема состоит в том, что после извлечения из руд и попадания в биосферные круговороты веществ тяжёлые металлы возвращаются в природные депо — осадочные породы чрезвычайно медленно.

<sup>27</sup> Однако последние исследования показали, что даже такой токсичный элемент, как ртуть, в микродозах стимулирует активность лейкоцитов и интенсивность обмена веществ, а также дезинтоксикацию живых организмов. — *Примеч. ред.*

Антропогенными источниками тяжелых металлов в природной среде являются процессы их производства, а также технологические процессы, в которых они используются: производство бумаги и ювелирных изделий (ртуть<sup>28</sup>), электротехническая, электронная и электрохимическая промышленность (кадмий, свинец, олово, медь, ртуть и т. д.)- Присадки к автомобильному и авиационному топливу содержат свинец и таллий, при сжигании попадающие в атмосферу (тетраэтилсвинец широко используется до сих пор для повышения октанового числа бензина во многих странах, в том числе и в России).

Значительная доля загрязнения природной среды тяжёлыми металлами приходится на неорганизованные мусорные свалки, помойки и просто разбросанный мусор. Избыток железа в подземных водах Подмосквья — следствие огромного количества разбросанного металлолома. Ртуть в атмосфере и соединения ртути в воде — это выброшенные ртутные лампы, медицинские приборы (термометры, тонометры) и другая аппаратура, содержащая ртуть. К сожалению, большинство людей не задумывается над тем, что один выброшенный битый «градусник» способен отравить кубический километр воздуха!

При выбросах в атмосферу тяжёлые металлы или их соединения сорбируются (оседают) на поверхности аэрозольных частиц, вместе с частицами рассеиваются в воздухе и выпадают на землю. Исключением отчасти является ртуть, значительная часть которой остаётся в атмосфере в виде паров. Попав в пресные воды непосредственно или в результате атмосферных выпадений, тяжёлые металлы и их соединения отравляют реки, а потом и моря, в которые эти реки впадают. Например, природный вынос реками соединений железа в океан составляет около 25 млн тонн, а антропогенный — около 320 млн тонн, природный вынос соединений свинца — 180 тыс. тонн, а антропогенный — более 2 млн тонн. Многие металлы, прежде всего ртуть, жадно поглощаются пресноводными бактериями. В результате образуются металлоорганические соединения, гораздо более ядовитые, чем чистые металлы.

<sup>28</sup> Во многих странах Латинской Америки и Азии при золочении до сих пор используется примитивный кустарный процесс, использующий амальгаму — раствор золота в ртути. Ртуть при этом просто испаряется. Возможно, что это главный антропогенный источник ртути в природной среде.

Хотя крупные частицы-носители выпадают на сравнительно малых расстояниях от источников выбросов, целый ряд факторов приводит к глобальному распространению тяжёлых металлов в биосфере. Во-первых, малые, долгоживущие частицы-носители, имеющие относительно большую сорбирующую поверхность<sup>29</sup>, медленно выводятся из атмосферы (рис. 4.9). Поэтому они могут переноситься в атмосфере на огромные расстояния. Во-вторых, выпавшие на землю частицы и пары некоторых металлов (ртути прежде всего) спустя даже длительное время могут снова подниматься в воздух ветром и такими «прыжками» постепенно распространяться на всё больших территориях. В-третьих, тяжёлые металлы разносятся реками и морскими течениями в виде растворимых солей или на взвешенных в воде частицах.

Глобальный характер распространения тяжёлых металлов хорошо виден на примере свинца (рис. 4.10). Данные, приведенные на картах рис. 4.10, свидетельствуют об одной неприятной дополнительной особенности поведения тяжёлых металлов в природной среде.'

Вся пресная вода, потребляемая человеком, исходно дождевая вода. Поэтому содержание тяжёлых металлов в питьевой воде непосредственно зависит от их содержания в атмосферных осадках. Из рис. 4.10 и данных табл. 4.2 видно, что в то время как концентрации в воздухе существенно ниже ПДК, концентрации в осадках могут превосходить ПДК для питьевой воды и, тем более, для рыбохозяйственных водоёмов. Такая картина наблюдается как для свинца, так и для кадмия и ряда других тяжёлых металлов.

Если воспользоваться формулами (4.1) и (4.2) для оценки суммарного уровня загрязнения свинцом, кадмием и ртутью пресноводных водоёмов, то для Европы в среднем получим значение  $S = 1,1—1,25$ , то есть выше критического уровня, а для Азии и Северной Америки  $S = 0,8—0,9$ . И это — следствие загрязнения атмосферы. Ясно, что для наиболее загрязнённых урбанизированных районов нормы загрязнения превышены в несколько раз. Таким образом, уровень загрязнения тяжёлыми ме-

<sup>29</sup> Объём и вес частицы пропорциональны кубу её размера, а поверхность — квадрату. Поэтому одна «большая» частица имеет поверхность в 1,26 раз меньшую, чем две частицы того же объёма.

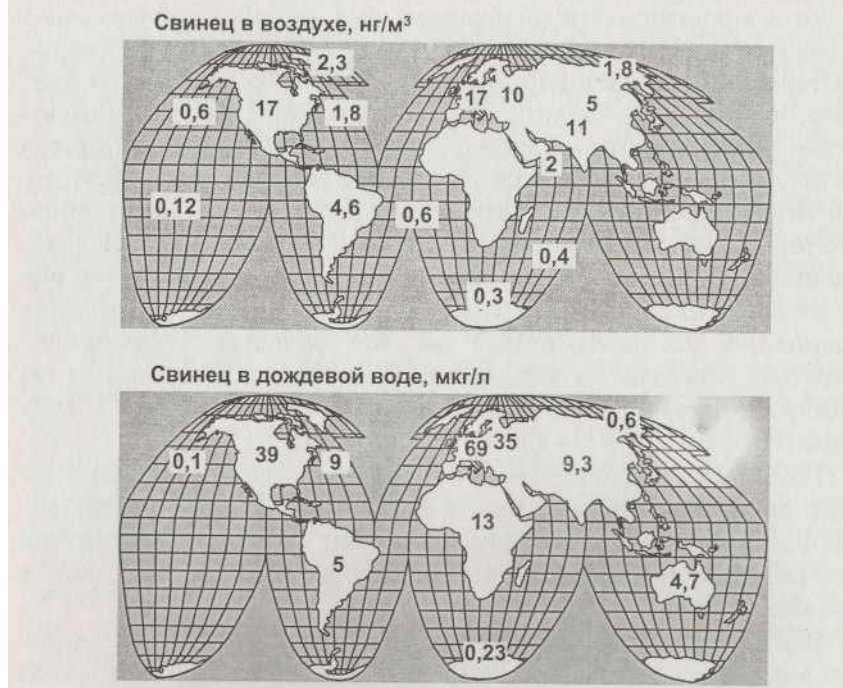


Рис. 4.10. Средние концентрации свинца в приземном воздухе вдали от крупных источников и максимальные среднемесячные концентрации свинца в осадках в различных регионах мира

таллами стал угрожающим по меньшей мере в масштабах всего Северного полушария.

Опасные долгоживущие органические соединения попадают в природную среду двумя путями. Наиболее опасные, прежде всего 3,4-бенз(а)пирен и диоксины, — это побочные продукты сжигания органического топлива и технологических процессов. Они образуются и выбрасываются, условно говоря, «непреднамеренно». Другие опасные вещества вносятся в природную среду вполне сознательно, с определёнными хозяйственными или иными целями. Это применяемые в сельском хозяйстве *пестициды* (ядохимикаты) и дефолианты — вещества, вызывающие листопад у деревьев и кустарников<sup>30</sup>. Среди наиболее широко

<sup>30</sup> Дефолианты широко используются при сборе урожая хлопка. США использовали дефолианты во вьетнамской войне с тяжёлыми последствиями для населения.

применяемых пестицидов гептахлор, карбофос, диурон и различные ГХЦГ (линдан и гексахлоран). Большинство этих веществ разлагаются в природе очень медленно и получают глобальное распространение. Они обладают способностью накапливаться в пищевых цепях высших животных и человека даже в регионах, весьма удалённых от источника. Основной путь по предотвращению загрязнения природы ядохимикатами — создание и использование биологических и экологических методов борьбы с вредителями сельскохозяйственных культур и сорными растениями.

#### 4.5. Биологическое и физическое разрушение и загрязнение природной среды

С момента своего появления на Земле человечество оказывает постоянно нарастающее воздействие на состав и структуру экологических систем, истребляя одни виды живых организмов и способствуя, вольно или невольно, распространению и процветанию других видов. Вырубая леса и распахивая степи, человек лишает огромное число видов их мест обитания, и ежегодно с лица Земли исчезают тысячи видов, о существовании большинства которых науке даже не было известно. Тем самым подрывается видовое разнообразие биосферы — одна из основ её устойчивого существования. Мы же замечаем исчезновение только крупных животных — мамонтов, туров (дикие предки наших коров), китов, ламантинов (морских коров), некоторых видов птиц.

Наряду с этим человек способствует внедрению в экосистемы новых для них видов. Иногда это проходит более или менее безболезненно, но может приводить к тяжёлым последствиям. Общеизвестны печальные результаты интродукции кроликов в Австралии, где они стали вытеснять местные эндемические виды из их экологических ниш, или появления колорадского жука на Евразийском континенте. В обоих случаях виды-мигранты попали в благоприятную для них среду, где не имели естественных врагов. И вследствие этого был нанесён огромный вред местным экосистемам и прежде всего сельскому хозяйству.

В огромных урбанизированных регионах, таких как Северо-Восток США, Мехико с пригородами, Москва с города-

ми-спутниками, образуются специфические полностью антропогенные экосистемы, в которых наряду с приятными для человека соседями поселяются полчища крыс, мышей и тараканов.

С древних времён человечество осознало опасность соседства прожорливых грызунов, не только истреблявших запасы зерна, но и носителей страшных эпидемических заболеваний, прежде всего чумы, а также гепатита, геморрагических лихорадок, лептоспирозов и туляремии. Недаром вид одной дохлой крысы, погибшей от неизвестной причины, вызывал панику в средневековом городе. Древние египтяне были пионерами в экологически грамотном подходе к борьбе с вредителями, когда сделали кошку священным животным. В известном смысле цивилизация обязана своим развитием именно домашней кошке, издревле спасавшей зернохранилища от разорения, а людей — от голода и чумы<sup>31</sup>. В этом отношении действия многих современных городских властей представляются по меньшей мере безграмотными. Вместо того, чтобы вкладывать деньги и силы в очистку городов от мусора и пищевых отходов, они тратят огромные средства на ядохимикаты, к которым грызуны быстро адаптируются. В то же время эти яды уничтожают бродячих кошек, и в результате возникает эффект, обратный желаемому, — происходит очередная вспышка численности мышей и крыс.

Другой тип биологического загрязнения, представляющего собой прямую угрозу для людей, — это *бактериальное загрязнение* пресных вод и почвы. Оно возникает из-за отсутствия или неисправности канализационных систем, а также неправильного размещения полигонов для хранения отходов. Фекальные массы — основное депо инфекции — попадают в источники пресной питьевой воды и в море вблизи курортных зон как со сточными и тальми водами, так и путём просачивания из необустроенных выгребных ям и при авариях на очистных сооружениях.

Много веков человек пытался обеспечить себя чистой водой. Но до начала XX века основной целью водоочистки было удаление ила, для чего в основном использовались песчаные фильтры, а не обеззараживание воды. В начале XX века появились мощные универсальные средства предупреждения эпидемий ин-

<sup>31</sup> Целый ряд мелких хищников также являются отличными истребителями домашних грызунов. Но только кошка обладает полным набором достоинств, делающим её практически незаменимой на этом поприще.

фекционных заболеваний: хлорирование воды<sup>32</sup> и пастеризация продуктов питания, особенно молока.

К наиболее опасным патогенным микроорганизмам, переносимым водой, относятся: холерный вибрион, сальмонеллы, вызывающие брюшной тиф и паратифозные заболевания, шигеллы, вызывающие дизентерию, и вирусы гепатита. Контроль качества воды по наличию в ней патогенных микроорганизмов весьма проблематичен, так как обнаружить и распознать их среди огромного числа безвредных бактерий почти невозможно. Поэтому в качестве критерия попадания фекальных остатков в питьевую воду используют наличие в чистой воде бактерий, сходных с абсолютно безвредной кишечной палочкой коли — так называемый *коли-индекс*. Обычно вода считается чистой, если в 1 литре её содержится не более 10 таких бактерий. Это очень малая величина, так как в 1 литре неочищенных сточных вод содержится до 1 миллиарда кишечных палочек.

За последние десятилетия всё большую роль начинает играть простое *механическое загрязнение*. Окрестности многих крупных городов буквально завалены отходами и мусором. Завалены мусором берега и дно рек и озёр. Иногда этот мусор биологически и химически пассивен (полиэтилен и другие пластиковые материалы, стекло), но даже в этих случаях он делает значительные пространства малопригодными для жизни и человека, и диких животных. В других случаях, медленно разлагаясь, он к тому же отравляет почву и воду.

Особую опасность представляет *разлив нефтепродуктов*. Масляные пятна на поверхности воды практически полностью прекращают газообмен между водой и атмосферой. Плёнка этих пятен по толщине близка к мономолекулярной, поэтому одна тонна нефтепродуктов, разлитая на поверхности воды, способна сделать непригодной для жизни несколько квадратных километров водного пространства. Загрязнённая нефтепродуктами почва практически перестаёт «дышать», и в ней погибают все почвенные организмы. Сквозь почву нефтепродукты проникают в грунтовые воды, делая их непригодными для использования. Нефтепродукты разлагаются очень медленно, и отравленные воды и почва самоочищаются очень долго.

<sup>32</sup> В настоящее время всё чаще вместо хлорирования используется озонирование. Этот метод гораздо эффективнее и не ухудшает, а повышает вкусовые качества воды, но стоит несколько дороже.

Загрязнение природной среды может носить не только материальный, но и энергетический характер.

Крупные электростанции, а также заводы используют для охлаждения оборудования огромные объёмы воды. Эта нагретая вода часто сбрасывается в природные водоёмы, вызывая их перегрев — *тепловое загрязнение* и тем самым нарушая нормальное функционирование природных экосистем.

Ещё один тип физического воздействия на природные объекты связан с использованием быстроходных катеров и моторных лодок на небольших реках и пресноводных озёрах. Поднимаемые этими судами волны размывают берега, при этом обнажаются корни растущих на них деревьев, что ещё более ускоряет процесс разрушения берегов, ведёт к заиливанию и гибели водоёма. Поэтому использование лодок с моторами на озёрах категорически запрещено в скандинавских странах. К сожалению, подобный запрет далеко не везде введён в России и там, где введён, не всегда исполняется.

*Шумовое загрязнение* свойственно крупным городам и посёлкам, расположенным вдоль автомобильных трасс и вблизи аэродромов. Человеческое ухо весьма совершенный механизм, способный различить ничтожный поток энергии звуковых волн: порог слышимости человека с хорошим слухом составляет около  $10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>. Болевой порог интенсивности звука составляет около 10 Вт/м<sup>2</sup> (это шум реактивного самолёта на расстоянии 50 м), то есть превышает порог слышимости в  $10^{13}$  раз. Чтобы выразить такой гигантский диапазон интенсивностей звука прибегают к логарифмической шкале

$$I = 10 \lg(E/E_0) \text{ [дБ]},$$

где  $I$  — интенсивность звука, выраженная в децибеллах (сокращённо — дБ),  $E$  — измеряемый поток энергии звука и  $E_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup> — эталонный поток звуковой энергии, принятый равным порогу слышимости. Таким образом, болевой порог составляет 130 дБ. Логарифмическая шкала интенсивностей удобна ещё и тем, что субъективно мы также воспринимаем громкость звука в масштабе, близком к логарифмическому, и рост интенсивности на 10 дБ соответствует примерно удвоению громкости. Типичные уровни шума выглядят так:

- тихая сельская местность — 20—30 дБ;
- обычный разговор — 40—50 дБ;

- салон легкового автомобиля, пылесос — 60—70 дБ;
- тяжёлый дизельный грузовик — 90 дБ;
- шумный заводской цех — 100 дБ;
- выстрел из ружья вблизи уха — 160 дБ.

Шум, превышающий 100 дБ, заведомо ведёт к повреждению слуха при систематическом воздействии. При постоянном воздействии шум, превышающий 80—90 дБ, может вызвать психические нарушения, прежде всего тяжёлое расстройство сна. Вместе с тем равномерный шум, имеющий природное происхождение, например шум морского прибоя или дождя, не влияет на здоровье. Всё дело именно в равномерности во времени и по спектру (гармоническому составу). Наиболее опасны для сна именно стук, внезапные всплески. Одиноким мотоциклист в ночном городе способен разбудить тысячи людей. Для нарушения сна и даже снижения работоспособности достаточно одиночных всплесков в 40—50 дБ на фоне тишины или равномерного шума в 20 дБ. По данным Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ) постоянный шум в 70 дБ вызывает нервно-психические расстройства, а также изменения слуха и даже состава крови. Между тем подобный уровень шума наблюдается, например, на 30 % территории Москвы.

Мощное развитие всевозможных видов радиосвязи, использующих всё более коротковолновые диапазоны, то есть всё более высокие частоты, привело к тому, что пространство урбанизированных регионов насыщено *микроволновым излучением*. Прямых доказательств вредного влияния сантиметровых радиоволн на здоровье пока нет, также как не изучены возможные механизмы такого влияния. Следует, однако, иметь в виду, что длины сантиметровых волн соответствуют размерам органов человеческого тела, которые, таким образом, оказываются приёмными антеннами, настроенными в резонанс для этих волн. Например, длина волн, используемых во многих беспроводных и мобильных телефонах, равна примерно 17 см (частота 1800 МГц), что как раз соответствует обычному диаметру человеческой головы. Поэтому органы здравоохранения Великобритании, вполне возможно, поступают разумно, рекомендуя детям и подросткам воздерживаться от пользования мобильными телефонами.

Другим источником интенсивных микроволн являются бытовые микроволновые печи для приготовления пищи. Как правило, они излучают на частотах около 3 ГГц или выше, то есть с



длинами волн менее 10 см, и это излучение прекрасно захватывается органическим веществом приготовляемых продуктов. Само собой, кванты этого излучения не отличают живую органическую ткань от мёртвой. Защитные сетки-экраны в дверцах микроволновых печей ослабляют излучение не более чем вдвое. Поэтому, если вы находитесь перед дверцей печи на расстоянии в 1 м, то уровень облучения, воздействующий на вас, всего в 200—500 раз ниже, чем тот, что действует на приготовляемые продукты. Комментарии излишни!

Чем короче длины волн, тем выше энергия отдельных квантов излучения. Излучение с длинами волн от 1 мм до 0,77 мкм (инфракрасное излучение) воспринимается нами как тепловое излучение. Видимый свет занимает сравнительно узкую область от 0,39 до 0,77 мкм. Мягкое ультрафиолетовое излучение заставляет нашу кожу защищаться — возникает загар. К контактам с этими видами излучения биота не только приспособилась, но использует их как источник энергии<sup>33</sup>. От опасного для всего живого жесткого ультрафиолета и ещё более жестких видов радиации, приходящих из космоса, — потоков частиц и квантов рентгеновского и у-излучения — поверхность Земли защищена верхней атмосферой. В естественных условиях на поверхности Земли присутствует только фоновая радиация, часть которой (от 20 до 50 %) имеет космическое происхождение, а остальное есть следствие распада радиоактивных элементов, находящихся в земной коре.

#### 4.6. Радиация, радиоактивное загрязнение и атомная энергетика

Два основных типа ионизирующей радиации (излучения) стали известны науке почти одновременно. Анри Беккерель (*Becquerel*, 1852—1908) открыл явление радиоактивности в 1896 г. и стал первым человеком, явно пострадавшим от радиоактивного облучения. Всего годом ранее, в 1895 г., Вильгельм Рентген (*Rontgen*, 1845—1923) открыл рентгеновские лучи.

<sup>33</sup> Это прежде всего обусловлено тем, что энергия квантов у этих типов излучения недостаточна для ионизации любых атомов в отличие от рентгеновского и радиоактивного излучений.

*Естественное радиоактивное излучение* земного происхождения вызывается распадом нестабильных атомных ядер и практически полностью состоит из а(альфа)-частиц, р(бета)-частиц и у (гамма)-квантов. Из известных в настоящее время примерно 1700 видов атомных ядер (нуклидов) только 270 представляют собой стабильные изотопы, все остальные — подвержены радиоактивному распаду. Нестабильные изотопы называются радионуклидами. Атомное ядро содержит частицы двух видов — положительно заряженные протоны и не имеющие заряда нейтроны. Естественная нестабильность атомных ядер обычно обусловлена избытком нейтронов, поэтому радиоактивные изотопы сосредоточены, главным образом, в нижней части таблицы Менделеева. Радиация космического происхождения и антропогенное радиоактивное излучение, связанное с развитием атомной энергетики, широким использованием радионуклидов в медицине и промышленности и производством и испытаниями ядерного оружия, может, помимо перечисленных частиц, содержать потоки нейтронов, протонов и осколки атомных ядер.

При а(альфа)-распаде ядро испускает а-частицу (ядро гелия), состоящую из двух протонов и двух нейтронов. Так как ядро теряет при этом два элементарных заряда, то образуется дочернее ядро, имеющее в таблице Менделеева номер, на две единицы меньший, чем материнское ядро. При р(бета)-распаде один из нейтронов ядра превращается в протон, при этом из ядра вылетают (β-частица — электрон, обладающий большой кинетической энергией, и антинейтрино — нейтральная частица, возможно даже не имеющая массы покоя<sup>34</sup>. Дочернее ядро получает дополнительную единицу заряда и соответственно номер в таблице Менделеева на единицу больший, чем материнское ядро. Третий тип распада связан с захватом ядром одного из электронов внутренней электронной оболочки атома, в результате чего один из протонов ядра становится нейтроном. Дочернее ядро в этом случае имеет номер на единицу меньший материн-

<sup>34</sup> Нейтрино и антинейтрино (не путать с нейтроном!) столь малы и неуловимы, что первоначально гипотеза об их существовании была высказана лишь на основе твёрдой уверенности физиков в незыблемости закона сохранения энергии. Эти частицы не имеют заряда, и до сих пор неизвестно, есть ли у них масса покоя. Потоки этих частиц во Вселенной очень велики, но они обладают огромной проникающей способностью и почти не захватываются материальными телами. Отсюда — их безвредность для живой ткани и огромные трудности экспериментального обнаружения.

ского. При всех типах распада дочернее ядро может остаться в возбуждённом состоянии. Возбуждённое ядро сбрасывает избыток энергии, испуская высокоэнергичный квант электромагнитного излучения —  $\gamma$ (гамма)-квант с длиной волны короче  $10^{-12}$  м. Скорости, и соответственно кинетическая энергия, испускаемых  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц велики: скорость  $\alpha$ -частиц около  $10^7$  м/с, а скорость электронов приближается к скорости света.

Скорости распада различных изотопов сильно различаются, а сам распад носит абсолютно случайный характер и в широчайших пределах не зависит от внешних воздействий — температуры, давления, электромагнитных и гравитационных полей и т. д. Когда количество атомов в образце изотопа велико, то распад в среднем происходит по закону

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t, \quad (4.4)$$

где  $\Delta N$  — количество атомов, распавшихся за малый промежуток времени  $\Delta t$ ,  $N$  — количество атомов радиоактивного изотопа в образце и  $\lambda$  — постоянная распада. Решение этого уравнения имеет вид:

$$N = N_0 \exp(-\lambda t), \quad (4.5)$$

где  $N_0$  — количество атомов изотопа при  $t = 0$ .

В качестве характеристики активности изотопа, наряду с постоянной распада, употребляется *период полураспада*, равный времени распада половины ядер данного изотопа. Период полураспада  $T_{1/2}$  связан с постоянной распада простым соотношением:

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda \approx 0,693 / \lambda \quad (4.6)$$

Чем меньше период полураспада, тем выше радиоактивность изотопа.

И радиоактивное, и рентгеновское излучение способны разрывать внутримолекулярные связи и вызывать образование ионов в окружающем веществе, поэтому их называют *ионизирующим излучением*. Именно способность к ионизации среды использовалась изначально для оценки интенсивности излучения. Для количественной характеристики активности источника излучения и интенсивности его воздействия были введены соответствующие внесистемные единицы измерения, широко ис-

пользуемые до сих пор, хотя формально они изъяты из применения с 1980 г.

За единицу активности источника излучения была принята активность 1 г чистого природного радия, названная *кюри* (в честь Марии Кюри-Склодовской) и составляющая 1 Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  распадов в секунду. Для оценки дозы облучения, которую может получить облучаемый объект, первоначально использовалось понятие *экспозиционной дозы*, равной отношению суммарного заряда, образовавшегося в воздухе при нормальных условиях и выраженного в кулонах (Кл), к массе ионизированного воздуха. Единицей измерения экспозиционной дозы служил *рентген* (Р). 1 Р =  $2,58 \cdot 10^{-4}$  Кл/кг, что соответствует образованию  $2,08 \cdot 10^9$  пар ионов в 1 см<sup>3</sup> воздуха (заряженные частицы всегда образуются парами — одна с положительным, а другая с отрицательным зарядом). Удобство этой единицы измерения в том, что способность живой ткани к ионизации примерно та же, что и у воздуха (на кг веса).

Уровень опасности облучения определяется скоростью, с которой происходит ионизация, то есть накопление дозы. Поэтому в качестве характеристики уровня радиации используется *мощность дозы*. Мощность экспозиционной дозы измерялась (и до сих пор часто указывается) в Р/час.

Степень воздействия излучения на вещество зависит от *поглощённой дозы*  $D_a$ , которая оценивается по энергии, переданной излучением единице массы облучаемого вещества. В качестве единицы её измерения использовался *рад*, 1 рад = 100 эрг/г. При рентгеновском и  $\gamma$ -облучении поглощённая доза в 1 рад возникает в мягких тканях организма при экспозиции в 1,136 Р. Обычно принимают, что 1 рад соответствует экспозиции 1 Р<sup>35</sup>.

Различные типы ионизирующего излучения по-разному воздействуют на живой организм. Для того чтобы учесть эти отличия, рассчитывается *эквивалентная доза*

$$D_e = K_{обз} D_a, \quad (4.7)$$

где  $K_{обз}$  — коэффициент относительной биологической эффективности воздействия излучения. Общепринятыми являются следующие значения  $K_{обз}$ : 1 — для рентгеновских,  $\gamma$ - и  $\beta$ -лучей,

<sup>35</sup> Способности тканей поглощать излучение различны, на чём и основана медицинская рентгенодиагностика. Кости поглощают излучение примерно вдвое сильнее, чем мягкие ткани.

3 — для медленных нейтронов, 10 — для протонов и быстрых нейтронов, 20 — для  $\alpha$ -частиц и осколков деления атомных ядер.

Если поглощённая доза выражена в радах, то соответствующей единицей эквивалентной дозы будет служить *бэр* (аббревиатура от «биологический эквивалент рада»).

С 1980 г. были введены в употребления следующие единицы измерения СИ:

- единица активности источника — *беккерель*, 1 Бк = 1 распад/с ( $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк = 1 Ки);
- единица поглощённой дозы — *грей*, 1 Гр = 1 Джоуль/кг (1 Гр = 100 рад);
- единица эквивалентной дозы — *зиверт*, 1 Зв = 1 Гр для рентгеновского,  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучения.

Проникающая способность ионизирующего излучения существенно зависит от его типа (рис. 4.11).

Проникающая способность  $\gamma$ -квантов очень велика: их задерживает только толстая свинцовая или бетонная плита. Поэтому защита от внешнего гамма-излучения представляет наибольшие проблемы.

Бета-излучение обладает меньшей проникающей способностью. Электроны при наружном облучении способны проникать в ткани организма не более чем на 1—2 см. Защититься от этого излучения при внешнем источнике можно сравнительно легко. В принципе бета-частицы задерживаются плотной одеждой и неповрежденной кожей. Однако, когда бета-активные радионук-

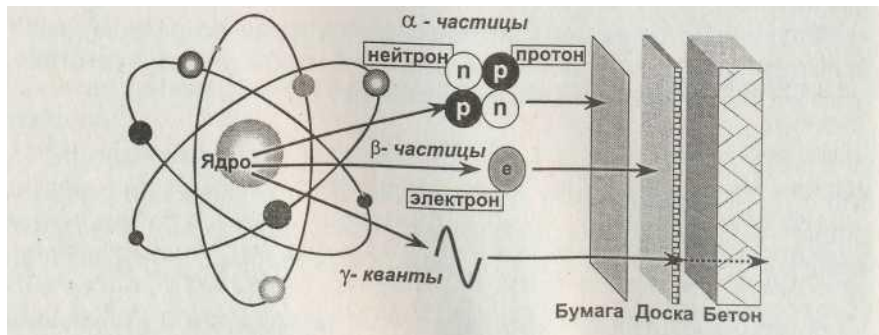


Рис. 4.11. Три вида естественного радиоактивного излучения и их проникающая способность

лиды попадают внутрь организма при дыхании (*респираторным путём*) или с водой и пищей, испускаемые ими бета-частицы интенсивно поглощаются внутренними тканями организма. Возникающие при этом в тканях организма разрушения значительно превосходят таковые от гамма-излучения.

Альфа-частицы легко задерживаются листом бумаги и верхним слоем нашей кожи — эпидермисом. Малая проникающая способность  $\alpha$ -излучения означает его особо сильное воздействие на облучаемые ткани — недаром для него  $K_o^{\wedge} = 20$  в формуле (4.7)! Поэтому попадание внутрь организма  $\alpha$ -излучающих веществ с водой, пищей или дыханием наиболее опасно.

Различные ткани организма обладают не одинаковой чувствительностью к радиационным повреждениям. Чтобы это учесть, для оценки уровня воздействия радиации на организм вычисляется (в зивертах или бэрах) *эффективная эквивалентная доза*, в которой дозы облучения органов и тканей рассчитываются с различными коэффициентами, а затем суммируются. Установлено, что наибольшей чувствительностью к облучению обладают хрусталик глаза, половые органы, молочные железы, лёгкие и костный мозг (основной орган кроветворения).

Эффективная эквивалентная доза отражает суммарный эффект облучения для всего организма, но характер поражения зависит не только от типа и локализации облучения, но при внутреннем облучении и от изотопного состава источника. Например, радиоактивные изотопы йода при попадании в организм: концентрируются в мало чувствительной к внешнему облучению щитовидной железе с самыми тяжёлыми последствиями. Изотоп стронция  $Sr^{90}$ , радий Ra (стронций и радий химически близки кальцию) и актиниды накапливаются в костях, а потому воздействуют на костный мозг и состав крови, вызывая злокачественную лейкемию (рак крови).

Основные механизмы воздействия излучения на ткани носят двоякий характер. Во-первых, может нарушаться структура ДНК, то есть генетический аппарат клетки. Это непосредственно приводит к онкологическим заболеваниям и наследственным заболеваниям потомства (или к невозможности его иметь вообще). Во-вторых, излучение ионизирует молекулы воды, содержащейся в тканях (напомним, что вода составляет примерно 75 % массы тела человека). При этом образуются свободные ОН-радикалы, сильнейшие окислители, разрушающие молекулы белков и других органических соединений. В силу того что клетки

особо уязвимы в процессе деления, эмбрионы и дети наиболее чувствительны к облучению.

После прекращения наземных испытаний ядерного оружия в 1963 г. естественные источники радиации стали основным источником облучения для подавляющего большинства жителей Земли. Уровень этого *естественного радиоактивного фона* сильно зависит от местности и конкретных условий жизни.

На уровне моря мощность эффективной эквивалентной дозы от *космического радиационного фона* составляет примерно 0,3 мЗв/год ( $1 \text{ мЗв} = 10^{-3} \text{ Зв}$ ). Этот фон несколько повышается у полюсов из-за отклоняющего заряженные частицы магнитного поля Земли и в высокогорных местностях, где на высоте 2000 м мощность дозы от него достигает 1 мЗв/год. Пассажиры и экипаж авиалайнера на высоте 10 км получают около 0,01 мЗв/час.

