



Председатель

Л.А. ПУЧКОВ

Зам. председателя

Л.Х. ГИТИС

Члены редколлегии

И.В. ДЕМЕНТЬЕВ

А.П. ДМИТРИЕВ

Б.А. КАРТОЗИЯ

В.В. КУРЕХИН

М.В. КУРЛЕНЯ

В.И. ОСИПОВ

Э.М. СОКОЛОВ

К.Н. ТРУБЕЦКОЙ

В.В. ХРОНИН

В.А. ЧАНТУРИЯ

Е.И. ШЕМЯКИН

**ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

*ректор МГГУ,
чл.-корр. РАН*

*директор
Издательства МГГУ*

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАЕН

академик РАН

академик РАН

академик МАН ВШ

академик РАН

профессор

академик РАН

академик РАН

ВЫСШЕЕ ГОРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

**Л.А. Пучков
А.Е. Воробьев**

**ЧЕЛОВЕК
И БИОСТЕРА:
ВХОЖДЕНИЕ
В ТЕХНО
СТЕРУ**

*Рекомендовано Министерством
образования Российской Феде-
рации в качестве учебника для
студентов высших учебных за-
ведений, обучающихся по нап-
равлению «Горное дело»*



**МОСКВА
ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКОВСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО
УНИВЕРСИТЕТА
2 0 0 0**

ПРЕДИСЛОВИЕ

На рубеже тысячелетий классическая наука подошла к определенной границе своих методологических возможностей в объяснении многих процессов окружающего мира.

Одновременно исчезла иллюзия единства человека с Природой, так как нарушился естественный ход эволюции биосферы. ЧЕЛОВЕК на нашей планете стал выступать как одна из самых значительных сил, преобразующих биосферу.

Осознанное (целенаправленное) преобразование возможно лишь на основе концепции развития человечества в биосфере. Стокгольмская конференция ООН по защите окружающей среды, а также Всемирный экологический форум РИО-92 определили стратегию коэволюции человеческого общества и биосферы в современных условиях, наметили пути выхода из экологического кризиса.

Эти решения, а также имеющиеся в настоящее время знания необходимо не только всесторонне развить, но и передать студентам высших учебных заведений.

В результате появилась целесообразность в издании учебника, объединяющего достижения в познаниях о ноосфере, теории эволюции, а также в процессах самоорганизации (синергетики), происходящих в биосфере.

Сегодня горному инженеру уже недостаточно владеть сведениями только об эффективных технологиях получения полезных ископаемых из недр Земли и инженерных методах защиты окружающей среды от негативного воздействия горнопромышленного комплекса.

Человечество стало одной из главных сил, преобразующих биосферу Земли, вследствие этого необходимы знания, позволяющие дать прогнозную оценку происходящим изменениям в среде нашего обитания.

Поэтому для обучения студентов весьма актуально привлечение результатов фундаментальных исследований Российской академии наук, полученных академиками В.И. Вернадским (о биосфере), А.Е. Ферсманом (о техногенезе), Н.П. Лавровым (о радиогеоэкологии), К.Н. Трубецким (о ресурсо-воспроизводстве) и проф. А.И. Перельманом (о геохимии ландшафта).

ВВЕДЕНИЕ

Наша планета существует уже 4,5 млрд. лет. За этот огромный интервал времени на ее поверхности постоянно протекали сложные физико-химические процессы, возникла жизнь, сформировалась кислородсодержащая атмосфера и развились высокоорганизованные животные и растения.

Эти изменения происходили очень медленно, растягиваясь на сотни миллионов лет, что обеспечивало возникновение процессов самоорганизации.

И только с появлением человечества на фоне постепенной эволюции развития жизни биосфера стала претерпевать резкие и зачастую негативные изменения.

По различным прогнозам, к середине XXI века объем мирового производства может возрасти примерно в 5 раз, в результате современные технологии выбросами загрязняющих веществ могут уничтожить человечество и биосферу Земли.

Сегодня на каждого жителя нашей планеты уже приходится около 400 т ежегодно перемещаемой горной породы и 2 м² нарушаемой земной поверхности. Общая масса извлекаемого и перерабатываемого человечеством минерального сырья составляет около 100 Гт/год, что лишь в 10 раз меньше массы синтезируемого биотой органического вещества (~1000 Гт/год в живом весе) и во столько же раз превосходит объем вещества, поступающего на дневную поверхность в результате вулканической деятельности.

В связи с таким резким и непрерывным увеличением объема различных выбросов из антропогенных источников весьма актуальной стала проблема охраны окружающей среды уже на планетарном уровне. Необходимо также определение устойчивой и оптимальной формы взаимодействия человеческого общества с природой, представляющей собой инерционный саморегулирующий механизм, который направлен на сохранение, поддержание и повышение продуктивности и разнообразия биосферы.

Следовательно, знание основ современного учения о взаимосвязи человека с биосферой необходимо главным образом для правильного решения возникших в последнее время острых экологических задач.

Как известно, имеются различные аспекты учения о биосфере Земли. Для студентов горных специальностей основное значение имеют геохимические принципы этого учения, разработанные выдающимся ученым XX века В.И. Вернадским и его многочисленными учениками и последователями. В частности, важным представляются особенности поведения химических элементов (рассеяние или концентрирование) в окружающих ландшафтах, возникающие при антропогенной деятельности, их взаимосвязь с живыми организмами, а также эволюция биосферы (в том числе регулируемая) под влиянием антропогенной деятельности.

Такой подход предполагает рассмотрение Человека в русле всего протекающего на Земле эволюционного процесса, определение его биосферной функции и научно обоснованного прогноза будущего развития, опирающегося на ретроспективную базу — уже пройденный Природой путь. Тем самым определяются благоприятные возможности эволюционного процесса — по пути роста устойчивости биосферы.

Глава 1

ОСНОВЫ ОБЩЕГО УЧЕНИЯ О БИОСФЕРЕ

1.1. Современное понятие
биосферы

1.2. Основные функции
биосферы

План лекции

Контрольные вопросы-
задания

1.1

Современное понятие биосферы

Согласно гипотезе академика А.И. Опарина (выдвинутой в 1921 г.) жизнь возникла в определенный момент эволюции Земли как планеты.

Это был период, когда в насыщенной водяными парами атмосфере находились кислородные производные углеводов, аммиак, цианистые и другие органические соединения, обладающие значительной свободной энергией и способные к сложным химическим превращениям.

Их появление было возможно лишь при весьма высоких температурах, радиации, усиленном ультрафиолетовом излучении.

По мере охлаждения Земли и при понижении температуры ее верхних слоев до 100 °С из атмосферы на земную поверхность устремились горячие ливни, образовавшие кипящий океан.

Вместе с водой в океан попадали и органические вещества, обусловившие после концентрации процесс взаимного присоединения, приводивший к появлению все более крупных и сложных частиц.

В результате (после того как подобные превращения длились многие тысячи лет) в первичной водной оболочке Земли возникли коллоидные растворы, из которых образовались сгустки студенистых органических веществ.

Эти сгустки геля в какой-то степени и представляли собой первичные протоорганизмы сложной структуры, способные к поглощению веществ из внешней среды.

Имеющиеся данные геологического изучения пород литосферы свидетельствуют о непрерывном воздействии на них окислительно-восстановительных реакций со стороны живого вещества. Это обстоятельство приводит к *космической гипотезе* привнесения жизни на Землю, так как возникла сразу вся совокупность организмов, выполняющих различные биогеохимические функции. Или же жизнь, начавшись с одной простейшей формы, так быстро раздробилась на разновидности, имеющие разные геохимические функции, что этот период при всем своем своеобразии не оставил никаких следов в земной коре.

В процессе длительной и сложной эволюции, обусловившей совершенствование физико-химической структуры гелей, примерно 3,8—3,5 млрд. лет назад из сгустков образовались уже простейшие (с одним типом клетки) настоящие первичные организмы (получившие название *прокариоты*) со всеми присущими живому веществу функциями (размножением, восприятием и преобразованием окружающей среды преимущественно на основе окислительно-восстановительных процессов и т.д.). Затем впервые появились предъядерные формы — *уркариоты* (примерно 3,2—3 млрд. лет назад).

Наиболее важен рубеж 2,1—1,9 млрд. лет назад, когда сине-зеленые водоросли начали фиксировать азот и связывать его с углеродом, что высвободило кислород. В результате среда стала меняться с восстановительной на окислительную, но концентрация кислорода свыше 1 % оказалась ядовитой для прокариот, что было отмечено в истории Земли длительным периодом угленакопления [43].

Высокое содержание кислорода в оксанических водах привело к появлению *эукариот*, имеющих в цитоплазме ядро с набором хромосом и, следовательно, минимум уже два типа клеток. Использование ими кислорода усилило процесс разложения глюкозы, образующейся в процессе фотосинтеза, в 20 раз. С возникновением эукариот завершился период биохимической специализации организмов и началась их внутриклеточная эволюция.

История развития жизни имеет своего рода качественный скачок, связанный с особым классом силикатных минералов — цеолитов, включающих в свою структурную решет-

ку гидроксильную группу ОН [43]. Для цеолитов характерна наибольшая сложность структурной организации, которая по уровню сложности приближается к полимерам органического происхождения. В рамках теории биогенеза это послужило основанием для «матричной» гипотезы развития биополимерных молекул на природных кристаллах.

Если учесть, что *основной признак жизни* - самовоспроизведение и самообновление белковых тел, в основе которых лежит саморепликация (т.е. удвоение молекулы ДНК под действием ряда белков-ферментов с передачей рождающейся клетке генетической информации), а также свойство хиральности живой среды (например, белки содержат только «левые» аминокислоты), то становится очевидной важность роли цеолитов и магнитного поля в развитии форм жизни. Так, на глинах, возможно, происходил синтез полипептидов, а на базальтах — полинуклеотидов, т.е. минералогический код управлял синтезом органических соединений.

В настоящее время установлено, что все живое вещество обладает свойством дисимметрии, благодаря которому во всех связанных с жизнью проявлениях существуют только оптические оси симметрии, в которых нарушено равенство правых и левых сторон. Этой особенностью живое вещество отличается от вещества неорганического, с осями простой симметрии. Как в строении слагающего вещества, так и в физиологических проявлениях живые организмы обладают резко выраженной дисимметрией с преобладанием правых явлений. Правый характер дисимметрии живых организмов выражается рядом явлений, начиная с правого вращения плоскости поляризации при прохождении луча света через биологические объекты и кончая усваиванием организмами правых антиподов кристаллических веществ и инертным отношением к левым антиподам.

Это явление частично подтверждает космическую гипотезу распространения жизни, так как в соответствии с принципом Кюри дисимметрия может возникнуть только под влиянием процессов, обладающих такой же дисимметрией. Другими словами, абиогенез мог произойти только в дисимметричной правой среде. Поскольку все неорганические процес-

сы и образования на Земле обладают обычной симметрией, дисимметричные процессы, послужившие причиной появления жизни, следует искать на соответствующих планетах Вселенной (вероятно, среди туманностей спиральной формы).

На Земле такие условия могли быть связаны прежде всего с космическими объектами, попадавшими на ее поверхность. По химическому составу астероиды значительно отличаются от среднего состава Земли и способны приводить к образованию аномалий в ее теле. Возможно, что при падении крупного астероида могли создаться условия, необходимые для зарождения жизни.

В период возникновения первых живых организмов земная атмосфера почти не содержала молекулярного кислорода и, следовательно, была лишена верхнего озонового слоя.

Сильное коротковолновое ультрафиолетовое излучение беспрепятственно достигало земной поверхности, поэтому дальнейшее развитие жизни было возможным лишь в существовавших тогда небольших и насыщенных минеральными солями водоемах глубиной 10—100 м. Тем более что 10 основных химических элементов, встречающихся в организме человека и у 99 % животных, совпадают с химическим составом морской воды (если фосфор заменить магнием).

По относительному содержанию неорганических ионов кровь человека (как и других позвоночных животных) также аналогична морской воде (табл. 1.1).

Поэтому первые этапы развития жизни (до ее выхода на сушу) должны были коррелировать с характеристиками водной среды и прежде всего с вариациями содержаний в морской воде таких химических элементов, как Mo, Zn, Fe.

Эти элементы необходимы для всех организмов (включая и бактерии, например клостридии, которые в наибольшей степени приближены к первым земным существам).

При этом следует учесть, что молибден участвует в обмене веществ между клетками и окружающей средой, железо — в переносе электронов и энергетическом обмене, цинк — в метаболизме макромолекул и, следовательно, в передаче информации.

Таблица 1.1

Сравнение химического состава крови человека и вод Мирового океана

| Химический элемент | Процент от суммы растворенных солей | |
|--------------------|-------------------------------------|----------------|
| | в крови человека | в морской воде |
| Хлор | 49,3 | 55,0 |
| Натрий | 30,0 | 30,0 |
| Кислород | 9,9 | 5,6 |
| Калий | 1,8 | 1,1 |
| Кальций | 0,8 | 1,2 |

Установлено, что элементы с переходной валентностью (Mo, Fe, Zn, Mn, Co, Cu) ускоряли ход эволюции, создавая и развивая многомолекулярные мультикаталические (многоферментные) системы [43]. Причем вариации содержаний этих элементов определялись в основном тектоническими и магматическими событиями на Земле.

Следующий качественный скачок эволюции связан с возникновением многоклеточности. Он протекал примерно 0,9 млрд. лет назад и характеризовался максимумами концентрации большинства химических элементов, необходимых живым организмам в оксанических водах. Появление первых *офиолитов* произошло около 1 млрд. лет назад и было обусловлено активными крупномасштабными горизонтальными перемещениями литосферы и развитой мантийной конвекцией.

Многоклеточность явилась началом новых принципов адаптации организмов к окружающей среде. Самым важным событием для биоты было возникновение около миллиарда лет назад *нервной клетки*, открывшей очередной этап в эволюции живого мира — путь к созданию системы управления многофункциональными организмами.

В любом случае — после привнесения или самозарождения — жизнь стала иметь разнообразные формы и последовательно освоила практически всю поверхность нашей планеты. Это обстоятельство позволило академику В.И. Вернадскому (1863—1945 гг.) объединить в своих построениях планетарную совокупность живых организмов как *единое живое вещество*.

Сегодня для полноценной характеристики живого вещества необходимо использовать следующие показатели:

химический состав;
средний вес организмов;
среднюю скорость заселения ими земной поверхности.

С планетарных позиций классификацию живого вещества (в отличие от биологии или других наук) необходимо осуществлять на геохимической основе, т.е. по химическому составу и особенностям преобразования окружающей среды, а также по типу потребляемых веществ.

Автотрофными (от греч. *afit* — сам и *trof* — питание) называются все организмы, берущие нужные им для существования химические элементы из окружающей косной материи и не требующие для построения своего тела готовых органических соединений другого организма.

Гетеротрофными (от греч. *geter* — разный) называют организмы, нуждающиеся для своего существования в органическом веществе, образованном другими организмами, а **миксотрофными** (от греч. *miks* — смешивать) — организмы, имеющие смешанный тип питания. Среди гетеротрофов выделяют две категории организмов: питающиеся живым органическим веществом — **биотрофы** и использующие отмершие органические остатки — **сапротрофы** (от греч. *saprot* — гниль). В существующих сейчас наземных экосистемах вес живого вещества гетеротрофов в тысячи раз меньше веса автотрофов. В результате этого биотрофы не справляются со своей кормовой базой, и большая часть продукции живого вещества отмирает естественным образом. Отмершую органику и продукты метаболизма потребляют разнообразные сапротрофы, полностью расщепляющие эти вещества до простых минеральных соединений — углекислого газа, воды, азота и солей.

Сапротрофы не только предохраняют среду от самоотравления (многие продукты распада отмершего органического вещества чрезвычайно ядовиты), но и, расщепляя органику, возвращают углерод и азот в минеральную форму (только в этом виде они могут потребляться автотрофами). Характерно, что если биотрофы для нормального своего развития нуждаются в смешанной пище, состоящей из разнообразных веществ (белков, жиров, сахаров или крахмала), то сапротрофные бактерии при наличии азота и зольных элементов могут

обходиться каким-нибудь одним органическим веществом (например, белком или сахаром).

Зеленые растения, использующие солнечный свет в качестве источника энергии, называют *фотосинтезаторами* (от греч. *phos* — свет). После открытия русским микробиологом С.В. Виноградским (1856—1953 гг.) способности некоторых видов бактерий создавать живое вещество за счет энергии нитрификации (окисления аммиака до азотной кислоты) в качестве отдельной группы организмов выделили *хемосинтезаторы*. Впоследствии были выявлены бактерии, способные получать энергию в результате окисления и других элементов — водорода, серы, железа или сурьмы.

Живое вещество Земли имеет ряд специфических (присущих только ему) свойств [24]:

1. Живое вещество нашей планеты характеризуется огромной свободной энергией. В неорганическом мире по количеству свободной энергии с живым веществом могут быть сопоставимы только незастывшие лавовые потоки.

2. Резкое различие между живыми и неживыми объектами наблюдается в скорости протекания химических реакций: в живом веществе реакции идут в тысячи, а иногда и в миллионы раз быстрее. Для жизненных процессов характерно, что получение небольших масс или порций энергии вызывает передачу и переработку значительно больших энергий и масс. Так, вес насекомых, поедаемых синицей за один день, равен ее собственному весу, а некоторые гусеницы потребляют и перерабатывают за сутки в 200 раз больше пищи, чем весят сами.

3. Отличительной особенностью живого вещества является и то, что слагающие его индивидуальные химические соединения (белки, ферменты и т.д.) устойчивы только в живых организмах (в значительной мере это характерно и для минеральных соединений, входящих в состав живого вещества).

4. Живое вещество стремится заполнить собой все возможное пространство. Свойство максимальной пространственной экспансии присуще живому веществу так же, как теплоте переходить от нагретых тел к менее нагретым, диффузии химических соединений и ионов в растворе, а газу — рассиваться в атмосфере.

5. Живое вещество обнаруживает значительно большее морфологическое и химическое разнообразие, чем неживое. Различия между вирусом и млекопитающим намного больше, чем между любыми самыми контрастными представителями неживого вещества. Химический состав живого вещества поразительно разнообразен: известно свыше 2 миллионов органических соединений, входящих в его состав. В то же время количество природных минералов составляет всего около 2 тысяч, т.е. на 3 порядка меньше.

6. Живое вещество на Земле представлено в виде дисперсных тел — индивидуальных организмов. Их размеры колеблются в пределах от 20 нм (у наиболее мелких вирусов) до 100 м (палеоящеры), т.е. диапазон более 10^9 . По мнению В.И. Вернадского, минимальные и максимальные размеры живых организмов определяются предельными возможностями их газового обмена со средой обитания.

7. Будучи дисперсным, живое вещество никогда не находится на Земле в морфологически чистой форме (в виде популяций одного вида): оно всегда представлено *биоценозами*, т.е. сообществом взаимосвязанных организмов, живущих на каком-либо участке суши или водоема.

8. Одно из главных отличий живого вещества от неорганического мира — это способ использования энергии. Живые организмы способны улавливать солнечную энергию, удерживать ее в виде энергии сложных органических соединений (биомассы), передавать друг другу, трансформировать в механическую, электрическую, тепловую и др. Таким образом, живое вещество собирает полученную им в форме солнечного света энергию и превращает ее в свободную энергию, способную совершать работу.

9. Решающее отличие живого вещества от косного заключается в следующем:

- в ходе геологического времени возрастают мощь живого вещества и его воздействие на косное вещество биосферы;
- только в живом веществе происходят качественные изменения организмов в ходе геологического времени, нашедшие объяснения в теории Ч. Дарвина происхождения видов путем естественного отбора;

- живые организмы изменяются в зависимости от трансформации окружающей среды, адаптируются к ней, что вследствие постепенного накопления изменений служит источником эволюции.

10. Особенностью живого вещества также является то, что количество массы живого вещества, соответствующее данному моменту, не дает представления о его работе в течение всего времени существования организмов. По существу, масса биогенного вещества Земли — это интеграл массы всех существовавших в разное время живых организмов, в то время как в геологической истории масса неживого абиогенного вещества земного происхождения остается примерно постоянной.

В итоге за время своего существования живое вещество Земли покрыло практически всю ее поверхность, сформировав особую сферу. Биосфера (от греч. *bios* — жизнь и *sphaira* — шар) — это оболочка Земли, в которой развивается и функционирует жизнь, а процессы обмена веществ и энергии происходят главным образом за счет жизнедеятельности организмов, и включающая живые организмы, биогенное (уголь, нефть, известняки и др.), косное (в его образовании живое не участвует) и биокосное (система совместного функционирования косных тел и живых организмов, например почвы, леса, поверхностные воды или океан в целом) вещество, а также вещество космического происхождения. Масса биосферы (включающая все органическое вещество биогенного происхождения и косного вещества других сфер, занятых биосферой) оценивается величиной $(2,5—3)10^{24}$ г, а масса живого вещества — около 0,0001 % от этого показателя [42].

Биосфера охватывает верхние слои литосферы (в нефтяных водах микроорганизмы были найдены на глубинах 5—6 км), водную оболочку до глубины 12 км и нижний слой атмосферы высотой до 15 км. Распространение жизни в литосфере ограничивается прежде всего температурой вмещающих горных пород, которая возрастает с глубиной и на уровне 15 км превышает 100 °С. Верхняя граница жизни в атмосфере определяется нарастанием с высотой ультрафиолетовой радиации Солнца.

Понятие о биосфере менялось во времени. Элементы современной концепции биосферы содержались уже в трудах французского натуралиста Ж.Б. Ламарка (1744—1829 гг.). В 1875 г. известный австрийский геолог Э. Зюсс (1831—1914 гг.) наряду с атмосферой, гидросферой и литосферой выделил в качестве самостоятельной оболочки Земли биосферу (или сферу жизни). Но наибольший вклад в науку о биосфере внес выдающийся отечественный ученый-естествоиспытатель В.И. Вернадский. Он представил биосферу не как простую совокупность живых организмов, а как единую термодинамическую оболочку (пространство), в которой сосредоточена жизнь и осуществляется постоянное взаимодействие всего живого с неорганическим миром.

В 1926 г. В.И. Вернадским была опубликована основополагающая книга «Биосфера», где рассматривались закономерности функционирования биосферы как цельной системы с определяющей ролью живого вещества. В ней было зафиксировано, что живое вещество не просто пронизывает верхнюю часть твердой, всю жидкую и низы газообразной оболочек Земли (что констатировали еще его предшественники), но и выступает как сила, регулирующая планетарные потоки вещества и энергии и связывающая между собой все три земные оболочки в единую систему. Так, кислородная атмосфера, примерное постоянство химизма вод суши и океана, наличие в составе литосферы материковых поднятий с их гранитным слоем — это интегральное выражение работы планетарной *биоты* (т.е. совокупности организмов, обитающих на данной территории) и процессов в неорганической природе Земли. Другими словами, жизнь является ведущим фактором преобразования нашей планеты.

1.2 Основные функции биосферы

В связи с тем что жизнь опосредует все другие планетарные процессы, необходимо уяснить, чем же живые организмы отличаются от остальных природных тел и почему об-

ласть, занятую жизнью, выделяют в особую оболочку — биосферу?

Особенность живых объектов заключается не только в ускорении химических реакций, но и в том, что некоторые реакции при нормальных температурах и давлениях вне организмов вообще не происходят. Так, жиры и углеводы окисляются в организме при температуре около 37°C , а вне его для их окисления уже требуется нагревание до $450\text{--}500^{\circ}\text{C}$ [24]. Подобное снижение температуры окисления обеспечивается наличием в организмах особых катализаторов (ферментов), ускоряющих протекание химических процессов.

В целом взаимодействие живых и неживых компонентов определяется биогеохимическими функциями биосферы (табл. 1.2).

Таблица 1.2

Биогеохимические функции живого вещества в биосфере

| Функция | Характеристика происходящих процессов |
|------------------|--|
| Энергетическая | Поглощение солнечной энергии при фотосинтезе, а химической энергии — путем преобразования активных веществ |
| Деструктивная | Разложение вещества, минерализация органических соединений, вовлечение химических элементов в биогеохимический круговорот атомов |
| Концентрационная | Избирательное накопление в ходе жизнедеятельности определенных химических элементов |
| Транспортная | Перенос вещества против силы тяжести и в горизонтальном направлении |
| Средообразующая | Преобразование физико-химических параметров среды |
| Биохимическая | Размножение и рост живых организмов |

Основой энергетической функции являются окислительно-восстановительные реакции живого вещества, играющие важную роль в истории многих элементов с переменной валентностью (азота, меди, селена, урана, кобальта, ванадия, молибдена и др.), которые при ее изменении резко меняют свое поведение в биосфере.

Исключительно важна концентрационная функция живых организмов, обеспечиваемая накоплением организмами в своих телах многих химических элементов. Концентрация хи-

мических элементов живым веществом может проявляться в двух принципиально различных формах:

- в виде морфологически оформленных минеральных образований;
- в виде органоминеральных соединений.

Наиболее наглядным примером концентрации элементов служат каменные и бурые угли, а также торф, образовавшиеся из остатков растений и являющиеся накопителями углерода. Так, в углях по сравнению со средним в земной коре ($2,3 \cdot 10^{-2} \%$) содержание углерода повышено в 1000 раз. Концентрационная функция живого вещества проявляется и в накоплении в биосфере кальция (например, из карбонатов и известняков сложены целые горные хребты и т.д.).

Содержание урана в гуано океанского побережья Перу в 10 тысяч раз превышает его концентрацию в морской воде [24]. Известны живые организмы (диатомовые водоросли, кремнистые губки и другие) — концентраторы кремния, деятельности которых обязаны отложения этого элемента.

Акантарии строят скелет своего организма из весьма дефицитного элемента в морской воде — стронция. Еще более редкий в морской среде элемент — ванадий — входит (до 15 %) в состав крови асцидий. В Новой Зеландии обнаружен кустарник, высушенные листья которого содержат до 1 % никеля.

Концентраторами йода служат морские водоросли; фосфора — позвоночные животные; железа, марганца и серы — особые бактерии. Причем физиологические особенности растений, в частности водорослей, позволяют концентрировать химические элементы при их весьма низких концентрациях (менее 10 мг/л). Для бактерий предельные концентрации химических элементов еще ниже. Особое влияние на геохимию элементов оказывают микроорганизмы с разным видом воздействия на различные соединения. Так, если бактерии рода *Thiobacillus* окисляют сульфиды разнообразных металлов, переводя их в растворимое состояние, то бактерии рода *Ferrobacillus* способны переводить, например, ионы Fe^{2+} в осаждаемые ионы Fe^{3+} [20].

Транспортная функция обуславливает перемещение химических элементов на суше снизу вверх и из океана — на континенты. Например, только питание наземных организмов морской пищей компенсирует (возвращает) на сушу соизмеримую часть тех масс химических элементов, которые реки уносят в море.

Средообразующая функция биосферы заключается в преобразовании физико-химических параметров среды в результате жизнедеятельности живых организмов. Другими словами, вследствие процессов фото- и хемосинтеза происходит воздействие организмов на среду. Это объясняется тем, что при жизнедеятельности растений выделяются сильный окислитель — кислород и сильный восстановитель — органические вещества.

Кроме этого, живые организмы, вследствие превращения атомов и молекул в положительно и отрицательно заряженные ионы, изменяют величину *ионизации* атмо- и гидросферы (степень которой определяется отношением общего числа ионов к числу нейтральных частиц). Ионизация происходит по многим причинам (поглощение электромагнитного излучения — *фотоионизация*, нагревание тела — *термическая ионизация*, воздействие электрического поля и другие факторы), в том числе и под влиянием растительности, повышающей концентрацию полезных для организма человека легких ионов. Например, в лесном воздухе степень ионизации кислорода обычно в 2—3 раза выше, чем над морем, в 5—10 раз выше, чем над лугом, и примерно в 150 раз выше, чем в воздухе жилых помещений. Наивысшей ионизирующей способностью обладают акация белая, дуб черешчатый и красный, ель обыкновенная, лиственница сибирская, сосна обыкновенная, можжевельник и ряд других растений. Однако некоторые растения снижают количество легких ионов и повышают число тяжелых: тис ягодный, табак душистый, черемуха, гвоздика садовая, шалфей блестящий, магнолия, мимоза, аралия и эвкалипт.