Радиационный фон земного происхождения создают радиоактивные изотопы, содержащиеся в горных породах, и продукты их распада. К ним относятся радиоактивные изотопы калия  $\text{K}^{40}$  и рубидия  $\text{Rb}^{87}$ , а также члены радиоактивных семейств, берущих начало от долгоживущих изотопов урана  $\text{U}^{238}$  и тория  $\text{Th}^{232}$ , входящих в состав горных пород Земли с самого её образования. В среднем доза, получаемая жителями Земли от этого источника, составляет примерно 1,7 мЗв/год.

Таким образом, суммарная доза, получаемая жителем Земли, составляет в среднем около 2 мЗв/год. Значительные группы населения Земли получают около 5 мЗв/год без всяких вредных последствий. Это значение и рекомендовано Международной комиссией радиационной защиты в качестве предельно допустимой дозы для населения в целом. Для ежегодного профессионального облучения (врачи и медицинские сестры — рентгенологи, лица работающие с радиоактивными веществами, персонал атомных электростанций АЭС) установлено предельно допустимое значение 50 мЗв/год. Существенно, что указанные годовые дозы должны быть равномерно распределены по времени.

Живые организмы обладают прекрасными механизмами поддержания своего гомеостаза, в том числе компенсации любых вредных внешних воздействий. Иммунная система организма уничтожает клетки, разрушенные или повреждённые радиацией. Пока скорость возникновения повреждений меньше скорости работы компенсаторных механизмов организма, он справляется с повреждениями. Отсюда следует, что важна не столько сама получаемая доза, сколько мощность дозы. Наиболее опасно

кратковременное, в течение минут, облучение большой интенсивности. На рис. 4.12 показаны зависимости чувствительности различных биологических видов к мощному однократному облучению. При получении этих зависимостей считалось, что доза является смертельной, если организм млекопитающего погибает в течение 30 дней после облучения. Из рис. 4.12 видно, что индивидуальная устойчивость к облучению внутри каждого вида

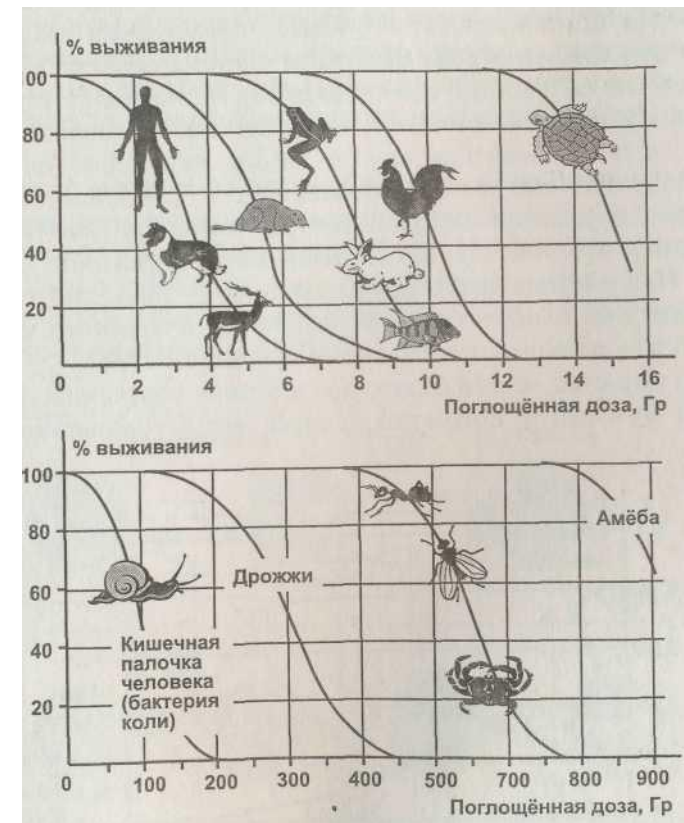


Рис. 4.12. Зависимости процентной доли особей, выживших после однократного одномоментного облучения, от эквивалентной дозы облучения. Высшие биологические виды в десятки и сотни раз чувствительнее к облучению, чем членистоногие, простейшие, улитки и большинство бактерий. Человек — один из наиболее чувствительных к облучению биологических видов. Кривая для организма человека верифицирована по данным о лучевом поражении жителей Хиросимы и Нагасаки после атомных бомбардировок

имеет большой разброс. При дозе 3,5 Гр, равномерно распределённой по всему организму, погибает 10 % крыс с высокой чувствительностью к облучению, и в то же время 15 % крыс выживает при дозе в 7 Гр. Опасность однократного облучения можно характеризовать *абсолютно летальной*  $DL_{100}$  и *среднесмертельной дозой*  $DL_{50}$  облучения (см. п. 4.1). Принято считать, что для человека  $DL_{100}$  7 Гр и  $DL_{50} = 3,5$  Гр.

При мощности дозы, соответствующей природному фону, иммунная система абсолютного большинства людей способна полностью компенсировать лучевые повреждения тканей. По мере роста *мощности дозы* иммунная система перестаёт успевать справляться со своими обязанностями, и наиболее страшным следствием этого оказываются онкологические заболевания, которые могут проявиться спустя много лет после облучения (рис. 4.13). Разовые дозы, превышающие 1 Гр, вызывают острую лучевую болезнь, при которой человек может погибнуть в течение одного-двух месяцев в основном из-за поражения костного мозга. При разовых дозах, превышающих 5—7 Гр, смерть наступает в течение нескольких дней вследствие внутренних кровоизлияний и поражения центральной нервной системы.

Что касается генетических последствий облучения, то здесь частота мутаций у потомства, скорее всего, пропорциональна



Рис. 4.13. Относительная вероятность заболевания раком в результате получения однократной дозы в 1 Гр при равномерном облучении всего тела. Прежде всего развиваются лейкозы. Опухоли развиваются позже, и вероятность их возникновения больше, но пока нет достаточной информации, чтобы уточнить эту кривую

мощности дозы, полученной родителями, и, следовательно, любое хроническое превышение над фоновым уровнем радиации увеличивает риск возникновения мутаций, которые могут передаваться из поколения в поколение. Согласно существующим оценкам, хроническое облучение с мощностью дозы 0,03 Гр/год человеческих особей мужского пола ведёт к появлению от 2000 до 15 000 случаев серьёзных генетических заболеваний на каждый миллион рождений. Вместе с тем не выявлено статистически значимого увеличения числа наследственных заболеваний у потомков лиц, подвергшихся кратковременному переоблучению. Для появления генетических аномалий облучение, видимо, должно непосредственно воздействовать на половые клетки или зародыш.

Главный вклад в фоновое облучение создаёт инертный радиоактивный газ радон естественного происхождения и продукты его распада. В природе встречаются два изотопа этого газа:  $Rn^{222}$  входит в семейство изотопов радиоактивного ряда урана  $U^{238}$  (рис. 4.14), а  $Rn^{220}$  входит в семейство тория  $Th^{232}$  (поэтому иногда его называют тороном).



Рис. 4.14. Схема части радиоактивного семейства урана-238, содержащей радон-222 и продукты его распада. Указаны типы распада и периоды полураспада (сплошные стрелки). Штриховые стрелки означают достаточно длинные ряды превращений, и на них указаны максимальные периоды полураспада в ряду. Выделившийся в виде газа радон попадает в воздух, где химически активные металлы - продукты его распада (полоний, висмут и свинец) почти мгновенно оседают на аэрозольных частицах

Основную роль играет  $Rn^{222}$  и продукты его распада. Радон — тяжёлый газ, примерно в 7,5 раз тяжелее воздуха. Он постоянно и повсеместно просачивается из земной коры в атмосферу, имея тенденцию скапливаться в плохо вентилируемых низко расположенных местах и помещениях. Сам по себе радон в силу своей химической инертности в лёгких не задерживается, а внешнее облучение от него легко экранируется одеждой и эпидермисом. Но короткоживущие продукты его распада — радиоактивные изотопы полония, свинца и висмута — практически мгновенно после образования оседают на аэрозольных частицах и вместе с ними попадают и задерживаются в лёгких. Именно таким образом мы получаем около 50 % фонового облучения. Многие строительные материалы — гранит, цемент, бетон, глинозёмы — неизбежно содержат следовые количества урана, тория и продуктов их распада, а потому постоянно выделяют в воздух радон. Если эти помещения плохо проветриваются, что особенно характерно для современных теплосберегающих строений, то концентрация радона в них может в сотни раз превышать его концентрацию в наружном воздухе. Радон может также скапливаться в подвалах и на первых этажах деревянных зданий, куда просачивается непосредственно из почвы. В последние годы было установлено, что в результате скопления радона люди, постоянно работающие или живущие в таких зданиях, могут получать облучение с мощностью дозы до 100 и более мГр/год, что значительно превышает любые установленные нормы безопасности.

Не только строительные материалы, но и практически любые ископаемые ресурсы неизбежно содержат в небольших концентрациях радионуклиды. В большинстве случаев при добыче и использовании эти нуклиды не рассеиваются в окружающей среде. Основным исключением является уголь, сжигаемый без золоулавливания, то есть в домашних печах, малых отопительных котлах и т. п. В этом случае вместе с дымом происходит рассеяние содержащихся в угле долгоживущих радионуклидов.

В настоящее время *антропогенные источники радиации* представляют опасность в глобальном, региональном и локальном масштабах.

В глобальном масштабе угрозу составляет само существование больших запасов ядерного оружия и, особенно, появление новых ядерных держав, а также возможность попадания ядерных материалов в руки террористических организаций. Экологиче-

ские последствия мирового ядерного конфликта трудно предсказуемы. Один из сценариев развития событий — «ядерная зима», другие сценарии предполагают иные, но не менее трагические варианты развития событий. В любом случае биосфера в её нынешнем виде погибнет, а что касается человечества, то, по меткому замечанию А. Эйнштейна, «четвёртую мировую войну человечество будет вести дубинами», если хоть кто-нибудь сумеет уцелеть. Локальный ядерный конфликт, а также возобновление массовых испытаний ядерного оружия несут в себе весьма серьёзную угрозу для экосистем и населения в пределах нескольких сот километров. При ядерных взрывах в атмосфере образуются сотни видов радионуклидов, которые рассеиваются и переносятся не только в тропосфере, но и в нижних слоях стратосферы, а потом выпадают на поверхность Земли. Большинство из этих радионуклидов либо быстро распадается, либо изначально имеет ничтожную концентрацию, и основной вклад в радиоактивные выпадения от взрывов дают: изотоп углерода  $C^{14}$  (p-распад,  $T_{1/2} = 5730$  лет), изотоп циркония  $Zr^{95}$  ( $T_{1/2} = 64$  дня), изотоп цезия  $Cs^{137}$  ( $T_{1/2} = 30$  лет) и изотоп стронция  $Sr^{90}$  (p-распад,  $T_{1/2} = 29$  лет). Изотопы углерода и циркония играют небольшую роль, первый из-за сравнительно низкой активности, второй из-за быстрого распада и исчезновения. Наиболее опасны радионуклиды  $Cs^{137}$  и  $Sr^{90}$ , так как они имеют и сравнительно высокую активность (обоим свойственен p-распад), и значительное время жизни. Оба они принадлежат к группам наиболее химически активных металлов, жадно захватываемых живыми организмами и встраиваемых в биохимические циклы. Попадая в организм человека (и других животных) в основном с пищей и во-, дой, цезий как щелочной металл распределяется по всем органам равномерно, а стронций накапливается в костях, поражая костный мозг. Так как интенсивный приток этих изотопов в биосферу прекратился более 40 лет назад, их вклад в глобальное радиоактивное загрязнение сейчас уже ничтожен, но в местах, где проводились испытания, загрязнение очень велико до сих пор<sup>36</sup>.

Источником радиоактивного загрязнения, вокруг которого кипят общественные страсти, являются атомные электростанции (АЭС), хотя при нормальной работе выбросы радиоактивных ве-

<sup>36</sup> В своё время атмосферные ядерные испытания привели к росту глобального радиационного фона на 7 %, в 2000 г. вклад ядерных испытаний в радиационный фон составил уже менее 1 %■

ществ от них несущественны. К настоящему времени в мире работает около 400 атомных энергетических установок, дающих примерно 15 % мирового производства электроэнергии.

Сами атомные станции — это только часть ядерного топливного цикла, который начинается с добычи и обогащения урановых руд. Около 50 % урановых руд добывается в шахтах, остальные — открытым способом. Обогащительная фабрика строится рядом с рудником. Рудники и обогащительные фабрики — источник интенсивного долговременного радиоактивного загрязнения. При переработке руды образуется огромное количество отходов — «хвостов». К настоящему времени в мире их скопилось сотни миллионов тонн, и они будут оставаться активными миллионы лет. К счастью, удельная активность на единицу массы этих отходов невелика, и они консервируются без чрезмерных затрат. Далее урановый концентрат, полученный из обогащенной руды, на специальных заводах дополнительно очищается, и из него производится ядерное топливо. При переработке образуются газообразные и жидкие отходы, дозы облучения от которых много меньше, чем на остальных этапах *ядерного топливного цикла*. Готовое топливо поступает на АЭС.

На современных АЭС используется около десятка типов ядерных реакторов, и уровень радиоактивных выбросов у них зависит не только от типа и конструкции, но и существенно различается даже для одного и того же реактора. Реакторы снабжены мощными очистными устройствами, и в нормальных режимах их выброс состоит главным образом из радионуклидов инертных газов.

Последняя стадия ядерного топливного цикла — переработка и захоронение отходов АЭС. Отходы АЭС сами по себе являются достаточно ценным сырьём для получения ядерного топлива — плутония. Поэтому значительная часть отходов до захоронения подвергается переработке для его извлечения. Само захоронение, пожалуй, наиболее сложная проблема во всём цикле. При распаде нуклидов в отходах выделяются благородные газы, которые неизбежно будут пытаться вырваться из захоронений. Поэтому захоронения не могут строиться абсолютно герметичными, а должны иметь вентиляцию. Активность отходов АЭС очень велика и спадает медленно. Поэтому конструкция и технология захоронений должны обеспечивать их целостность в течение десятков и сотен тысяч лет. Наилучшим, хотя и дорогим подходом, является технология отверждения отходов с последующим захо-

ронением на больших глубинах в геологически стабильных районах. Вместе с тем суммарный физический объём отходов АЭС относительно мал, что несколько облегчает задачу.

При отсутствии крупных аварий топливный цикл всех АЭС в целом даёт прибавку к естественному фону не более 0,5 % в среднем по земному шару и примерно 1—3 % в непосредственной близости к АЭС и другим предприятиям, с ними связанным. Дополнительные дозы, которые получает население за счёт повышенных концентраций нуклидов в строительных материалах, рентгенологических обследований и сжигания каменного угля, гораздо выше. Небрежное обращение с аппаратурой, содержащей высокоактивные изотопы, например с промышленными дефектоскопами, может представлять ещё большую опасность на локальном уровне. Особо здесь следует выделить случаи, когда предприятия из экономии или по небрежности не принимают специальных мер по утилизации подобных источников излучения, отслуживших свой срок, а просто выбрасывают их на свалки общего назначения, а то и где попало.

Основной и весьма серьёзной проблемой ядерной энергетики является возможность крупных «нештатных» или «сверхпроектных» аварий<sup>37</sup>, при которых события развиваются неожиданным образом. За полвека с лишним развития ядерных технологий наиболее крупными авариями со значительными выбросами в окружающую среду были: авария реактора в Уиндскейле (Великобритания, 1957 г.), две аварии на Южном Урале (тепловые взрывы ёмкостей для ядерных отходов, 1957 и 1967 гг.), авария на атомной электростанции в Три-Майл-Айленде (США, 1979 г.) и авария на Чернобыльской атомной станции (Украина, 1986 г.).

Крупнейшей из этих аварий была чернобыльская, давшая гигантский выброс радиоактивного материала в окружающую среду, сравнимый только с поступлением радионуклидов от испытаний ядерного оружия (рис. 4.15). Это отнюдь не означает, что такая авария сопоставима с этими испытаниями по своим последствиям, — слишком велики отличия в изотопном составе выброса, длительности и условиях его формирования и распространения. Именно после чернобыльской аварии радиофобия во всём мире приобрела гораздо большие масштабы, чем даже во времена ядерных испытаний в атмосфере. Между тем имеющие-

<sup>37</sup> Во всех случаях аварии были связаны с пожарами, утечками и тепловыми, а не ядерными взрывами. Ядерный взрыв атомного реактора невозможен.

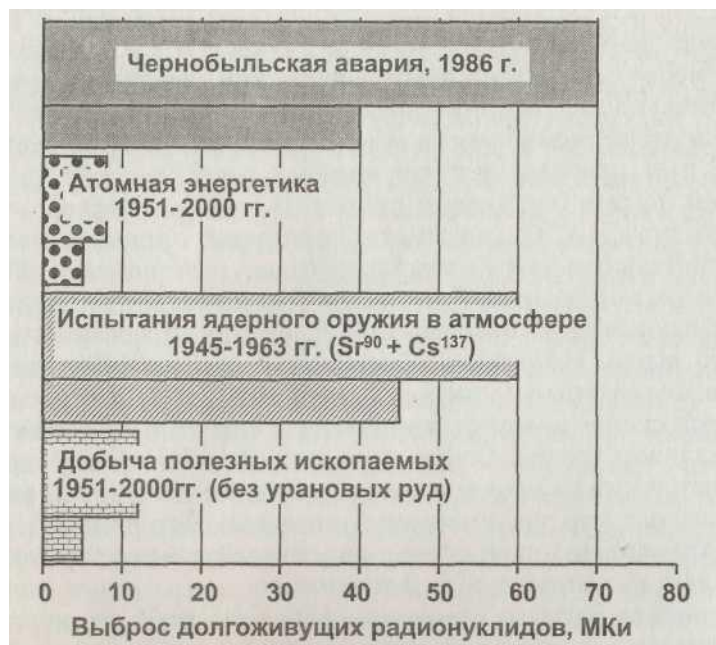


Рис. 4.15. Выбросы долгоживущих радионуклидов в биосферу от различных источников, выраженные в **мегаюри** (миллионах юри). Приведены две оценки — минимальная и максимальная. Выброс от атомной энергетики включает выбросы на всех этапах производственного цикла и от всех аварий, кроме чернобыльской

ся данные о последствиях этой аварии крайне противоречивы. Разброс оценок числа жертв облучения просто изумителен. Различаются даже сведения о точном количестве погибших непосредственно от острой лучевой болезни сотрудников АЭС и пожарных, пытавшихся погасить огонь на открытом реакторе. Например, по данным Научного комитета по действию атомной радиации ООН, всего от лучевой болезни умерло 45 человек, и риск фатальных онкологических заболеваний в течение 10 лет составляет не более 670 человек. А по утверждению некоторых авторов публикаций в средствах массовой информации за 13 лет от лучевой болезни погибло 100 тысяч человек, а всего от последствий аварии — 200 тысяч. Первая из этих оценок представляется, возможно, несколько заниженной, но достаточно близкой к истине. Это подтверждается статистикой, полученной при обследовании жертв атомных бомбардировок Хиросимы и Нагасаки и

При медицинском наблюдении за персоналом многочисленных объектов атомной промышленности во всём мире. Если судить по обобщённым данным, приведенным на рис. 4.13, то к этим жертвам чернобыльской катастрофы в течение 2002—2012 годов добавится ещё несколько тысяч случаев онкологических заболеваний, однако ни о каких сотнях или десятках тысяч жертв не может быть и речи. Некоторый рост числа заболеваний может быть связан и с тем, что в силу экономических и психологических причин много жителей отказалось от отселения из мест с повышенным уровнем радиации. Нарушаются и ограничения, наложенные на выпас скота и другое сельскохозяйственное использование земель, заражённых выпавшими радионуклидами.

Таким образом, основная проблема, возникающая при развитии атомной энергетики, — это предупреждение крупных аварий. Полученный опыт показывает, что все аварии, включая чернобыльскую, были связаны с грубыми нарушениями инструкций по технике безопасности, ошибками и небрежностью персонала, неграмотными распоряжениями и неразберихой при противоаварийных мероприятиях. Огромный ущерб наносят и попытки скрывать и тем более фальсифицировать фактическое положение дел.

Там, где на АЭС и других предприятиях ядерного цикла царит порядок, а невозможность больших выбросов радиоактивного материала при любой аварии заложена в конструкции используемых реакторов, атомная энергетика успешно развивается без серьёзных инцидентов. Такова ситуация во Франции, где АЭС вырабатывают более 75 % всей электроэнергии, в Японии, Бельгии, Швеции, Канаде и ряде других стран. Уровни опасности загрязнения от других источников энергии, таких как тепловые электростанции на ископаемом горючем, гораздо выше, чем от атомной энергетики. Неизбежный переход к строительству АЭС с реакторами-размножителями на быстрых нейтронах даст не только практически неограниченный запас энергетического сырья, но и резко снизит потенциальную аварийность АЭС.

#### 4.7. Аварии как источники загрязнения

Не только атомный реактор, но и любой агрегат, содержащий в сконцентрированном виде опасные вещества и (или) энергию, является потенциально аварийным. Среди аварийных



антропогенных воздействий на экосистемы можно выделить несколько особо опасных. К ним относятся:

- аварии на атомных электростанциях и химических предприятиях;
- аварии при транспортировке горючих, радиоактивных и ядовитых веществ;
- прорывы водоочистных сооружений и нефтепроводов;
- обширные лесные пожары;
- аварии танкеров и нефтедобывающих платформ.

Каждая из крупных аварий имеет «своё собственное лицо», однако можно выделить одну их характерную черту. Почти все страшные аварии, пожары и катастрофы есть следствие пренебрежения мерами безопасности при проектировании, строительстве или эксплуатации опасных объектов. Приведём примеры.

Большую опасность для людей и природных экосистем представляют собой химические реакторы и хранилища продукции. В большинстве случаев на подобных предприятиях имеют место постоянные утечки опасных ядовитых веществ, но к особо страшным последствиям ведут аварии. Самая тяжёлая катастрофа в химической промышленности произошла ночью со 2 на 3 декабря 1984 г. в городе Бхопала (Индия) на заводе дочерней фирмы американской корпорации «Юнион карбайд». Из-за **неисправности системы охлаждения и аварийной сигнализации** из резервуара, содержавшего более 40 тонн метилизоцианата, в течение двух часов в атмосферу выбрасывались его пары при температуре примерно 200 °С и под давлением более 10 атмосфер. Метилизоцианат  $\text{CH}_3\text{NCO}$  — сильный яд, служивший промежуточным продуктом для производства *пестицидов*, используемых для уничтожения сельскохозяйственных вредителей и переносчиков опасных заболеваний. Молекулярный вес  $\text{CH}_3\text{NCO}$  равен 57, и его пары почти вдвое тяжелее воздуха. Вертикальное перемешивание воздуха ночью было слабым, и ядовитое облако стелилось над спящим городом. В общей сложности от отравления погибло более 3500 человек, не менее 30 000 стали инвалидами, а общее число пострадавших непосредственно от аварии составило около полумиллиона. Кто бы ни был виноват в этой аварии, но она, безусловно, явилась следствием пренебрежения техникой безопасности, как со стороны проектировщиков, так и со стороны персонала.

Огромную опасность для водных экосистем и биосферы в цеде представляют разливы нефти и нефтепродуктов. При авариях нефтеналивных танкеров и нефтедобывающих платформ в море внезапно попадают гигантские количества нефти, растекающиеся по поверхности воды и переносимые течениями на сотни километров. Каждая такая авария приводит к массовой гибели морских организмов от планктона до крупных рыб, птиц и морских млекопитающих на площадях в тысячи квадратных километров и загрязнению десятков километров берега. Более половины мирового экспорта нефти перевозится танкерами. В настоящее время в мире эксплуатируется более 1000 гигантских супертанкеров, каждый из которых способен перевозить более 100 000 тонн нефти. Ежегодно происходит около ста аварий танкеров, в том числе до 20 тяжёлых, и, согласно статистическим данным, 60 % из них происходит вследствие небрежности **или** ошибок персонала. Только у входа в пролив Ла-Манш произошли две гигантские аварии. 18 марта 1967 г. танкер «Торри Каньон» сел на мель, и в море попало около 120 тысяч тонн нефти, а 16 марта 1978 г. при **сходной** аварии танкера «Амоко Кадис» разлилось более 200 тысяч тонн нефти. 24 августа 1989 г. у берегов Аляски сел на риф танкер «Эксон Валдиз», из которого вытекло 45 тысяч тонн нефти, покрывшей около 1500 км<sup>2</sup> акватории. Последствия подобных аварий наблюдаются и спустя десятилетия. **Все эти аварии происходили при хорошей погоде и исключительно по халатности владельцев и экипажей.** Достаточно сказать, что капитан танкера «Эксон Валдиз» в момент катастрофы был просто беспробудно пьян!

Анализ большинства катастроф показывает, что, как правило, проектировщики, производя свои расчёты, пренебрегают «человеческим фактором» и предполагают катастрофическую аварию невозможной, основываясь на гипотезе, что в процессе эксплуатации их инструкции не будут серьёзно нарушаться. Эта ошибочная гипотеза дорого обходится человечеству!

#### 4.8. Глобальные проблемы: рост парникового эффекта и разрушение озонового слоя

Среди огромного разнообразия загрязнителей, выбрасываемых человеком в природную среду, почти безобидные на первый <sup>Вз</sup>гляд вещества (по сравнению с бенз(а)пиреном или тяжёлыми Металлами) могут оказаться наиболее опасными для биосферы в

целом. Это — углекислый газ, метан, а также окислы азота и хлорфторуглеводороды<sup>38</sup>, главным образом фреоны  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$  и  $\text{CFCl}_3$ , широко использовавшиеся в холодильной технике и в аэрозольных баллончиках-распылителях дезодорантов, инсектицидов и т. д. Дело в том, что все эти вещества играют огромную роль в формировании парникового эффекта, а окислы азота и хлорфторуглеводороды способны разрушать стратосферный озоновый слой<sup>39</sup>.

Выше, в главе третьей, роль парникового эффекта и значение озонового слоя были подробно рассмотрены. Парниковый эффект — это в принципе весьма благоприятное явление природы, так как благодаря нему сохраняется тепло на поверхности Земли, и она может быть обитаемой. Однако если газовое одеяло Земли станет слишком хорошо сохранять тепло из-за роста концентрации в атмосфере парниковых газов, прежде всего  $\text{CO}_2$ , то это вызовет неизбежные серьёзные изменения климата. Концентрация  $\text{CO}_2$  увеличивается вследствие сжигания огромных количеств ископаемого топлива и сведения лесов (рис. 4.16). Примерно 40 % этого выброса поглощает мировой океан, но его способность достаточно быстро удалять избыток  $\text{CO}_2$  из атмосферы недостаточна.

Наряду с выбросом парниковых газов хозяйственная деятельность ведёт к попаданию в атмосферу огромного количества аэрозольных частиц. Воздействие частиц на климат неоднозначно. С одной стороны, они отражают определённую долю входящей лучистой энергии обратно в космос, с другой стороны, они поглощают эту энергию, что ведёт к нагреванию атмосферы. Осаждаясь на поверхность полярных шапок, они уменьшают альбедо, способствуя потеплению. В целом антропогенные аэрозольные частицы, скорее всего, уменьшают поток солнечной энергии, достигающий поверхности Земли, и действуют как охлаждающий фактор.

Человечество сформировалось и освоило Землю в относительно холодную климатическую эпоху. Как правило, климат Земли был теплее современного. Переходы от холодных эпох к тёплым и обратно происходили очень быстро, но только по геологическим меркам. Поэтому глобальное потепление нельзя

<sup>38</sup> К этим малым антропогенным газовым составляющим относятся -  $\text{CCl}_4$ ,  $\text{CH}_3\text{Cl}$ ,  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ,  $\text{CHCl}_3$ ,  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$  и  $\text{CFCl}_3$ .

<sup>39</sup> Определённую роль в усилении парникового эффекта играют и повышенные концентрации «нижнего», тропосферного озона.

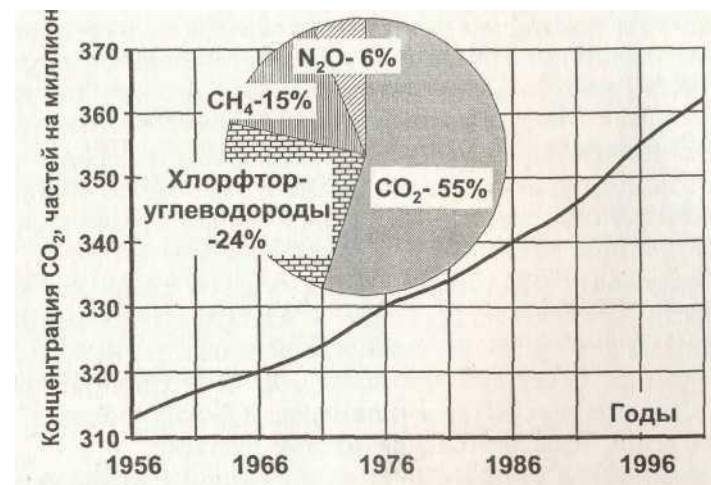


Рис. 4.16. Относительная роль различных газов в увеличении парникового эффекта и изменения средней концентрации углекислого газа в атмосфере Земли во второй половине XX века

было быстро обнаружить. Однако в конце XX и начале XXI века появились его явные признаки:

- систематическое повышение глобальной среднегодовой температуры с 1970 г. в среднем примерно на  $0,013\text{ }^\circ\text{C}$  в год;
- 9 наиболее жарких лет на планете в XX веке пришлось на период 1980-2000 гг.;
- резко увеличилась скорость схода ледников с ледяных щитов Антарктиды и Гренландии с образованием особо крупных айсбергов, по площади превосходящих небольшие страны Европы;
- площадь ледяного щита Северного Ледовитого океана, по данным спутниковых наблюдений, сократилась на 10 %;
- свободный ото льда сезон на канадских озёрах сократился на три недели (по другим водоёмам умеренных широт просто нет систематических данных).

Быстро развивающееся глобальное потепление — отнюдь не благо, а грозит человечеству многими бедами:

- потепление будет происходить неравномерно — в полярных областях сильнее, чем в экваториальных, поэтому произойдёт смена направлений океанических течений, ветров и перераспределение осадков;

- согласно некоторым расчётам, Гольфстрим может ослабеть и отодвинуться от берегов Европы, что приведёт к превращению мягкого европейского климата в резко континентальный с очень жарким летом и холодными зимами;
- произойдёт таяние огромного количества льда, что вызовет подъём уровня воды в океане и затопление обширных областей суши; в тундрах растает вечная мерзлота, и они превратятся в гигантские области солончатых болот;
- в результате перераспределения осадков сдвинутся к полюсам климатические зоны, и наиболее плодородные и важные для сельского хозяйства регионы, такие как степи Украины, Северного Казахстана, Южной Сибири, прерии в Соединенных Штатах и пампасы Южной Америки, скорее всего, превратятся в безводные пустыни;
- значительная часть избытка поглощённой солнечной энергии до перехода в тепло будет расходоваться на усиление атмосферной циркуляции (см. рис. 3.4 в гл. 3), что вызовет увеличение числа и рост мощности ураганов, смерчей и тому подобных разрушительных природных явлений.

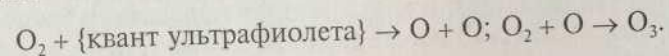
Вопрос о причинах глобального потепления вызывает споры в научной среде. Одни учёные склонны рассматривать глобальное потепление как обычное природное явление, много раз происходившее в истории нашей планеты, а рост концентрации углекислого газа в атмосфере — не как причину, а как следствие того обстоятельства, что растворимость  $\text{CO}_2$  в воде (и, следовательно, в мировом океане) и площади полярных шапок Земли падают с ростом температуры. По мнению этих учёных, антропогенный выброс парниковых газов не играет в этом процессе существенной роли.

Другие специалисты, напротив, увязывают потепление напрямую именно с антропогенной эмиссией парниковых газов.