Живое вещество оказывает определяющее влияние на состав атмосферы и природных вод Земли главным образом путем выделения во внешнюю среду биогенного вещества.

Так, кислая реакция вод чаще всего связана с растворением в них углекислого газа или гуминовых кислот. Процесс фотосинтеза в поверхностных частях водоемов вызывает уменьшение содержания углекислого газа и увеличение рН.

При «цветении» пресноводных бассейнов рН воды повышается водорослями и цианобактериями до значений 9—10 и более. Процессы разложения органики происходят во всей водяной толще, а это приводит к противоположным результатам — увеличению содержания углекислого газа в воде и к понижению рН (гниющие водоросли могут понизить рН морской воды до значения 6,4).

В донных осадках водоемов физико-химические условия среды определяются главным образом наличием органического вещества: при его присутствии — обстановка восстановительная, в отсутствии — окислительная. Восстановительная обстановка создается в застойных условиях при разложении отмершей органики сульфатвосстанавливающими бактериями с образованием сероводорода. Этот процесс протекает везде, где есть влага, сульфат-ионы (SO_4^{2-}) и скапливается органическое вещество.

Причем организмы создают в процессе своей жизнедеятельности неоднородность (механическую или химическую) среды своего обитания. Например, животные, строя свои норы в грунте, сильно изменяют его свойства. Так, благодаря рытлению почвы дождевыми червями объем воздуха в ней увеличивается в 2,5 раза. Изменяют механические свойства почвы и корни высших растений (особенно древесных): они ее скрепляют и предохраняют от эрозии. В результате смыв почвы в лесах происходит в 6 раз менее интенсивно, чем в степях. Аналогичным же образом действуют грибы и нитчатые цианобактерии: они создают подобие сети, предохраняющей почву от эрозии. Так, в горных породах Таджикистана в 1 г почвы содержится иногда свыше 100 м нитчатых цианобактерий.

Из всех представителей живого вещества Земли наиболее значимыми по своему средообразующему влиянию на биосферу являются микроорганизмы. Многие из них способны активно изменять внешнюю среду в соответствии со своими жизненными потребностями. Например, в чрезмерно кислой

для микроорганизмов среде они вместо кислых выделяют нейтральные продукты, а в щелочной — усиленно образуют кислоты [24]. При этом важную роль играют сульфатвосстанавливающие и тионовые бактерии: первые превращают сульфат-ион в сероводород, а вторые осуществляют обратную реакцию — окисляют сероводород до серной кислоты (известно, что если сероводород не удаляется из среды, то происходит ее самоотравление).

Многие газы порождены жизнью. Например, продуктом фотосинтеза зеленых растений является свободный кислород атмосферы, а продуктом дыхания всех организмов — углекислый газ.

К биохимической функции относятся такие явления, как рост, размножение и перемещение живых организмов, имеющие важное геологическое значение, так как приводят к быстрому распространению живых организмов — «давлению жизни».

Доказав, что биосфера является глобальной экосистемой, В.И. Вернадский в работе «Биосфера в Космосе» сформулировал *главный закон развития биосферы и человека*: «Жизнь не является... внешним случайным явлением на земной поверхности. Она теснейшим образом связана со строением земной коры, входит в ее механизм и в этом механизме исполняет величайшей важности функции, без которых он не мог бы существовать». Из этого закона следует, что планетарной биоте принадлежит центральное место в глобальной экосистеме и что живое вещество не рядовой компонент природной среды, а выступает в ней в роли надкомпонента, по состоянию которого следует судить о биосфере в целом.

Из закона вытекает также и то, что биоту Земли нельзя рассматривать лишь как структуру, возобновляющую экологические ресурсы. Способность живого вещества оказывать преобразующее действие на окружающую среду и определенным образом организовывать ее свидетельствует о его обладании *функциями управления*. Их стихийное или же сознательное нарушение человеком, которое зачастую оправдывается целью построения «второй природы», одинаково губительно для биосферы.

Таким образом, В.И. Вернадский открыл биогенно-геодинамическую природу системы «атмосфера — гидросфера — литосфера» и ее центрального блока — биосферы. Он установил уникальную роль живого вещества в действии механизма трех внешних геосфер — механизма супергеосферы, в которой находится наш мир.

В результате осуществления этих функций биосфера обладает свойством саморегуляции, позволяющим по некоторым показателям и особенностям оставаться постоянной даже на весьма длительных промежутках времени. В основном эта особенность связана со средним химическим составом и массой живого вещества биосферы, так как живая часть неизменно составляет определенную долю массы всей биосферы. Только при этом условии на протяжении длительных периодов существования биосферы не нарушается постоянство химических процессов приповерхностной части литосферы, в которой выражается химическое действие жизни. Следовательно, с момента образования биосферы жизнь уже должна состоять из многочисленных и разнообразных форм, имеющих различные функции.

Биогеохимические функции можно классифицировать по основным (ведущим) химическим элементам.

Так, *кислородно-углеродная функция* осуществляется зелеными растениями. Практически весь кислород (общее количество которого в атмосфере в свободном состоянии в настоящее время оценивается величиной $1,18 \cdot 10^{15}$ т) возник в результате деятельности организмов путем разложения молекул углекислоты. Вывод о биогенном происхождении свободного кислорода подтверждается соотношением общих количеств углерода и кислорода на планете, относящихся друг к другу как $12 + 32$ — так же, как атомные веса этих элементов в молекуле CO_2 (атом углерода с атомным весом 12 и два атома кислорода с атомным весом 16).

Углекислотная функция независимо от кислородной осуществляется всеми живыми организмами, в том числе и бактериями. В результате их деятельности образующийся углекислый газ, растворяясь в водах, оказывает огромное влияние на миграцию большинства химических элементов (фор-

мируя кислую и щелочную реакцию вод, образуя карбонатные комплексы металлов и т.п.).

Озонная и перекисьводородная функции заключаются в продуцировании сильных окислителей — озона и перекиси водорода.

Азотная функция заключается в накоплении азота в результате жизнедеятельности микроорганизмов и других биогенных процессов.

Углеродородная функция обеспечивается в бескислородной среде при микробиологическом разложении органических остатков, что приводит к образованию метана и других углеводородов.

Сероводородная функция обеспечивается также в бескислородной среде, содержащей органические остатки и сульфаты, сульфатредуцирующими бактериями, разлагающими органические вещества и сульфаты с выделением углекислого газа и сероводорода.

Водородная функция заключается в образовании в бескислородной среде водорода при разложении органических остатков бактериями (водородное брожение клетчатки).

Согласно мировоззрению В.И. Вернадского функции живого вещества в биосфере (биогеохимические функции) остаются неизменными в течение всего геологического времени и ни одна из них не появилась вновь. Они непрерывно существуют одновременно.

Важно осознать, что нет организма, который один мог бы исполнять все эти биогеохимические функции. Исключено также и то, чтобы в ходе геологического времени происходила смена организмов, замещающих друг друга в исполнении какой-либо одной биогеохимической функции, без изменения ее самой. Только со времени появления в биосфере цивилизованного человечества один организм оказался способным одновременно вызывать разнообразные химические процессы, достигая этого разумом и техникой, а не физиологической работой своего организма. Поэтому хотя человечество составной частью и входит в биосферу, в изучении ее эволюции мы выделяем *Человека* как объект, наиболее значительно преобразующий среду своего существования.

Открытия, сделанные В.И. Вернадским, позволили ему поставить и искать ответ на вопрос: *к чему ведет столкновение не согласующихся между собой двух основных сил планеты — механизма саморегулирования и саморазвития биосферы, с одной стороны, и стремительно прогрессирующего нарушения природных равновесий технически вооруженным человечеством, с другой.*

Получив функциональное могущество, а значит, и некоторую власть над природой, человечество сразу отошло от сложившихся тысячелетиями принципов *эволюции* (предполагающих взаимосвязанное последовательное развитие). В результате практически любая деятельность человека оказывает пока в целом негативное воздействие на биосферу. Интеллект человека стал инструментом агрессии над биосферой и при минимуме энергетических затрат обеспечил стабильное поступление продуктов потребления в человеческое общество.

Экологические кризисы (под которыми понимают напряженное состояние взаимоотношений между человечеством и биосферой, характеризующееся несоответствием развития производительных сил и производственных отношений ресурсо-экологическим возможностям) всегда сопровождали человеческое общество, что объясняется несоответствием (превышением) используемых им техники и технологий возможностям биосферы (рис. 1.1).

Первый экологический кризис был связан с совершенствованием орудий и методов охоты (рис. 1.2). Перед первобытным обществом всегда стояла задача увеличения объемов потребляемых продуктов питания, которые добывались охотой на крупных видов животных (древних мамонтов, слонов, бизонов, носорогов, медведей, гигантских ленивцев и др.).

Были придуманы ловушки-ямы и методы загона в них животных всем племенем. В результате такого усовершенствования техники и методов охоты количество добываемых животных, а следовательно, и объем пищи возросли, и первобытное общество могло резко увеличить число своих членов. Но через некоторое время подобный интенсивный отлов животных привел к резкому сокращению их поголовья. Это был первый экологический кризис, обусловленный перепотреблением человеческим обществом природных ресурсов.

Вектор усиления антропогенного воздействия

Глобальный кризис надежности экологических систем

Глобальный термодинамический (тепловой) кризис

Глобальный экологический кризис редуцентов (загрязнения) и нехватки минеральных ресурсов

Второй антропогенный экологический кризис

Кризис примитивного полевного земледелия

Первый антропогенный экологический кризис (консументов, перепромысла)

Кризис обеднения ресурсов промысла и собирательства

Доантропогенный экологический кризис аридизации



Рис. 1.1. Экологические кризисы и революции

В биосфере среди живых объектов, не обладающих человеческим разумом, такое изменение в соотношении «хищник—жертва» описывается уравнением Лотки—Вольтерра и приводит к последующему сокращению численности хищника (рис. 1.3). Например, после дождливого лета на обильном травяном корме резко увеличивается количество зайцев. Но и число лис, охотившихся на зайцев, за счет размножения тоже резко растет. В результате отлова лисами зайцев происходит уменьшение их популяции, что приводит к снижению численности популяции лис.



Рис. 1.2. Схема, иллюстрирующая совпадение по времени исчезновения некоторых крупнейших представителей животного мира плейстоцена и заселение мест их обитания охотниками палеолита:

основные периоды пути человека, отмеченные гибелью животных (жкт): 1 — до 40 000 (до современности); 2 — от 20 000 до 13 000; 3 — от 13 000 до 11 000; 4 — от 11 000 до 10 500; 5 — от 10 500 до 8000; 6 — от 8000 до 2000; 7 — от 1000 до 400; → — переселение человека

Но в случае с человеческим обществом этого не происходит. Истребив большую часть популяции крупных диких животных, человечество изобретает новые орудия (копье, лук, силки и т. д.) и методы охоты на мелкую дичь (олений, коз, кабанов, птиц и др.). В результате достигается отложение кризиса перепотребления и гибели человеческого общества (рис. 1.4).

Обилие мелкой дичи, эффективных орудий и методов охоты на нее приводит к увеличению объемов получаемой пищи, а следовательно, и к дальнейшему росту численности человеческого общества. Последнее обстоятельство вынуждает к усилению охотничьей деятельности, что обуславливает сокращение популяции уже более мелких диких животных.

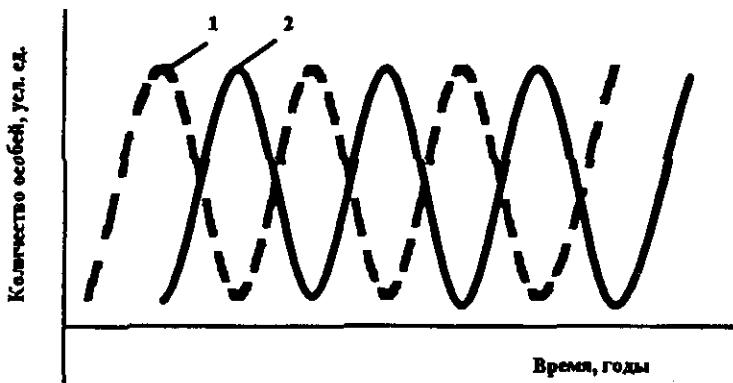


Рис. 1.3. Зависимость «хищник—жертва»: 1 и 2 — численность соответственно зайцев и лис

И вновь в результате своей деятельности человеческое общество предстает перед экологическим кризисом (исчерпанием объектов живого мира), грозящим ему гибелью. Но этого вновь не происходит.

Чтобы выжить, человечество придумывает новые методы увеличения объемов потребляемой пищи: на этот раз — одомашнивание диких животных, пастбищное животноводство и расширение сферы собирательства дикорастущих ягод, плодов и съедобных растений. И снова достигаются преодоление имеющегося экологического кризиса и рост численности человеческого общества.

Для обеспечения пищей растущего общества увеличивают рост поголовья домашних животных, а это ведет к расширению территорий пастбищ. Для этого сводится часть прилегающих природных лесов (и одновременно уменьшаются объемы собираемой из них пищи), а также повышается нагрузка на имеющиеся пастбища. В результате происходит их деградация и опустынивание (по такому сценарию могло происходить опустынивание территории нынешней Сахары). И опять человечество предстает перед грозящей ему экологической катастрофой.

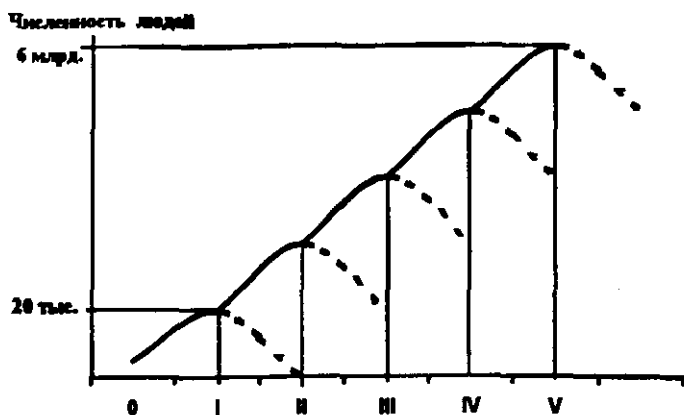


Рис. 1.4. Кризис перепотребления природных ресурсов: технологии получения пищи: I — ловушки-ямы для крупных диких животных; II — стрела, копьё, силки для мелких животных; III — одомашненные животные; IV — агрокультурные технологии; V — генная инженерия

Кардинальное решение проблемы обеспечения продовольствием человечество находит в переходе к *агрокультурным технологиям*, т.е. в проведении сельскохозяйственных работ. Это отодвигает глобальный экологический кризис перепотребления природных ресурсов до нашего времени, хотя региональные катастрофы возникали периодически. Например, применение поливных технологий в древности с первоначальным расцветом шумерской, ассирийской, вавилонской и других империй Двуречья привело к засолению сельскохозяйственных территорий и снижению их урожайности. Сведение лесов для увеличения сельскохозяйственных площадей одновременно с их опустыниванием уже стало влиять на региональный климат планеты.

Темпы общемировых потерь живого вещества в ходе современной хозяйственной деятельности человечества оцениваются (млрд. т/год):

- сведение лесов — 4,4;
- избыточная пастьба — 0,7;
- почвенная эрозия — 0,45;
- окисление гумуса на возделываемых землях — 0,3;
- дефляция аридных земель — 0,06.

Суммарно потери составляют более 5—6 млрд. т/год [42].

В настоящее время наряду с имевшимися экологическими кризисами перепотребления в биосфере (когда ежедневно на Земле исчезает один вид биоты) появился и новый — катастрофическое *геохимическое загрязнение* планеты.

Современное видение этой грандиозной коллизии, разворачивающейся в среде нашего обитания, позволяет наметить глобальные пути целенаправленной и совместной эволюции биосферы и человечества, получившей название *козволюции*. Эволюция природы идет медленно (тысячелетиями), а социальное развитие человечества происходит гораздо быстрее (веками и даже десятилетиями). Следовательно, по теории козволюции, несовпадение скоростей природного эволюционного процесса и социально-экономического развития человечества при неуправляемой форме взаимоотношений приведет к деградации биосферы, поскольку антропогенный фактор оказывается слишком мощным в направленности эволюции, приводящим не столько к изменению видов, сколько к их исчезновению. Выход заключается в регулируемом, сознательно ограниченном воздействии человечества на природу, в построении *ноосферы*. При этом общество, развиваясь по специфическим законам, должно лимитировать свой экстенсивный рост и техногенное давление с учетом обеспечения условно-естественного хода эволюции биосферы.

В этой связи важно использование понятия *баланса экологических компонентов* — количественное сочетание экологических компонентов (энергии, газов, воды, субстратов, растений-продуцентов, животных-консументов и организмов-редуцентов), обеспечивающих экологическое (естественное, природное) равновесие, что позволяет формироваться и поддерживаться экосистеме соответствующего типа. Например, для роста леса необходимы определенные климатические условия, состав атмосферы, водный режим, почвы, животный мир и состав микроорганизмов, возвращающих образовавшееся органическое вещество в минеральное состояние. Но все эти компоненты, составляющие для леса *среду жизни*, тесно связаны с произрастающим лесом, качественные и количественные характеристики которого в значительной степени определяют местные климатические условия, состав атмосферы, водный режим, характер почв, животный мир и состав микроорга-

низмов. Изменение любого из компонентов (например, при антропогенном воздействии) ведет к перемене их баланса.

План лекции

1. На основе различных теорий происхождения жизни на Земле дать характеристику живого вещества нашей планеты.
2. Объяснить специфические свойства и функции живых объектов.
3. Дать определение понятию «биосфера», раскрыть его смысл, описать основные показатели и характеристики.
4. Объяснить значение и место человеческого общества в биосфере.
5. Раскрыть имеющийся кризис перепотребления природных ресурсов человечеством и разработанную концепцию коэволюции.

Контрольные вопросы-задания

1. Опишите возможные пути происхождения жизни на Земле.
2. Каким общим свойством обладают все живые организмы на Земле?
3. Объясните смысл понятия «живое вещество» планеты.
4. Какие показатели используют для характеристики живого вещества Земли?
5. Дайте определение понятию «биосфера».
6. Перечислите и раскройте основные биогеохимические функции живого вещества.
7. Объясните главные отличительные признаки живого и неживого (косного) вещества.
8. Опишите взаимосвязь между основными биогеохимическими функциями биосферы и ведущими химическими элементами.
9. Сформулируйте главный закон развития человечества и биосферы.
10. Раскройте механизм кризиса перепотребления природных ресурсов.
11. Объясните сущность коэволюции человечества и биосферы.

Глава 2

Структура биосферы

**2.1. Возникновение,
эволюция и особенности
планеты Земля**

2.2. Строение биосферы

План лекции

**Контрольные вопросы-
задания**

Века и тысячелетия прошли, пока человеческая мысль могла отметить черты единого связанного механизма в кажущейся хаотической картине природы.

В.И. Вернадский

2.1

Возникновение, эволюция и особенности планеты Земля

Земля, по теории происхождения планет, разработанной российским академиком О.Ю. Шмидтом (1891—1956 гг.), образовалась из сгустков протосолнечного облака, путем аккумуляции твердого рассеянного пылегазового вещества, что обусловило ее неоднородную (агломератовую) структуру.

Постепенно слагающие такое облако мельчайшие частицы и метеориты различных размеров объединялись в астероиды, которые затем падали на еще более крупные объекты — на образующуюся Землю.

Подобное соударение крупных космических тел обеспечило имеющийся наклон оси вращения нашей планеты. Так, при существующем сейчас угле наклона земной оси, равном $23,5^\circ$, массы наибольших тел, падающих на Землю при ее образовании, достигали $1/1000$ массы нашей планеты.

Следовательно, их поперечник мог доходить до 1000 км. Представление о масштабе столкновения Земли с подобным объектом (к тому же перемещающимся со скоростью 11 км/с) дают гигантские размеры лунных кратеров и морей. Выделившейся при таком ударе энергии достаточно, чтобы нагреть на сотни градусов слой земной коры толщиной, превышающей поперечник упавшего тела.

Заметная часть энергии падения таких гигантских космических тел оставалась внутри Земли и в результате способствовала разогреву ее недр на температуру свыше 1000 °С.

В условиях имеющегося вращения неоднородная агломератовая структура Земли не соответствовала закону минимума момента количества ее движения. Оптимизация энергии обусловлена приобретением планетарного тела сферичности и дифференциацией вещества по плотности. В результате вращения сферичность космического объекта достигается в интервале масс $2 \cdot 10^{16}$ — $2 \cdot 10^{19}$ г, а выделение геосфер осуществляется за счет внутренних и внешних источников энергии [43]. Это, в первую очередь, разогрев от процессов аккреции и метеоритной бомбардировки. Далее тепловой вклад вносят процессы радиоактивного распада короткоживущих (Al^{26} , I^{129}) и долгоживущих (U^{235} , U^{238} , Rb^{87} , K^{40} , Re^{187} , Th^{232} и др.) изотопов. И, наконец, имеется вклад энергии за счет воздействия близких и особенно массивных спутников (приливное влияние и воздействие на ось вращения Земли) с диссипацией тепла во внутренние зоны планеты.

Формирование Земли (*космическая стадия эволюции*), сопровождающееся падением астероидов и метеоритов, продолжалось около 100 млн. лет (примерно 2% от всего времени существования нашей планеты). В этот период происходила интенсивная отдача тепла в Мировое космическое пространство, вследствие чего температура на земной поверхности понижалась, и наступил момент, когда выделявшиеся из ее недр водяные пары смогли конденсироваться в жидкую воду.

С этого момента начинается *геологическая стадия* развития Земли [45]. Происходящие в этот период на нашей планете процессы можно подразделить на два типа. С одной стороны, это подземные вулканические и иные силы, приводящие к излиянию лав и подъему (или опусканию) земной коры, что примерно 3,8 млрд. лет назад привело к разделению мантии Земли на более легкие или плотные компоненты. С другой стороны, это процессы разрушения, эрозии горных пород, их переноса водами и ветром. Пока вода на Земле была только в связанном или парообразном состоянии, переноса горных пород практически не происходило (что имеется в настоящее время на поверхности Луны). Вул-

канические горы еще не размывались, а пониженные между ними места не заполнялись осадками.

Только с появлением на Земле жидкой воды впервые возникли осадочные породы, отлагающиеся в неглубоких морских водоемах. В результате поверхность нашей планеты стала более ровной, так как высокие вулканы со временем разрушались и постепенно исчезали с земной поверхности.

Ко времени 3—2 млрд. лет назад земная кора уже остыла на всю глубину (20—40 км) и приобрела определенную хрупкость. В местах максимальных напряжений она начала трескаться. В результате возникли глубинные разломы, вдоль которых образовались прогибы (где накапливались многокилометровые толщи осадков).

Сравнительный анализ планетоидов (планет, их спутников и астероидов, имеющих сферическую форму) показывает определенную идентичность в их строении [43]. Все они имеют сферично-слоистую структуру, включающую ядро, мантию и литосферу, а в некоторых случаях — атмосферу с магнитосферой (рис. 2.1).

Распределение сферических слоев строго подчинено закону минимума момента количества их движения в условиях вращения. Поэтому в центре любого планетоида располагаются наиболее плотные породы, составляющие ядро, а по мере продвижения к периферии наблюдается разуплотнение, а также выделение различных химических элементов и их соединений. По-видимому, сценарий дифференциации и структурирования вещества на всех планетоидах одинаков, а вот степень их завершенности зависит от запасов внутренней и притока внешней энергии.

В течение предыдущих периодов в земной коре, близ ее поверхности, накапливались такие элементы, как кремнезем, щелочи, кальций, создавался гранитный слой, выделялась вода, большую часть которой, как губку, впитала в себя верхняя часть мантии. В результате возник мощный слой обводненных ультраосновных пород. Слагающие Землю химические элементы расположились в закономерной последовательности: сверху самые легкие, ниже — тяжелые и плотные, кремнезем, еще ниже — алумосиликаты и внизу — силикаты с высоким содержанием магния и железа.

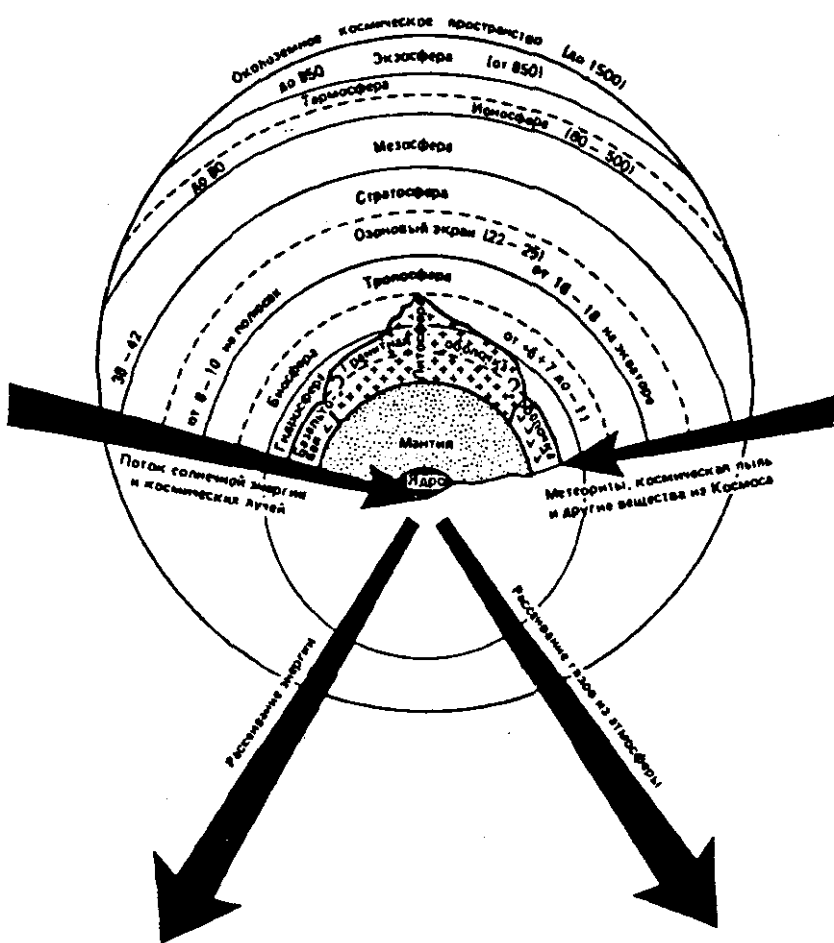


Рис. 2.1. Схема геосфер Земли (расстояния от поверхности Земли даны в километрах)

Примерно 0,5—0,3 млрд. лет назад Земля вступила в стадию эволюции, характеризующуюся уничтожением мощной континентальной коры и ее превращением в тонкую (5—7 км) океаническую разновидность. Человечеству давно известна загадочная географическая особенность.

Если сопоставить противоположные берега Атлантического океана, то нельзя не заметить совпадения очертаний восточного побережья Южной Америки и западного побережья Африки. На основании этого факта и сходства ископаемых растений в месторождениях каменного угля Северной Америки и Европы была выдвинута гипотеза, что Северная и Южная Америка в прошлом составляли единое целое с Европой и Азией. Впоследствии они откололись и начали дрейфовать.

Океаническую стадию следует рассматривать как завершение гигантского мегацикла в истории Земли, длившегося 4—5 млрд. лет: Тихий океан образовался примерно 1500 млн. лет назад, Атлантический — 150—300 млн. лет назад, Индийский — 160 млн. лет назад, Северный Ледовитый — 30—40 млн. лет назад. Главной особенностью процесса океанообразования является то, что он постепенно расширяется (со скоростью 1—15 см/год) и захватил к настоящему времени пространство, превышающее суммарную площадь материков.