Наиболее обоснованной представляется третья точка зрения, состоящая в том, что рост концентрации парниковых газов и средней температуры на планете — взаимозависимые процессы, ускоряющие друг друга. Климатическая система имеет несколько устойчивых состояний, но области устойчивости этих состояний сравнительно невелики (см. рис. 1.13 и комментарий к нему в гл. 1). Поэтому даже относительно небольшое по сравнению с природными процессами антропогенное воздействие способно вывести климат из одного равновесного состояния и спровоци-

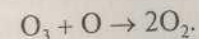
ровать переход к другому, в данном случае более тёплому, состоянию. Вопрос, следовательно, в том, чтобы ограничить антропогенное воздействие на климат, стараясь не спровоцировать его необратимое изменение. Это одна из причин, по которой очень важно сократить сжигание ископаемого углерода и перестроить мировую энергетику.

Антропогенная эмиссия окислов азота и хлорфторуглеродов не только способствует росту парникового эффекта, но и, что гораздо опаснее, способствует разрушению стратосферного озонового слоя. Озон  $\text{O}_3$  образуется в стратосфере при расщеплении молекул кислорода жестким ультрафиолетовым излучением (с длиной волны менее 0,242 мкм) согласно реакциям



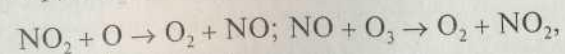
Стратосферный озон поглощает жёсткое ультрафиолетовое излучение Солнца (см. рис. 3.5) и тем самым спасает от него биоту. Образование озонового слоя позволило живым организмам заселить сушу, и жизнь на материках стала возможной (рис. 3.2 в гл. 3). Область максимальной концентрации озона находится на высоте около 30 км и иногда называется *озоносферой* (рис. 2.2). При общем количестве озона в атмосфере около 3,3 млрд тонн только 0,12 млрд тонн находится вне озоносферы, главным образом в тропосфере.

Естественное разрушение молекул озона происходит тоже под действием ультрафиолета или за счёт реакции с атомарным кислородом



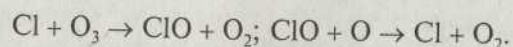
Среднее время жизни озона в атмосфере 50 часов.

Окислы азота, способствующие в тропосфере образованию озона, в стратосфере действуют в противоположном направлении, например, в такой циклической цепочке реакций:



причём один атом окисленного азота, многократно участвуя в этих реакциях способен вызвать разрушение сотен и тысяч молекул  $\text{O}_3$ . По другому же образом, но ещё более активно, озон разрушается атомарными галогенами - хлором и фтором, образующимися при разрушении ультрафиолетом хлорфторуглеродов или

попадающими в стратосферу естественным путём при извержениях вулканов. Хлорный цикл разрушения озона имеет вид:



Один атом галогена может разрушить до 10 млн молекул озона, поэтому даже ничтожные концентрации хлорфторуглеводородов опасны для озонового слоя. К настоящему времени в мире произведено более 10 млн тонн фреонов, и это настоящая химическая бомба замедленного действия и глобального масштаба. Дело в том, что основное преимущество фреонов — химическая инертность (они не ядовиты, не горючи, не растворимы и не вызывают коррозии) — приводит к тому, что они практически не поддаются утилизации и в конце концов попадают в тропосферу, где их время жизни составляет десятки, а может быть, и сотни лет и определяется их медленной диффузией из тропосферы в стратосферу. И только в стратосфере под действием жесткого ультрафиолета они разлагаются, выделяя входившие в их состав атомы галогенов, столь разрушительно действующие на озоновый слой. Проблема разрушения озонового слоя, — быть может, первый случай, когда опасность антропогенного загрязнения была предсказана заблаговременно, когда человечество и биота в целом ещё не ощутили его (загрязнения) негативных последствий. Ф. Ш. Роуланд (*Rowland*) с соавторами в 1974 г. опубликовал статьи, в которых указал на возможность разрушения озонового слоя вследствие применения хлорфторуглеводородов. Статьи серьёзно обеспокоили общественность и вызвали немедленную реакцию со стороны представителей бизнеса, для которых отказ от производства и применения фреонов означал огромные расходы. В 1984 г. была обнаружена знаменитая «озоновая дыра» над Антарктидой, где специфические условия атмосферной циркуляции привели к скоплению монооксида хлора СЮ — продукта распада фреонов в стратосфере. В результате анализа многолетних данных было показано, что толщина озонового слоя над Антарктидой снизилась к 1985 г. почти вдвое по отношению к нормальной (рис. 4.17). В 1987 г. были проведены одновременные измерения концентраций СЮ и озона на специально оборудованном высотном самолёте при пролёте вдоль антарктической «озоновой дыры». В результате была доказана однозначная связь между концентрацией СЮ и озона (рис. 4.18). Впоследствии «озоновые дыры» были обнаружены и в высоких широтах Северного полушария, где они охватывали огромные площади, но не



Рис. 4.17. Толщина слоя озона над Антарктидой. За десятилетие 1975—1985 гг. слой уменьшился почти вдвое. Измерения проводились каждый раз в октябре, когда в Южном полушарии наступает весна и начинается полярный день. Единице Добсона соответствует слой чистого озона толщиной в 0,01 мм при давлении и температуре на уровне моря. На карте штриховой линией обозначена северная граница области появления глубоких «озоновых дыр», практически совпадающая с Южным полярным кругом



Рис. 4.18. Зависимость концентрации озона от концентрации монооксида хлора, построенная по данным высотных самолётных измерений над Антарктидой, полученным 16 сентября 1987 г. Кругами отмечены экспериментальные точки, по которым построена зависимость

были столь глубокими, как над Антарктидой, слой озона в них уменьшался только на 10—15 % максимум.

После образования озоновые дыры размываются интенсивными стратосферными ветрами, что приводит к ослаблению озонового слоя над всей планетой. В целом предполагается, что это ослабление не превысило 1—2 %, что ниже возможностей приборного обнаружения. Однако, по оценкам медиков, даже такое небольшое снижение концентрации озона в стратосфере может вызвать 5—8% -й рост заболеваемости раком кожи.

В настоящее время заключён целый ряд международных соглашений по прекращению использования хлорфторуглеродов. Тем не менее проблема «озоновых дыр» остаётся актуальной. Во-первых, в атмосфере накоплено так много фреонов, что они будут воздействовать на озоновый слой ещё десятки лет, а во-вторых, антропогенный выброс окислов азота от сжигания топлива и в результате применения азотных удобрений остаётся очень большим.

## Глава 5

### Население и ресурсы Земли. Методы рационального природопользования

...Человек должен разделять мир со многими другими организмами вместо того, чтобы смотреть на каждый квадратный сантиметр как на возможный источник пищи и благосостояния или на место, на котором можно соорудить что-нибудь искусственное.

*Юджин Одум. «Основы экологии»*

Не будем, однако, слишком обольщаться нашими победами над природой. За каждую такую победу она нам мстит.

*Фридрих Энгельс. «Диалектика природы»*

#### 5.1. Народонаселение Земли

Оказавшись на вершине экологической пирамиды биосферы, человечество как биологический вид — абсолютный доминант получило и реализовало возможность экспоненциального (в геометрической прогрессии) роста своей численности в соответствии с законом Мальтуса (формула (1.1)). На рис. 5.1 приведен график изменения численности населения Земли в логарифмическом масштабе. На протяжении первых десятков и сотен тысяч лет человечество росло очень медленно, со скоростью примерно 0,002 % в год. В эту эпоху человек оставался частью природных экосистем. С появлением земледелия человек начал существенно влиять на структуры экосистем и создавать искусственные, антропогенные экосистемы. Одними из первых крупных антропогенных экосистем были огромные площади орошаемого земледелия Древнего Египта и Месопотамии. В эту эпоху рост населения Земли значительно ускорился, и ко времени распада древнего мира оно, возможно, достигало 500 млн человек. Войны, экологические катастрофы и голод как их следствие привели к резкому сокращению населения на пороге Средних веков. Примерно такой же спад населения явился результатом мировых эпидемий чумы в XIV веке. После этого и вплоть до

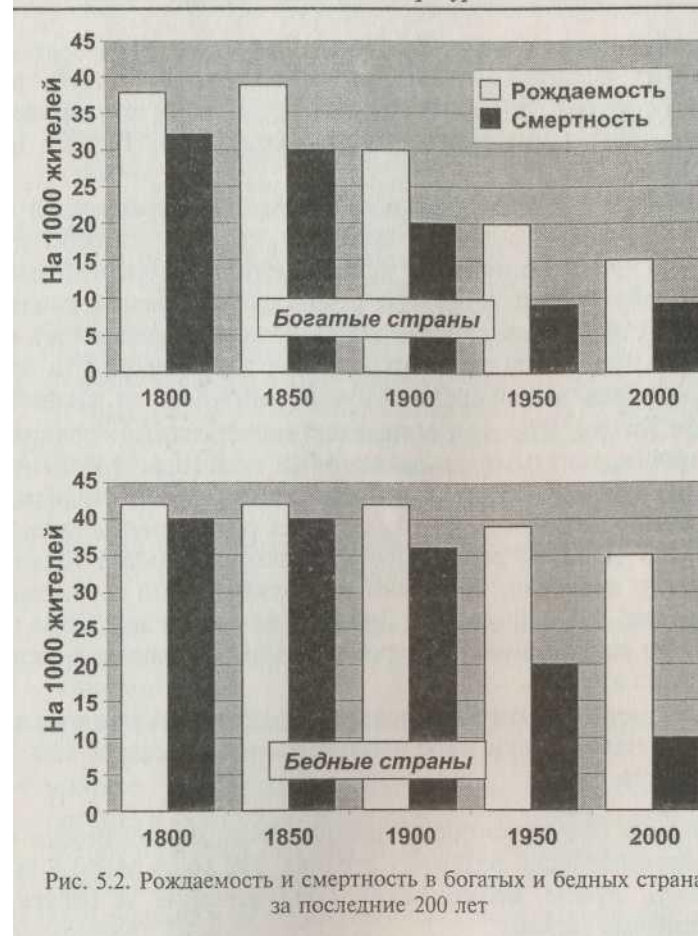


нашего времени скорость роста населения Земли непрерывно возрастала и только в конце XX века несколько снизилась с 2 % в 1970 г. до примерно 1,7 % в 1990—2000 гг.

Рост населения определяется двумя основными факторами: рождаемостью и смертностью. Коэффициентом рождаемости называется число живорождённых детей на 1000 жителей за год. Коэффициентом смертности — число смертей на 1000 жителей за год. На рис. 5.2 показано, как менялись рождаемость и смертность в богатых и бедных странах за последние двести лет. Прирост населения зависит от разности этих показателей.

До начала XX века ситуация в богатых странах Европы и Северной Америки мало отличалась от ситуации в относительно бедных странах и даже тогдашних колониях. Дело в том, что до середины XIX века рост численности населения Земли серьёзно сдерживался двумя факторами: инфекционными заболеваниями, с которыми не умели бороться, и периодическими неурожаями, приводившими к голоду.

В Средние века страшные эпидемии чумы, чёрной оспы, холеры и других быстропротекающих смертельных болезней периодически уносили до 2/3 населения целых стран и континентов. Рост городов способствовал распространению туберкулёза и других опасных инфекций. Детская смертность достигала 50 %, а



родильная горячка (послеродовой сепсис, то есть заражение крови вульгарной кокковой инфекцией) буквально косила женщин в наиболее репродуктивном возрасте.

Успехи микробиологии и медицины в конце XIX и особенно в XX веке привели к открытию мощных средств борьбы с инфекционными болезнями — вакцин, сывороток, сульфаниламидных препаратов и антибиотиков. Одновременно, что ещё важнее, стала понятна роль элементарных санитарно-гигиенических правил.

В конце XIX — начале XX века начали широко применяться химические удобрения и химические методы борьбы с сельскохозяйственными «вредителями» и «сорняками». Разви-

тие генетики стимулировало создание новых сортов сельскохозяйственных культур, устойчивых к засухе и болезням, и высокопродуктивных пород скота и птицы. Всё это привело к быстрому росту производства продовольствия в Европе и Северной Америке.

В результате сначала резко сократилась смертность в богатых, индустриально развитых странах, где этому способствовал общий рост благосостояния и просвещения. С ростом благосостояния и урбанизации в богатых странах существенно снизилась и рождаемость, поэтому темпы роста населения оказались невелики. Рост населения здесь происходил и происходит в основном за счёт увеличения средней продолжительности жизни<sup>40</sup>.

После Второй мировой войны наиболее важные средства борьбы с инфекционными заболеваниями и методы интенсивного земледелия стали доступны и относительно бедным странам. Соответственно смертность в этих странах резко уменьшилась, но сохранилась большая рождаемость, и скорость роста населения Земли резко возросла, особенно в Африке, Азии и Латинской Америке (рис. 5.3). Население Земли перевалило за 6 млрд человек, причём две страны — Китай и Индия — имеют население более 1 млрд каждая.

В современном мире социальные факторы и национальные традиции в наибольшей мере влияют на рост населения. К этим факторам относятся:

- уровень обеспеченности: рождаемость и смертность ниже в экономически развитых странах, где мала детская смертность, лучше медицинское обслуживание и отсутствует проблема голода;
- урбанизация и роль детей как трудовой силы в семье: рождаемость особенно велика в сельских местностях бедных стран, где широко применяется детский труд и нет обязательного школьного образования, отрывающего детей от домашнего труда; напротив, в развитых странах

<sup>40</sup> В последние десятилетия существенную роль начинает играть и миграция населения из бедных стран в Европу и США. Миграция всегда играла огромную роль в расселении человечества. Население США, Австралии и Канады почти полностью состоит из эмигрантов и их потомков. Латинская Америка — смесь коренного индейского населения и эмигрантов из стран Пиренейского полуострова. Современные англичане — в основном потомки племён, переселившихся с континента.



Рис. 5.3. Рождаемость и смертность в основных регионах мира в настоящее время

детский труд запрещён законодательно, а среднее образование является обязательным, что неизбежно снижает рождаемость;

- права женщин на образование и работу и средний возраст их вступления в брак;
- уровень пенсионного обеспечения: при достаточном его развитии родители не нуждаются в материальной помощи детей; в бедных странах родители рассматривают детей как своеобразное пенсионное накопление;
- культурные и религиозные традиции: например, католическая церковь выступает против применения противозачаточных средств и запрещает аборт; существенным фактором могут быть и традиции в питании и употреблении спиртных напитков (в странах Европы, где преимущественно употребляются натуральные виноградные вина, смертность заметно ниже, чем в странах, где в основном употребляют различные типы водки и пиво).

Сказанное хорошо видно из графика на рис. 5.4. Чем выше валовой национальный продукт на душу населения, тем ниже рождаемость. Исключение составляют только нефтедобывающие страны Ближнего Востока — Саудовская Аравия, Иран, Оман, Объединённые Арабские Эмираты, — где высокая рождаемость

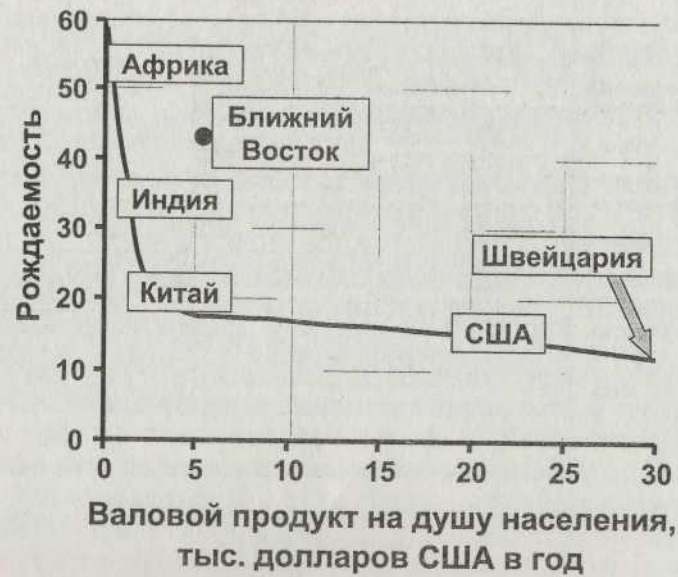


Рис. 5.4. Связь между душевым производством валового национального продукта и рождаемостью

при значительном доходе обусловлена религиозными и национальными традициями.

Важнейшими показателями уровня жизни и здравоохранения в стране являются средняя ожидаемая продолжительность жизни (среднее количество лет, которое может прожить новорожденный) и детская смертность (число детей, умерших до 1 года, на тысячу новорожденных). В настоящее время в беднейших странах Африки и Азии средняя продолжительность жизни менее 50 лет, тогда как во Франции, Испании, Исландии и Японии она составляет 80 и более лет. Ещё разительнее отличия в уровне детской смертности: от 3 в Финляндии до 200 в беднейших странах Африки. Эти показатели непосредственно связаны с возрастной структурой населения. На рис. 5.5 показаны возрастные структуры населения Европы и Африки по данным 1990 г. Из этого рисунка видно, что средняя продолжительность жизни в Европе приближается к биологическому пределу, тогда как в Африке очень велика смертность в раннем возрасте (сравните с рис. 1.10). Отличия этих возрастных структур ясно указывают на огромную разницу в уровне и качестве жизни на этих двух континентах.

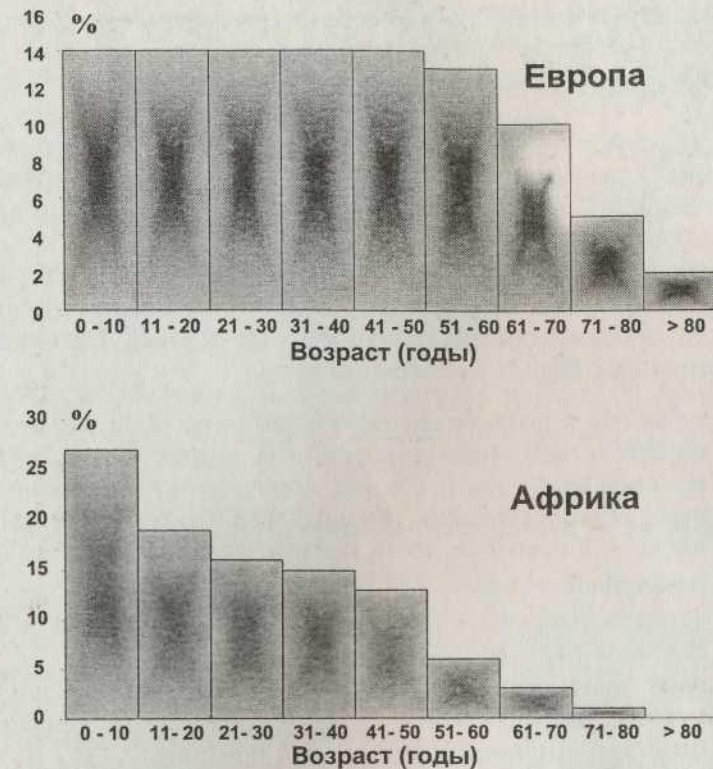


Рис. 5.5. Возрастная структура населения Европы и Африки (данные 1990 г.)

Коэффициенты рождаемости и смертности характеризуют текущее состояние популяции, но недостаточны для прогноза демографической ситуации. Наиболее точными показателями для расчётов изменений численности населения являются *коэффициенты простого воспроизводства и фертильности*. Первый из них указывает, сколько живых детей в среднем должно родиться у каждой женщины, чтобы численность населения была постоянной. Второй показывает реальное среднее число живых детей у женщин детородного возраста.

На первый взгляд может показаться, что для простого воспроизводства населения, то есть сохранения его постоянной численности, достаточно, если в среднем у каждой женщины родится двое детей. Однако надо учесть, что часть девочек умирает



до достижения ими детородного возраста, поэтому коэффициент простого воспроизводства в развитых странах составляет примерно 2,1, а в странах с высокой детской смертностью — не менее 2,5.

В настоящее время оба эти коэффициента снижаются во всём мире, соответственно замедляется рост населения Земли, и можно ожидать, что около 2100 г. мировое население стабилизируется примерно на уровне 8—12 млрд человек.

Современный очень быстрый рост населения приводит к быстрому истощению природных ресурсов и опасному загрязнению окружающей среды. И при этом по данным Организации Объединённых Наций в настоящее время:

- половина взрослого населения Земли неграмотна, что препятствует освоению современных эффективных методов ведения хозяйства и создаёт порочный круг: низкий уровень технологических знаний ведёт к бедности, а бедность — к невозможности получить эти знания;
- пятая часть человечества голодает или недоедает;
- четверть населения планеты испытывает нехватку в качественной питьевой воде;
- одна треть человечества не имеет нормального жилья с минимальными санитарными условиями, не обеспечена даже элементарной медицинской помощью.

Проблема состоит в том, что население богатых стран (я 25 % человечества) растёт медленнее, чем валовое производство в этих странах, тогда как в большинстве бедных стран рост населения обгоняет рост производства. Некоторый оптимизм внушает только то обстоятельство, что за последнее десятилетие XX века Китай и Индия, где проживает около 1/3 всего человечества, в основном решили проблему голода, встали на путь внедрения и освоения современных технологий и сумели резко снизить темпы роста населения.

Рост благосостояния человечества до сих пор достигается за счёт интенсификации потребления природных ресурсов, прежде всего из-за роста потребления энергии на душу населения (рис. 5.6). Это происходит в большинстве стран на фоне пренебрежения экологическими проблемами, решение которых откладывается «на потом», что чревато опасными последствиями уже в недалёком будущем.



## 5.2. Продовольственная проблема и зелёные революции

Сельскохозяйственное производство требует наличия достаточных земельных, водных и энергетических ресурсов и тем самым из всех видов человеческой деятельности создаёт наибольшую нагрузку на природную среду.

Принципиальная проблема, с которой сталкивается сельское хозяйство, — это необходимость удерживать в равновесии искусственно созданные антропогенные экосистемы, которыми в сущности являются любые сельскохозяйственные угодья, будь то заливное рисовое поле, поле, засеянное пшеницей, фруктовый сад или огород. Все эти экосистемы имеют очень малое видовое разнообразие, то есть в них нарушено основное условие устойчивости экосистем (см. п. 1.6). Более того, внешние условия, как правило, не соответствуют оптимумам на кривых толерантности для возделываемых культур, и фактически человек вынужден создавать и поддерживать целые искусственные биогеоценозы. Понятно, что такая деятельность неизбежно требует серьёзных затрат.

Само по себе производство продовольствия не исчерпывает проблемы питания человечества. Огромное значение имеет качество пищи, прежде всего достаточное количество в ней необходимых белков, витаминов и минеральных веществ. Недостаток

последних приводит к массовым *эндемическим* (то есть свойственным данной местности) заболеваниям. Так, например, многие регионы мира испытывают дефицит химически связанного йода<sup>41</sup>, что ведёт к распространению заболеваний щитовидной железы и другим гормональным патологиям у населения, включая врождённый кретинизм. В странах, где рис является основным и почти единственным продуктом питания большинства жителей, широко распространена болезнь бери-бери, являющаяся следствием дефицита витамина В, (тиамин) и способная привести к смерти от паралича и сердечной недостаточности.

Другая проблема, с которой человечество сталкивается на протяжении всей своей истории, — это проблема хранения и транспортировки продуктов питания. Для собранного урожая особую опасность представляют грызуны — домашние мыши и крысы. Дело не только в физическом уничтожении и порче продуктов, но и в том, что они являются носителями особо опасных инфекционных болезней человека, прежде всего чумы, вирусного гепатита (болезнь Боткина), геморрагических лихорадок, туляремии и лептоспироза (см. п. 4.5). В современном мире проблема переработки и хранения пищевых продуктов остаётся решенной не до конца, прежде всего из-за бедности.

Человеку известны десятки тысяч съедобных растений, однако только 30 из них широко используется в качестве сельскохозяйственных культур. Четыре культуры — пшеница, рис, кукуруза (маис) и картофель — в основном кормят человечество. Продукты животного происхождения (мясо, рыба, молоко, яйца) обходятся гораздо дороже в производстве, а потому до сих пор малодоступны для большинства людей. Дело в том, что для получения мясо-молочных продуктов домашним животным скормливается большое количество зерна (кукурузы и сои) и значительная часть (до 30 %) мирового улова рыбы. В соответствии со вторым началом термодинамики и правилом «10 %» (см. п. 3.2) доля изначальной солнечной энергии, получаемая конечным потребителем — человеком от животной пищи, в целом оказывается в 10 раз меньше, чем при вегетарианской диете. Это можно

<sup>41</sup> В определённой степени это относится и к Европейской России, в частности к московскому региону. Поэтому очень важно использовать йодированную соль. Следует помнить, что организм усваивает только химически связанный йод, в виде, например, солей KI или NaI. Свободный йод, попав внутрь, вызовет просто сильный ожог.

видеть из схемы пищевых цепей человека, показанной на рис. 5.7. В результате продукты животного происхождения оказываются до сих пор недоступны большинству населения планеты просто по экономическим причинам.

Тем не менее в опасной гонке между ростом народонаселения и производством продуктов питания, предсказанной Мальтусом (см. п. 1.2 и рис. 1.3), человечество пока умудряется не проиграть. Это достигается за счёт развития сельского хозяйства, которое может идти двумя путями: *экстенсивным* и *интенсивным*. Их сравнительные характеристики приведены на рис. 5.8.

Экстенсивный путь развития состоит попросту в увеличении площадей, занятых под сельскохозяйственное производство. На протяжении многих веков рост производства продовольствия происходил именно так. Этот путь является тупиковым в прин-

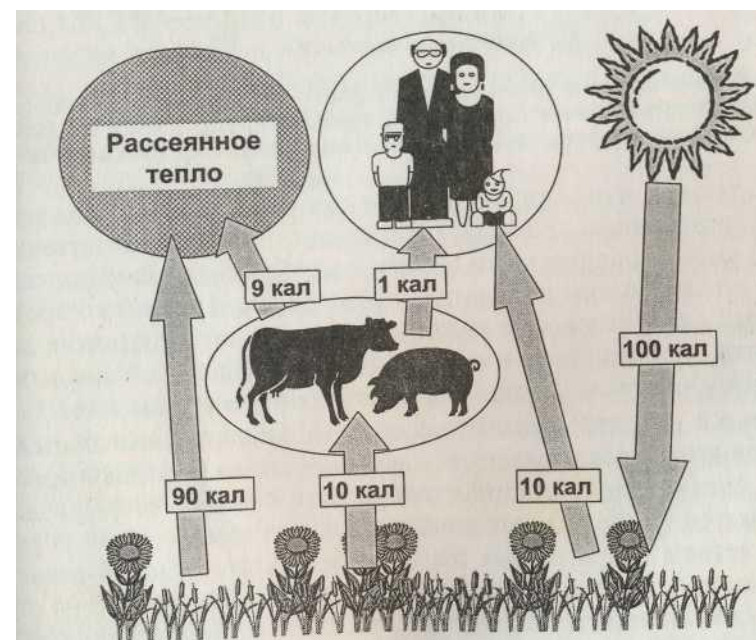


Рис 5.7 Две основных пищевых цепи человека. При питании растительной пищей человек получает 10 калорий из каждых 100 калорий солнечной энергии, военной полевыми культурами (рис, пшеница, картофель, кукуруза), \* 90 калорий растения рассеивают в виде тепла в основном за счет испарения воды. При питании продуктами животноводства человек получает только 1 калорию из 100, полученных растениями от Солнца

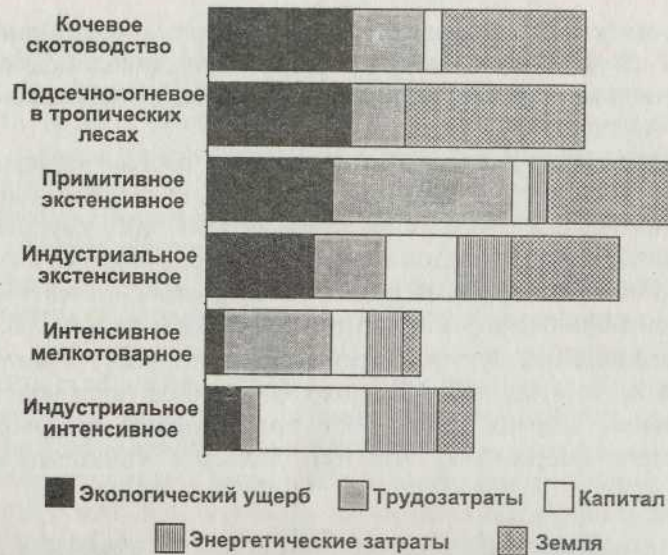


Рис. 5.8. Сравнительные удельные уровни экологического ущерба, затрат труда, капитала, энергии (в виде горючего или электроэнергии) и земли на единицу продукции при различных типах сельскохозяйственного производства

ципе, так как площади, пригодные для распашки или под пастбища, ограничены. Большая часть этих площадей в настоящее время занята тропическими лесами, вырубка которых может привести к тяжелейшим природным катастрофам. И вместе с тем печальный опыт человечества показывает, что такое развитие оказывается экономически неэффективным в перспективе и экологически убийственным даже на коротких отрезках времени.

Дело в том, что сведение лесов и распашка целинных степей без принятия соответствующих мер ведёт к сильнейшей эрозии почв, при которой тонкий плодородный слой не столько даже истощается, сколько смывается поверхностными водами и уносится ветром при пыльных бурях. В результате недавно освоенные земли теряют плодородие и часто забрасываются, но при этом далеко не всегда на них восстанавливаются природные экосистемы. В совсем недавнем прошлом, в начале XX века, такая судьба постигла огромные пространства прерий в Северной Америке. Они были распашаны и уничтожены (при этом погибло множество уникальных видов животных и дикорастущих растений), а потом из-за эрозии почв и пыльных бурь брошены и

только теперь медленно восстанавливаются. Но люди не умеют учиться на чужих ошибках, и ситуация во многом повторилась при «освоении» целинных степей Северного Казахстана и Юго-Западной Сибири в 60—70-х годах XX века. В настоящее время человечество вынуждено признать, что экстенсивное развитие сельского хозяйства себя полностью изжило, и дальнейшее движение по этому пути не только бесперспективно, но и опасно.

Альтернатива состоит в интенсивном развитии сельскохозяйственного производства, основанном на повышении урожайности возделываемых земель и разведении высокопродуктивных пород скота. В 50-х годах XX века этот процесс происходил в индустриально развитых странах, и его основой послужили широкое внедрение новых высокоурожайных сортов и массированное применение минеральных удобрений и ядохимикатов — пестицидов для борьбы с «вредителями» и сорняками<sup>42</sup> и болезнями растений (*пестициды* — от латинских слов *pestis* — зараза и *caedo* — убивать). Одновременно в практику земледелия вводились шадящие методы обработки земли, минимизирующие нарушения структуры почвы и снижающие её эрозию. За счёт этого в 1950—70 гг. произошёл многократный рост урожайности в индустриально развитых странах Северной Америки и Европы. Эту перестройку сельского хозяйства назвали «первой зелёной революцией». Однако она требовала значительных капиталовложений в новую сельскохозяйственную технику, развития соответствующих отраслей химической промышленности и больших затрат энергии, получаемой от ископаемого топлива (горючее для техники и электроэнергия для оросительных систем и индустриального животноводства). Поэтому эта схема оказалась «по карману» только экономически развитым, богатым странам. Проблем относительно бедных и густонаселённых стран Юга она не решила, и там продолжал практиковаться экстенсивный подход.

<sup>42</sup> Слова «вредители» и «сорняки» взяты здесь в кавычки, так как со строго экологической точки зрения только очень немногие виды этих представителей биоты могут быть названы так без кавычек. Дело в том, что появление на полях «вредителей» и «сорняков» есть не что иное, как стремление экосистемы к устойчивому равновесному состоянию, для которого характерно заполнение всех экологических ниш и максимум видового разнообразия. Однако именно такое устойчивое состояние неприемлемо для современного сельскохозяйственного производства. В дальнейшем кавычки будут опускаться, но суть дела от этого не меняется.