Затем началась *биосферная стадия* эволюции Земли, когда появилась и стала развиваться на планете жизнь, влияющая и преобразующая другие ее оболочки. Ископаемые остатки организмов были обнаружены в древнейших горных породах.

Так, в самых древних известных породах юго-запада Гренландии (возраст 3,76 млрд. лет при возрасте Земли 4,5 млрд. лет) найден углерод, имеющий биогенное происхождение. Приблизительно этим же периодом датируются отложения железистых кварцитов.

Следовательно, в это время под влиянием жизнедеятельности одноклеточных водорослей, разлагающих углекислый газ, в морской воде уже появился кислород. Ко времени 3,5 млрд. лет органический углерод составлял уже около 20% содержания в экзогенной системе Земли.

Возникновение почвенного покрова нашей планеты обусловлено выходом растений на сушу, произошедшим около 0,5 млрд. лет назад.

В дальнейшей эволюции Земли на появление биосферы и развитие ее структуры значительное влияние оказало *гелиоцентрическое расстояние и расположение планеты*. Температурный режим поверхности нашей планеты зависит от внешнего источника — Солнца (99,5 % всей энергии), а также притока внутреннего тепла (источником которого служит распад радиоактивных минералов в гранитных породах).

Уникальность Земли как планеты состоит в том, что она находится на единственно возможном расстоянии от Солнца (табл. 2.1), которое создает на ее поверхности температуру, обеспечивающую существование воды в жидком виде [16].

Другие параметры орбиты Земли обусловили бы резкое изменение характеристик окружающих ее оболочек — газовой (атмосферы), водной (гидросферы) и твердой (литосферы). Если Землю мысленно переместить на орбиту Венеры, то из-за так называемого необратимого (убегающего) парникового эффекта ее водная оболочка исчезла бы в кратчайший срок.

Таблица 2.1

Основные характеристики некоторых планет Солнечной системы

| Основные характеристики | Планета | | |
|--|-------------------|-------------------|-------------------|
| | Венера | Земля | Марс |
| Расстояние до Солнца, км | $1,08 \cdot 10^8$ | $1,49 \cdot 10^8$ | $2,28 \cdot 10^8$ |
| Экваториальный радиус, км | 6051 | 6378 | 3398 |
| Период вращения (<i>d</i> —дни, <i>h</i> —часы) | 243 <i>d</i> | 23,93 <i>h</i> | 24,62 <i>h</i> |
| Ускорение свободного падения, см/с ² | 884 | 981 | 376 |
| Температура, °С | 457 | 15 | -55 |
| Давление на поверхности, МПа | 9000 | 1000 | 7 |

Парниковый эффект в плотных атмосферах планет (Земли, Венеры и др.) представляет собой нагрев внутренних слоев воздуха, обусловленный их прозрачностью для основной части излучения Солнца (в оптическом диапазоне) и поглощением инфракрасной части теплового излучения поверхностью планеты.

Парниковый эффект повышает среднюю температуру планеты. *Убегающий* парниковый эффект представляет собой замкнутый цикл, состоящий в том, что, например, при уменьшении гелиоцентрического расстояния происходит повышение температуры поверхности планеты. Это приводит к дополнительному испарению воды (рек, морей и океана), что вследствие поглощения водяным паром инфракрасного (длинноволнового) излучения влечет за собой еще большее повышение температуры поверхности планеты и, следовательно, — увеличение испарения вод и т.д.

Если окажется, что рост температуры внутренних слоев атмосферы планеты из-за парникового эффекта опережает ее понижение вследствие конденсации, то выпадение осадков прекращается, а вода (пар) диссоциирует (под действием ультрафиолетового облучения) на кислород и водород. Кислород может вступить во взаимодействие с планетной корой, а наилегчайший из газов водород удаляется в космос. Именно такой оформилась атмосфера Венеры (табл. 2.2) и поэтому мала вероятность обнаружить на ней жизнь в традиционной, земной форме.

Таблица 2.2

Основные компоненты планетных атмосфер, %

| Компонент | Планета | | | |
|-----------------------------------|---------|--------|-------------|------|
| | Венера | Земля | | Марс |
| | | ранняя | современная | |
| Азот (N ₂) | 3,5 | 1,9 | 78,0 | 1,7 |
| Кислород (O ₂) | 0 | 0 | 21,0 | 0,0 |
| Углекислый газ (CO ₂) | 96,5 | 98,0 | 0,03 | 98,0 |
| Пары воды (H ₂ O) | Следы | 3 км | 2,5 км | 30 м |

Если Землю мысленно переместить на орбиту Марса, то там могла бы зародиться жизнь, пройти несколько стадий эволюции, а впоследствии угаснуть (если допустить, что перемена климата до существующих показателей происходила под действием парникового эффекта, но уже в ослабленном его состоянии). Так, в грунте с Марса были обнаружены микрофоссилии, т.е. следы древних микроорганизмов [43]. Вполне реальны надежды получить подтверждение о следах

биосфер на ряде крупных спутников планет внешней группы, в частности на Титане — спутнике Сатурна.

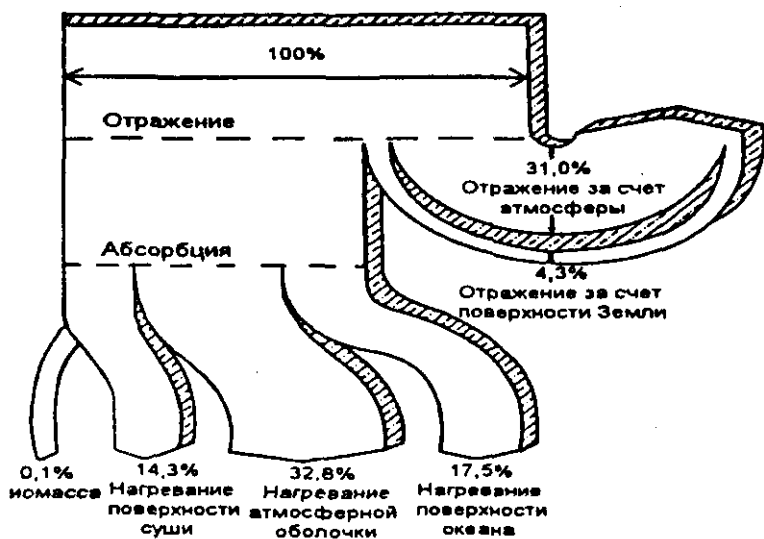


Рис. 2.2. Отражение и поглощение солнечной энергии

Как же распределяется солнечная энергия, достигшая поверхности Земли? Лучистая энергия, получаемая поверхностью Земли от Солнца, составляет примерно $1,2 \cdot 10^{17}$ Дж [17]. Средний приход энергии от Солнца в умеренных широтах равен 48—61 тыс. ГДж/га в год. Так, в степные районы Северной Осетии (Моздокский административный район) годовой приход солнечной радиации составляет 50—55 ккал/см² (1 калория — энергия, позволяющая нагреть 1 г воды на 1 °С), а в лесолуговой зоне — 40—45 ккал/см². При ее поглощении активной поверхностью Земли она преобразуется в тепловую. Около 35 % отражается обратно в космос облаками, пылью и другими веществами, находящимися в атмосфере, а также собственно поверхностью Земли (рис. 2.2).

Незначительная доля солнечной энергии (примерно 0,003 %) улавливается земными растениями и участвует в

процессе фотосинтеза при образовании органических соединений, необходимых для жизнедеятельности живого вещества. Остальная часть (примерно 65%) идет на нагревание атмосферы, суши и гидросферы, испарение и обеспечение перераспределения вещества в биосфере (рис. 2.3).

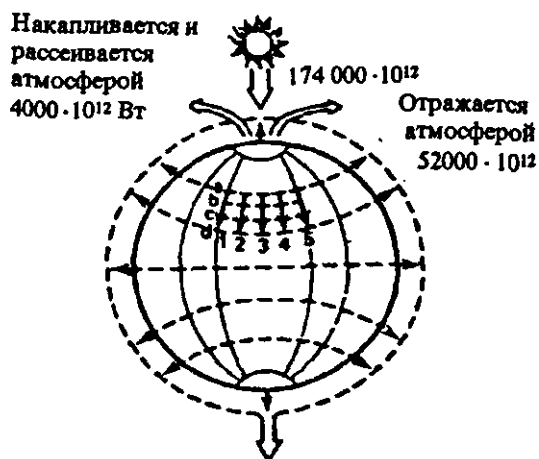


Рис. 2.3. Механизм перераспределения солнечной энергии на Земле (стрелки символизируют потоки энергии)

Поверхность океана теряет больше энергии, чем получает от Солнца. Это объясняется тем, что значительная часть излучения от поверхности океана поглощается облаками и водяным паром атмосферы, а затем переизлучается обратно. Такое переизлучение происходит в инфракрасной части спектра, т.е. в виде длинноволнового излучения.

2.2

Строение биосферы

Планета Земля состоит из ядра, мантии, литосферы, гидросферы, атмосферы, живого вещества, обладает гравитационным, электрическим и магнитным полями и характеризуется значительным разнообразием природных условий. Это

определяется ее сферообразной формой, движениями вокруг Солнца и своей оси (обуславливающими широтное и сезонное изменение интенсивности поступления солнечной энергии).

Значительное разнообразие природных условий создается и имеющимся расчлененным рельефом местности (рис. 2.4): амплитуда абсолютных отметок поверхности Земли составляет более 19 км — от +8848 м (г. Эверест в Гималаях) до -11 022 м (Марианская впадина в Тихом океане). Но основное разнообразие поверхности Земли создается живыми организмами.

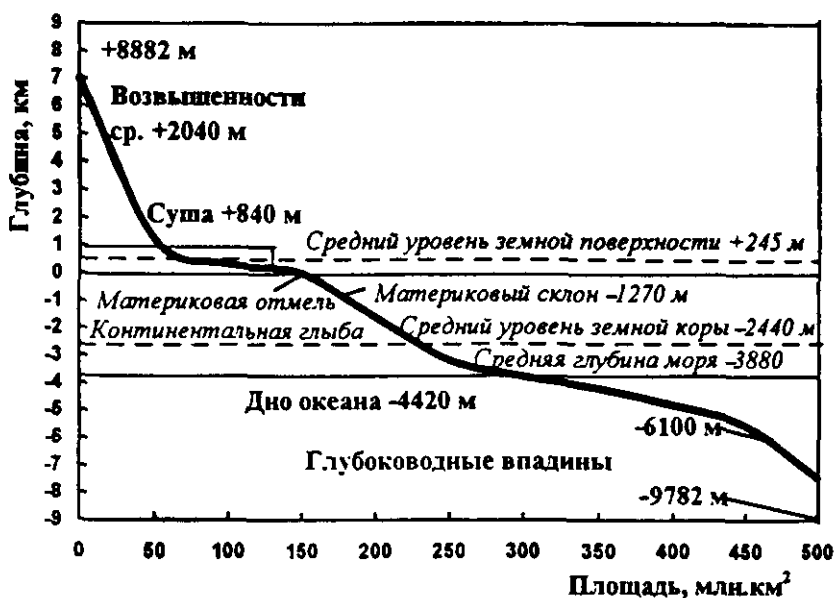


Рис. 2.4. Гипсографическая кривая земного шара

Сегодня структура биосферы необычайно сложна и полностью асимметрична. Это проявляется в неравномерном распределении континентов и океанов (общая площадь планеты в северном и южном полушариях Земли состоит из площади суши $1,49 \cdot 10^8$ км² и океанов $3,64 \cdot 10^8$ км²), широком сочетании горных массивов и равнинной местности, в разнообразии почв, континентальных и морских водоемов, климатических условий и т.д.

Очевидно, что бесконечное разнообразие сред порождает множество эволюционных связей, которые возникли в ходе преобразования биосферы, а это, в свою очередь, привело к появлению огромного количества живых существ — растений и животных (по разным оценкам, на нашей планете существуют от 1,5 до 30 млн. видов животных и около 500 тыс. видов растений) [26]. Распределение живых организмов по поверхности земного шара еще более неравномерное, чем перстрота физико-химических условий, в которых они находятся.

Таким образом, природные ресурсы Земли весьма разнообразны — это энергетические, неорганические и органические компоненты. Их величина включает [19]:

- поступающую солнечную радиацию — $2 \cdot 10^{21}$ кДж/год (проникающую в литосферу в среднем на глубину 30 м и гидросферу — до 100 м);
- верхнюю часть земной коры (до глубины 10—15 км);
- массу атмосферы — $5,51 \cdot 10^{15}$ т;
- массу гидросферы — $1,5 \cdot 10^{18}$ т;
- объем пресной воды — 1,2 тыс. км³;
- биомассу. Ее количество на Земле колеблется в пределах $(2,4—3,6)10^{12}$ т сухого вещества.

Биомасса — выраженное в единицах массы (веса) количество живого вещества тех или иных организмов (популяций, видов, сообществ в целом и т.д.), приходящееся на единицу площади или объема. В весовых единицах относится к сырому или сухому состоянию живого вещества. Целесообразно отдельно определять массу консументов, продуцентов и редуцентов [42].

Среди ресурсов нашей планеты особо важное место занимает живое вещество биосферы (его общее количество массы равно 2423 млрд. т) как обладающее возможностью воспроизводства. Так, глобальная ежегодная продукция всей фитомассы определяется величиной $2,3 \cdot 10^{11}$ т (в том числе $1,7 \cdot 10^{11}$ т на материках и $0,6 \cdot 10^{11}$ т в океане).

Важнейшей особенностью строения биосферы, как отмечал В.И. Вернадский, является наличие поля устойчивости (существования) жизни. Первое поле характеризуется усло-

виями, которые выдерживает жизнь, не прекращая свои функции, а второе — условиями репродукции организмов.

К природным условиям, определяющим *границы биосферы*, относят:

- благоприятный радиационный режим;
- достаточность количества кислорода и углекислого газа;
- обеспеченность влагой, обуславливающую развитие живых организмов;
- оптимальный термический режим.