В конце 1960-х годов многолетними усилиями генетиков и селекционеров были получены совершенно новые сорта риса и пшеницы, отличающиеся высокой урожайностью, устойчивостью к болезням и коротким периодом созревания (*время вегетации*). У этих сортов стебли короче и механически прочнее, чем у обычных, а потому способны нести очень крупные и тяжёлые колосья. При применении дополнительного орошения и удобрений новые сорта дают рост урожая до пяти раз, а благодаря короткому периоду вегетации позволяют в условиях тропического и субтропического климата собирать с одного участка 2—3 урожая за год. Эта «*вторая зелёная революция*» охватила Китай, Индию, Индонезию, Пакистан, Японию, Мексику и ряд других стран, в которых в целом проживает более половины человечества. Однако в Африке и Южной Америке она затронула только Египет и Аргентину, и эти континенты остались по большей части голодными.

Две зелёные революции, существенно облегчив решение проблемы питания быстрорастущего человечества (мировое производство зерна выросло более чем пятикратно), привели, однако, к возникновению новых проблем.

Во-первых, резко возросла энергоёмкость сельского хозяйства, на нужды которого расходуется примерно 12 % мирового производства нефти.

Во-вторых, примерно десятикратный рост применения азотных и фосфатных удобрений привёл к засорению ими пресных, а в некоторых случаях и морских вод. В результате водоёмы *эвтрофируются*, в них гибнет рыба, а вода становится непригодной для использования или требует сложной и дорогой очистки.

В-третьих, качество продуктов питания во многих случаях снижается. Например, многие растения поглощают соединения азота по принципу «сколько дадут», и плоды насыщаются нитратными соединениями. При этом не только ухудшаются их вкусовые качества. Нитраты, попав в организм человека, превращаются в нитриты (соли азотистой кислоты  $\text{HNO}_2$ ), опасные соединения, обладающие, помимо общей токсичности, канцерогенным действием, то есть способные провоцировать возникновение раковых опухолей. Другим примером может служить использование для ускоренного выращивания скота и птицы гормональных добавок. У людей, систематически потребляющих это мясо, часто возникают гормональные отклонения.

В-четвёртых, широкое применение пестицидов связано с опасностью отравления людей, как острого в результате небрежности, так и систематического, ведущего к опасным хроническим заболеваниям. В этом смысле особую опасность представляет *кумуляция* (накопление) пестицидов в трофических (пищевых) цепях и пирамидах (см. п. 1.5, рис. 1.8 и 1.9), когда на верхнем уровне находится человек. Пример такой пирамиды показан на рис. 5.9.

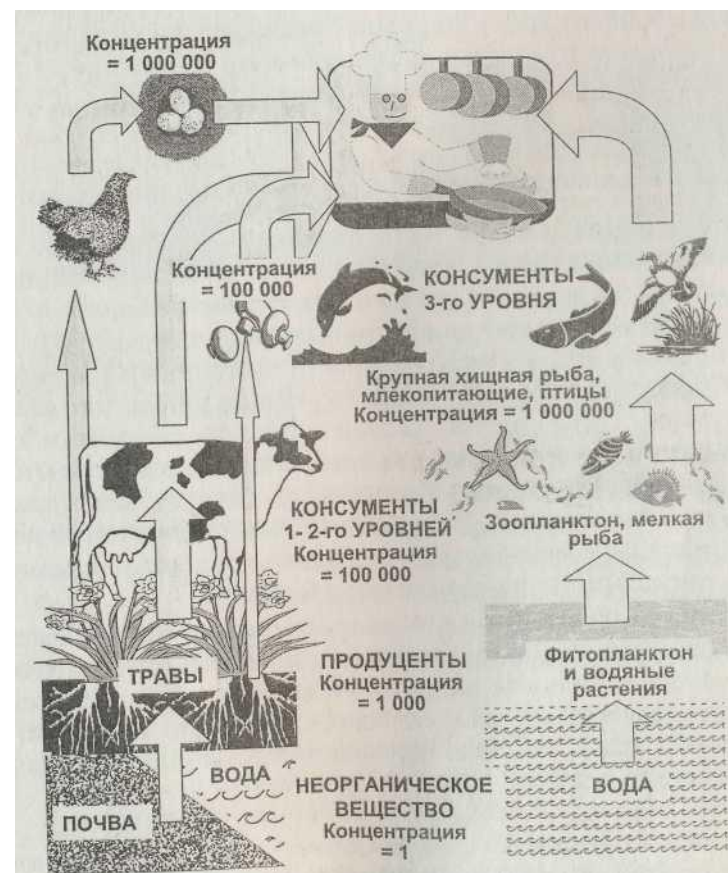


Рис 5.9 Пищевые пирамиды, на вершине которых находится человек. Приведены средние оценки увеличения концентраций. Последовательная кумуляция опасного токсиканта в каждом звене приводит к росту его концентрации в 100 000—1 000 000 раз

В-пятых, кумуляция пестицидов ведёт к вырождению и гибели многих видов высших животных. Грызуны, насекомые, растения и бактерии, для уничтожения которых предназначены пестициды, сравнительно быстро вырабатывают устойчивость к ним. В тоже время естественные враги этих фитофагов накапливают в своих организмах большие концентрации ядохимикатов, гораздо менее способны выработать устойчивость к пестицидам и погибают (рис. 5.10). В результате возникает порочный замкнутый круг: для сохранения урожая приходится прибегать к всё более сильным пестицидам во всё больших количествах, но эти меры оказываются всё менее эффективными. Вместо желаемой гибели вредителя происходит раскочка численности его популяции, и провоцируются процессы, подобные показанным на рис. 1.6 и 1.12.

Указанные обстоятельства привели к тому, что в конце XX века фактически началась и сейчас развивается «третья зелёная революция», отличительными особенностями которой являются:

- внедрение методов генной инженерии в практику создания новых сортов и даже видов сельскохозяйственных культур и высокопродуктивных пород скота<sup>43</sup>;
- отказ от массированного применения химических удобрений и замена их по возможности биогенными удобрениями (навоз, компост и т. д.), возвращение к практике севооборотов, когда с целью насыщения почвы связанным азотом вместо внесения азотных удобрений производится периодический посев клевера, люцерны (служащих прекрасным кормом для скота) и других растений семейства бобовых;
- создание особо нетребовательных, но высокоурожайных сортов, устойчивых к засухе и болезням;
- замена пестицидов узконаправленными биологическими методами борьбы с вредителями посевов, а при необходимости использование только короткоживущих пестицидов, распадающихся на безвредные вещества под действием света или вследствие окисления в течение нескольких часов или дней.

<sup>43</sup> Выведение новых пород и сортов с помощью генной инженерии принципиально отличается от классической селекции. Последняя использует наличный генетический материал биологического вида и искусственный направленный отбор (селекцию). Генная инженерия непосредственно изменяет набор генов биохимическими методами, причём широко используется включение генов одного вида в геном другого (трансгенные сорта).



Рис 5 10 Пищевые цепи, по которым движутся пестициды. Последовательная кумуляция в каждом звене приводит к росту их концентраций в живых организмах в 100-1 000 000 раз (сравните с рис. 5.9). Соответственно от них больше всего страдают насекомоядные и крупные хищники - естественные враги кровососущих насекомых, насекомых-фитофагов и грызунов

С природоохранной точки зрения наиболее существенными чертами третьей зелёной революции является резкое снижение объёмов применения химических удобрений и пестицидов. Это приводит к резкому улучшению состояния пресноводных экосистем и вообще всех природных биоценозов, соседствующих с сельскохозяйственными угодьями. Среди биологических методов борьбы с насекомыми-вредителями наибольшее развитие получили:

- разведение и распространение возбудителей заболеваний конкретного вида вредных насекомых-фитофагов или разведение и привлечение на поля их природных врагов — хищных насекомых;
- обеспечение благоприятных условий для насекомоядных птиц в частности, с помощью лесонасаждений, создающих места для гнездовий, - приём хорошо известный с давних времён;

- использование домашней птицы для очистки садов от насекомых, слизней и сорных трав;
- использование *феромонов* и гормонов.

Последний метод постепенно получает всё большее распространение. У большинства насекомых самка, готовая к спариванию, вырабатывает несколько микрограмм специфического для данного вида летучего *феромона* — аттрактанта, который самцы данного вида обнаруживают на расстоянии до километра (см. п. 3.6). Синтезированные феромоны используют для заманивания самцов в ловушки с сильными токсическими веществами, чем практически полностью лишают популяцию вредителей возможности размножаться. Другой подход заключается в использовании феромонов для привлечения на поля хищных насекомых. С помощью гормонов вызывают отклонения в жизненном цикле насекомых, что также приводит к гибели их популяции.

Основные преимущества этого вида защиты заключаются в его абсолютной избирательности. Уничтожая вредителя, эти вещества никак не действуют на другие виды. Кроме того, вредитель не может выработать генетической (врождённой) устойчивости к этим веществам в отличие от обычных пестицидов.

Новые подходы, особенно в части использования методов генной инженерии, подвергаются достаточно яростной критике. И далеко не всегда по существу, а в силу того, что ущемляют экономические интересы целых отраслей промышленности и стран-экспортёров сельскохозяйственной продукции. Особым атакам подвергаются полученные трансгенным путём новые сорта и даже виды растений и сельскохозяйственных животных, что вряд ли обосновано. Вместе с тем применение генной инженерии в ряде случаев и прежде всего в медицине действительно может привести к труднопредсказуемым негативным последствиям как биологическим, так и социальным.

### 5.3. Природные ресурсы. Общая характеристика. Минеральные ресурсы

Земля — благодатная планета с огромными и разнообразными природными ресурсами. Основная масса проблем, с которой сталкивается человечество, связана не с нехваткой ресурсов как таковых, а с их неразумной и неэффективной эксплуатацией.

Все используемые человеком природные ресурсы обычно разделяют на три категории: *невозобновимые*, *ограниченно возобновимые* и *неограниченно возобновимые*.

К невозобновимым ресурсам относятся прежде всего полезные ископаемые: нефть, уголь, природный газ, уран (энергетические ресурсы и сырьё для химической промышленности), руды многих металлов, фосфаты, как основа фосфорных удобрений, и минеральное сырьё, используемое в строительстве. Потребление всех этих ресурсов во второй половине XX века очень быстро росло, и геологические запасы многих из них сильно истощены. Однако, как это видно из рис. 3.7, содержание алюминия, железа, титана и кремния в земной коре столь велико, что потенциальные ресурсы этих веществ в принципе можно считать также неограниченными. К подобным веществам можно отнести и такие металлы, как золото и ванадий. В силу своей огромной способности к рассеянию эти металлы дороги, хотя их содержание в литосфере и гидросфере сравнительно велико. Проблема состоит в наличии месторождений, где концентрация металла достаточно велика, чтобы его добыча была экономически целесообразна. В табл. 5.1 приведены данные по срокам обеспеченности важнейшими неэнергетическими полезными ископаемыми. Эти сроки рассчитываются как отношение соответствующих запасов к добыче. Нижняя из цифр соответствует наиболее пессимистической оценке, а верхняя — оптимистической. Разброс данных обусловлен неопределённостью в оценках как запасов, так и потребления. В силу наличия больших прогнозных запасов по многим металлам геологоразведка ведётся просто по мере необходимости, поэтому даже при малых сроках обеспеченности нет оснований ожидать возникновения кризисной ситуации по этим ресурсам.

Сохранению многих ресурсов полезных ископаемых способствует многократное использование получаемых материалов. Прежде всего, это относится к *переду металлов*. В промышленно развитых странах сбор и переплавка металлического лома играют всё большую роль. Примерно 50 % стали, около 40 % алюминия и до 70 % меди и свинца в промышленно развитых странах используется повторно, и тенденция к росту вторичного использования постоянно растёт. Хотя эта тенденция и обусловлена в основном чисто экономическими причинами, она весьма благотворна как с точки зрения сохранения рудных ресурсов, так и с точки зрения минимизации ущерба природной среде: снижа-

Таблица 5.1. Сроки обеспеченности некоторыми полезными ископаемыми (годы)

Полезные ископаемые	По известным мировым запасам	По оценке извлекаемых запасов	По содержанию в земной коре (млн лет)
Алюминий	20-50	> 50 000	~ 40 000
Железо	100-140	» 2 500	« 2 000
Медь	40-50	300-400	250-300
Молибден	60-70	600-700	400-500
Золото	8-12	100	<b>60</b>
Цинк	20-30	500-700	400
Свинец	8-12	150-200	80-100
Фосфор	450-500	1500-2000	800-900

ется энергопотребление, уменьшаются вредные выбросы в атмосферу, сокращаются площади карьерных горных выработок.

Ограниченно возобновимые ресурсы — это, например, территория (земля) и плодородные почвы, запасы пресной воды, древесина, пищевые ресурсы в океане и т. п. В перспективе к этим ресурсам, к сожалению, приходится отнести атмосферный воздух и даже океанические воды в силу их значительного загрязнения. Загрязнение, бездумное уничтожение и деградация вследствие избыточной антропогенной нагрузки могут превращать эти ресурсы в невозобновимые. Чрезвычайно важным, но «невидимым» ресурсом является накопленная в биосфере генетическая информация. До тех пор, пока биологический вид существует, это — возобновимая часть генофонда планеты. Однако исчезновение вида ведёт к безвозвратной её утрате.

По-настоящему неограниченно возобновимым ресурсом можно считать только солнечную энергию и её производные — энергию ветра и падающей воды. Некоторые ресурсы могут быть невозобновимыми, но в известной мере заменяемыми. Проблема обычно заключается в экономической возможности такой замены.

Основные трудности, связанные с истощением ресурсов и с которыми человечество может столкнуться в обозримом будущем, — это дефицит традиционных видов топлива, прежде всего нефти и природного газа, и уничтожение и деградация ограниченных возобновимых ресурсов — плодородных почв, пресных

вод, лесов и рыбы в мировом океане. Истощение этих ресурсов грозит, прежде всего, снижением производства продовольствия, а далее — чрезвычайно опасными нарушениями биосферных циклов, рассмотренных в главе третьей.

Проблема истощения возобновимых ресурсов и отношения к ним цивилизации подобна проблеме предпринимателя, обладающего определённым капиталом. Возобновимые ресурсы достались человечеству даром — это исходный основной капитал. Разумно им распоряжаясь, его можно даже приумножить и получать прибыль для собственных нужд и запросов. Но если предприниматель будет тратить на удовлетворение своих запросов не только прибыль, но и основной капитал, он рано или поздно разорится. Сегодня ситуация такова, что человечество живёт подобно легкомысленному предпринимателю, растрачивая свой основной капитал — природные ресурсы.

#### 5.4. Почва

Почти всё, что мы едим, даёт почва. Она же накапливает и очищает пресную воду, обеспечивая питание растений. Растения, в свою очередь, предохраняют почву от разрушения — эрозии под действием выветривания и смыва поверхностными водами. Таким образом, растительность и почва образуют единую систему.

Почва представляет собой смесь взаимодействующих между собой неорганических веществ (глина, песок, ил), разложившегося органического вещества (гумус), воды, воздуха и огромного числа живых организмов — бактерий, простейших, грибов, червей, насекомых и т. д.

Зрелая почва вместе с произрастающими на ней растениями есть климаксовый биогеоценоз, состоящий из нескольких слоев — *почвенных горизонтов*. Вертикальная структура — профиль почвы показана на рис. 5.11. Поверхностный горизонт О состоит из листопада, веток и других органических остатков, гумусовый слой А — это пористая смесь частично разложившихся органических остатков, в которой обитают многочисленные почвенные живые организмы — детритофаги и сапрофаги. Именно этот гумусо-перегнойный слой почвы отвечает за её плодородие. При эрозии почв разрушение слоя А ведёт к потере плодородия. Восстановление этого слоя происходит (если происходит!) в ре-



Рис. 5.11. Почвенные горизонты. Масштаб по вертикали не соблюден

зультате многолетней сукцессии. Горизонты В и С состоят в основном из неорганического материала и являются долговременными хранилищами для воды, заполняющей поры между минеральными частицами.

Дождевая вода, просачиваясь через слои О и А, растворяет минеральные и органические вещества и выносит их в слой Е, откуда они могут вместе с водой подниматься к корням за счет капиллярного эффекта (см. п. 2.2). Корням растений требуется не только вода с растворёнными в ней веществами для питания, но и кислород воздуха для дыхания {аэрация}. Способность почвы удерживать воду и поддерживать дыхание корней сильнее всего зависит от её пористости, которая в свою очередь определяется минеральной основой почвы, состоящей из частиц различных размеров. Глина состоит из частиц меньших 2 мкм, плотно слипающихся друг с другом, и поэтому глинистые почвы хорошо удерживают влагу и минеральные вещества, но препятствуют аэрации. Пески, состоящие обычно из частиц со средним размером около 200 мкм, плохо держат влагу и питательные вещества. Поэтому суглинки, содержащие примерно равные доли песка и глины, оказываются наилучшей минеральной основой почвы.

Структура почвы и её сохранность сильнее всего зависят от растений, корни которых пронизывают её верхние горизонты. Биомасса корней может составлять от 10 до 99 % от биомассы растений. Биогеоценозы с относительно большой массой корней обладают и большей устойчивостью к неблагоприятным воздействиям, так как сеть корней препятствует эрозии. Для плодородия почвы чрезвычайно важно наличие в ней почвенных бактерий, прежде всего фиксаторов азота, грибов-детритофагов и дождевых червей, которые помимо переработки органических остатков производят непрерывное рыхление почвы, обеспечивая её аэрацию и улучшая структуру. Поэтому в хорошей почве количество дождевых червей должно быть порядка миллиона на гектар и более.

Значительную роль в характере растительности и возможности для растений усваивать питательные вещества играет кислотность почв. Наиболее благоприятными для земледелия являются нейтральные и слабокислые почвы с водородным показателем рН между 6 и 7<sup>44</sup>, так как они обеспечивают наилучшие условия по усвоению растениями минеральных веществ. Некоторые культуры, например картофель и ягоды, хорошо растут и при высоких уровнях кислотности с рН < 6. При выращивании пшеницы или кукурузы кислотность почвы снижают путём внесения на поля извести {известкование почв}. Щелочные почвы с рН > 8 засоляются, и требуются специальные меры для борьбы с этим явлением. Выпадение кислотных дождей часто ведёт к нежелательному закислению почв.

В почвоведении различают более десятка только основных типов почв. Для земледелия особо важны чернозёмы с мощным, до 50 см, слоем гумуса и суглинистые (подзолистые, серые лесные) почвы, остающиеся после сведения лиственных лесов. Суглинки сравнительно быстро истощаются и требуют постоянного внесения удобрений в гумусовый горизонт.

В целом почвенные ресурсы Земли, пригодные для земледелия, в настоящее время исчерпаны примерно на 40 %. Площади, занятые чернозёмами, а также суглинистые почвы, расположенные в областях с наиболее благоприятными для земледелия условиями, практически полностью хозяйственно освоены.

Вовлечение новых земель в сельскохозяйственный оборот происходит главным образом за счёт вырубки тропических ле-

<sup>44</sup> Определение водородного показателя см. в гл. 4.



сов, что само по себе таит угрозу глобальной экологической катастрофы. Освоение этих земель не может решить проблемы роста производства продовольствия. Почвы тропических лесов малоплодородны. В горизонте В этих почв накоплено много соединений железа и алюминия. После сплошной вырубке тропические ливни смывают тонкий слой гумуса, и под совместным влиянием кислорода воздуха и воды на поверхности образуется очень прочная красная твердая порода — железняк. Земля становится бесплодной и непригодной для обработки. По различным оценкам, железняки уже покрывают более 10 % площади тропиков, а в Западной Африке — до 15 %.

Сохранение и умножение плодородия почвы есть одна из ключевых проблем выживания человечества. Между тем усиленная эксплуатация наиболее плодородных почв ведёт не только к их истощению (это ещё полбеда, — с помощью удобрений и агротехники эта проблема вполне разрешима), но и к их эрозии. *Эрозия есть процесс разрушения почвы вследствие перемещения и рассеяния её частиц под действием ветра и поверхностного стока воды.* Различают несколько типов эрозии. Плоскостная эрозия происходит под действием выветривания и тогда, когда водяные потоки стекают по полю сплошным потоком, унося с собой частицы верхних слоев почвы. Этот тип эрозии особо опасен тем, что разрушение и истощение почвы происходит исподволь, почти незаметно, и последствия обнаруживаются со значительным опозданием.

Ветровая эрозия особо интенсивна на больших открытых пространствах распаханых полей, так как для подъёма частиц почвы скорость ветра у поверхности должна превышать определённое пороговое значение, называемое *критической скоростью подъёма*. Для открытых распаханых полей критическая скорость приземного ветра очень невелика — она составляет 3—5 м/с. По достижении ветром критической скорости  $v_{\text{крит}}$  масса поднимаемых в воздух частиц  $M$  быстро растёт по закону:

$$M \sim [(v - v_{\text{крит}})/v_{\text{крит}}]^{\alpha}, \quad (5.1)$$

где  $v$  — скорость ветра на высоте около 1 м и лежит в диапазоне от 3 до 5. Особо катастрофического объёма эрозия достигает во время так называемых *пыльных бурь*, когда сильный ветер поднимает на обширных пространствах миллионы тонн частиц почвы и рассеивает их на расстояния в тысячи километров.

При струйной водной эрозии на поверхности образуются ручьи, которые промывают себе русла, постепенно превращаясь и сливающиеся в овраги. В конце концов происходит полное заволаживание сельскохозяйственных угодий, и они становятся непригодны для использования. За счёт эрозии площадь наилучших пахотных земель сокращается примерно на 5—7 % за десятилетие.

Слой плодородной почвы нарастает очень медленно — примерно на 1/10 мм в год. В естественных условиях зрелых биогеоценозов скорость образования почвы примерно равна суммарной скорости эрозии. Но практически все используемые человеком территории в той или иной степени поражены эрозией. На рис. 5.12 приведены осреднённые оценки скоростей восстановления и эрозии почв, характерных для умеренных широт. Из этих данных видно, что при отсутствии специальных мер по защите и восстановлению почвенный покров сельскохозяйственных угодий быстро разрушается. Скорости естественного восста-

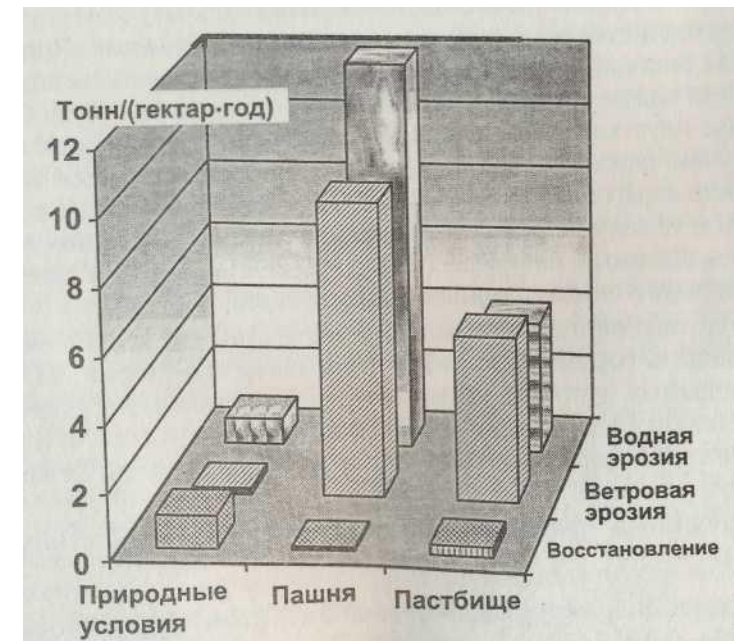


Рис. 5.12. Типичные скорости эрозии и восстановления почв для умеренных климатических условий

новления абсолютно недостаточно для сохранения почв, используемых для сельского хозяйства.

Ещё более страшным бичом для почвы являются строительные работы и открытые карьерные разработки. Сохранение снятого почвенного покрова и его последующая рекультивация проводятся строителями и производителями горных работ в очень редких случаях. По меткому выражению известного специалиста по эколого-экономическим системам К. Г. Гофмана, «как правило, после них остаётся сплошной лунный пейзаж». По счастью, эти отрасли человеческой деятельности в целом охватывают относительно небольшую площадь. Однако в некоторых регионах России, Украины, США и Южной Африки эта проблема стоит очень остро: горно-, угле-, и нефтедобывающие территории завалены миллионами тонн отвалов, «хвостов» обогатительных фабрик и разливами нефти.

Антропогенная эрозия почв опасна не только для самих почв, но наносит значительный ущерб водным ресурсам. Смытые с полей верхние слои почвы, попадая в водоёмы, засоряют их и способствуют процессам *эвтрофикации*.

Крайней степенью эрозии является *опустынивание*. При умеренном опустынивании пастбищ и пахотных земель их продуктивность падает на 10—25 %, при сильном — на 25—50 %. Очень сильное опустынивание означает падение продуктивности земли более чем вдвое и образование на месте плодородных угодий глубоких оврагов и песчаных дюн. Опустынивание может происходить и в силу естественных причин, но в природе это достаточно медленный процесс, к тому же, как правило, обратимый, и происходит он на границах существующих пустынь.

Под антропогенным воздействием опустынивание может происходить гораздо быстрее и охватывать территории, далёкие от природных пустынь, но находящиеся в зонах недостаточного увлажнения. Судя по всему, современные полупустыни и пустыни Ближнего Востока, а возможно, и большая часть Сахары — дело рук человека.

Основными причинами антропогенного опустынивания являются:

- перевыпас скота на протяжении длительного времени;
- неправильное орошение, ведущее к засолению почв и разрушению их верхнего слоя;

- распашка земель, в принципе непригодных для земледелия;
- вырубка и уничтожение лесов и кустарника;
- деградация земель за счет многолетней добычи полезных ископаемых, строительства и пр.

По различным оценкам, за вторую половину XX века опустыниванию подверглись от 300 до 800 млн га, но действенных мер в должном масштабе до сих пор никто не предпринимает.

С сожалением приходится констатировать, что Россия вместе с Китаем, Индией и США является лидером по скорости развития эрозии. В этих странах эрозией поражены около 35 % почв, и только сравнительно высокие значения коэффициента увлажнения (см. п. 2.1) спасают их от тотального опустынивания.

Для подавления эрозионных процессов существует целый ряд эффективных приёмов. Чтобы сохранить почвенную структуру, минимизируют механическое воздействие на почву, используя безотвальную обработку. Верхний слой почвы при этом рыхлится без переворачивания пластов. В результате сохраняются прошлогодние растительные остатки и влага и уменьшаются расходы энергии на обработку. Однако при этом приходится использовать много *гербицидов* — пестицидов, предназначенных для борьбы с сорняками.

На склонах пахота и сев должны вестись строго поперёк, а не вдоль склона. Тогда ряды растений препятствуют стоку воды и смыву верхнего слоя почвы. На более крутых склонах используется террасирование.

На поливных землях должны применяться дождевальные установки, позволяющие минимизировать смыв верхнего слоя почвы и правильно дозировать поступление воды, чтобы избежать заболачивания и засоления.

Особую роль в сохранении почв способны сыграть меры, которые можно назвать экологическими. В их основе лежит восстановление видового и ландшафтного разнообразия в антропогенных системах, что является основным условием повышения системной устойчивости любого биоценоза (см. п. 1.6), а также в максимально возможной степени восстановление в антропогенных биогеоценозах естественных геохимических круговоротов.

Сохранению почвы способствует использование чересполосицы, при которой сельскохозяйственные культуры высеваются

чередующимися широкими полосами поперёк уклона. Этот приём используется совместно с севооборотом на полосах. Чередование полос не только снижает эрозию. Посев на части полос бобовых обогащает почву азотом, а смена типа растительности препятствует распространению болезней, сорняков и вредителей.

Чтобы избежать заовраживания, производятся посадки деревьев и кустарников. Эти посадки одновременно дают приют птицам, истребляющим насекомых, что позволяет сократить использование инсектицидов. Уже образовавшиеся овраги перегородиваются плотинами, которые удерживают наносы, постепенно заполняющие сам овраг.

Лесопосадки в виде полос не только уменьшают смыв почвы, дают приют птицам и препятствуют миграции нежелательных видов. Они являются одним из главных средств борьбы с ветровой эрозией. Резко увеличивая трение воздушных потоков о поверхность, лесные полосы уменьшают поверхностную скорость ветра, что в соответствии с формулой (5.1) может практически полностью подавить ветровую эрозию и, во всяком случае, предотвратить возникновение пыльных бурь.

В природных экосистемах взятые из почвы питательные вещества возвращаются в неё, что обеспечивает поддержание её плодородия в естественных условиях. В антропогенных биогеоценозах этот геохимический цикл оказывается разорван, так как каждый раз, когда убирается урожай, вместе с ним с полей вывозится масса питательных веществ, которые оказываются утраченными для экосистемы. Эрозия усиливает эту убыль. Так происходит истощение почв, эксплуатируемых в сельскохозяйственных целях. Поэтому эти почвы нуждаются в удобрениях и отдыхе.

Минеральные удобрения в силу относительной простоты применения наиболее употребительны в сельском хозяйстве. Они действительно позволяют пополнить запасы связанного азота, фосфора, калия и большинства других необходимых растениям веществ. Однако их применение недостаточно для полного восстановления почв и связано с рядом дополнительных проблем. Во-первых, они не пополняют утраченные запасы гумуса, а потому не восстанавливают структуру почвы, необходимую для удержания и накопления влаги. Нарушение структуры почвы и её уплотнение ведут к ухудшению аэрации корней. Средства обитания многочисленных организмов, живущих в почве и

важных симбионтов растений, оказывается нарушенной. Во-вторых, использование искусственных минеральных удобрений связано с необходимостью расчёта точной дозировки при их внесении. Это требует достаточно развитой агрохимической инфраструктуры, обеспечивающей постоянный контроль химического состава почвы. Последнее доступно далеко не всем хозяйствам даже в наиболее развитых странах.

Для восстановления слоя гумуса почва нуждается в органических удобрениях, основу которых составляют навоз, перегной и компост, то есть отходы жизнедеятельности живых организмов.

Навоз и птичий помёт являются наиболее эффективными органическими удобрениями. Однако их применение в условиях индустриализации животноводства, когда птица откармливается на гигантских птицефабриках, а свиньи и рогатый скот — на специализированных фермах и в откормочных хозяйствах, резко уменьшается в связи с необходимостью транспортировки. Эта сиюминутная экономия в долгосрочном плане обходится очень дорого по двум причинам. Во-первых, из-за невозвращения на поля ценнейших питательных веществ, а во-вторых, потому, что эти вещества слишком часто загрязняют округу ското- и птицеводческих хозяйств и источники пресной воды. Наряду с экскрементами животных важными органическими удобрениями являются перегной и компост. Перегной образуется в результате за-пашки остатков зелёной массы, а компост специально готовится из смеси растительных остатков, навоза и почвы, разлагающейся под действием микроорганизмов и детритофагов.

Применение только органических удобрений в целом не может компенсировать потерь почвой питательных веществ. Только совместное применение органических и минеральных удобрений, антиэрозионных мер и ротации сельскохозяйственных культур (то есть традиционного севооборота) вместе с правильной организацией поливного земледелия может спасти основу жизни — почву от массовой деградации в планетарном масштабе.

## 5.5. Водные ресурсы

Вода — основа жизни, по крайней мере в её земных формах. Вода составляет от 50 до 97 % веса растений и животных. Человеческий организм на 2/3 состоит из воды. Общемировые запасы

сы воды огромны. Однако для жизнедеятельности человека совершенно необходима пресная вода. Доступная пресная вода составляет лишь малую толику от этих запасов — не более 0,8 % (рис. 5.13), а на самом деле ещё намного меньше. Весь доступный поток пресной воды поступает на континенты в виде осадков. В настоящее время человечество близко к тому, что общая потребность в пресной воде окажется равной этому потоку (рис. 5.14). Из рис. 5.14 видно, что в значительной степени это связано не с реальной потребностью, а с высоким уровнем загрязнения источников пресной воды.