Четких границ биосфера не имеет, так как проникает в другие оболочки Земли: лито-, гидро- и атмосферу. На континентах ее нижняя граница уходит на глубины до 6 км, а под океанами достигает глубин 0,5—1 км. Верхней границей биосферы служит озоновый экран, располагающийся на высоте 23—25 км над уровнем моря. В последнее время в гидротермах дна океана на глубине 3 км обнаружены живые организмы при температуре 250 °С [38]. При давлении около $3 \cdot 10^7$ Па вода не кипит, а пределы жизни ограничены температурами превращения воды в пар и сворачивания белков.

Установлено, что в земной коре ниже приповерхностной зоны постоянных температур наблюдается постепенный нагрев горных масс с углублением в недра литосферы. Расстояние по вертикали, на котором температура повышается на 1 °С, называют геотермической ступенью. Ее величина в разных местах весьма различна, но в среднем равна 32 м. На глубине около 25 км должна существовать критическая температура в 460 °С, при которой при любом давлении вода превращается в пар и жизнь принципиально невозможна.

При изучении биосферы необходимо осознать, что ни один живой организм в свободном состоянии на Земле не находится. Все организмы неразрывно и непрерывно связаны (прежде всего питанием и дыханием) с окружающей средой. Существовать вне ее в природных условиях они не могут [5]. Поэтому биосфера оказывает огромное влияние на формирование состава, структуры и свойств всех внешних оболочек Земли. Так, анализ состава ранней и современной

земной атмосферы (см. табл. 2.2) четко показывает влияние живого вещества, продуцирующего 21 % кислорода, поддерживающего 78 % азота и обуславливающего лишь следы углекислого газа. Аналогичное влияние живого вещества обнаруживается также в гидро- и литосфере.

В этой связи важной методической особенностью изучения биосферы в целом является обособление в ней нескольких концентрических оболочек — атмосферы, гидросферы и литосферы, отличающихся друг от друга по ряду признаков, главными из которых являются фазовое состояние, а также физические и химические свойства вещества.

Литосфера. Твердая (каменная) оболочка Земли, получившая название литосферы, ограничена сверху атмосферой и частично гидросферой, а снизу — поверхностью мантии. При этом имеется резкая асимметрия строения поверхности Земли, т.е. поверхности литосферы. Средняя мощность литосферы составляет 33 км (под океанами ее мощность не превышает 4—8 км), а масса — 0,8 % общей массы Земли. Средняя плотность пород литосферы находится в пределах 2,7—2,9 т/м³.

Верхняя часть литосферы на 95 % состоит из магматических образований, хотя на самой поверхности нашей планеты она зачастую представлена осадочными отложениями. На континентах литосфера сложена преимущественно комплексом гранитных пород, залегающих почти сплошным слоем на глубине 15—30 км.

Большое значение для жизни и деятельности человечества (как и для функционирования биосферы в целом) имеет в основном только приповерхностная область литосферы — верхняя часть земной коры, к которой относятся такие биокосные элементы, как почвы, коры выветривания, осадочные породы и илы.

Отличительная особенность *биокосных систем* — это присутствие в них живого вещества. Если входящие в состав системы живые организмы погибнут, то она переходит в категорию косной. Содержание живого вещества (по отношению к общей массе) в биокосных системах является небольшим,

но именно живому веществу принадлежит ведущая роль в их функционировании.

Почва представляет собой органоминеральное образование верхнего горизонта литосферы, вовлеченное в биогеохимический круговорот атомов при участии растений, животных и микроорганизмов, обладающее плодородием и являющееся областью проявления наивысшей геохимической энергии живого вещества. Природные почвы являются результатом воздействия живых организмов на минеральный субстрат и разложения мертвых организмов при одновременном влиянии климата и рельефа местности в гравитационном поле Земли (другими словами, преобразованными горными породами, изменившимися под воздействием живого вещества, воды и газов).

Почва образуется при трансформировании горных пород под влиянием различных агентов. Например, в измельчении массивно-кристаллических горных пород принимает участие не только физическое выветривание, но и живые организмы, даже после их отмирания. При физическом выветривании образуется груботекстурный материал — почвообразующая порода. Дальнейшее ее измельчение происходит в результате жизнедеятельности литофильной растительности и автотрофных микроорганизмов. Литофильная растительность, особенно лишайники, прикрепляясь к породе, отрывают от нее кусочки. Затем эти кусочки обволакиваются и втягиваются в тело лишайника, с его еще глубоким проникновением в образовавшуюся ямку и продолжением разрушительной работы. Однако участие литофильных растений не ограничивается подобным механическим измельчением породы. Растения при дыхании образуют угольную кислоту, а при отмирании и биохимических превращениях отмерших частей — органические кислоты (особенно фульвокислоты).

Как минеральные, так и органические кислоты способствуют дальнейшему, более глубокому измельчению горных пород. При появлении высших растений и увеличении доли биохимического выветривания горных пород все больше накапливается мелкозем, обогащенный гумусом.

В результате совместного влияния литофильной растительности и скальных микроорганизмов в образующемся

мелкоземе появляются аморфные формы кремнезема, гидроксиды железа, вторичные глиноподобные минералы (типа минимориллонита и бейделлита). Образование 1 см почвенного слоя в среднем протекает в течение 150 лет.

С появлением в составе минеральной части почвы вторичных минералов примитивная почва приобретает поглощающую способность.

В результате же жизнедеятельности и отмирания литофильной растительности, а также микроорганизмов в мелкоземе скапливается до 20—30 % органического вещества. По мере увеличения количества мелкозема и органического вещества создаются более благоприятные условия для поселения высших растений.

В современных условиях подобный процесс протекает в субальпийской зоне, где увеличивается влияние биохимического фактора в выветривании горных пород и формировании мелкозема, в том числе образовании вторичных глинистых минералов. Если в профиле альпийских почв груботекстурная минеральная часть почвы занимает 30—50 % (а иногда до 80 %), то в субальпийских почвах каменная часть уже незначительна. Здесь же в составе гумуса преобладают гуминовые кислоты.

Важнейшими физическими свойствами почвы являются *механический состав* и *дисперсность*. За счет дисперсности почва приобретает пористость, необходимую для размещения воды, воздуха, корневой системы растений и живых организмов (прежде всего различных микроорганизмов).

В хорошо гумусированных почвах минеральные микрочастицы склеиваются гумусовыми веществами, образуя макроагрегаты, благодаря чему почва становится структурной и рыхлой, содержит крупные поры аэрации (т.е. капиллярные поры более 0,1 мм), которые обеспечивают нормальный воздухообмен.

С *плотностью почвы* тесно связана *пористость*: наиболее благоприятной является пористость 50—58 % от объема почвы, а критическим пределом служит 40—45 %, при которых в почве протекают уже отрицательные процессы.

Все почвы (даже весьма бедные северные или южные пустынные) имеют весьма сложный химический состав, характеризующийся фоновыми концентрациями содержания в них различных химических соединений во всех фазах (твердой, жидкой и газообразной). В состав минеральной части почвы входят кремний, алюминий, железо, калий, натрий, магний, кальций, фосфор, сера и некоторые микроэлементы (медь, молибден, йод, бор, фтор, свинец и др.).

Подавляющее большинство химических элементов находится в форме оксидов. В почве также распространены соли угольной, серной, фосфорной, хлористо-водородной и других кислот.

Почва как среда обитания представляет собой не просто твердое тело (как большинство пород литосферы), а сложную трехфазную систему, в которой твердые частицы окружены воздухом и водой. Так, на 1 га приходится от 30 до 50 млн. т воды [42]. В результате необходимо оперировать таким показателем, как *влагоемкость почвы* — способность к удерживанию воды.

Различают много форм влагоемкости почвы — полевую, общую, капиллярную, наименьшую, полную, предельную и др. Основными считаются наименьшая, капиллярная и полная влагоемкость почвы. Последняя образуется при условии заполнения почвенных пор водой после ее стекания и зависит от высоты положения слоя почвы над уровнем грунтовых вод.

Капиллярные поры почвы от 0,1 до 3 микрон заполняются водой, являющейся в этом случае высокоподвижной и высокопродуктивной влагой, содержащей растворенные питательные вещества. В этих же порах размещаются и микроорганизмы. Поэтому это поры первого порядка использования питательных веществ, куда проникают корневые волоски растений. Тонкие же капилляры мельче 3 микрон недоступны корневым волоскам и микроорганизмам, но они содержат малоподвижную влагу с питательными веществами второго порядка использования, т.е. служат кладовыми питательных веществ.

Поэтому в почвах должны быть структурные агрегаты разного размера — и микро-, и макроагрегаты. Только в этом случае в почве создаются нормальные водный и воздушный режимы, от которых зависит как биологическая активность, так и накопление питательных веществ.

В бесструктурной почве микроагрегаты при увлажнении набухают, сближаются друг с другом и образуют единую тонкокапиллярную систему, в которой все поры заняты водой, а воздухообмен отсутствует. Поэтому в них подавлены аэробные процессы. При подсыхании такие почвы покрываются коркой, быстро иссушаются, а микрофлора и корневая система страдают от недостатка влаги. В результате снижаются качество и количество биологической продукции.

В почве по сравнению с приземным слоем воздуха сглажены температурные колебания, а наличие грунтовых вод и проникновение осадков создают здесь запасы влаги и обеспечивают режим влажности, промежуточный между водой и наземной средой. В почве концентрируются органические и минеральные вещества, поставляемые отмирающей растительностью, что определяет большую насыщенность почвы жизнью.

В результате почвы имеют чрезвычайно высокую биохимическую активность: в них живут разнообразные живые организмы. Это могут быть различные микроорганизмы (бактерии, водоросли, грибы, простейшие одноклеточные), черви и членистоногие, а также высшие животные (кроты, сурки и т.д.). Так, с почвенной оболочкой тесно связано существование большинства видов растений и многих систематических групп животных.

Например, 90 % насекомых (самый многочисленный класс животных, объединяющий около 1 млн. видов) используют в своей жизнедеятельности почву или проходят в ней определенную стадию своего развития. Поэтому на 1 га почвы приходится (в кг): 1000—7000 бактерий, 100—1000 микробов, 10—300 водорослей, 5—10 простейших, до 1000 членистоногих и 350—1000 дождевых червей [46]. Другими словами, в каждом грамме почвы обитают миллионы бактерий (например, в черноземе — до 25 млрд. микробных клеток) и актиномицетов, сотни тысяч микроскопических грибов, десятки

тысяч дрожжей и водорослей, а также тысячи простейших животных. Вследствие чего на каждом гектаре пашни находится от 2 до 7 т микробной массы. Общее количество углерода в почве (в том числе и в живых объектах) составляет примерно $2 \cdot 10^{18}$ г.

Цвет, структура и состав почвы определяются климатическими условиями, особенностями рельефа местности, составом материнских пород, растительностью; в свою очередь, почвы обуславливают характер произрастающего на них растительного покрова: при определенных климатических условиях на каждой материнской породе поселяется только определенный вид растительности (рис. 2.5).

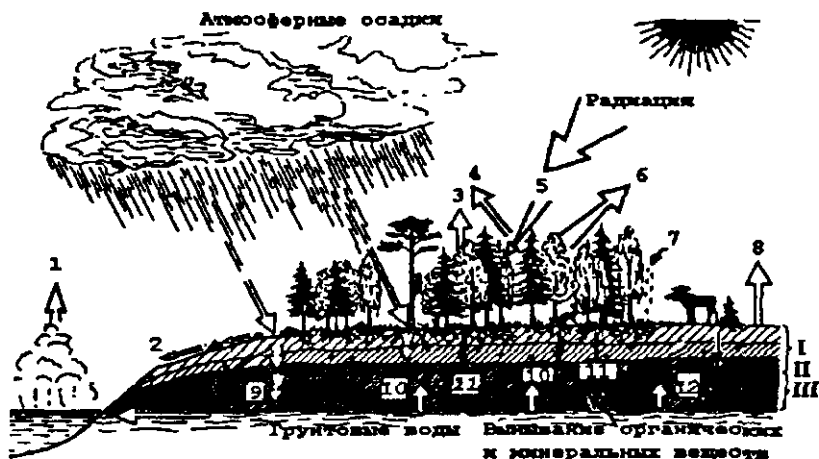


Рис. 2.5. Схема взаимного влияния лесного фитоценоза и условий среды: I — почва и почвенная влага; II — зона аэрации; III — материнская порода; 1 — испарение с водоема; 2 — сток поверхностных вод; 3 — транспирация и испарение с хрон; 4 — альbedo; 5 — расход на фотосинтез; 6 — расход на транспирацию; 7 — опад; 8 — испарение с покрова и почв; 9 — просачивание воды в грунт; 10 — зона капиллярного подъема грунтовой воды; 11 — продукт разложения опада; 12 — капиллярный подъем

Виды почв определяются прежде всего исходной, материнской породой. Например, песчаные почвы — рыхлые, хорошо проницаемые, легко выщелачиваются. Глинистые почвы (вязкие в мокром состоянии и довольно твердые в сухом) — тяжелые, слабопроницаемые, выщелачиваются медленно.

В почве происходит взаимодействие воды, воздуха и живых организмов, участвующих в ее формировании. Между минеральными и органическими компонентами, растительностью и почвенными микроорганизмами возникает целая серия взаимосвязей, что определяет состав почвы.

Мерилом интенсивности почвообразования служит количество органического вещества, разлагающегося в почве за год. В этом отношении весьма существенное значение имеет климатическая зональность. Так, наиболее интенсивно процессы разложения происходят во влажных тропиках, а наиболее слабо — в тундре и пустынях. Особенно велика роль микроорганизмов, с помощью которых протекают процессы разложения различных (как органических, так и неорганических) веществ. Разлагая остатки растений и животных, микроорганизмы поставляют в почвенные растворы CO_2 , органические кислоты и другие соединения, делая их химически высокоактивными. Образующиеся при этом углекислый газ, метан и водород поступают в атмосферу. Чем больше ежегодно разлагается органического вещества, тем богаче почва химически работоспособной энергией, тем дальше она от состояния равновесия.

В почвах в основном наблюдается два направления миграции химических элементов — вертикальная и латеральная. Если первая обусловлена функционированием живых организмов (прежде всего растений) и гравитацией, то вторая — только действием гравитационных сил (особенно на различного рода водоразделах и склонах).