В нашем распоряжении имеются два источника пресной воды: подземные и поверхностные воды (рис. 5.15). После выпадения атмосферные осадки частично остаются на поверхности, а частично просачиваются в грунт под действием силы тяжести и диффузии (*инфильтрация*) до тех пор, пока их не остановит водонепроницаемый слой глины или сланцев. Так образуются безнапорные грунтовые воды, состав примесей в которых зависит от локальных условий — состава почв и осадков. Верхняя граница этого водоносного горизонта называется зеркалом вод. Когда зеркало вод оказывается выше поверхности почвы, образуются озёра и болота. Часть осадков задерживается губчатой структурой почвы (почвенные воды). Здесь лежит зона аэрации, где одновременно в порах почвы присутствуют и вода, и воздух.



Рис. 5.13. Распределение мировых запасов воды. Запасы воды даны в тысячах кубических километров



Рис. 5.14. Распределение и использование среднегодового потока пресной воды, выпадающего на континенты и равного  $40\,000\text{ км}^3$ . Около 2/3 выпавших осадков уходит с паводками или испаряется. Из оставшегося основного стока в  $14\,000\text{ км}^3$  примерно  $6000\text{ км}^3$  приходится на незаселённые территории;  $8000\text{ км}^3$  образуют доступный для потребления поток, включая некоторые озёра (Байкал в первую очередь) и водоохранилища. Суммарная потребность составляет  $7000\text{ км}^3$ , из которых около  $3000\text{ км}^3$  выпадают из оборота в силу сильного антропогенного загрязнения, и только  $4000\text{ км}^3$  пригодны для использования



Рис. 5.15. Источники пресной воды

Именно из этой зоны питаются корни растений, а её водные запасы при отсутствии осадков пополняются за счёт капиллярного подъёма безнапорной воды, уровень которой при этом соответственно снижается.

Запасы напорных или артезианских вод располагаются ниже верхнего водонепроницаемого слоя и пополняются подземными потоками из источников, которые могут располагаться на расстояниях в десятки и сотни километров, например, из горных ледников. Соответственно, темпы пополнения артезианских вод не зависят от локальных источников. Эти воды могут находиться под значительным давлением, почему и называются напорными.

Для своих нужд человек использует главным образом поверхностные воды рек и озёр. Для создания запасов воды и нужд гидроэнергетики создаются огромные водохранилища. Однако к их строительству необходимо подходить с большой осторожностью, так как при этом часто теряются большие площади лучших сельскохозяйственных угодий и наносится непоправимый ущерб стадам наиболее ценных промысловых рыб. Пример экологической катастрофы, вызванной подобной деятельностью, — волжский каскад гидроэлектростанций. Из-за их плотин резко сократилось стадо каспийского осетра, почти исчезли знаменитые волжские стерлядь, севрюга и белуга. Элементарные оценки показывают, что ущерб только от исчезновения этих ценнейших видов значительно превышает стоимость полученной электроэнергии.

Вода из колодцев — это воды безнапорного горизонта, артезианскую воду добывают из глубоких скважин, откуда она часто поступает самотёком и даже фонтанирует. Распространённое убеждение в особой чистоте напорных вод в наше время, как это ни печально, часто оказывается ошибочным. Напорные воды могут поступать в сравнительно чистые регионы из сильно загрязнённых. В процессе длительной инфильтрации они очищаются от крупных частиц, но растворённые в них опасные соединения тяжёлых металлов мигрируют вместе с ними на значительные расстояния. Поэтому в окрестностях крупных промышленных центров и мегаполисов использование воды из обычных колодцев может оказаться предпочтительнее. Во всяком случае химический контроль не только грунтовых, но и артезианских вод здесь является отнюдь не лишним.

В масштабе земного шара основная масса используемой человеком пресной воды идёт на орошение. Другим важнейшим

потребителем является промышленность. На рис. 5.16 показаны затраты воды на производство некоторых видов массовой продукции. При получении 1 т алюминия затрачивается 10 000 т воды. Ещё больше воды уходит на орошение при выращивании 1 т хлопка. В промышленно развитых странах индустриальное потребление примерно равно сельскохозяйственному. В аграрных странах почти вся вода идёт на орошение полей (рис. 5.17). Значительная часть забранной из природных водоёмов воды возвращается в эти водоёмы, но слишком часто эта вода уже непригодна для дальнейшего использования из-за её загрязнения. Как показано на рис. 5.18, промышленность и коммунальные службы возвращают почти весь объём водозабора. Исчисление

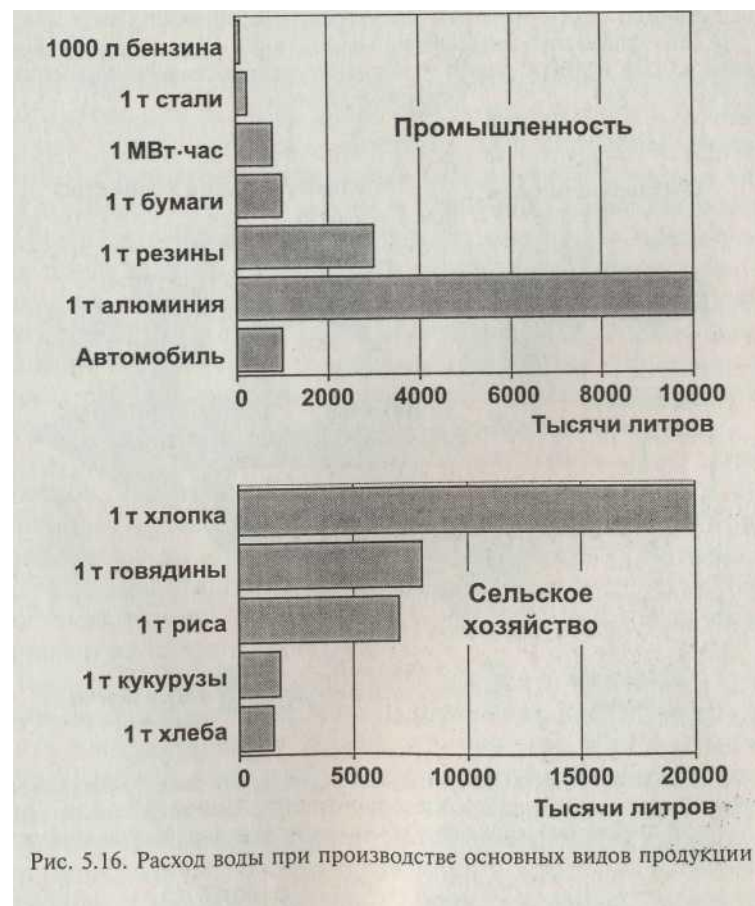




Рис. 5.17. Две крайности в потреблении воды. Слева — распределение потребления воды в США (1990 г.), справа — типичное распределение потребления воды в бедных странах

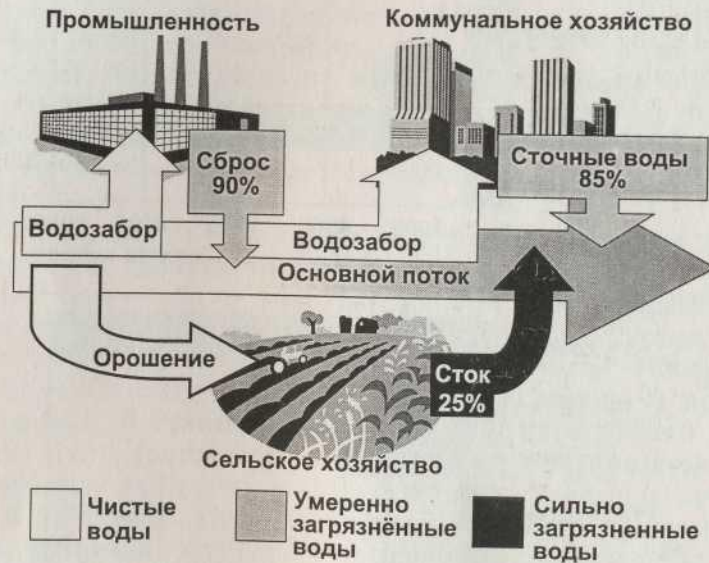


Рис. 5.18. Большая часть потребляемой природной воды возвращается в водоёмы, но уже загрязнённой и мало пригодной для дальнейшего использования. Указано процентное отношение объёма возвращаемой воды к объёму водозабора

потребления воды при этом обычно ведётся по объёму водозабора, что неправильно. Если вода возвращается чистой (например, из охладительных систем или благодаря безупречным очистным сооружениям), то фактическое её потребление оказывается в 10 раз меньше водозабора. Но такая ситуация скорее исключение, чем правило. На практике сбрасываемая вода бывает очищена не полностью. *Потребляемым природным ресурсом является не вода вообще, а именно чистая вода!* Предположим, что концентрация хотя бы одного загрязняющего вещества в водосбросе вдвое превышает допустимую. Это означает, что для разбавления сброса до допустимого уровня загрязнения потребуется дополнительный объём чистой воды, равный сбросу. Тогда при 90 % возврата фактическое потребление чистой воды оказывается в 1,8 раза больше водозабора.

Сельскохозяйственные сбросы — это обычно результат свободного стока с полей в водоёмы или инфильтрации в грунтовые воды без всякой очистки. Поэтому они способны наносить огромный систематический ущерб запасам чистой воды. Смыв с полей плодородного слоя почвы и удобрений приводит к массовому размножению в водоёмах фитопланктона, и прежде всего синезелёных водорослей. В результате начинается процесс эвтрофикации, в воде падает содержание кислорода, вода начинает «цвести», а затем «загнивает» и становится непригодной для использования. Попадание в водоёмы пестицидов усиливает этот процесс, так как пестициды прежде всего убивают организмы, ответственные за очистку воды от органических остатков.

Благодаря деятельности водных организмов, прежде всего моллюсков, водоёмы обладают мощной способностью к самоочищению. Проблема заключается в том, что чрезмерный сброс ядовитых веществ ведёт к массовой гибели этих организмов, после чего водоём становится «мёртвым», то есть полностью теряет способность самоочищаться. Подобные ситуации часто связаны с авариями на очистных сооружениях.

Поверхностные воды рек формируются в основном за счёт стока выходящих на поверхность грунтовых вод. Крупные равнинные реки образуются за счёт слияния многочисленных мелких рек и ручьёв, имеющих извилистое русло и замедленное течение. Эти водотоки вместе с верховыми озёрами и болотами образуют природные водохранилища — регуляторы запасов чистой пресной воды и потому нуждаются в тщательной охране от загрязнения и мелиоративных работ по осушению, спрямлению

русла и тому подобного вмешательства. Расширение за их счёт пахотных площадей в одном месте ведёт к обезвоживанию гораздо больших территорий и лучших угодий ниже по течению, провоцирует гибель урожая в засушливые годы и наводнения в годы с избыточным выпадением осадков. В особой защите нуждаются берега малых водоёмов и водотоков. Чтобы избежать их разрушения необходима тщательная охрана растительности, особенно кустарника и деревьев на берегах. Необходим также запрет использования быстходных катеров и моторных лодок, создающих волны, подмывающие и разрушающие их берега.

Чистая пресная вода стала наиболее дефицитным природным ресурсом на Земле. Методы её защиты от загрязнения и меры по сохранению её запасов требуют поистине ничтожных затрат по сравнению с ущербом, который возникает при пренебрежении ими:

- простые меры по экономии воды, особенно в сельском хозяйстве и коммунальной сфере, способны дать огромный эффект. В сельском хозяйстве, где только треть забираемой на орошение воды получают растения, а остальная вода стекает впустую, мероприятия по охране почв от водной эрозии одновременно позволяют резко сократить затраты на орошение;
- в коммунальных службах и промышленности поддержание в должном порядке очистных сооружений и предотвращение бесполезных утечек (вечно капающие краны, подтекающие унитазы и водопроводные трубы приводят к потерям 30—50 % используемой воды!) позволяет резко сократить расходы на очистку питьевой воды, увеличить доступные ресурсы чистой воды и избежать угрозы эпидемий опасных болезней, таких как холера, дизентерия или брюшной тиф;
- промышленные предприятия должны снабжаться системами оборотного водоснабжения;
- правительственные и муниципальные органы, а также все граждане должны чрезвычайно осторожно подходить к любым предложениям по строительству водохозяйственных сооружений и проведению мелиоративных работ, тщательно оценивая их последствия в долгосрочной перспективе.

## 5.6. Леса

Среди ресурсов дикой природы, наиболее интенсивно эксплуатируемых человеком, надо выделить леса, пастбища, рекреационные и курортные зоны и ресурсы океана. Трудно сказать, сохранились ли где-нибудь, кроме Антарктиды и некоторых пустынь, территории, не эксплуатируемые человеком. Даже в Гималаях на высотах 6 км и более приходится убирать мусор, оставленный многочисленными экспедициями альпинистов. Деградация дикой природы неразрывно связана с исчезновением многих видов животных и растений, то есть с невозобновимыми потерями в генофонде биосферы — возможно, самом ценном ресурсе природы.

Первичные, или девственные, леса сохранились в основном в бассейне Амазонки, в Канаде, Юго-Восточной Азии и в Сибири и занимают около 25 % суши. Леса же в целом как потенциально возобновимый природный ресурс покрывают около 1/3 суши, но эта доля убывает с катастрофической скоростью из-за беспощадной рубки. Древесина является ценнейшим сырьём для целых отраслей промышленности и одновременно прекрасным и доступным топливом, а затраты на её заготовку оказываются ничтожными по сравнению с получаемой сиюминутной выгодой. Распределение полученной от рубки лесов древесины по отраслям показано на рис. 5.19. В общей сложности в мире ежегодно производится пиломатериалов и бумаги примерно на 150 млрд долларов США. Массовое использование древесины в качестве топлива сохранилось в наименее развитых странах.

Сегодня ситуация такова, что наиболее беспощадной эксплуатации подвергаются наименее устойчивые к массовой рубке экосистемы тропических лесов. Происходит это под давлением ряда экономических причин.

Во-первых, растущее население тропических стран не имеет средств для интенсификации сельскохозяйственного производства, а потому традиционно пытается наращивать производство продуктов питания за счёт увеличения посевных площадей. Так как почвы тропических лесов бедны и при оголении быстро деградируют (см. п. 5.4), то освоенные участки через несколько лет забрасываются и вырубается новые. Сукцессия на этих разорённых и ставших каменистыми почвах протекает чрезвычайно медленно, ориентировочно — порядка сотен лет. Фактически

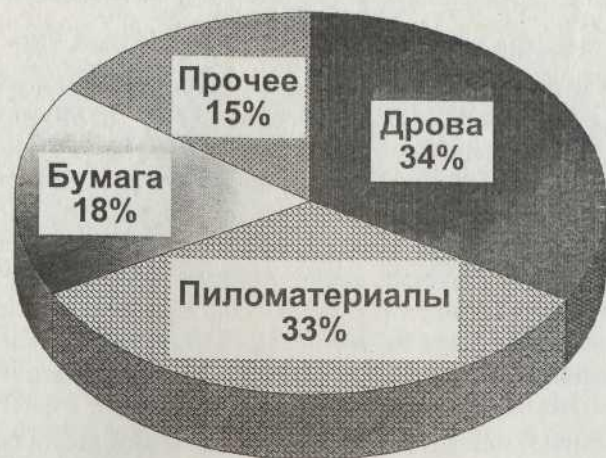


Рис. 5.19. Использование древесины

на этих брошенных участках джунгли не восстанавливаются. Во-вторых, вырубленные тропические леса дают весьма ценную древесину. В сочетании с дешёвой рабочей силой массовая промышленная рубка приносит огромный доход. В-третьих, многократно выросшее за последние годы население тропических стран не имеет других видов топлива для бытовых нужд, кроме Дров.

Всё это наносит непоправимый ущерб тропическим лесам, и к настоящему времени их площадь сократилась примерно до 40 % от своей первоначальной величины.

Леса выполняют в биосфере нашей планеты уникальные и жизненно необходимые функции, которые плохо осознаются большинством людей. Прежде всего леса — основные биопродукты нашей планеты (см. рис. 2.12). Они защищают основные природные хранилища чистой пресной воды, предохраняют почвы от эрозии, регулируют горные водостоки, защищая долины от наводнений и селей. В процессе фотосинтеза они поглощают углекислый газ и выделяют кислород. Вырубка лесов и особенно сжигание древесины приводит к некомпенсированному выделению в атмосферу  $\text{CO}_2$ , образующегося за счёт окисления как углерода самой древесины, так и углерода, накопленного в лесной почве. Это способствует росту парникового эффекта. Леса служат домом для огромного числа видов растений и

животных, а значит крупнейшим на планете хранилищем генетической информации. По существующим оценкам, половина всех живущих на земле видов обитает в тропических девственных лесах. Гибель джунглей может привести к исчезновению примерно миллиона видов, для которых они (джунгли) являются единственно возможным природным местообитанием. Вырубка тропических лесов наносит прямой непоправимый ущерб и генофонду умеренных широт, так как тропические леса служат местами зимовки огромного числа птиц, гнездящихся в средних и высоких широтах.

По одной из оценок, среднее дерево в тропическом лесу за счёт выделения кислорода, очистки воздуха, защиты почвы от эрозии, регулирования водостока, обеспечения условий для жизни диких животных и синтеза органического вещества создаёт за полвека «экологический доход» около 200 тысяч долларов США. В то же время стоимость его древесины не превышает 500 долларов.

Лесные экосистемы умеренного пояса и тайга гораздо более устойчивы к рубке, чем тропические леса. Это обусловлено наличием относительно мощного почвенного покрова. Среди лесов умеренного пояса наибольшая антропогенная нагрузка приходится на широколиственные леса и сосновые боры. Эта нагрузка обусловлена не столько лесозаготовками, сколько загрязнением воздуха, закислением осадков и изменениями уровня грунтовых вод, связанными с мелиоративными работами и строительством гидросооружений. Первоначально предполагалось, что леса особо чувствительны к первичному кислотному загрязнению, вызываемому окислами серы и азота. Однако в последнее время становится ясно, что гораздо большую роль могут играть повышенные концентрации озона.

Введенное в ряде развитых стран, в частности Канаде, скандинавских странах и большинстве стран Европейского Союза, правильное управление лесами позволяет сохранить леса, одновременно получая значительные устойчивые урожаи древесины. Для достижения спелости лесу требуется от 20 до 120 лет в зависимости от вида деревьев.

При *равновозрастном лесопользовании* на каждом участке растут деревья одинакового возраста. По достижении ими спелости участок — лесная плантация вырубается и, как правило, засаживается саженцами одного возраста. Период выращивания от рубки до рубки называется оборотом. Такой подход широко исполь-



зуется для получения древесины быстрорастущих хвойных пород — сосны и ели. По сути, этот подход ничем не отличается от обычного монокультурного земледелия со всеми проблемами неустойчивых антропогенных экосистем и соответственно с необходимостью значительных затрат на поддержание неустойчивого состояния экосистемы (удобрения, пестициды и т. д.). Если после тотальной вырубki лес восстанавливается естественным путём в результате сукцессии, то система будет устойчивой, но с технологической точки зрения этот подход неудобен из-за разброса размеров деревьев и их неодновременного созревания. Кроме того, при сплошной рубке оголённый участок может надолго, а то и навсегда зарастить «сорными» породами деревьев. Например, место, которое занимала вырубленная дубрава, может зарастить осинкой и ольхой.

При *разновозрастном лесопользовании* на участке сохраняются деревья разного возраста. Выборочная рубка, конечно, менее удобна технологически, но оказывается полезна для леса в целом. Она защищает лесные почвы от истощения и эрозии, улучшает условия для роста молодых деревьев и позволяет полностью сохранить биологическое разнообразие, обеспечивающее устойчивость лесного биоценоза. Всё сказанное о выборочной рубке не относится, разумеется, к случаю, когда выбор имеет вид «снятия пенек» — вырубается только наиболее хозяйственно ценные взрослые деревья. Такой хищнический подход ведёт к деградации леса. Наилучший вариант выборочных рубок — когда рубка хозяйственная совмещается с санитарной очисткой леса от сухих и больных деревьев.

Большое значение в сохранении лесных ресурсов имеет защита лесов от болезней, насекомых-вредителей и пожаров. В лесах с природной структурой биоценоза заболевания и насекомые-вредители редко получают серьёзное распространение. Но искусственные лесные плантации далеко не сразу становятся способны к самозащите и легко поражаются болезнями, среди которых особо опасными являются грибки-паразиты, непарный шелкопряд и короеды. Особую опасность представляют виды, заносимые с континента на континент: на новом месте они находят изобильную пищу при отсутствии естественных врагов.

Лесные пожары — достаточно сложное и неоднозначное явление. *Низовые лесные пожары* охватывают подлесок, но почти не затрагивают взрослые деревья. В природе они периодически

(возникают от молний. Огонь распространяется медленно, так как он сконцентрирован в безветренном ярусе леса, и животные успевают убежать. Низовые пожары уничтожают накопившиеся в подстилке сухие ветки, хвою и опавшие листья, что снижает опасность катастрофических *верховых лесных пожаров*. Низовой пожар ускоряет минерализацию мёртвого органического вещества, увеличивает активность азотфиксирующих почвенных бактерий, стимулирует прорастание семян некоторых видов и уничтожает множество опасных для деревьев паразитов. Для многих лесных обитателей (лоси, косули, вальдшнепы, куропатки, тетерева) низовые пожары — благо, так как они способствуют сохранению их местообитаний и кормовой базы. Низовой пожар обычно затухает сам или гасится без особых проблем.

Огромный ущерб лесам наносят *верховые лесные пожары*, способные охватывать площади в десятки и сотни тысяч гектаров. Абсолютное большинство этих пожаров вызывается неосторожным обращением с огнём и преднамеренными палами, а не грозами, так как последние обычно сопровождаются ливневыми осадками. Верховой пожар носит тотальный характер, охватывает все ярусы леса и быстро распространяется благодаря возникающей высокой температуре и особенно ветру. В отличие от низовых, верховые пожары способствуют эрозии почв и гибели обитателей леса.

Тушение верховых лесных пожаров — весьма сложная и дорогостоящая операция, требующая привлечения множества обученного и специально экипированного персонала, а также наземной техники и авиации.

Гораздо дешевле систематическое предупреждение пожаров. Предупреждение состоит в постоянной разъяснительной работе среди населения и введении запретов на посещения огнеопасных участков леса в сухую жаркую погоду, на разведение костров и курение. Регулярная санитарная чистка и рубка сухостоя вместе с контролируруемыми низовыми палами также отличное средство предупреждения верховых пожаров.

Большую опасность представляют собой *подземные пожары*, возникающие в пересохших торфяниках в лесах умеренного климатического пояса. Огонь может тлеть в них в течение долгого времени и внезапно выйти на поверхность в неожиданном месте. Известны случаи, когда такие подземные очаги огня умудрялись пережить даже зиму.

### 5.7. Пастбища

Около половины поверхности материков (кроме Антарктиды) занимают пастбищные угодья, то есть безлесные земли, способные обеспечить кормом травоядных животных. Примерно 40 % от этих земель используется для выпаса скота. В мире насчитывается не менее 10 млрд голов скота, из которых 3 млрд составляет рогатый скот — овцы, коровы, козы, буйволы и другие жвачные животные. Три четверти из них кормятся за счёт естественных пастбищ на так называемом беспривязном содержании, остальные откармливаются в специализированных хозяйствах. Между этими двумя способами содержания скота существует принципиальная разница. Скот на естественных пастбищах занимает определённую экологическую нишу в природном биогеоценозе, частично или полностью вытеснив из неё не без помощи человека диких животных. Если поголовье скота соответствует экологической ёмкости травоядных, то структура природной экосистемы при этом сохраняется, и поддержание её в равновесии не требует от человека особых затрат и усилий. Скот, содержащийся исключительно на засеиваемых выгонах или в стойлах, оказывается частью антропогенной системы, поддерживаемой искусственно. Многие современные хозяйства такого типа носят полностью индустриальный характер.

Устойчивость экосистемы пастбища зависит от типа растительности. Злаковые травы имеют густые корневые системы, не поддающиеся выкорчёвыванию и препятствующие эрозии. Большинство остальных трав и кустарников имеют один основной корневой стержень, который легко вырывается из почвы. При объедании только верхней части растения оно быстро восстанавливается, если сохранились нижняя его часть и корень, где сосредоточен *метаболический запас* растения.

Пастбище, как и всякая экосистема, имеет определённую экологическую ёмкость (см. п. 1.2) по отношению к каждому виду и поголовью травоядных в целом. В оптимальной ситуации ёмкость пастбища заполнена, но не переполнена. При переполнении, то есть при *перевыпасе* скота, начинается уничтожение метаболического запаса растений, и ёмкость пастбища падает. Если перевыпас продолжается, то резко возрастает эрозия и меняется видовой состав растений — кормовые травы замещаются малосъедобными растениями — колючками, которые получают

экологическое преимущество. В дальнейшем в регионах с пониженным увлажнением может произойти полное опустынивание. Такое катастрофическое развитие событий характерно при перевыпасе в африканской саванне. В северной степной зоне — тундре, где почвенный покров слаб и тонок, перевыпас оленей оказывается даже менее опасен, чем использование тяжелых транспортных машин, следы от которых не зарастают десятки лет.

При недостаточном выпасе экологическое равновесие также нарушается. Начинается сукцессионный процесс зарастания пастбища разнотравьем и кустарником, которые дают укрытие грызунам — конкурентам скота.

В настоящее время около трети пастбищ Земли находятся в неудовлетворительном состоянии вследствие неправильной эксплуатации и перевыпада. Наилучший способ поддержания продуктивности пастбища издревле применялся скотоводами и состоит в контроле над передвижениями животных и содержании смешанных стад, в которых различные виды животных питаются преимущественно разными растениями.

Применение на пастбищах удобрений для форсированного роста растений и пестицидов для борьбы с нежелательными видами — очень дорогой и малоэффективный метод управления пастбищами. Вместе с грызунами гибнут их естественные враги, что приводит к неконтролируемым вспышкам численности тех самых видов, против которых ведётся борьба (см. рис. 5.10, п. 5.2).

### 5.8. Ресурсы дикой природы. Охраняемые природные территории — заповедники и национальные парки

Особо тяжёлым антропогенным нагрузкам подвергаются рекреационные зоны, то есть места массового отдыха. Обычно свободные от непосредственного индустриального загрязнения, эти местности бывают сильно загрязнены бытовыми и коммунальными отходами. Проблема сохранения этих зон — это проблема в гораздо большей степени образовательная и воспитательная, нежели собственно экологическая. Всеобщее понимание того простого факта, что леса и парки требуют к себе такого же бережного отношения, как и собственное жилище, а их обитате-

ли — животные не меньшего уважения, чем соседи по дому или хотя бы собственные кошки и собаки, — это и есть основное условие сохранения зон рекреации от разрушения и деградации.

Люди издавна стали понимать важность охраны ресурсов дикой природы. Необходимость правильной эксплуатации лесов, пастбищ и источников пресной воды достаточно очевидна и может быть обеспечена.

Однако этих мер недостаточно, чтобы сохранить во всей полноте природные ресурсы Земли. Даже самое бережное хозяйственное использование природных экосистем неизбежно приводит к обеднению видового разнообразия.

В принципе возможны два не противоречащих друг к другу подхода к решению этой проблемы. *Популяционно-видовой метод* заключается в создании перечней исчезающих и малочисленных видов растений и животных, подлежащих охране. Эти виды заносятся в знаменитые «Красные книги», и подразумевается, что сбор растений или охота на животных, попавших в эти книги, категорически запрещены. Ещё один путь реализации популяционно-видового метода — разведение животных в зоопарках и специальных питомниках и растений в ботанических садах. Например, в России существуют Окский журавлиный питомник и Приокско-Террасный зубровый питомник, на многочисленных рыбозаводах разводят редкие виды рыб. В ряде европейских стран после разведения в неволе интродуцировали в леса рысь, в США восстановили природные стада бизонов. Наконец, в научных центрах создаются коллекции семян растений и банки замороженных клеток исчезающих видов животных. Но популяционно-видовой метод сам по себе не может обеспечить достаточной сохранности видового разнообразия.

Дело в том, что причиной исчезновения биологического вида обычно бывает не столько сознательное истребление вида человеком, сколько захват или уничтожение его экологической ниши<sup>45</sup>. В мире ежегодно незаметно исчезают многие сотни видов мелких животных и растений, а другие оказываются на грани вымирания не потому, что их уничтожили, а потому, что им

<sup>45</sup> Конечно, есть и противоположные примеры: истребление в результате безобразной хищнической охоты ламантинов (морских коров), странствующих голубей, некоторых видов китов, туров и зубров в Европе и бизонов в Америке. Зубров и бизонов, также как и бобров, с большим трудом удалось спасти от полного исчезновения.

стало негде жить и нечего есть. Поэтому сохранение целых природных биогеоценозов есть необходимое условие сохранения генофонда Земли. Такой подход можно назвать *экосистемным методом*, и он особенно важен потому, что позволяет сохранить и те виды, о существовании которых нам ничего неизвестно. А таких видов очень много, особенно в тропиках. По некоторым оценкам, науке известно не более 30 % обитающих на Земле биологических видов.

Следовательно, чтобы сохранить генофонд биосферы, требуется сохранить в первоначальном виде достаточно значительные площади при минимальном антропогенном воздействии, то есть в виде заповедников, национальных парков и заказников. Другое важное назначение этих *особо охраняемых территорий* — служить ценнейшими зонами отдыха (заметим, крайне прибыльными для туристической индустрии) и быть важным резервом возобновимых ресурсов, который может срочно потребоваться в будущем. . . . . :

Наиболее важной формой особо охраняемых территорий являются *заповедники*. В мире сейчас существует более двух тысяч заповедников, но далеко не все из них удовлетворяют необходимым требованиям, важнейшее из которых — достаточная площадь, как правило, не менее 400 тысяч гектаров. Основное назначение заповедников — служить очагами восстановления популяций редких и исчезающих видов. После восстановления популяции в достаточном объёме заповедник становится центром расселения вида в подходящих ареалах. В России успешно было проведено расселение бобров из Воронежского заповедника, выхухоли из Хоперского заповедника, зубра из Беловежской пуши. Другая функция заповедников — научные исследования и наблюдения за живыми организмами в их естественной среде обитания.

Особую роль играют *биосферные заповедники*, задачей которых является сохранение не только биоты, но и определённого ландшафта в целом. Наблюдения в них проводятся по единым методикам, составленным ЮНЕП — Программой ООН по охране окружающей среды. Тем самым обеспечивается унификация представления и сопоставимость результатов исследований, полученных в разных условиях. Всего в мире примерно 300 биосферных заповедников, из них 11 расположены в России.

Национальные парки отличаются от заповедников тем, что они открыты для свободного посещения. Там могут быть выде-

лены заповедные зоны, а на остальной территории прокладываются туристические тропы и оборудуются места для стоянок. В правильно организованных парках туристы, имея возможность общаться с природой и отдыхать, не наносят вреда природе. Первый в мире национальный парк — Йеллоустонский в США — был учреждён в 1872 г. В наше время в мире существует более 1000 национальных парков в 120 странах, среди которых наиболее знаменитый — Серенгети в Танзании площадью 1,3 млн гектаров, дающий приют 1,5 млн копытных, слонов и хищных.

### 5.9. Ресурсы океана

Помимо ресурсов, расположенных на континентах, человек во всё больших объёмах эксплуатирует ресурсы мирового океана. Океан используется как источник продовольствия, со дна океана извлекаются полезные ископаемые, и он изрезан огромной невидимой сетью морских путей.

Около 1/4 всех белков животного происхождения в рационе человечества составляют «дары моря» — рыба, ракообразные и моллюски. Ещё около 1/20 нашего белкового рациона составляет мясо, полученное за счёт скармливания скоту рыбной муки. Этот источник белков намного богаче говядины, яиц и птицы. В прибрежных странах Азии и в Океании доля морских продуктов в белковом рационе ещё выше и достигает 90 %. Океан даёт в 8 раз больше продуктов питания, чем пресноводные водоёмы. Почти все рыбопромысловые районы находятся на континентальном шельфе и в мелководных морях в пределах так называемых прибрежных экономических зон шириной 370 км (200 морских миль). Это связано с тем, что именно там сосредоточена жизнь в океане, тогда как открытый океан по существу представляет собой полупустыню (см. п. 2.3). От трети до половины расходов рыболовных судов составляют расходы на горючее, поэтому затраты «ископаемой» энергии углеводов на получение единицы пищевой энергии океана велики. Например, чтобы добыть 1 пищевую калорию мяса креветок, затрачивается около 75 калорий горючего; для пелагических рыб это соотношение составляет примерно 1:20. Заметим, что для пресноводной рыбы, получаемой в рыбоводческих хозяйствах, это соотношение близко к 1:1.

С 1940 по 1970 год мировой улов океанической и морской рыбы вырос в три раза (рис. 5.20). Широко бытовало мнение, что пищевые ресурсы мирового океана почти неограничены, и продовольственная проблема может быть решена за их счёт. Этот оптимизм основывался на предположении, что ресурсы открытого океана сопоставимы с ресурсами шельфа. Оказалось, что это — грубая ошибка. И в тоже время в этих расчётах не принималось во внимание, что нагрузка на шельф уже превысила способность экосистемы к воспроизведению стада. Поэтому в 70-е годы улов не вырос, несмотря на увеличение рыболовного флота. Стало ясно, что рыбы вылавливается слишком много, и её почти не остаётся для воспроизводства популяций. В следующие 30 лет улов вырос всего на 30 %, а потребление рыбы и других морепродуктов на душу населения резко упало (рис. 5.20). Проблема усугубилась тем, что многие рыбаки были вынуждены переключаться на лов малоценных пород рыбы, так как популяции лучших пород, таких как лосось, треска или атлантическая сельдь, были изрежены в крайней степени.

Значительный вклад в этот спад мировой добычи рыбы внесла экологическая катастрофа, разразившаяся у берегов Перу. Здесь в зоне апвеллинга (см. п. 2.3, рис. 2.10) у западных берегов Южной Америки образуются благоприятные условия для бурного роста морской биоты. С середины 50-х годов XX века здесь стало быстро развиваться рыболовство, ориентированное на лов

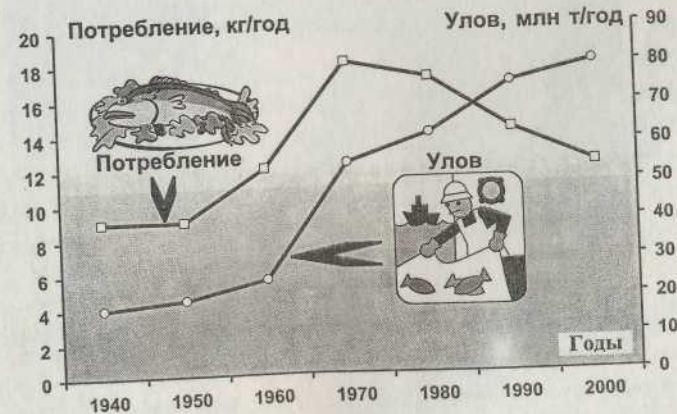


Рис. 5.20. Душевое потребление и мировой улов рыбы, ракообразных и моллюсков в 1940—2000 гг.

анчоусов, на долю которых в 1965—1971 гг. приходилось до 1/5 мирового улова рыбы и других морепродуктов (рис. 5.21, вверху). Учёные Продовольственной и сельскохозяйственной программы ООН предупреждали, что вылов анчоусов значительно превышает допустимый уровень. Дело в том, что по неизвестным пока причинам направление ветров над Тихим океаном иногда меняется, при этом апвеллинг у берегов Перу прекраща-

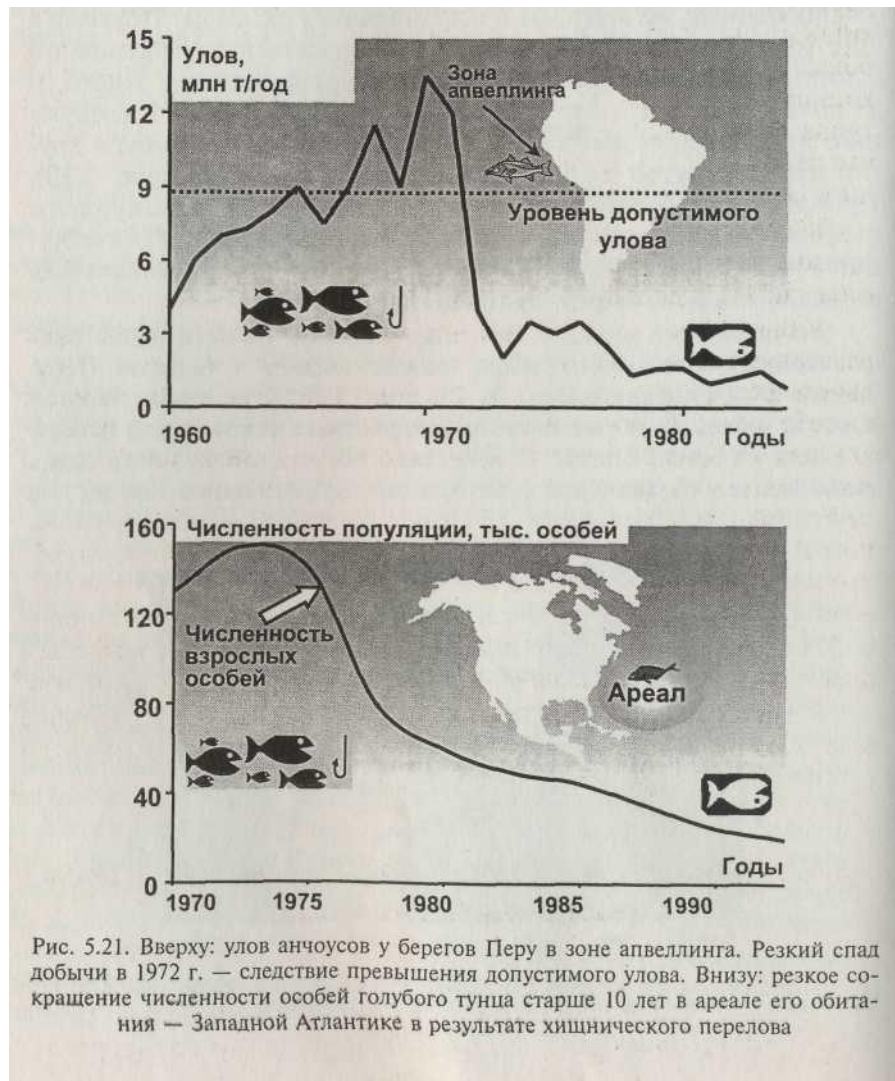


Рис. 5.21. Вверху: улов анчоусов у берегов Перу в зоне апвеллинга. Резкий спад добычи в 1972 г. — следствие превышения допустимого улова. Внизу: резкое сокращение численности особей голубого тунца старше 10 лет в ареале его обитания — Западной Атлантике в результате хищнического перелова

ется. Это хорошо известное явление называется Эль-Ниньо. С приходом Эль-Ниньо резко падает концентрация планктона, а вслед за ней сокращается и способность популяции анчоусов к воспроизводству. Правительство Перу пренебрегло предупреждениями учёных. В 1972 г. из-за чрезмерного вылова популяция анчоусов не смогла восстановиться, и уловы уменьшились сначала в 5, а впоследствии и в 10 раз по сравнению с допустимым уровнем! Одновременно от голода погибла масса морских птиц и хищных рыб. Страна понесла огромные убытки, природа — ещё большие. Примерно в это же время из-за неконтролируемого хищнического лова произошла деградация популяции голубого тунца в Западной Атлантике (рис. 5.21, внизу). Нет сомнений, что такова же судьба северокаспийской популяции осетра, трески и сельди в Восточной Атлантике.

К сожалению, эти уроки не идут впрок, и по отношению к продовольственным ресурсам океана человечество в целом ведёт себя так же, как перуанские рыбаки в 1967—1971 гг.

Уничтожению популяций морских животных способствуют развернувшаяся в последние годы добыча нефти на континентальном шельфе и большая транспортная нагрузка, которую несёт на себе океан. Бурение тысяч разведывательных скважин ведётся как раз на местах нереста. При авариях нефтяных платформ и нефтеналивных танкеров в море попадает огромное количество нефти, вызывающее гибель морских животных и птиц на больших площадях. Кроме того, стремясь сэкономить деньги, недобросовестные судовладельцы занимаются промывкой танков, отводя суда подальше от берега, чтобы их не могли поймать полицейские и охранные службы. Значительный ущерб шельфовым экосистемам наносят и загрязнения, поступающие с континента.

Подводя итог, нужно заметить, что разорение и загрязнение мирового океана — одна из острых проблем, плохо решаемых до сих пор.

### 5.10. Энергетические ресурсы. Реальна ли угроза энергетического голода?

Солнечное излучение является источником почти всей энергии, используемой и биосферой, и цивилизацией. Только около 1 % используемой человеком энергии поступает от других источ-

ников — за счёт добычи и сжигания угля, нефти, природного газа и урана. При этом месторождения угля, нефти и газа — это тоже солнечная энергия, когда-то аккумулированная растениями. До сих пор развитие цивилизации основывалось на освоении всё новых источников энергии и характеризовалось непрерывным ростом её потребления как удельным (на душу населения — см. рис. 5.6), так и в абсолютных цифрах. До середины XX века дрова и уголь были основными источниками энергии. Начиная с этого времени, в мировом *энергетическом балансе* всё большую роль играют нефть, газ, а в конце XX века и атомная энергия (рис. 5.22).

Потребление ископаемых энергетических ресурсов в таких гигантских объёмах ставит перед человечеством ряд насущных и трудных вопросов:

- На какое время хватит этих ресурсов и каковы последствия их истощения?
- Можно ли их заменить и чем?
- Как экономить энергию?
- Как решить проблемы загрязнения окружающей среды?

Это комплекс взаимосвязанных проблем, требующих системного подхода, но, к сожалению, до сих пор слишком часто решаемых порознь.

В табл. 5.2 приведены сроки обеспеченности основными энергетическими ресурсами для мира в целом. Оценки этих сроков имеют значительный разброс в зависимости от оптимизма конкретного эксперта или экспертной группы. Это связано с неопределённостью в оценках запасов, неточностью данных о потреблении и, самое главное, в разбросе оценок коэффициента извлечения. Дело в том, что по мере истощения месторождения стоимость добычи растёт. Истратив очень много ресурсов, можно, например, извлечь из Земли и 99 % нефти, но нефть эта окажется дороже золота. При современных технологиях для нефтяных месторождений коэффициент извлечения редко превышает 50-60 %.

— Однако, — говорит оптимист, — в будущем будут созданы новые технологии, и почти вся нефть будет добыта при умеренных затратах.

— Нет, — отвечает пессимист, — ничего особо нового здесь придумать нельзя, и коэффициент извлечения будет только

Таблица 5.2. Сроки обеспеченности ископаемыми энергетическими ресурсами (годы)

Полезные ископаемые	По известным мировым запасам	По оценке извлекаемых запасов
Нефть	20-50	100-500
Уголь	100-250	*500
Природный газ	40-60	400-600
Уран (реакторы на тепловых нейтронах)	50-300	500-2000
Уран (реакторы-размножители на быстрых нейтронах)	я 500 тыс. лет	Миллионы лет

уменьшаться по мере того, как мы будем вынуждены осваивать месторождения с всё худшими геологическими условиями.

Примерно такая же ситуация и в оценках запасов энергоресурсов, в особенности нефти и газа, на континентальном шельфе.

Кто бы ни был прав, но из данных табл. 5.2 видно, что ресурсов углеводородного сырья, то есть нефти, природного газа и угля, человечеству хватит ненадолго. К этому добавляется ещё ряд немаловажных обстоятельств. Во-первых, сжигание огромных количеств угля и нефти ведёт к нарушению геохимического и теплового балансов биосферы с последствиями в виде катастрофического роста парникового эффекта, возможного роста озоновых дыр в стратосфере, кислотного загрязнения почв, гибели лесов и т. д. (см. гл. 4). Во-вторых, углеводородное сырьё, особенно нефть, нефтяные попутные газы (бутан, пропан) и природный газ, есть ценнейшее и, вместе с тем, дешёвое сырьё для производства огромного количества синтетических материалов, без которых человечество просто не сможет обойтись. С этой точки зрения сжигать нефтепродукты — это, по меткому выражению Дмитрия Ивановича Менделеева, всё равно что топить печи ассигнациями. В-третьих, массовый выход нефтеразработок на континентальный шельф и мелководные моря может привести к полной деградации пищевых ресурсов мирового океана и морей, и без того переживающих далеко не лучшие времена (см. п. 5.9).

Таким образом, вопрос об эффективной замене тепловой углеводородной энергетики — одна из главных и неотложных проблем, стоящих перед человечеством. При рассмотрении этой проблемы необходимо учитывать, что в настоящее время только четверть ресурсов, показанных на рис. 5.22, идут на производство электроэнергии. Остальные используются непосредственно для производства высокотемпературного тепла в промышленности, отопления и приготовления пищи в быту и коммунальном секторе, в качестве горючего на транспорте и в сельском хозяйстве (рис. 5.23).

Существуют два взаимодополняющих способа решения проблемы истощения ископаемых ресурсов: снижение потребления энергии (уменьшение энергоёмкости производства и быта) и отыскание альтернативных источников получения энергии.

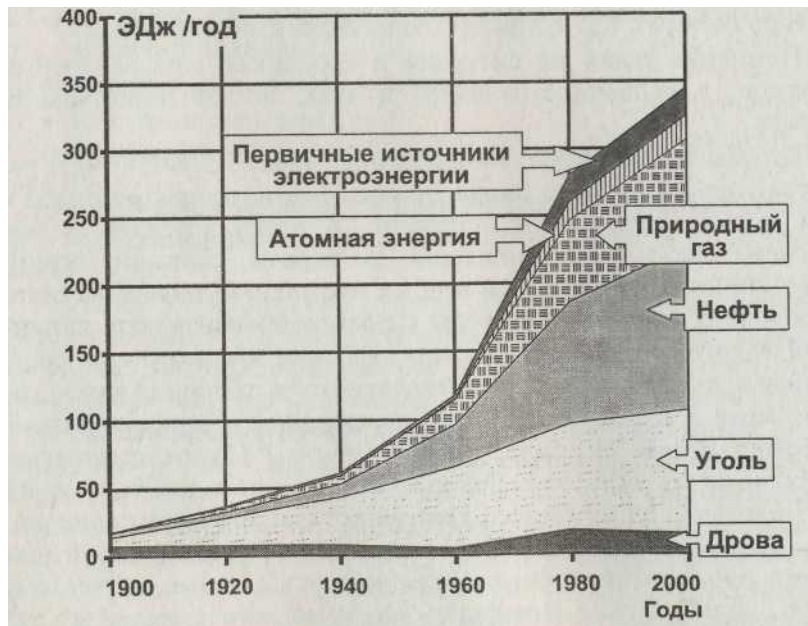


Рис. 5.22. Мировой энергетический баланс в XX веке. Первичные источники энергии включают гидроэлектростанции, ветровые, гелиоэлектрические, геотермальные станции и т. д. К категории дров отнесены все виды биомассы, используемые в качестве топлива, — сами дрова, хворост, солома, кизяк, торф и пр.; 1 ЭДж (Эксаджоуль) =  $10^{18}$  Дж

На пути радикального снижения энергоёмкости развитые страны стоят уже более трёх десятилетий. За это время:

- разработаны технологии строительства «тёплых домов», в которых удалось в несколько раз снизить потери тепла через стены и окна, что привело к снижению расхода тепла на отопление;
- модернизация теплоэлектростанций привела к росту коэффициента полезного действия паротурбинных и газотурбинных установок в среднем с 35 до 42 %;
- у автомобилей и сельскохозяйственной техники в среднем на 25 % снизился расход горючего;
- сократился удельный расход энергии (на единицу продукции) в энергоёмких отраслях промышленности;
- ламповая электроника (усилители, измерительная аппаратура, телевизоры, телефонная и радиоаппаратура) полностью заменилась полупроводниковой и интегральными схемами, что привело к сокращению удельного расхода энергии более чем в 100 раз;
- началось массовое применение экономичных светильников с увеличенным в 10 раз сроком службы и 5-кратным увеличением светоотдачи на 1 Вт потребляемой мощности по сравнению с обычными лампами накаливания.

К сожалению, большинство из перечисленных новшеств пока получило распространение только в наиболее богатых и развитых странах.

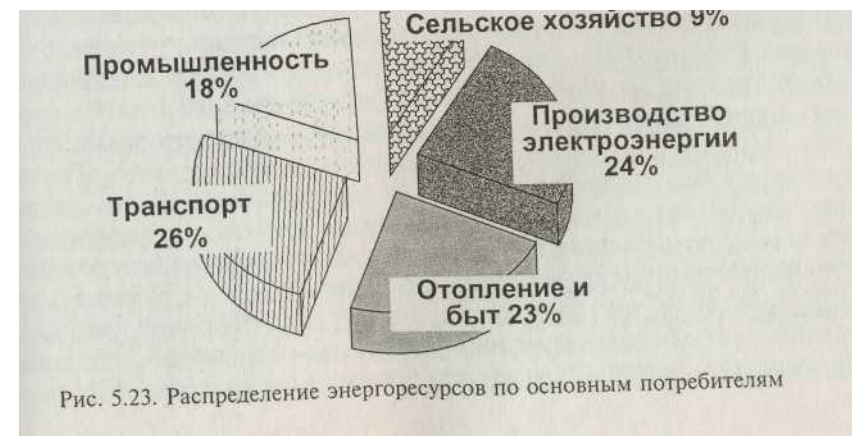


Рис. 5.23. Распределение энергоресурсов по основным потребителям

Однако, несмотря на меры по энергосбережению, общий объём потребления углеводородных ресурсов не снижается, а продолжает расти. Совершенно ясно, что только мерами по экономии энергии проблему исчерпания ресурсов решить невозможно, и необходим переход к другим источникам энергии.

В качестве альтернативных способов получения энергии можно рассматривать

- *солнечную энергетику*, которая прямо или косвенно- использует солнечную энергию, поступающую на поверхность Земли;
- » *атомную энергетику*.

Первый путь, безусловно, предпочтительнее с точки зрения безопасности и минимизации загрязнения природной среды. Он может реализоваться на основе нескольких технологий

- *гидроэнергетика*, использующая энергию падающей воды;
- *ветроэнергетические установки*;
- *гелиоэнергетика*, использующая солнечные печи для получения высокотемпературного тепла и водонагревателя для отопления и бытовых нужд, а также прямое преобразование солнечного излучения в электрический ток с помощью полупроводниковых солнечных батарей;
- переработка растительной биомассы в органическое топливо.

*Гидроэнергетика* уже сейчас занимает заметное место в производстве электроэнергии (до 25 %). Она обеспечивает 100 % потребления энергии в Норвегии и около 75 % в Швейцарии, Австрии и Канаде. Гидроэлектростанции надёжны и имеют большой срок службы. Они не загрязняют атмосферу и позволяют накапливать паводковые воды для орошения. Во многих странах значительная часть гидроэнергетических ресурсов уже освоена, и подходящих створов для плотин осталось мало. Тем не менее «запас» гидроэнергетических ресурсов ещё далеко не исчерпан, особенно на равнинных реках. Вместе с тем опыт показывает, что расширение использования равнинных рек для строительства гидроэлектростанций не всегда оправдано, так как при этом под водохранилища уходят большие площади ценных сельскохозяйственных угодий, на не меньших площадях происходит нежелательное перераспределение грунтовых вод,

водохранилища могут быстро заиливаться, и ценные породы рыб лишаются нерестилищ. Приливные гидроэлектростанции, использующие морские приливы и отливы для выработки энергии, не могут сыграть существенной роли, так как на всей Земле существует только около двух десятков подходящих для их строительства мест.

*Энергия ветра* используется человеком с незапамятных времён. В настоящее время во многих странах разрабатываются и используются современные ветровые турбины, которые могут эффективно работать при скоростях ветра от 6 до 10 м/с. Поэтому турбины приходится устанавливать на мачтах высотой несколько десятков метров, чтобы поднять над приземным инерционным слоем атмосферы. *Ветроэнергетические установки* оправдывают себя только в районах с достаточно устойчивыми ветрами, поэтому их выгодно размещать на горных перевалах и на морских берегах. Мощность отдельных установок колеблется в пределах от 10 до 1000 кВт. Слишком большие турбины ненадёжны и не могут работать при слабых ветрах. Для получения значительной мощности турбины группируют в ветряные электростанции или фермы. Они не требуют чрезмерных капиталовложений, но их основной недостаток — нестабильность работы, вызываемая колебаниями скорости ветра. Будучи очень эффективными в отдалённых районах со стабильными ветрами, ветряные электростанции в целом вряд ли могут внести существенный вклад в мировой энергетический баланс.

Солнечная энергия может непосредственно преобразовываться в тепло или электрический ток. Земная поверхность получает от Солнца в среднем  $165 \text{ Вт/м}^2$ . Если в одно- или двухэтажном жилом доме площадью в  $100 \text{ м}^2$  установлено оборудование, способное утилизировать хотя бы 30 % солнечной энергии, падающей на крышу дома, то за сутки будет получено примерно  $120 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ , то есть энергия, более чем достаточная для полного обеспечения комфортной жизни в доме. Это оборудование должно включать водяной солнечный коллектор для накопления тепла и солнечные батареи для получения электроэнергии. Следовательно, проблема заключается в реализации соответствующих технологий с приемлемыми затратами. Современные *солнечные батареи* способны отдавать мощность до  $60 \text{ Вт/м}^2$  при инсоляции  $\ll 200 \text{ Вт/м}^2$ , но стоимость их пока достаточно высока — 500—1000 долларов США за  $1 \text{ м}^2$ . Полученная энергия должна аккумулироваться, так как максимальная необходимость в



её использовании возникает тогда и там, где в данный момент инсоляции нет или она недостаточна. Тепло может накапливаться в баках с водой, а электроэнергия — в аккумуляторных батареях.

Наряду с бытовыми гелиоэнергетическими системами, получившими уже значительное распространение в богатых регионах с солнечным и жарким климатом, в этих регионах уже построен целый ряд промышленных предприятий, работающих на солнечной энергии.

Основной принципиальный недостаток *гелиоэнергетики* — зависимость от уровня инсоляции, которая распределяется по поверхности Земли весьма неравномерно. Поэтому в регионах, лежащих выше 45—50° широты, а также в регионах с большой облачностью она оказывается практически малоприменимой.

Трезво оценивая совокупные возможности гидроэнергетики, гелиоэнергетики и ветровых электростанций, нельзя не заметить, что они способны покрыть в самом лучшем случае не более половины потребностей человечества в тепле и электроэнергии. Использование горючих ископаемых для производства энергии должно сокращаться, так как эти ценные ресурсы весьма ограничены, а их сжигание ведёт к экологической и климатической глобальной катастрофе.

Следовательно, у человечества нет альтернативы использованию атомной энергии для покрытия возникающего энергетического дефицита. Современная атомная энергетика за малыми исключениями использует реакторы, в которых топливом служит уран-235 ( $U^{235}$ ). Этот изотоп урана составляет только 0,7 % природного урана, остальное — практически полностью уран-238 ( $U^{238}$ ), в котором цепная реакция деления не развивается и который ядерным топливом служить не может. При делении ядер  $U^{235}$  высвобождается много энергии, превращающейся в высокотемпературное тепло. Чтобы цепная реакция пошла, необходимо, чтобы хотя бы один нейтрон, вылетевший при делении ядра  $U^{235}$ , попал в такое же ядро и был этим ядром захвачен (рис. 5.24).

Вероятность захвата нейтрона возрастает, если скорость нейтрона мала. Между тем нейтроны, вылетающие из делящегося ядра  $U^{235}$ , имеют очень большую скорость (более  $10^6$  м/с) — это быстрые нейтроны. Поэтому природный уран подвергают обогащению, увеличивая концентрацию  $U^{235}$  примерно до 2,5—3 %, а сами тепловыделяющие элементы помещают в среду-замедли-

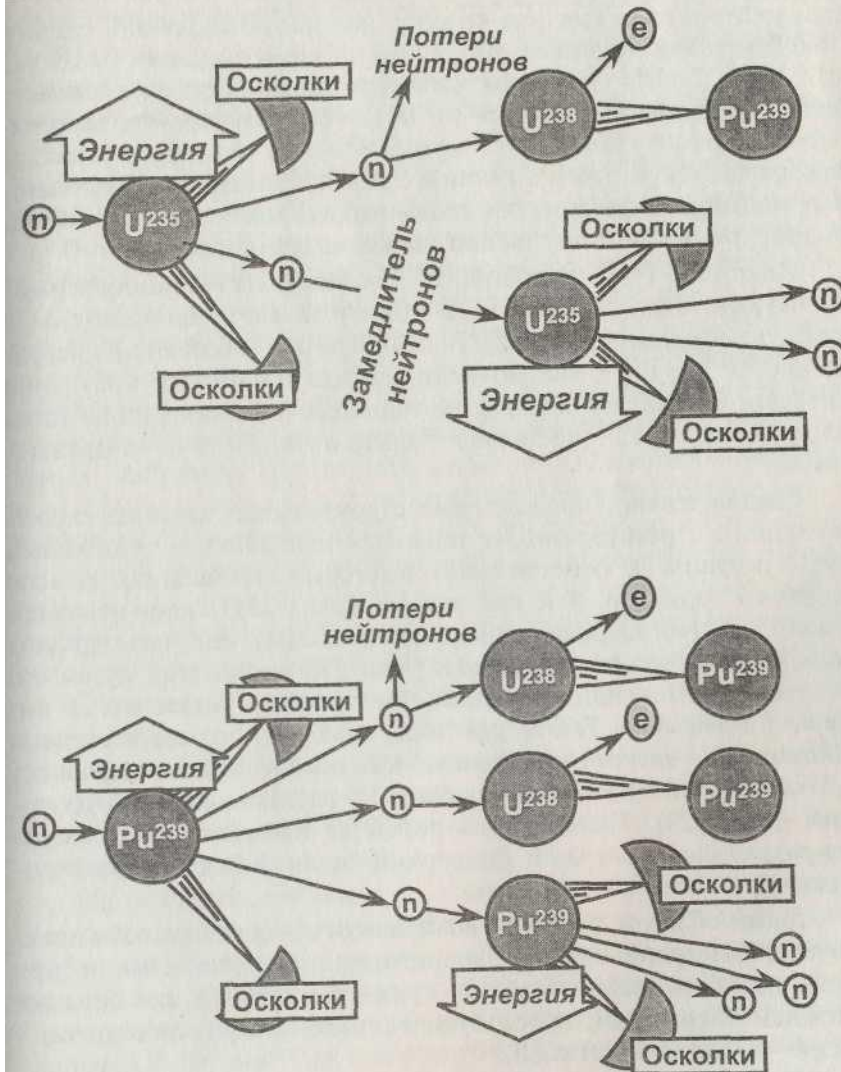


Рис. 5.24. Процессы в ядерных реакторах. Вверху — в реакторе на тепловых нейтронах (с замедлителем): коэффициент размножения нейтронов  $\approx 2,07$ ; на каждые 10 распадов атомов урана  $U^{235}$  только 7 атомов урана  $U^{238}$  превращаются в атомы плутония  $Pu^{239}$ . Внизу — в реакторе на быстрых нейтронах: коэффициент размножения нейтронов  $\approx 2,5$ ; на каждые 10 распадов атомов плутония  $Pu^{239}$  превращаются в плутоний  $Pu^{239}$ . Буквой *n* обозначены нейтроны, буквой *e* — электроны, вылетающие при бета-распаде ядер  $U^{238}$

тель нейтронов, в качестве которой используют воду или графит. Такой реактор называют *реактором на тепловых нейтронах*, так как замедленные нейтроны движутся со скоростями теплового движения молекул (порядка  $10^3$  м/с). Часть нейтронов захватывается ядрами атомов  $U^{238}$ , которые после двух бета-распадов превращаются в атомы плутония-239 ( $Pu^{239}$ ). Реакторы на тепловых нейтронах требуют для своей работы минимального обогащения урана и поэтому нашли широкое применение.

Плутоний  $Pu^{239}$ , подобно  $U^{235}$  обеспечивает самоподдерживающуюся цепную реакцию, а потому может использоваться в качестве ядерного топлива. Таким образом, обеспечив превращение  $U^{235}$  в  $Pu^{239}$ , можно использовать и  $U^{238}$  для получения энергии. Однако в реакторах на тепловых нейтронах количество образующегося  $Pu^{239}$  составляет только около 70 % от «сгоревшего»  $U^{235}$ .

Следовательно, продолжение строительства атомных электростанций с реакторами на тепловых нейтронах — тупиковый путь, ведущий к относительно быстрому истощению запасов ядерного горючего, так как запасы урана-235 очень невелики (табл. 5.2). Но ядерная технология позволяет получать ядерное горючее с избытком, превращая уран-238 в плутоний путём его облучения интенсивным потоком нейтронов в *реакторах на быстрых нейтронах*. Такие реакторы требуют большей степени обогащения ядерного топлива, но обеспечивают наработку 1,3 кг плутония из  $U^{238}$  на каждый кг израсходованного плутония (рис. 5.24). Поэтому эти реакторы называются *реакторами-размножителями* (или бридерами от английского breeder — заводчик).

Таким образом, реальная возможность обеспечить себя практически неограниченными энергетическими ресурсами и при этом избежать экологического кризиса состоит в комбинации атомной энергетики, использующей реакторы-размножители, с гидро- и гелиоэнергетикой.

Рассмотренные методы получения энергии позволяют получать энергию в виде электрического тока и тепла. Однако эти виды энергии не поддаются длительному хранению, а аккумуляторы, как термические, так и электрические, дороги и очень громоздки. Поэтому существует и до сих пор не решена проблема горючего для транспорта и сельскохозяйственной техники, альтернативного нефтепродуктам.

В качестве одного из вариантов решения этой проблемы предлагается применение в качестве топлива водорода, для по-

лучения которого путём электролиза воды должна использоваться электроэнергия. Водород сжигается в топливных элементах, непосредственно преобразующих химическую энергию в электрический ток, питающий электропривод транспортного средства. Помимо того, что водород чрезвычайно взрывоопасен, это означает, что человечеству потребуются, по меньшей мере, удвоение установленной мощности электростанций, так как энергопотребление транспорта равно производству электроэнергии для иных нужд (рис. 5.23). Точно та же ситуация возникнет, если удастся изобрести лёгкие и сверхёмкие электрические аккумуляторы или использовать в качестве горючего для топливного элемента, например, магний или алюминий (сведения о подобных разработках появлялись в печати). Это означает гигантские дополнительные капиталовложения в энергетику и в создание целой новой отрасли промышленности для производства водорода или его заменителей. Кроме того, при этом принципиальной перестройке должна подвергнуться как сама автомобильная промышленность, так и вся сфера обслуживания автотранспорта.

Существует, однако, альтернатива столь разорительному пути. Нефть — это набор углеводов, продукт химической трансформации когда-то существовавшей биомассы. Все необходимые компоненты присутствуют и в растительной биомассе сегодня, отсюда прямая возможность получения транспортного горючего из биомассы растений.

Растительная биомасса — самый древний вид топлива, до сих пор широко используемый во всём мире в виде дров, древесного угля, древесных отходов, хвороста, кизяка и обычной соломы (рис. 5.22). Значительные объёмы бытового мусора, сжигаемого на мусоросжигательных предприятиях, также входят в этот список. Ещё один вид превращения биомассы в высококачественное топливо получил последнее время широкое распространение в Китае и Индии. Растительные и другие органические остатки, в том числе нечистоты, собирают в замкнутые *метантанки*, где под действием бактерий идут процессы превращения биомассы в *биогаз*, состоящий в основном из метана. Твёрдые остатки от процесса используются как удобрение. Эта технология хороша в странах с тёплым и жарким климатом, так как при низких температурах она почти не работает.