В результате в почвах (под действием различных факторов — климатических, биогенных и т.д.) происходит перераспределение химических элементов. В черноземных, подзолистых, каштановых и других типах почв биогенная аккумуляция и выщелачивание протекают с различной интенсивностью, следовательно, и суммарный эффект распределения элементов различен. Например, в верхней части почвы может преобладать или концентрация элементов, или их вынос. В результате почва расчленяется на *горизонты* (т.е. однородные слои, обычно расположенные параллельно дневной поверхности и имеющие одинаковые признаки). Почвенные го-

ризонты возникают в результате привнесения, миграции, выноса и превращения веществ в почвах. Отличаются почвенные горизонты по окраске, структуре, сложению, составу, характеру новообразований и другим признакам. Так, имеются почвы, в которых верхний горизонт кислый (в нем господствует окислительная среда), а нижний — щелочной (с восстановительной средой) и т.п. Совокупность горизонтов образует *почвенный профиль*.

Поверхностный горизонт обычно состоит из остатков растительности, составляющих основу гумуса. *Гумус* — это высокомолекулярное темноокрашенное органическое вещество почвы, содержащее гуминовые кислоты, фульвокислоты, гумин и ульмин. Образуется он в результате гумификации продуктов разложения органических остатков и содержит элементы питания растений.

Избыток или недостаток гумуса определяет плодородие почвы, так как с его помощью осуществляются обменные процессы, в которых участвуют не только кислород, углерод, азот и вода, но и различные минеральные соли, присутствующие в почве.

Для большинства почв характерно накопление (до 18%) гумуса и многих химических элементов в верхней части. Мощность гумусового горизонта изменяется от нескольких сантиметров до 1,5 м.

Во многих почвах присутствует горизонт концентрации соединений, вымытых из верхней части (*иллювиальный горизонт*). В черноземах — это горизонт накопления углекислого кальция. В подзолистых почвах и солонцах из верхнего горизонта вымываются минеральные и органические коллоиды, которые частично осаждаются в иллювиальном горизонте, повышая его глинистость. Поэтому механический состав почв этого горизонта — тяжелоглинистый, что связано с перемещением ила (частиц мельче 0,001 мм). Коллоиды могут сорбировать металлы, поэтому в нижней части такой почвы наблюдается повышенное содержание Cu, Ni, Zn, Pb и т.д.

Высокое содержание ила (в сочетании с плотной упаковкой механических частиц) обуславливает в иллювиальном

горизонте наличие тонких капиллярных пор, которые определяют отрицательные водные и воздушные свойства этого горизонта.

Еще сложнее распределение элементов в солончаках, болотных, луговых и других почвах низин. В них наряду с биогенной аккумуляцией и выщелачиванием происходит накопление химических элементов из грунтовых вод. Такие почвы также расчленяются на горизонты. В болотных почвах — это *торфяные* и *глеевые горизонты*, в солончаках — *солевые*.

Таким образом, почвообразование приводит к дифференциации элементов по почвенному профилю, т.е. однородная горная порода превращается в чрезвычайно неоднородное образование. В связи с этим почвообразование обуславливает накопление не только энергии, но и информации.

Для почв характерна и окислительно-восстановительная зональность. Наиболее ярко она выражена в заболоченных почвах, в которых бурые, желтые и красные горизонты с окислительной обстановкой сопряжены с сизыми, синеватыми и белесыми глеевыми горизонтами с восстановительной средой.

Контрастность окислительно-восстановительной зональности и конкретные величины окислительно-восстановительного потенциала в разных почвах различны. Геохимический анализ позволяет выделить по окислительно-восстановительным условиям три основных ряда почв: с преобладанием окислительной, глеевой и сероводородной обстановки.

Почвы с окислительной обстановкой образуются там, где атмосферный воздух легко проникает в них, где глубоко залегают грунтовые воды. Это — горные почвы, многие водораздельные почвы равнин и др. К ним относятся черноземы, красноземы, каштановые почвы, буроземы, большинство почв пустынь и т.д.

Почвы с глеевой обстановкой (восстановительной без H_2S) имеют большое распространение на заболоченных равнинах в районах влажного климата, например на Западно-Сибир-

ской изменности, в болотах Белорусского Полесья и в других районах. В глеевых почвах часто содержится растворенное органическое вещество, в том числе различные органические кислоты, которые образуются при неполном окислении растительных остатков.

Третий ряд почв — с восстановительной сероводородной обстановкой распространен не столь широко, как два предыдущих. К нему относятся солончаки степей, пустынь, морских побережий и некоторые другие почвы. Если в глеевых почвах многие металлы вследствие образования легкорастворимых соединений (особенно с органическими кислотами) подвижны, то в сероводородных — уже малоподвижны и образуют труднорастворимые сульфиды.

В почвах часто окислительно-восстановительная зональность является моделью более грандиозных процессов, протекающих в других системах земной коры, в том числе и в биосфере в целом. Так, изучение геохимии почв, и в частности их окислительно-восстановительной зональности, позволяет прогнозировать многие эволюционные процессы, протекающие в биосфере при техногенном воздействии.

В пределах рядов выделяются следующие *типы почв*: черноземные, подзолистые, бурые лесные, коричневые, сероземные, красноземные и другие. Их размещение подчиняется климатической зональности. Типы почв определяются прежде всего условиями разложения органических веществ, видом биогенной аккумуляции химических элементов и окислительно-восстановительной зональностью.

В зависимости от окислительно-восстановительных и щелочно-кислотных условий могут быть выделены и более мелкие единицы почв — *классы*. В тайге, например, преобладают почвы *кислого* класса (подзолистые и дерново-подзолистые), но есть и *кальциевые* (перегнойно-карбонатные на известняках), *кислые глеевые*, *карбонатные глеевые классы почв* (рис. 2.6).

Изучение почв важно не только потому, что они являются основой плодородия. Почвы прежде всего выполняют многие незаменимые общебиосферные функции: они являются

одним из эффективных регуляторов газового режима атмосферы и водного баланса Земли. Именно в них наиболее сосредоточена геологическая работа живого вещества; именно в них готовится тот материал континентальных и морских отложений, из которого в дальнейшем образуются новые породы. Но в то же время в почвах в наибольшей степени происходят и те процессы, совокупность которых обуславливает эволюцию органического мира.

Здесь разыгрываются многообразные формы борьбы за существование и приспособление организмов к изменяющимся условиям их жизни, создаются сообщества (биоценозы) и формируются новые виды многочисленных низших организмов и высших растений [28].

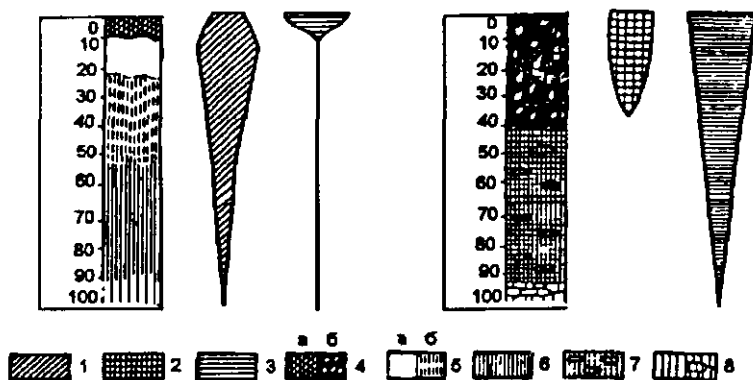


Рис. 2.6. Строение профиля кислых дерново-подзолистых и кальциевых дерново-карбонатных почв в таежной зоне:

1 — кислое выщелачивание (Fe, Al, Ca, Mg, Mn, Na, Cu, Zn, Cl, S и др.); 2 — нейтральное и слабокислое выщелачивание (Ca, Mg, Na, Mo, Mn, Cl, S и др.); 3 — биогенная аккумуляция; 4 — гумусовый — биогеохимический барьер (а — слабый, б — сильный); 5 — элювиальный; 6 — иллювиальный; 7 — карбонатная кора выветривания известняков; 8 — почвообразующие породы

Корой выветривания (элювиум) называются рыхлые продукты изменения горных пород, образующиеся под почвой за счет поступления из нее высокоактивных растворов. Как для почвы, так и для коры выветривания характерны следующие свойства:

- инфильтрация атмосферных осадков;
- выщелачивание растворимых соединений;
- выветривание первичных силикатов с образованием глинистых минералов;
- формирование геохимического профиля, расчленяющегося на горизонты;
- окислительно-восстановительная и щелочно-кислотная зональность.

Биокосная природа коры выветривания выражена менее отчетливо, чем у почв, но и здесь проявляется деятельность микроорганизмов, окисляющих органические соединения, поступающие сверху из почвы. В отличие от почвы, в коре выветривания практически нет биогенной аккумуляции химических элементов под влиянием растительности.

Коры выветривания, так же как и почвы, подвержены *климатической зональности*. Наиболее благоприятные условия для формирования коры выветривания создаются во влажном и жарком климате при равнинном или слабохолмистом рельефе, а также спокойном тектоническом режиме.

В этом случае мощность элювия может достигать нескольких десятков метров, а по трещинам и зонам дробления — сотен метров. В условиях сухого климата мощность коры выветривания не превышает первых десятков метров. В горных районах на крутых склонах мощность коры выветривания еще меньше. Для коры выветривания скальных пород характерен обломочный горизонт, выше которого залегают горизонты различного состава — гидрослюдистый, каолиновый и т.д.

По *химическому составу* и свойствам необходимо различать два основных класса кор выветривания.

Кора выветривания *кислого класса* образуется в условиях влажного климата и сквозного промачивания, что характерно для влажных тропиков. Богатый растительный покров определяет энергичное поступление из почвы в такую кору углекислого газа, гумусовых кислот и других продуктов разложения растительных остатков.

Поэтому реакция вод является кислой, что обеспечивает разложение многих минералов и вынос большинства метал-

лов, а также замещение водородным ионом обменных катионов в поглощающем комплексе. Кислые коры имеют общие особенности:

- отсутствие легкорастворимых солей и CaCO_3 ;
- малое количество катионов;
- высокую миграционную способность большинства элементов.

Кислое глеевое выветривание широко распространено в северной части Русской платформы, на большей части Западно-Сибирской низменности, где кислая глеевая кора представлена подпочвенными сизыми горизонтами, обедненными железом и марганцем. В арктических и северных районах мерзлый горизонт является естественным водоупором, вызывающим заболачивание, поэтому на границе с мерзлой толщей также энергично развивается глеевое выветривание.

Карбонатный (кальциевый) класс коры выветривания широко распространен в районах сухого климата (для территории России это могут быть различные аридные районы, например Калмыкии и Дагестана). Коры в таких районах маломощные. На скальных породах — это обломки пород, покрытые корочкой углекислого кальция. Наиболее подвижный и накапливающийся мигрант — кальций, входящий в состав углекислой извести, поглощающей комплекс в виде катиона.

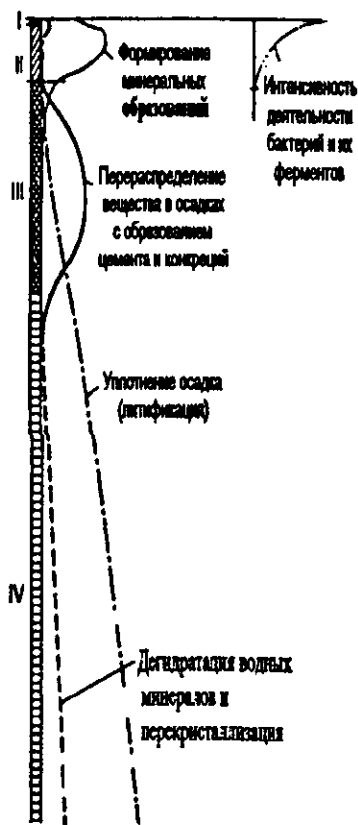


Рис. 2.7. Вертикальная дифференциация в илах:
I—IV — горизонты ила

Илы. Сущность илообразования также заключается в разложении органических веществ на основе окислительно-восстановительных реакций. Поэтому и для илов характерны как различные горизонты, так и окислительно-восстановительная зональность (рис. 2.7, 2.8).

Однако в отличие от почв илы растут сверху и, следовательно, не имеют «материнской» породы.

В образовании илов, как правило, не участвуют высшие растения. Для них характерен режим постоянного и значительного увлажнения.

Все это определяет меньшее по сравнению с почвами разнообразие илов и, следовательно, их большую однородность в пространстве.

В настоящее время выделяются три ряда илов: окислительный, глеевый и сероводородный (сульфидный).

Окислительные илы образуются в океанах, морях, озерах и реках — всюду, где господствуют кислородные воды и создаются условия для их перемешивания.

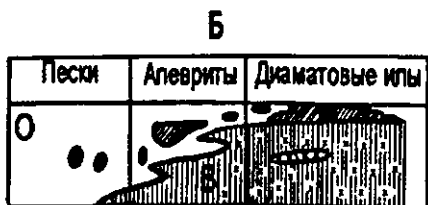
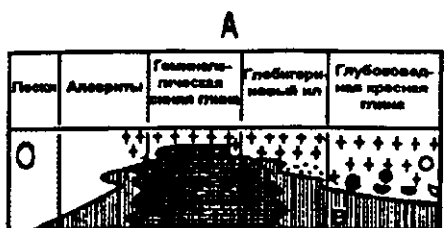
Окислительная среда характерна для прибрежных песков, зоны волнений, а также для больших глубин, где мало органических остатков, а холодная вода богата растворенным кислородом. В результате окислительных процессов примерно 50 % дна Тихого океана в настоящее время покрыто красной глубоководной глиной. Этот ил осаждается на глубинах более 4500 м с чрезвычайно малой скоростью: за 1000 лет образуется лишь несколько миллиметров осадка.

Окислительные илы имеют преимущественно желтую, бурую и красную окраску, обусловленную наличием гидроксидов трехвалентного железа.

Глеевые илы характерны для озер, расположенных в тундре, тайге и во влажных тропиках. Здесь разлагается много органического вещества, но содержится мало сульфатов. В результате развивается глеевая обстановка, железо и марганец восстанавливаются, а илы приобретают сизую, зеленоватую, серую и охристо-сизую окраску. В глеевых илах не хватает кислорода для окисления органического вещества, что сказывается на скорости этого процесса. В таежных озерах постепенно на дне накапливается ил, получивший название «сапропель».