Наиболее перспективное использование растительной биомассы для производства автомобильного горючего — это получение этилового и метилового спиртов (этанол и метанол) путём брожения и перегонки. Для этой цели могут использоваться древесные и сельскохозяйственные отходы, городские стоки и т. д. Полученные спирты обходятся дешевле бензина и могут применяться в современных автомобилях при минимальном переоборудовании, а в смесях с бензином — без всякого переоборудования. Первый опыт в этом направлении был осуществлён и накоплен в Бразилии, где 2/3 автомобильного топлива — это этиловый спирт (этанол), и 90 % производимых автомобилей могут работать на чистом этаноле. Около 10 % высококачественного бензина в США содержат до 15 % этанола. Дизельные двигатели прекрасно работают на смеси метанола (метилового спирта) с обычным дизельным топливом.

Таким образом, человечество располагает достаточными ресурсами, чтобы избежать энергетического голода и одновременно отвести от себя угрозу экологической катастрофы, но для этого народы и правительства должны существенно пересмотреть свои взгляды и своевременно и целенаправленно строить новую энергетическую политику.

## Глава 6 На пути к устойчивому развитию

Зачем нужна дорога, если она не ведёт к Храму?  
Тенгиз Абуладзе. «Покаяние»

### 6.1. Особенности взаимодействия природы и общества в эпоху научно-технической революции. Концепция устойчивого развития

Всякая человеческая деятельность прямо или косвенно, но неизбежно связана с эксплуатацией природных ресурсов и основана, таким образом, на взаимодействии с природной средой. Однако взаимоотношения человечества и природной среды развивались неравномерно. Как биологический вид современный человек *Homo sapiens sapiens* появился на Земле совсем недавно — около 40 тысяч лет назад. Его предки, другие виды рода *Homo*, появились на Земле примерно два миллиона лет назад. Наиболее древний из известных науке — *Homo habilis* (человек умелый) — жил в Африке. В ходе эволюции его 1,5 млн лет назад сменил *Homo erectus* (человек прямоходящий), от которого около 200 тысяч лет назад произошёл *Homo sapiens*. Развитие завершилось появлением *Homo sapiens sapiens*. Все эти виды были охотниками и собирателями, и только примерно 10 тысяч лет назад человек научился приручать и одомашнивать животных и разводить растения. В распоряжении человека были только собственная мускульная сила, примитивные орудия из подручных материалов — камня, дерева, костей и растительных побегов — и, может быть, самое главное — способность устно (а потом и письменно) обмениваться информацией. Около 12 тысяч лет назад было сделано первое великое изобретение — лук и стрелы. Постепенно люди увеличивали степень своего влияния на природную среду, и первобытные охотники, по-видимому, даже полностью истребили некоторые виды крупных животных. Однако в целом первобытные племена жили в гармонии с окружающей природой, они были *людьми в природе*.

Настоящее сельское хозяйство появилось около 7 тысяч лет назад в долине Инда, в Месопотамии (в долине рек Тигр и Евфрат) и в долине Нила. Там возникли первые цивилизации и первые антропогенные биогеоценозы, основанные на высоко-развитых системах ирригации и орошения. Цивилизации Месопотамии и Древнего Египта просуществовали дольше всей остальной письменной истории человечества, и это в значительной мере объясняется их гармоничным сосуществованием с природной средой. Важным фактором, поддерживавшим это равновесие, было то обстоятельство, что мифология и религиозные учения древних народов не противопоставляли человека природе, а подчёркивали их единство. Постепенно рост населения и появление частной собственности на землю и воду привели к резкому усилению антропогенной нагрузки на природную среду. Вырубка лесов и истощение почв вели к экономической деградации древних цивилизаций. Одновременно в античных Греции и Риме начинают развиваться философские учения, основанные на рационалистическом подходе к познанию природы, и возникает наука в подлинном смысле слова. Природа перестаёт быть предметом обожествления, а становится исключительно объектом собственности и зачастую беспощадной эксплуатации.

Отсюда — стремление к захвату новых территорий, войны и великое переселение народов в начале новой эры. Почти одновременно произошли крушения Римской империи, империи Хань в Китае, ближневосточных империй. Человек впервые противопоставил себя природе, и в результате — уменьшение населения Земли и отчасти — утрата многих технологических приёмов и навыков (см. рис. 5.1). Антропогенная нагрузка на природу снизилась, и часть разрушенных экосистем постепенно восстанавливалась. Достижения античной науки и философии были почти забыты вплоть до эпохи Возрождения. Именно философия Возрождения, снова повернув человечество к рациональному познанию природы и объявив человека «царём природы», имеющим право на её неограниченную эксплуатацию, проложила путь к кардинальной смене технологической культуры и *первой промышленной революции*, начавшейся в XVII веке. Коперник и Галилей, повторив астрономические открытия Аристарха Самосского, создали базу для научных открытий Исаака Ньютона, с которых эта революция и началась.

Первая промышленная революция привела к переходу в XVIII—XIX веках от кустарного к крупному промышленному производству. Появились паровые машины, и примитивные, тесно связанные с сельским хозяйством, городские общества постепенно превратились в урбанизированные индустриальные системы. Применение паровых машин привело к огромному росту потребления ископаемых ресурсов, прежде всего угля и железной руды, и количества потребляемой энергии (рис. 5.6). Индустриальные центры потребляли всё больше продовольствия и сырья, что вело к растущей деградации природной среды. Городская среда в индустриальных центрах также становилась всё менее пригодной для нормальной жизни из-за сильного загрязнения воздуха и воды, а также огромных масс твёрдых отходов.

Конец XIX и начало XX века ознаменовались началом электрификации производства и быта, созданием двигателя внутреннего сгорания, радикально изменившего транспорт, и быстрым развитием химической и нефтехимической промышленности. На этой основе после Первой мировой войны (1914—1918 гг.) в наиболее развитых странах началась вторая промышленная революция. Возникшие в её результате развитые индустриальные общества имеют следующие характерные черты:

- огромные и часто неоправданные объёмы производства, истощающие невозобновимые природные ресурсы — запасы нефти, природного газа, угля и минерального сырья;
- переход от использования природных материалов, способных разлагаться под действием природных факторов, к синтетическим, большинство которых практически не разлагается;
- резкое увеличение производства продовольствия в результате первой и второй зелёных революций (см. п. 5.2), достигнутое за счёт быстрого роста энергопотребления и использования большого объёма химических удобрений и ядохимикатов;
- некоторое снижение темпов роста населения как следствие контроля над рождаемостью при одновременном старении населения за счёт увеличения продолжительности жизни, особенно в развитых странах;
- существенное усиление загрязнения вод суши и мирового океана токсичными веществами и нефтепродуктами;

- глобальное загрязнение атмосферы тяжёлыми металлами и особо опасными химическими веществами;
- недостаточное понимание опасностей радиоактивного загрязнения;
- кислотное загрязнение обширных регионов Северного полушария, приведшее к повреждению лесов и биоты в северных озёрах;
- уничтожение больших массивов тропических лесов и опустынивание обширных территорий в экваториальных широтах;
- глобальное воздействие на климат вследствие выброса в атмосферу огромных масс парниковых газов;
- истощение озонового слоя.

Из этого перечня видно, что рост благосостояния человечества в индустриальную эпоху XIX и XX веков был основан на быстром истощении невозобновимых природных ресурсов и разрушении и загрязнении потенциально возобновимых ресурсов — почвы, лесов, пастбищ и вод суши и океана. На новом историческом витке человечество стало повторять ошибки, приведшие к гибели древние цивилизации две тысячи лет назад. Но теперь эти ошибки приобрели глобальный характер и угрожают самому существованию биосферы.

Понимание того, что экстенсивный путь развития при ограниченных ресурсах неизбежно ведёт к катастрофе, пришло после публикации серии работ, выполненных по заказу так называемого Римского клуба — неправительственного объединения политических деятелей и бизнесменов. Толчком к проведению исследований послужил шок, который испытали развитые капиталистические страны в результате нефтяного кризиса 1968—1970 гг., когда быстрый многократный рост цен на нефть потряс всю мировую финансово-экономическую систему.

В процессе этих исследований стало очевидным, что цивилизации и природные комплексы, на базе которых эти цивилизации построены, образуют единые системы с весьма сложными внутренними связями. Был построен целый ряд сложных математических моделей мировой динамики, в которых учитывалось огромное количество переменных, главными из которых были народонаселение, производство продуктов питания, объёмы промышленного производства, запасы невозобновимых ресурсов, загрязнение и деградация природной среды (возоб-

новимых ресурсов). Результаты расчётов оказались отчасти неожиданными. Все модели при самых разных наборах параметров указывали на одно и то же — миру грозит экологическая катастрофа вследствие загрязнения и деградации природной среды и перенаселения, и эта катастрофа, скорее всего, наступит раньше истощения запасов полезных ископаемых ресурсов (рис. 6.1).

Стало ясно, что, для того чтобы избежать катастрофы и устойчиво развиваться, общество должно придерживаться трёх принципов, образующих концепцию устойчивого развития:

- скорость восстановления возобновимых ресурсов должна быть не ниже скорости их потребления;
- потребление невозобновимых ресурсов не должно превышать скорости отыскания их замены;
- интенсивность выбросов загрязняющих веществ не должна превышать скорости их разложения или ассимиляции природной средой.

Целый ряд научных открытий и технологических достижений второй половины XX века, совокупность которых принято называть *научно-технической революцией*, открыл возможности для выполнения этих условий. К достижениям, способствующим



Рис. 6.1. Сценарий глобальной катастрофы вследствие истощения возобновимых природных ресурсов

предотвращению экологического кризиса, в первую очередь относятся:

- успехи генетики и генной инженерии, позволившие вывести сверхпродуктивные сорта сельскохозяйственных культур и породы скота, а также разработать и применить биологические методы борьбы с вредителями и сорняками;
- новые технологии сбора, хранения и утилизации бытовых и промышленных отходов, повторное использование металлов, пластических материалов, стекла, бумаги и т. д.;
- энерго- и ресурсосберегающие, а также безотходные и малоотходные технологии производства и методы строительства;
- новые методы очистки отходящих газов и сточных вод, введение рециркуляции технологических оборотных вод;
- развитие ядерной энергетики и её постепенный перевод на реакторы-размножители;
- разработка эффективных солнечных батарей — основы конкурентоспособной гелиоэнергетики и создание современных ветроэнергетических станций.

К 2000 г. в ряде стран достижения научно-технической революции уже использовались в полной мере, и эти страны вступили в *постиндустриальную эпоху*. *Постиндустриальное общество* фактически сформировалось в Норвегии, Швеции и Финляндии, частично — в США, Канаде, Японии, Австрии, Франции и других странах Западной Европы. Оно характеризуется не только уровнем материального благосостояния и технического развития, но и весьма строгим законодательством в области охраны природных ресурсов и, что очень важно, готовностью граждан строго соблюдать эти законы.

Освоение новых ресурсосберегающих технологий и другие меры по охране природы в глобальном масштабе неизбежно требуют огромных затрат. Необходимые ежегодные капиталовложения в ресурсосберегающие технологии и затраты на охрану окружающей среды могут составить 5—10 % от годового мирового валового продукта<sup>46</sup>. Эти затраты имеют две важные особенности. Во-первых, очень часто они связаны не с развитием каких-то отраслей мирового хозяйства или освоением новых ре-

<sup>46</sup> Однако эти огромные затраты всё же не превышают затраты на вооружение и войны, которые человечество позволяет себе.

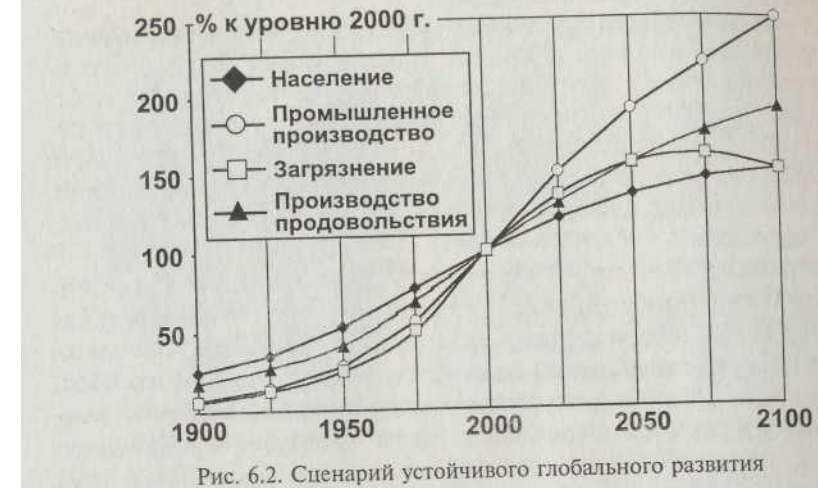


Рис. 6.2. Сценарий устойчивого глобального развития

сурсов, а, наоборот, с отказом от таковых и поиском альтернативных решений. Во-вторых, в наиболее важных случаях ошносят транснациональный характер. Согласившись на эти затраты, человечество совершает переход от покорения природы и гармонизации взаимоотношений с ней. При этом для человечества открывается перспектива длительного бескризисного развития (рис. 6.2).

Такой сценарий развития предполагает, что к концу XXI век; население Земли стабилизируется на уровне 8—12 миллиарде: человек, а темпы роста промышленного производства несколько замедлятся, и, скорее всего, само производство сильно поменяет свой облик. Сельскохозяйственное производство должно существенно обогнать рост населения, а уровень загрязнения и деградации природной среды начнёт снижаться примерно в середине XXI века, когда всё мировое сообщество вступит в постиндустриальную эпоху.

## 6.2. Мониторинг состояния природной среды и экологическое прогнозирование

Усилия по охране природных ресурсов требуют тщательного планирования как на национальном так и международном уровнях. Для такого планирования требуется не только достато-

но полная информация о текущем состоянии экосистем и уровне загрязнения природной среды, о превышении норм допустимых антропогенных нагрузок, кризисных и катастрофических ситуациях, но и о развивающихся в биосфере тенденциях (и отрицательных, и положительных), в том числе об эффективности принимаемых мер по охране природы и снижению загрязнения. Необходимо также своевременное оповещение о вновь возникших опасностях.

В терминах системного анализа в системе цивилизация—биосфера должна присутствовать стабилизирующая отрицательная обратная связь, включающая в себя органы, принимающие меры по охране природной среды, и систему информационного обеспечения этих органов, роль которой выполняет *мониторинг антропогенных изменений природной среды и состояния возобновимых ресурсов*, сокращённо называемый *экологическим мониторингом*. Замкнутый контур этой обратной связи есть контур *экологического регулирования* (рис. 6.3).

Таким образом, система регулярных наблюдений за изменениями в биосфере под влиянием человеческой деятельности называется экологическим мониторингом.

В принципе систематические наблюдения за состоянием природной среды ведутся людьми на протяжении всей истории. Жрецы Древнего Египта тщательно наблюдали за разливами Нила, их сроками и высотой подъёма воды и даже научились прогнозировать эти параметры. Аналогичные «службы» существовали, по-видимому, и в Древней Месопотамии. Столетиями фиксировались сроки зацветания вишни — сакуры в Японии. Систематические научные наблюдения за погодой в Европе ведутся уже около двух веков. Все эти наблюдения сосредоточены на изменениях в природе, вызванных естественными причинами и происходящих в течение длительных интервалов времени.

В отличие от естественных факторов, антропогенные воздействия могут приводить к очень быстрым изменениям в состоянии биосферы, процессам, скорости которых в сотни и тысячи раз больше естественных. Тем не менее система мониторинга, как правило, не требует организации сети новых наблюдательных станций, линий связи и центров обработки данных, а в большинстве случаев опирается на развитую инфраструктуру гидрометеорологических служб и, прежде всего, на Всемирную службу погоды Всемирной метеорологической организации.



Рис. 6.3. Информационные и материальные потоки в системе цивилизация - биосфера, обеспечивающие устойчивость системы, и роль мониторинга природной среды как элемента обратной связи

Глобальная система мониторинга окружающей среды (ГСМОС) была создана совместными усилиями мирового сообщества (основные положения и цели программы были сформулированы в 1974 году на первом межправительственном совещании по мониторингу) и объединила национальные системы практически всех стран.

Основными функциями экологического мониторинга являются:

- выявление факторов, воздействующих на природную среду, оценка их интенсивности и определение источников;
- оценка фактического состояния природной среды;
- прогноз изменений в природной среде.

Факторов, воздействующих на природную среду, очень много, и они весьма разнообразны как по характеру воздействия, так и по своей природе. Соответственно, весьма разнообразны и методы, используемые в мониторинге.

При оценке химического и радиоактивного загрязнения наряду с измерением уровня загрязнения (концентрации загрязняющего вещества или дозы радиоактивного излучения) часто приходится решать трудную, а порой и почти неразрешимую задачу определения местоположения и интенсивности неизвестного источника загрязнения. Проблема состоит в том, что мощный удалённый источник может создать в точке измерения такую же (или даже большую) концентрацию загрязняющего вещества, как и слабый локальный. Например, около 85 % кислотного загрязнения на территории Норвегии и Швеции и до 50 % — на европейской территории России создаётся источниками, расположенными в Центральной Европе, а до 60 % загрязняющих веществ в Японии приходят из Китая. В тех случаях, когда прямые измерения не дают однозначного ответа об источнике, для его определения разрабатываются специальные математические методы и изоцифрованные компьютерные программы.

Химический мониторинг требует для своей организации весьма совершенной и чувствительной аппаратуры и соблюдения аккуратности при отборе проб воздуха, воды или почвы. Предельно допустимые концентрации многих наиболее опасных веществ находятся на грани обнаружения их присутствия. Достаточно вспомнить (см. табл. 4.1), что ПДК для диоксида в воздухе составляет одну молекулу на  $10^6$  молекул воздуха!

Мониторинг радиоактивного загрязнения сравнительно сложен, когда требуется оценить загрязнение изотопами, создающими при распаде гамма-излучение, и большинство постов наблюдения метеорологической сети оснащается гамма-дозиметрами. Как правило, при техногенном загрязнении в окружающую среду поступает смесь радионуклидов, среди которых есть все

типы излучателей. Поэтому в первом приближении степень опасности может быть оценена по уровню гамма-излучения. Тем не менее в ряде случаев такая оценка неприменима. Существует множество искусственных радиоактивных изотопов, которые практически не испускают гамма-кванты, но при этом являются очень опасными источниками излучения при попадании в организм. Мощность дозы, определяемая при помощи гамма-дозиметра, не может зафиксировать уровень загрязнения такими изотопами, и требуется использование специализированной аппаратуры.

Наземные измерения не дают полной картины загрязнения атмосферы, поэтому для отбора проб в её толще используется авиация. Мощным средством оценки загрязнения воздуха является лазерное зондирование, основанное на резонансном поглощении квантов с различными длинами волн.

Для оценки состояния почв и водоёмов наряду с химическим контролем широко используется *биологический мониторинг*. Суть его заключается в том, что в данной экосистеме выбирается один или несколько видов-индикаторов и осуществляется слежение за состоянием этих видов: численностью, возрастной структурой и распространённостью патологий. Например, наблюдая за состоянием пресноводных моллюсков, энергично фильтрующих воду, можно судить об уровне загрязнения водоёма токсичными веществами. Другой пример: усыхание верхушек у сосен свидетельствует о кислотном загрязнении атмосферы. *Биоиндикаторы* могут применяться и для оценки химического загрязнения веществами, опасными в ничтожных концентрациях, а потому трудно обнаружимых. При этом используется способность некоторых видов аккумулировать эти вещества. Например, дождевые черви — концентраторы кадмия, жуки-жужелицы — свинца, а мокрицы — меди. Особенно широко биологический мониторинг используется для оценки состояния морских и океанических экосистем.

Биологический мониторинг имеет то преимущество, что позволяет по ограниченному числу сравнительно просто измеряемых параметров судить о состоянии экосистемы в целом. Однако у него есть существенный недостаток, связанный с тем, что выбранные виды-индикаторы могут быть нечувствительны к какому-то типам загрязнения, весьма опасным для других видов, в частности человека.



Особое значение в наземном экологическом мониторинге играют *биосферные заповедники*. Изучение в них экосистем в нетронутом или почти нетронутом человеком состоянии позволяет получить те эталоны, по которым можно судить о степени антропогенной нагрузки на аналогичные экосистемы. При этом удаётся отделить антропогенные воздействия от природного дрейфа геофизических характеристик среды и состояния экосистем.

При экологическом мониторинге на региональном и глобальном уровне незаменимым является использование спутников Земли, целых спутниковых систем и обитаемых космических станций.

*Космический мониторинг* позволяет получать информацию о состоянии лесов, сельскохозяйственных угодий, растительности на суше, эрозионных процессах, фитопланктоне и уровне загрязнения океана, направлении и скорости распространения многих видов загрязнения. Использование съёмок поверхности Земли в определённых диапазонах длин волн позволяет зондировать водные объекты на глубину до десятков метров. Использование многоспектральной съёмки позволяет не только определять типы почв, но и измерять такие их параметры, как влажность, температура и содержание гумуса, засоленность и т. д.

Из космоса определяется состояние растительности, её типы и биомасса, а также состояние и запасы пресной воды. Космические измерения позволяют судить и о состоянии верхних слоев атмосферы, в частности о состоянии озонового слоя и наличии в нём опасных малых газовых примесей.

Наконец, космический мониторинг позволяет чрезвычайно оперативно следить за появлением и распространением таких опасных явлений, как лесные пожары, пыльные бури и распространение нефтяных пятен при авариях танкеров и нефтедобывающих морских платформ.

### 6.3. Экологическое регулирование и экологическое право. Социальные проблемы природопользования и концепция сбалансированного риска

Экологическое регулирование осуществляется правительственными органами и местной администрацией на основе, прежде всего, национального законодательства и международных соглашений. Эти документы регламентируют пользование угоды-

ми — лесами и землёй, водными ресурсами и ресурсами биоты (охота и рыболовство), а также устанавливают предельно допустимые нормы загрязнения природной среды. Второй способ экологического регулирования — это финансирование природозащитных и природовосстановительных мероприятий.

Информационной базой экологического регулирования служит экологический мониторинг. На локальном и региональном уровне дополнительная информация поступает от общественных организаций и от отдельных граждан.

Основная проблема, с которой сталкиваются управляющие органы, осуществляя экологическое регулирование, — злостное нарушение законодательства и установленных норм. Слишком часто предприятиям проще и дешевле заплатить штраф за загрязнение, чем заниматься сложным и дорогим строительством очистных сооружений или менять технологию. Это непосредственно связано с другой проблемой — неполнотой и несовершенством самих природоохранных законов. Штрафные санкции обычно значительно меньше объёма ущерба и стоимости очистных сооружений. К сожалению, до сих пор природные ресурсы рассматриваются как «ничьи», а следовательно, почти не имеющие стоимости. Проблема состоит в том, что наиболее ценные вещи, такие как здоровье и сама жизнь, чистые воздух и вода, красота дикой природы и способность экосистем самовосстанавливаться и пополнять возобновимые ресурсы, невыгодно выражать в денежном эквиваленте. Введение обязательного страхования от экологических рисков для всех видов хозяйственной деятельности частично позволяет решить эту проблему.

Экономисты и правительства оценивают благосостояние общества по валовому национальному продукту (ВНП) на душу населения, то есть по средней совокупной стоимости товаров и услуг, приходящейся на долю одного жителя страны. В этот показатель не входит информация об истощении и загрязнении природных ресурсов, от которых, в конечном счёте, зависит вся экономика и само существование человечества.

Экологический контроль в Российской Федерации регламентируется Законом РФ «Об охране окружающей среды».

Нормативными документами, определяющими правила и методы контроля состояния природной среды, являются государственные стандарты и другие подзаконные акты.

Ввиду специфики и особой важности проблемы радиационной безопасности она регламентируется особым Федеральным

законом «О радиационной безопасности населения» и принятыми в его развитие «Нормами радиационной безопасности НРБ-96».

При измерениях, проводимых в рамках мониторинга, зачастую используются различные приборы и методы для оценки одной и той же величины, особенно, когда измерения проводятся многими службами в разных странах. Разброс результатов измерений малых концентраций может быть недопустимо велик. Поэтому очень существенной проблемой является калибровка приборов, их регулярная поверка и *интеркалибрация* (сверка) *приборов и методов измерений*. В России эти процедуры регламентируются Законом «Об обеспечении единства измерений». В сферу действия Закона попадают все организации (независимо от ведомственной принадлежности и формы собственности), ведущие работы в области охраны окружающей среды (статья 13). Закон предписывает для проведения всех видов измерений, подпадающих под действие этого Закона, использовать только аттестованные методики измерений (статья 9). Средства измерений, используемых для работ в области охраны окружающей среды, должны быть допущены в установленном порядке к применению в РФ (статья 8), а также проходить периодическую поверку (статья 15).

Хотя многие нормы, введённые российским законодательством, едва ли не самые жесткие в мире, они, к сожалению, часто и повсеместно нарушаются. Этому способствует то обстоятельство, что законодательная база России в области охраны природы проработана недостаточно. Для сравнения укажем, что в США в настоящее время действуют более 50 федеральных законов в этой области, тщательно регламентирующих все стороны эксплуатации возобновимых ресурсов, причём эти законы регулярно обновляются и уточняются в соответствии с новыми данными, а их нарушение карается достаточно строго.

При осуществлении экологического регулирования возникает проблема наложения загрязнений от нескольких предприятий-источников друг на друга в одной и той же точке. Выброс в атмосферу или сброс в водоём от каждого из предприятий создаёт концентрацию загрязняющего вещества ниже предельно допустимой, но суммарное воздействие выбросов от всех предприятий превышает ПДК. Эта проблема, характерная для крупных промышленных центров, решается путём установления для каждого из предприятий предельно допустимого выброса в атмо-

сферу (ПДВ) и предельно допустимого сброса (ПДС) сточных вод и концентрации содержащихся в них примесей.

ПДВ устанавливаются, исходя из суммы вкладов всех источников загрязнения при наихудших метеорологических условиях. ПДС устанавливается с учетом предельно допустимых концентраций веществ в местах водопользования (в зависимости от вида водопользования).

Согласно Закону все проекты вновь строящихся и модернизируемых производств проходят экологическую экспертизу. Но опыт показывает, что любые прогнозы экологических последствий намечаемой деятельности содержат существенную неопределенность. Поэтому существенную часть экологического регулирования составляет постпроектный анализ, включающий независимую квалифицированную оценку экологической и эколого-экономической эффективности реализованных решений в сравнении с проектными данными и материалами экологической экспертизы. Именно постпроектный анализ даёт возможность постепенно накопить опыт экологического прогнозирования, что необходимо для развития практических методов оценивания комплексных воздействий на окружающую среду.

Эффективное экологическое регулирование возможно только на основе тесного сотрудничества государственных органов и общества в целом. Согласно Закону РФ «Об охране окружающей среды», контроль состояния природной среды может осуществляться как государственными органами, так и общественностью. Статья 68 Закона гласит: «Общественный контроль в области охраны окружающей среды (общественный экологический контроль) осуществляется в целях реализации права каждого на благоприятную окружающую среду и предотвращения нарушения законодательства в области охраны окружающей среды. Общественный контроль в области охраны окружающей среды (общественный экологический контроль) осуществляется общественными и иными некоммерческими объединениями в соответствии с их уставами, а также гражданами в соответствии с законодательством».

Взаимоотношения общественных и государственных организаций — один из ключевых вопросов экологического мониторинга и экологического регулирования. На практике между административными органами и общественными природоохранными организациями почти во всех странах, а не только в России часто возникают конфликты, основанные на взаимном предубеждении. Со-

трудники государственных служб убеждены, что общественные организации состоят из некомпетентных людей, ищущих скандальной известности или психически не совсем здоровых. Значительная часть участников «зелёных» партий и движений считает, что государственные служащие не заинтересованы в улучшении существующей ситуации, они не берегут природу и наше здоровье.

Огонь конфликтов поддерживается, с одной стороны, зачастую неграмотными выступлениями «зелёных»<sup>47</sup>, а с другой стороны, действиями коррумпированных чиновников, разоблачение которых подрывает авторитет государственных природоохранных служб.

Конфликты могут возникать и часто возникают в результате использования непроверенной или просто непригодной аппаратуры. Недобросовестные фирмы эксплуатируют страх людей перед опасными загрязняющими веществами, торгуя фальшивыми «личными дозиметрами» или «нитратомерами», которые вообще ничего не измеряют. Это не означает, что общественный экологический мониторинг должен осуществляться исключительно с использованием аттестованных приборов и методик. Полуколичественные или даже качественные методы могут быть использованы в образовательных целях или для привлечения внимания к той или иной проблеме. Тем не менее следует ясно понимать, что принятие конкретных мер должно основываться на данных, полученных при помощи аттестованных аппаратуры и методик.

Экологические проблемы могут быть решены только путём совместных и согласованных действий и общественности, и государственных служб, действий, основанных на компетентной оценке реальности. Необходимость соблюдать экологические нормы почти всегда ущемляет чьи-то экономические интересы. Отсюда — лоббирование экологически неприемлемой деятельности в законодательных и государственных органах. Поразительно, до какой степени некоторые люди готовы рисковать благополучием, здоровьем и самой жизнью своей и собственных детей ради сиюминутной экономической выгоды или просто ради

<sup>47</sup> Среди этих выступлений надо отметить публичные заявления лиц, облечённых высокими научными званиями, но не имеющих никакого отношения к экологическим проблемам, кроме собственных амбиций. Это типичное проявление «болезни сайентизма», при которой человек, глубоко сведущий в некоторой узкой области, считает себя компетентным во всех науках, хотя часто ошибается даже в терминологии.

собственной прихоти. Именно поэтому субъективные оценки *приемлемого риска* мало достоверны и не всегда объективны.

Любая человеческая деятельность и сама жизнь, так или иначе, связаны с риском. Устанавливая экологические нормы, приходится исходить из того, чтобы индивидуальный риск каждого человека был сбалансирован, то есть выгода, получаемая человеком от некоторой деятельности, оправдывала возникающий для него риск.

*Сбалансированный риск* может быть оценён, исходя из сравнения с неизбежными рисками, связанными с повседневной человеческой деятельностью. Классический пример сбалансированного риска — применение лекарств, дающих вредные побочные эффекты. Диапазон риска для человека лежит между вероятностью серьёзно заболеть в течение года, составляющей примерно  $10^{-2}$ , и вероятностью погибнуть от природной катастрофы или несчастного случая, равной в среднем  $10^{-6}$ . При субъективной оценке риска очень велика разница между добровольным и вынужденным риском. Как правило, человек считает вполне допустимым добровольный риск  $10^{-4}$  (курение, злоупотребление алкоголем, регулярное вождение автомобиля) и бывает серьёзно обеспокоен вынужденным риском  $10^{-3}$  (например, от опасной промышленной аварии на близлежащем предприятии).

Оценка сбалансированного риска — один из основных компонентов экологического регулирования. При установлении экологических норм обычно используется величина индивидуального риска  $1\Gamma^6$ . Например, именно таков риск от естественного радиоактивного излучения, и доза от этого облучения положена в основу выработки допустимой дозы антропогенного облучения.

При оценке допустимого риска от загрязнения окружающей среды наибольшие трудности обусловлены тем, что выгода от некоторой деятельности и риск, с ней связанный, зачастую распределены неодинаково во времени и пространстве. Можно указать на применение долгоживущих пестицидов, выгода от применения которых возникает в конкретном хозяйстве на сравнительно коротком интервале времени, а риск рассеивается вплоть до глобального масштаба и на многие месяцы и годы.

Очень часто при разработке новых проектов выгоды переоцениваются, а затраты и потери недооцениваются, так как выгоды кажутся очевидными, а факторы риска расплывчатыми и неопределёнными. Это в особенности относится к экологическому риску. Для преодоления этих трудностей необходимо

строить и использовать на этапе проектирования соответствующие модели на научной основе. Однако до сих пор решения слишком часто принимаются на основе бюрократических «моделей», учитывающих пристрастные мнения противников и сторонников проекта, необходимость принятия решения в заданные сроки, возможные конфликты и тому подобные факторы, не имеющие отношения к реальным задачам обеспечения экологической безопасности каждого человека.

#### 6.4. Международное сотрудничество и мировоззрение устойчивого развития

Биосфера не знает государственных границ, и наиболее сложные проблемы охраны природы в большинстве случаев носят глобальный или региональный характер, затрагивая интересы многих стран. Достаточно вспомнить о росте парникового эффекта или разрушении озонового слоя, чтобы понять, сколь важно развитие международного сотрудничества в экологическом регулировании.

Многие крупнейшие учёные, среди которых прежде всего надо назвать В. И. Вернадского, уже очень давно ставили вопрос о глобальном характере влияния человеческой деятельности на биосферу. Однако на протяжении длительного времени проблемы загрязнения и деградации природных ресурсов рассматривались как сугубо локальные, не выходящие за пределы национальных границ.

Впервые понимание того факта, что опасные вещества не признают государственных границ, пришло к политикам, когда ядерные испытания в атмосфере стали глобальной угрозой, и в 1963 г. был заключён договор об их запрещении.

Следующий решительный шаг был сделан в июне 1972 г. на Стокгольмской конференции ООН по окружающей среде. Правительственные делегации на этой конференции приняли основополагающую «Декларацию об окружающей человека среде» и рекомендовали Генеральной Ассамблее ООН принять программу ООН по окружающей среде (ЮНЕП<sup>48</sup>). С момента создания ЮНЕП внесла достойный вклад в дело охраны возобновимых

<sup>48</sup> United Nations Environmental Program.

Природных ресурсов и в постепенный переход человечества к устойчивому развитию. Важнейшую роль в развитии международного сотрудничества сыграла конференция ООН по окружающей среде и развитию 1992 г., прошедшая в Рио-де-Жанейро. Конференция приняла итоговый документ «Повестка дня XXI», в котором были рассмотрены основные глобальные экологические проблемы и пути их решения на основе концепции устойчивого развития.

При участии ЮНЕП был подготовлен и заключён целый ряд международных соглашений и конвенций по экологическим проблемам. В их числе:

- Венская конвенция по защите озонового слоя 1979 г. и Монреальский протокол по веществам, разрушающим озоновый слой 1987 г.;
- Конвенция по биологическому разнообразию 1992 г. и Протокол по охране биоты 2000 г.;
- Рамочная Конвенция ООН об изменении климата 1992 г. и Киотский протокол по ограничению эмиссии парниковых газов 1997 г.

Подготовка и согласование каждого подобного документа требует от его участников огромного труда, так как его последствия для национальной экономики могут быть весьма значительными. В особенности это проявилось в работе по Киотскому протоколу. США считают этот протокол крайне невыгодным для себя, так как они являются главным «поставщиком» углекислого газа в атмосферу. Вместе с тем Россия, Канада и Бразилия указывают, что именно на их территориях сосредоточены основные массивы лесов — «лёгкие планеты», поглощающие значительную часть избыточного углекислого газа. Поэтому этот протокол до сих пор остаётся предметом дискуссий.

Большим успехом в развитии международного сотрудничества явилось подписание и реализация Монреальского протокола по защите озонового слоя, хотя и в этом случае были свои трудности. Подписавшие сразу протокол страны — основные производители хлорфторуглеродов опережающими темпами снижали их использование, но исследования показали, что этого недостаточно и разрушение озонового слоя продолжает расти. Это было связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, в атмосфере уже накопилось много хлорфторуглеродов, время жизни которых

составляет десятки лет. Во-вторых, ряд стран не подписал протокол и продолжал использовать фреоны (в том числе СССР), а некоторые страны, например Китай, планировали даже наращивание их производства. После длительных переговоров, в организации которых ЮНЕП сыграла большую роль, в 1990 г. в Лондоне было подписано соглашение о полном прекращении производства хлорфторуглеродов. К списку запрещённых веществ были добавлены метилхлороформ, четырёххлористый углерод и хлорбромуглероды, также разрушающие озоновый слой.

При работе над соглашением о защите озонового слоя проявилась ещё одна важная тенденция в международном сотрудничестве. Был создан фонд для технической поддержки стран третьего мира при внедрении химических соединений, заменяющих хлорфторуглероды. Это свидетельствует о растущем понимании того, что при решении глобальных экологических проблем технико-экономические вопросы должны решаться вместе всем международным сообществом в общих интересах.

Чрезвычайно важным учреждением ООН является Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ), созданное в 1957 г. и вносящее огромный вклад в повышение безопасности ядерной энергетики.

Осознание общности экологических проблем привело к тому, что международное сотрудничество стало развиваться на региональном уровне, прежде всего в Европе. Вероятно, первой успешной европейской программой стала программа ЕМЕП<sup>49</sup>.

Инициаторами этой программы были шведские, норвежские и российские учёные, сумевшие убедить правительства своих стран в важности проблемы закисления и доказать, что трансграничный перенос окислов серы — основная причина закисления природной среды в скандинавских странах и в западных областях России (тогда — СССР). Исследования проводились параллельно силами норвежских и российских учёных, начиная с 1976 г., в трёх научных центрах. Два центра, один в Москве, другой в Осло, вели компьютерные расчёты переноса окислов серы в атмосфере Европы, используя математические модели и реальную метеорологическую информацию. Третий центр, располо-

<sup>49</sup> Полное название — «Co-operative programme for monitoring and evaluation of the long range transmission of air pollution in Europe», то есть «Совместная программа наблюдения и оценки дальнего переноса загрязняющих воздух веществ в Европе».

ценный в Лиллестрёме, в Норвегии, собирал и обобщал данные измерений концентраций окислов серы. Исследования шли успешно, и скоро стало ясно, что программа позволяет получать на регулярной основе правильные оценки не только самих уровней загрязнения, но и достоверно указывать на его источники.

На основе данных предварительных исследований в 1979 г. страны Европы подписали Конвенцию о дальнем трансграничном переносе загрязняющих воздух веществ. Программа ЕМЕП с её научными центрами стала инструментом этой Конвенции. Деятельность ЕМЕП в рамках Конвенции оказалась очень эффективной. На основе получаемых от ЕМЕП данных были подписаны и реализованы на практике протоколы о сокращении или ограничении атмосферных выбросов в Европе окислов серы, окислов азота, летучих и стойких органических соединений. В результате к 2000 г. выброс окислов серы в Европе сократился более чем вдвое, общий уровень закисления природной I среды начал заметно снижаться, и расширилась и укрепилась сеть химического мониторинга атмосферы в Европе.

Успех работ в рамках Конвенции о трансграничном переносе загрязняющих воздух веществ стимулировал проведение ещё целого ряда международных природоохранных мероприятий в Европе. Среди них особое место заняли программы по мониторингу и контролю загрязнения примыкающих к Европе морей — Балтийского и Средиземного. В европейских странах стало расти понимание того, что, участвуя в решении интернациональных проблем охраны природной среды, каждая страна эффективно способствует улучшению экологической ситуации у себя дома.

Переход к постиндустриальному обществу и усиленное внимание к охране природы охватили пока только высокоразвитые страны Европы и Северной Америки и то не полностью. Этот процесс не коснулся, по меньшей мере, половины населения Земли. Действительно, нереально ожидать, чтобы люди, находящиеся на грани выживания, думали о перспективе устойчивого развития в планетарном масштабе. И это проблема не только взаимоотношений бедных и богатых стран, но и проблема социального неравенства в богатых странах.

Залогом перехода к обществу, живущему в гармонии с природой и с самим собой, может стать только щедрая, бескорыстная и эффективная помощь развивающимся странам со стороны богатых стран и готовность каждого человека делиться социальными благами с другими.

## Список литературы

### Учебная и популярная литература

1. Ардруз Дж., Бримблекумб П., Джикелз Т., Лисе П. Введение в химию окружающей среды. — М.: Мир, 1999. 272 с.
2. Медоуз Д. Х., Медоуз Д. Л., Рандерс Й. За пределами роста. — М.: Изд. группа «Прогресс»: Пангея, 1995. 304 с.
3. Миллер Т. Жизнь в окружающей среде: В 3 т. — М.: Изд. группа «Прогресс»: Пангея, 1993. Т. 1 (256 с); Т. 2 (336 с); Т. 3 (400 с).
4. Миркин Б. М., Наумова Л. Г. Экология России. — М.: АО МДС: Юнисам, 1995. 232 с.
5. Небел Б. Наука об окружающей среде: Как устроен мир: В 2 т. — М.: Мир, 1993. 760 с.
6. Протасов В. Ф. Экология, здоровье и охрана окружающей среды в России: Учеб. и справ. пособие. — М.: Финансы и статистика, 1999. 672 с.
7. Радиация: Дозы, эффекты, риск. — М.: Мир, 1990. 79 с.
8. Ревелль П., Ревелль Ч. Среда нашего обитания: В 4 кн. — М.: Мир, 1995. Кн. 1 (340 с); Кн. 2 (296 с); Кн. 3 (292 с); Кн. 4 (191 с).
9. Сивинцев Ю. В. Насколько опасно облучение? — М.: ИздАт, 1991. 112 с.

### Научная литература

1. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). — Л.: Гидрометеиздат, 1991. 512 с.
2. Биосфера. - М.: Мир, 1972. 184 с.
3. Беляев М. П. Справочник предельно допустимых концентраций вредных веществ в пищевых продуктах и среде обитания. — М.: Гос санэпиднадзор, 1993. 141 с.
4. Бертокс П., Радд Д. Стратегия защиты окружающей среды от загрязнений. - М.: Мир, 1980. 608 с.
5. Беспаятное Г. П., Кротов Ю. А. Предельно допустимые концентрации химических веществ в окружающей среде. — Л.: Химия, 1985. 528 с.

6. Блок М. Апология истории или ремесло историка. — М.: Наука, 1973. 232 с.
7. Вегенер А. Происхождение континентов и океанов. — Л.: Наука, 1984. 288 с.
8. Вернадский В. И. Живое вещество. — М.: Наука, 1978. 360 с.
9. Гальперин М. В. Динамика эколого-экономических систем в линейном приближении. — М.: Гидрометеиздат, 1984. 92 с.
10. Глобальный биогеохимический цикл серы и влияние на него деятельности человека. — М.: Наука, 1983. 424 с.
11. Государственный доклад «О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации в 1995 г.» — М.: Центр международных проектов, 1996. 458 с.
12. Гумилёв Л. Н. Этногенез и биосфера Земли. — Л.: ВИНТИ, 1979. 756 с.
13. Егоров В. А. и др. Математические модели глобального развития. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. 192 с.
14. Израэль Ю. А. Экология и контроль состояния природной среды. 2-е изд., доп. — М.: Гидрометеиздат, 1984. 560 с.
15. Израэль Ю. А. Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий. — СПб.: Прогресс-погода: Гидрометеиздат, 1996. 356 с.
16. Кислотные дожди. — Л.: Гидрометеиздат, 1983. 208 с.
17. Монин А. С, Шишков Ю. А. История климата. — Л.: Гидрометеиздат, 1979. 408 с.
18. Одум Ю. Основы экологии. — М.: Мир, 1975. 742 с.
19. Оксенгендлер Г. И. Яды и организм: Проблемы химической безопасности. - СПб.: Наука, 1991. 320 с.
20. Реймерс Н. Ф., Яблоков А. В. Словарь терминов и понятий, связанных с охраной живой природы. — М.: Наука, 1982. 144 с.
21. Уорк К., Уорнер С. Загрязнение воздуха: Источники и контроль. - М.: Мир, 1980. 544 с.
22. Фомин Г. С. Вода. Контроль химической, бактериальной и радиационной безопасности по международным стандартам: Энциклопедический справочник. — М.: Протектор, 1995. 624 с.
23. Elsom D. M. Atmospheric Pollution. A Global Problem. 2nd ed. — Oxford: Blackwell Publishers, 1995. 422 p.
24. Forrester J. W. World Dynamics. — Cambridge, Mass.: Wright-Allen Press Inc., 1971. 192 p.
25. Manahan S. E. Environmental Chemistry. — N. Y.: Lewis Publishers, 1994. 789 p.

- Абиотические факторы 12, 41  
 Абиссаль 73  
 Абиссальные равнины 60, 73  
 Абсолютно чёрное тело 82  
 Автотрофы 26  
 Адаптация 100  
 Адвекция 119  
 Аденозиндифосфат (АДФ) 97  
 Аденозинтрифосфат (АТФ) 97  
 Адсорбция 118  
 Азот связанный 95—97  
 Азота окислы 95-97, 124, 128, 160, 163  
 Азотная кислота 128, 129  
 Азотфиксирующие микроорганизмы 96  
 Алумосиликаты 87  
 Альбеда 82, 162 Аммиак 74, 125 Аммоний 129  
 Анаэробы 28, 98  
 — облигатные 28  
 Антициклон 45, 47, 48, 119  
 Антропогенная нагрузка 66, 186  
 Антропогенные экосистемы 9, 66—70  
 Апвеллинг 61, 213  
 Архей 75 Астеносфера 73  
 Аттрактивная область 38  
 Аттрактор 38 Аттрактанты 184, 102 Атмосфера нейтральная 45  
 — неустойчивая 45  
 — однородная 42  
 — первичная 74  
 — стандартная 43  
 — устойчивая 45  
 Атмосферная циркуляция 45—47, 117  
 Атомная энергетика 220 Атомные электростанции (АЭС) 153, 158  
 Аэрация 189
- Аэрозоль 82, 118, 122, 131—136, 160
- Бактериальное загрязнение 138  
 Барометрическая формула 43  
 3,4-бенз(а)пирен 130, 136  
 Бенгаль 64  
 Бериллий 108  
 Биогаз 225  
 Биогеоценоз 8, 26—27, 38, 55, 193  
 Биопродуктивность 12—15, 30, 61—63, 67-69  
 Биота 8  
 Биотический фактор 12  
 Биотоп 8  
 Бифуркации 38, 52 Бобовые растения 96 Болотные экосистемы 61, 62, 68, 201 Боральные леса 56, 205
- Ванадий 108, 133, 185  
 Вегетативное размножение 102  
 Вельд 54 Вертикальный градиент температуры 43, 119  
 Ветроэнергетические установки 220  
 Водородный показатель 123, 189  
 Воспроизводство 173 Водоносный горизонт 196—198 Время жизни 115  
 Время пребывания 115, 122 Второе начало (закон) термодинамики 80
- Гелиоэнергетика 220, 222  
 Генофонд 102  
 Геострофический ветер 47  
 Гидрокарбонат-ион 92  
 Гидросфера 75, 87, 185  
 Гидроэнергетика 198, 220  
 Гипоталамус 101 Гипофиз 101  
 Гольфстрим 162
- Гомеостаз 39, 107 Гормоны 101  
 Городской смог 130  
 Гравитационное осаждение 118  
 Градиент температуры 43—44  
 ----- сухоадиабатический 43  
 Гумус 29, 125, 187, 190, 195
- Двустворчатые фильтрующие моллюски 65 Девон 78  
 Дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК) 97, 101  
 Денитрификаторы 96  
 Детритофаги 29, 64, 187, 189  
 Дефолианты 136 Джунгли 52, 204  
 Диапазон толерантности 15, 17, 107  
 Динамическое равновесие 22  
 Диоксид углерода 74, 82, 86, 87, 160  
 Диоксин 106, 136 Диффузия 115  
 — турбулентная 119  
 Доза токсическая 108  
 — летальная 108, 150  
 — среднесмертельная 108, 150  
 — поглощённая 145—146  
 — эквивалентная 145  
 — экспозиционная 145  
 — эффективная эквивалентная 147  
 Долгоживущие органические соединения 136—137  
 Доминирующий вид 12, 26  
 Доминант 12
- Ёмкость экосистемы 12, 23, 208  
 ЕМЕП 246
- Загрязнение воды нефтепродуктами 159  
 Закисление водоёмов 123—124  
 — дождей 123  
 — почв 123  
 — природной среды 123  
 Запас устойчивости системы 38, 57  
 Зеркало вод 196 Зоопланктон 60
- Известкование почв 189  
 Известняки 91  
 Изобара 47  
 Инверсия температурная 44
- Инсоляция 41, 82 Интоксикация 108 Инфильтрация 196, 198  
 Ионизирующее излучение 144  
 Испаряемость 50
- Кадмий 108, 133-135  
 Канцерогены 107  
 Карбонат-ион 92  
 Карбонат кальция 93  
 Катархей 75  
 Кислотность среды 123, 189  
 Киотский протокол 245  
 Климатическое сообщество 39  
 Кобальт 96, 133  
 Колчеданы 127  
 Конвективный подъём 45  
 Конвекция 45, 73  
 Конвергенция внутритропическая 45  
 Конкуренция 12  
 Консументы 28, 75  
 Коэффициент увлажнения 50  
 Красные книги 210  
 Критическая скорость подъёма 190  
 Круговорот азота 95—97  
 — воды 87, 91  
 — кислорода 87  
 — углерода 87  
 — серы 99  
 — фосфора 97  
 Ксенобиотики 106—108
- Летучие органические соединения (ЛОС) 123, 128 Либиха закон 17 Лимитирующий фактор 16—18 Лиственные леса 55, 205  
 Литораль 34, 64 Литосфера 73, 87, 185 Литосферные плиты 73  
 Логистическое уравнение 24  
 ЛОС 123, 128
- Мальтуса закон 13—14  
 Мантия Земли 73  
 Мезосфера 44  
 Метаболический запас растения 208  
 Метан 74, 78  
 Метанол 226  
 Метантанк 225  
 Механическое загрязнение 139

- Мимикрия 33  
 Микроволновое излучение 141  
 Минеральные удобрения 179, 194  
 Молибден 96, 133 Монреальский протокол 245 Мощность дозы 145, **150** Мутация 103  
 —летальная 103  
 Нейтрализация **130** Нитраты 94, 129, 180 Нитриты 94, 180 Нуклеиновые кислоты 101  
 Обессеревание 126  
 Обратная связь отрицательная 22  
 ---- положительная 22  
 Озон тропосферный 123, 129, **160**  
 —стратосферный 78, 128, 160, 163  
 Озоносфера 78, 93, 163  
 Ольха 96  
 Опустынивание 68, 192  
 Органическое топливо 105, 123  
 Осадков годовая норма 49—50  
 —интенсивность **49**  
 Относительный уровень загрязнения 108  
 Пампасы 50, 53, 54 Парабиосферные области 71 Паразитизм 29  
 Парниковые газы 84, **93, 160**  
 Парниковый эффект 84, 93, 159—162, 204, 217 Пассаты 45  
 Пелагиаль 61 Первое начало (закон)  
 термодинамики 79  
 Перегной 187, 195 Передел металлов 185 Перенос глобальный 122, 135  
 —локальный 121  
 —региональный 121  
 Период полураспада 144  
 Пероксиацетилнитрат (PAN) 130  
 Пестициды 136, 158, 179, 181, 193  
 Плутоний 224  
 Пограничный слой атмосферы 48, **119**  
 Пожары лесные 206—208 Полярные пустыни 57 Полярный фронт 46  
 Полярные шапки 162  
 Популяция 11  
 —равновесная 17, 19—22  
 Порог вредного действия 107  
 Постоянная радиоактивного распада 144  
 Почвенные горизонты 187—188  
 Предельно допустимая концентрация (ПДК) 106  
 —рабочей зоны 106  
 —разовая 106  
 —среднесуточная 106, 135  
 Прерии 54  
 Продуктивность экосистем 67—70  
 Продуценты 26, 75 Протерозой 78  
 Профундаль 64 Пустыни 50—53, 57 Пыльные бури 178, **190**  
 Равновесие 121  
 —устойчивое 36—38  
 —неустойчивое 36—38  
 Радиационное выхолаживание 45, 54  
 Радиоактивное излучение 143—145  
 Радиоактивный фон  
 естественный 143—148  
 —космический 148  
 Радон 151  
 Разлив нефтепродуктов 139, **159**  
 Реактор на быстрых нейтронах 217, 224  
 Реактор на тепловых нейтронах 217, 224 Реактор-размножитель 217, 224  
 Редуценты 29, 64, 75  
 Рекреационная нагрузка 56, 209  
 Реземиссия 117 Рождаемость **170—171** Ртуть 108, 133-135  
 Саванна 50, 52, 53 Сапрофаг 29, 187  
 Свинец 108, 134-137 Свободные радикалы 128 Сернистый газ 74, 78, 99, 125—126 Серобактерии 99  
 Сероводород 74, 99, 127 Сжигание угля в кипящем слое 130 Сила Кориолиса 47, **119** Симбиоз 29—30

- Симбионт 11, 96  
 Синезеленые водоросли 65, 75, 96, 201  
 Синергетический эффект 66, 109  
 Система изолированная 9, 79  
 —открытая 9  
 Система «хищник — жертва» 35—36  
 Скорость испарения 50 Смертность 33, 168, 170 Смог 124, 130 Солнечная постоянная 81 Солнечная энергетика 220 Солнечные батареи 220—221  
 Сообщество зрелое 39 Степи 55  
 Сточные воды 138, 139, 197  
 Стратопауза 44 Стратосфера 44, 128, 164 Субарктическая область 56 Сукцессия 39, 188  
 Сульфат-ион 125, 126  
 Сульфатные частицы 126, 127  
 Сухое осаждение 118, 121  
 Тайга 56, 205  
 Тектоника плит 9, 73—74  
 Тепловая смерть 80  
 Тепловое загрязнение 140  
 Термическая стратификация 65  
 Термосфера 44  
 Тетраэтилсвинец 131, 134  
 Токсичность 108  
 Толерантность 15—18, 107  
 Торф 62, 207  
 Трофическая цепочка (цепь) 26, 124, 177, 181, 183  
 Трофическая сеть 26, 124  
 Трофический статус 26 Трофический уровень 26, 30, 40, 124 Тропопауза 44  
 Тропосфера 44, 128 Тропические леса 52, 189—190, 204 Тундра 52, 57  
 Тяжелые металлы 108, 133  
 Устойчивость в малом 36—38  
 —в большом 36—38  
 Уравнение статики атмосферы 43  
 Уран 222  
 Угольная кислота 123  
 Ультрафиолетовое излучение 75, 78, 82, 128, 163  
 Угарный газ 78, 128, 130  
 Феромоны 101, 184  
 Фертильность 173  
 Фитопланктон 60, 71, 201  
 Фитотроф 11 Фитофаг 18, 28, 30 Фосфор литосферный 98  
 Фотосинтез 28, 67, 75, 87  
 Фреоны 160, 164  
 Хеморецептор 100 Хемотроф 28 Хлорофилл 26, 71  
 Хлорфторуглеродороды 160  
 Циклоны 45, 47, 48, 119  
 Циркуляционные ячейки 45  
 Частицы аэрозольные 82, 127, 132, 160  
 Шельф континентальный 61, 213  
 Шумовое загрязнение 140  
 Эволюция 7, 32 Эвтрофикация 65, 99, 180, 192 Экзокринные железы 101 Экологическая ниша 11, 15, 24  
 —потенциальная 12  
 —реальная 12, 15, 24  
 —фундаментальная 12  
 Экосистема 7  
 —водная 60—65  
 Элиминация 12  
 Эмиссия 117, 163  
 —вторичная 117, 122  
 Эндемические заболевания 138, 176  
 Эндокринные железы 101  
 Энергетический баланс 216  
 Энергоёмкость 218  
 Энтропия 80  
 Эпидемические заболевания 176  
 Эрозия ветровая 105, 187, 190, 193  
 —водная 190, 193  
 Этанол 226  
 Ювенильные воды 87  
**ЮНЕП** 244-246  
 Ядерный топливный цикл 154  
 Ядохимикаты 179 Ядра конденсации 127, 131 Ячейки Гадлея 45, 119



## Содержание

Предисловие .....	3
<b>Часть I. ВВЕДЕНИЕ В ЭКОЛОГИЮ .....</b>	<b>6</b>
Глава 1. Основные понятия и законы .....	6
1.1. Предмет экологии .....	6
1.2. Экологическая ниша .....	11
1.3. Популяция в равновесии .....	18
1.4. Динамика популяций .....	23
1.5. Биогеоценоз в равновесии .....	26
1.6. Динамика биогеоценозов и экосистем .....	34
Глава 2. Разнообразие экосистем .....	41
2.1. Атмосферная циркуляция и климатические условия суши .....	41
2.2. Природные экосистемы суши .....	52
2.3. Уникальные свойства воды и водные экосистемы .....	57
2.4. Особенности антропогенных экосистем .....	66
2.5. Продуктивность экосистем .....	67
Глава 3. Биосфера .....	71
3.1. Предыстория .....	71
3.2. Потоки энергии в биосфере .....	79
3.3. Вода, кислород и углерод в биосфере .....	86
3.4. Азот в биосфере .....	94
3.5. Фосфор и сера в биосфере .....	97
3.6. Потоки информации в биосфере .....	100
<b>Часть II. ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ .....</b>	<b>104</b>
Глава 4. Загрязнение окружающей среды и проблема отходов .....	104
4.1. Основные типы загрязняющих веществ и их характеристики .....	104
4.2. Распространение загрязняющих веществ и рациональное размещение производства .....	117

4.3. Кислотное загрязнение, тропосферный озон и связанные с ними загрязняющие вещества .....	122
4.4. Пыль, тяжёлые металлы и ядовитые химические соединения .....	131
4.5. Биологическое и физическое разрушение и загрязнение природной среды .....	137
4.6. Радиация, радиоактивное загрязнение и атомная энергетика .....	<b>142</b>
4.7. Аварии как источники загрязнения .....	157
4.8. Глобальные проблемы: рост парникового эффекта и разрушение озонового слоя .....	159
Глава 5. Население и ресурсы Земли. Методы рационального природопользования .....	167
5.1. Народонаселение Земли .....	167
5.2. Продовольственная проблема и зелёные революции . . .	175
5.3. Природные ресурсы. Общая характеристика. Минеральные ресурсы .....	184
5.4. Почва .....	187
5.5. Водные ресурсы .....	195
5.6. Леса .....	203
5.7. Пастбища .....	208
5.8. Ресурсы дикой природы. Охраняемые природные территории — заповедники и национальные парки . . . .	209
5.9. Ресурсы океана .....	212
5.10. Энергетические ресурсы. Реальна ли угроза энергетического голода? .....	215
Глава 6. На пути к устойчивому развитию .....	227
6.1. Особенности взаимодействия природы и общества в эпоху научно-технической революции. Концепция устойчивого развития .....	227
6.2. Мониторинг состояния природной среды и экологическое прогнозирование .....	233
6.3. Экологическое регулирование и экологическое право. Социальные проблемы природопользования и концепция сбалансированного риска .....	238
6.4. Международное сотрудничество и мировоззрение устойчивого развития .....	244
Список литературы .....	248
Предметный указатель .....	250

Гальперин Михаил Владимирович  
Экологические основы природопользования

Учебник

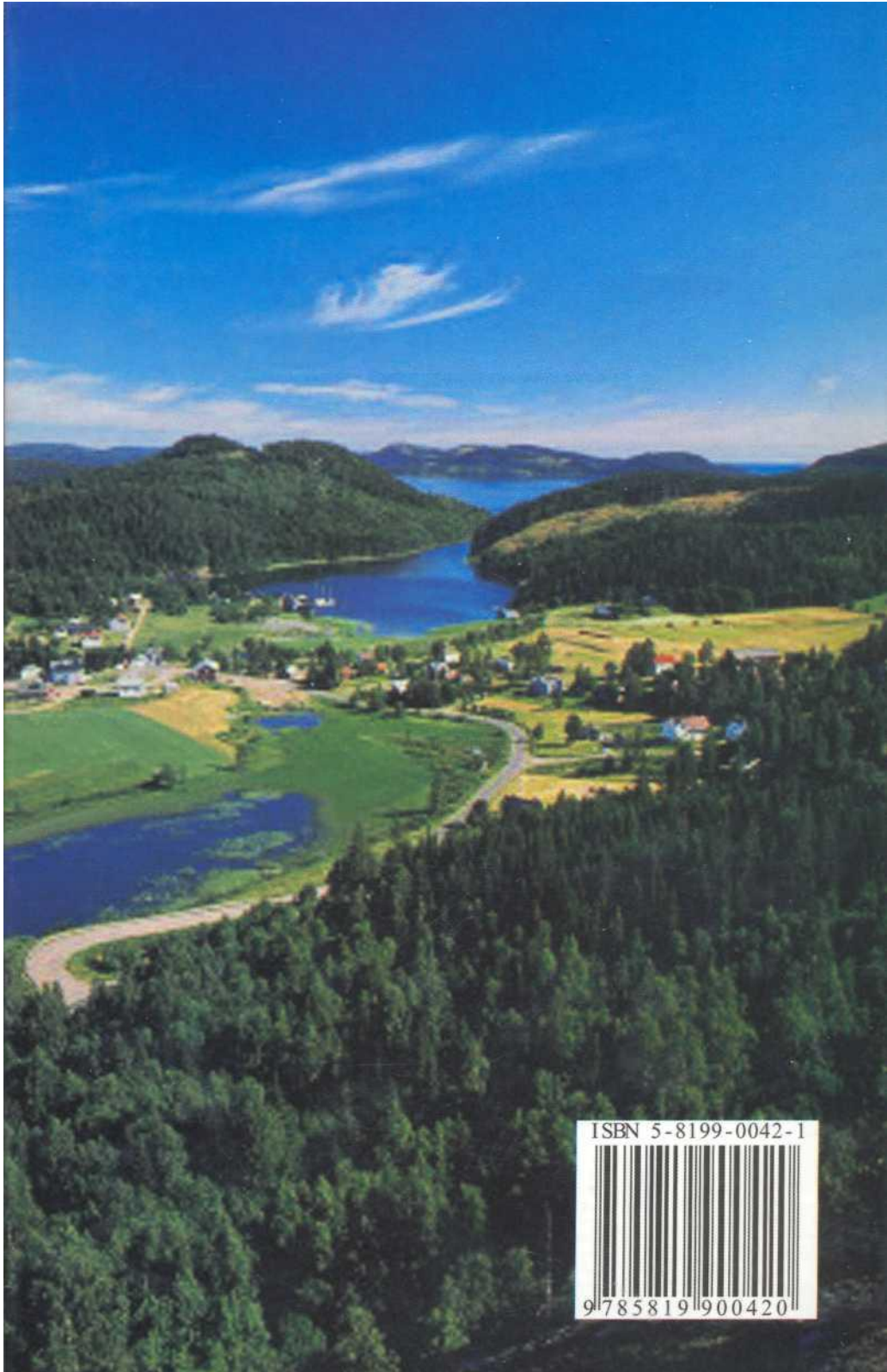
Редактор *Т. Г. Лапердина*  
Корректор *С. И. Зубкова*  
Компьютерная верстка *И. В. Кондратьевой*  
Оформление серии *Б. А. Гомона*

Сдано в набор 17.03.2002. Подписано в печать 28.06.2002. Формат 60x90/16.  
Гарнитура «Тайме». Усл. печ. л. 16. Уч.-изд. л. 15,75. Печать офсетная.  
Бумага типографская № 2. Тираж 10 000 экз. (2-й завод — 6001 — 10 000 экз.).  
Заказ № 7841.

ЛР№ 071629 от 20.04.98  
Издательский Дом «ФОРУМ»  
101831, Москва — Центр, Колпачный пер., д. 9а  
Тел./факс: (095) 925-32-07, 925-39-27  
E-mail: forum-books@mail.ru

ЛР№ 070824 от 21.01.93  
Издательский Дом «ИНФРА-М»  
127214, Москва, Дмитровское ш., 107  
Тел.: (095) 485-70-18; 485-74-00  
Факс: (095) 485-53-18. Робофакс: (095) 485-54-44  
E-mail: books@infra-ml.ru  
Http://www.infra-m.ru

Отпечатано в полном соответствии с качеством  
предоставленных диапозитивов в Тульской типографии.  
300600, г. Тула, пр. Ленина, 109.



ISBN 5-8199-0042-1



9 785819 900420