Рис. 2.8. Окислительно-восстановительная зональность илов (разрезы через океан (А) и озеро Байкал (Б)):

зоны: О — окислительная, В — восстановительная, слабо (1) и сильно выраженная (2); 3 — оксиды железа, окрашивающие окислительную зону в бурый цвет; 4 — участки, обогащенные железом и марганцем; 5 — железомарганцевые конкреции; 6 — равномерно окрашенные слабожелезистые ржавые пятна; 7 — марганцевые (черные) пятна; 8 — виванитовые пятна



Сероводородные (глеевые) илы широко распространены в морях и океанах, озерах степей и пустынь, где преобладают

сульфатные воды, развивается десульфитизация, продуцируется сероводород, образуются сульфиды железа. Такие илы имеют серый, черный и синеватый цвет (за счет наличия сульфидов железа).

Илы, как и почвы, также испытывают влияние зональности: климатической, вертикальной или циркумконтинентальной (от лат. *circum* — вокруг). Причем наибольшее значение имеет климатическая зональность.

Например, окислительные илы мелководий полярных бассейнов отличаются от илов теплых вод, а глеевые илы тундры — от илов влажных тропиков. В них различны как скорость процессов разложения органических остатков, так и состав самих илов. Это объясняется тем, что в разных климатических зонах организмы усваивают из морской и океанической воды различные компоненты: в холодных частях умеренных зон мобилизуется в основном кремнезем, в аридных — преимущественно карбонаты, а в экваториальной гумидной области — карбонаты и кремнезем.

Вертикальная зональность накопления карбонатных илов определяется уровнем карбонатной компенсации — критиче-

ской глубины, ниже которой (вследствие высокого давления и низкой температуры морской воды) происходит интенсивное растворение карбонатных скелетов кальциевых организмов. Это явление обуславливает отсутствие карбонатных отложений на морских глубинах ниже 4000—5000 м.

Карбонатные планктоногенные илы покрывают около 128 млн. км² дна Мирового океана (примерно 36 % его площади). Средняя их мощность составляет около 400 м, а скорость накопления — примерно 1 см в 1000 лет.

По мере удаления от континентов в сторону центра океана *циркумконтинентальная зональность* выражается в изменении состава илов. Плотность жизни в этом направлении уменьшается, а содержание биогенного вещества в осадках увеличивается. Это объясняется обильным разбавлением в прибрежных областях биогенного вещества терригенной примесью (на периферии океана отлагается 92 % этого материала), поступающей с континента.

Осадочные породы. Мощность осадочного слоя в глубоких палеовпадинах достигает 20—25 км. Большинство осадочных пород образовалось из озерных, речных, а также морских илов в ходе диагенеза и последующих эпигенетических изменений под влиянием подземных вод (рис. 2.9). Осадочные породы подразделяют на ряд *классов*.

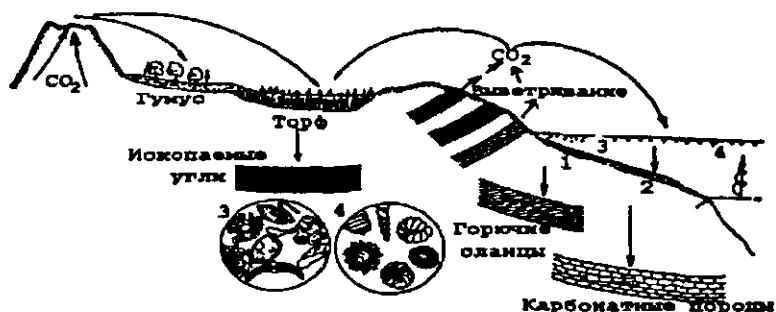


Рис. 2.9. Схема формирования каустобиолитов и карбонатных пород:
1 — сапропель; 2 — карбонатный ил; 3 — организмы-сапропелеобразователи; 4 — карбонатные организмы

Первый класс — современные ракушечные (моллюсковые) отложения, встречаются главным образом на шельфе и на вершинах подводных гор. Среди шельфов наиболее благоприятными для накопления ракушки являются участки, прилегающие к побережью с плоским рельефом и без сколько-нибудь развитой речной сети. В прибрежной зоне ракушки интенсивно измельчаются, поэтому их отложения часто представлены раковинными песками. Таковы огромные раковинные поля на восточной и северной окраинах Каспия, в северо-западном углу Черного моря, на Багамской отмели у побережья Флориды.

Второй класс бентогенных карбонатных отложений — кораллово-водорослевый, формируется в рифовых сгущениях жизни. На долю карбонатных осадков приходится около половины общей площади современных донных отложений Мирового океана. Широкий пояс карбонатных осадков располагается главным образом между 30° с. ш. и 30° ю. ш.

Осаждение карбонатов в озерах происходит как под действием процессов выпаривания пересыщенных растворов (например, в озере Севан), так и в результате геохимической деятельности бактерий. Образующийся при этом микрокристаллический кальцит в сочетании с обломками водорослей, ракообразных и тонкостворчатых моллюсков дает залежи озерного мела.

Доломит накапливается в водной среде, характеризующейся высокой соленостью, большим рН и обильной растительностью.

Формирование доломитов обуславливается средообразующей деятельностью автотрофного живого вещества: в ходе процесса фотосинтеза растения извлекают из воды растворенную в ней углекислоту, что приводит к повышению рН и способствует химическому осаждению доломита. Установлено непосредственное образование доломита бактериями *Proteus vulgaris* [24].

Поэтому во многих случаях существует четкая положительная корреляция между содержанием биогенной органики и концентрацией доломита.

Современные доломитовые осадки обнаружены в отложениях соленых озер (Балхаш), на южном побережье Персидского залива и в Австралии (лагуна Куронг).

Отложение кремнистых пород осуществляется главным образом в морской среде и в меньшей степени — в континентальных водоемах (рис. 2.10). Осаждение кремнезема производят следующие организмы: диатомовые водоросли (содержащие 90 % всего кремнезема, находящегося во взвеси в Мировом океане), радиолярии, губки и жгутиковые водоросли.

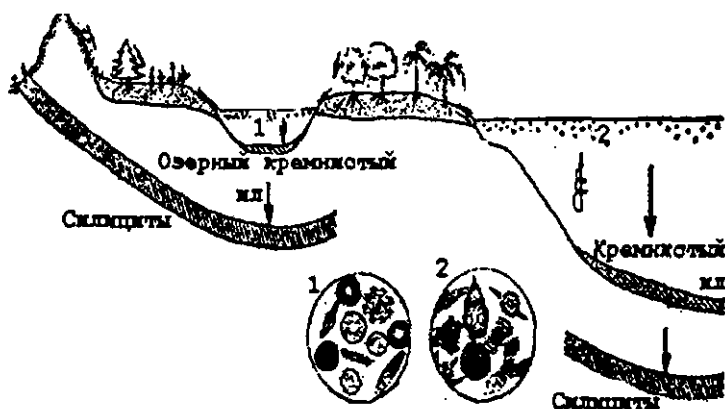


Рис. 2.10. Схема формирования кремнистых пород:
1 и 2 — планктон соответственно озерный и морской

В современной биосфере наблюдаются три основных пояса кремненакопления:

- южный пояс, охватывающий почти сплошной полосой весь земной шар в Южном полушарии (здесь накапливается 3/4 всего кремнезема);
- северный пояс, развитый в Тихом океане, а также в Каспийском и Аральском морях, Байкале, Севане, Ладожском, Онежском и других озерах;
- экваториальный пояс, находящийся в Тихом, Индийском и Атлантическом океанах.

Локализация кремненакопления в океане связана главным образом с областями массового развития диатомей (в

зонах апвеллинга). Диатомовые водоросли характеризуются огромной скоростью размножения.

При благоприятных условиях удвоение числа клеток может происходить каждые 4 часа. Слой биогенного кремнезема, накапливающегося в Мировом океане только за счет диатомей, может составлять от 7,5 до 30 см за 1000 лет. В настоящее время наиболее мощные толщи диатомитов (достигающие 1600 м) известны в Калифорнии (месторождение Ломпок).

В результате кремненакопления образуются диатомиты, светлые (белые или желтые) тонкопористые породы, сложенные в основной своей массе микроскопическими панцирями диатомовых водорослей. Количество панцирей диатомей в 1 см^3 этих пород достигает нескольких миллионов.

Озерное кремненакопление локализовано прежде всего в умеренных и высоких широтах, а также в зоне активного вулканизма (вулканы поставляют дополнительное минеральное питание для диатомовых водорослей). Эти озера имеют следующие морфологические признаки: мелководность (в основном 3—4 м) и небольшая площадь акватории (исключающая активную миграцию вод).

Осадочные породы для биосферы в целом имеют важное значение как *аккумуляторы солнечной энергии*. Например, после разложения органических остатков солнечная энергия частично накапливается в земной коре в виде алломосилкатов. Диспергирование горных пород и минералов резко увеличивает поверхность частиц и, следовательно, их поверхностную энергию: песчинка объемом в 1 мм^3 имеет поверхность 6 мм^2 , ее превращение в коллоидную форму увеличивает количество частиц в 10^{12} , а их поверхность до $6 \cdot 10^4 \text{ мм}^2$ — в 60 000 раз.

Гидросфера. Важнейшим и необходимым для обеспечения жизнедеятельности всего живого на Земле является вода (прерывистая водная оболочка), совокупность которой в пределах планеты названа гидросферой. В виде Мирового океана она занимает 70,8 % всей земной поверхности (площадь водного зеркала Земли равняется $360,8 \cdot 10^6 \text{ км}^2$). Средняя толщина (мощность, глубина) гидросферы равна 3790 м, а масса (по разным данным) оценивается в $(1,5—2,5)10^{18} \text{ т}$

(1,5—2,5 млрд. км³), что составляет 1/800 общего объема Земли. Хотя значительная часть воды сосредоточена в морях и океанах (табл. 2.3), 90 % ее находится в горных породах и недрах Земли.

Гидросфера объединяет все химически не связанные воды (материковые — глубинные, почвенные или поверхностные, океанические и атмосферные), которые под влиянием солнечной энергии и сил гравитации переходят из одного фазового состояния в другое. Как особую оболочку рассматривают преимущественно воды, находящиеся на поверхности планеты. Но в связи с тем, что воды Земли находятся в непрерывном движении, они пронизывают другие ее оболочки — атмосферу, литосферу и биосферу.

Вода — своеобразный минерал, обеспечивающий существование живых организмов на Земле, так как входит в состав живых клеток и тканей.

Таблица 2.3

Запасы воды в четырех верхних геосферах Земли

| Геосфера и формы содержания воды | Количество, км ³ |
|--|-----------------------------|
| Гидросфера: | |
| <i>солёные воды</i> | |
| океан | 1 338 000 000 |
| озера | 85 400 |
| <i>пресные воды</i> | |
| ледники и постоянно залегающий снежный покров | 24 064 100 |
| озера | 91 000 |
| водохранилища | 3000 |
| реки | 2120 |
| болота | 11 470 |
| Земная кора | |
| Общее количество воды | 905 000 000 (млрд. т) |
| В том числе: | |
| химически связанной | 415 000 000 (млрд. т) |
| гигроскопической поровой и пластовой | 480 000 000 (млрд. т) |
| запасы воды в двухкилометровой зоне (гравитационной и капиллярной) | 23 400 000 |
| преимущественно пресные воды в зоне 0—600 м от земной поверхности | 10 536 000 |
| почвенная влага | 16 500 |
| подземные льды криолитозоны | 31 500 |
| Атмосферная вода | 12 900 |
| Биологическая вода | 1120 |

Сложнейшие реакции в живых организмах могут протекать только при наличии воды. Как среда обитания вода имеет ряд специфических свойств. Это — большая плотность, значительные перепады давления с глубиной, относительно низкое содержание свободного кислорода и сильное поглощение солнечных лучей. Кроме того, водоемы и отдельные их участки различаются солевым режимом, скоростью горизонтальных и вертикальных течений, содержанием взвешенных частиц или растворенных элементов. Поэтому систематика основных типов вод исходит из их деления по расположению относительно земной поверхности, температуре, окислительно-восстановительным параметрам, затем — по величине рН и минерализации, а также — по ионному составу [29].

Согласно такому делению все природные воды подразделяют *по расположению* в литосфере на *поверхностные, грунтовые и подземные*.

Мировой океан (относящийся к поверхностной гидросфере) включает в себя Тихий, Атлантический, Индийский и Северный Ледовитый океаны, обладает суммарной площадью 361 059 тыс. км². Уровень Мирового океана повышается в среднем за последние 100 лет на 1,2 мм в год за счет стекания с суши 430—570 км³ воды, без 100 %-ного возврата ее на поверхность с осадками. Наиболее вероятная причина этого явления — таяние материковых льдов, а также техногенный подъем подземных вод через скважины и их стекание в Мировой океан. Сейчас повышение уровня Мирового океана происходит со скоростью 1,5 мм/год с ежегодным увеличением объема вод на 543 км³ за счет усыхания озер суши (7 %), сокращения запасов подземных вод (18 %) и уменьшения мощности покровного оледенения (75 %).

Океан является глобальной биокосной системой, включающей 80 % поверхностной воды (поровые воды илов и горных пород составляют 18,8 %, ледникового покрова материков — 1,7 %, рек и озер — 0,002 %, атмосферы — 0,008 %). Основным источником океанической воды — атмосферные осадки, в 100 раз меньше дает речной сток и совсем ничтожное количество — естественный подземный сток. Главный рас-

ход воды в океанах происходит через поверхностное испарение, что оценивается как несколько большая величина, чем выпадение воды с осадками.

Растворенное минеральное или органическое вещество поступает главным образом с речным стоком. В растворенном состоянии в океанической воде содержатся газы, ионы, минеральные и органические компоненты. В ней также взвешены и живые организмы. Наличие над срединно-океанскими хребтами гидротерм создает над ними конвективную систему и поставляет в океан более $2/3$ Mn, Li, Rb, $1/3$ — $2/3$ Fe, Ca, Ba, V, Co.

Наряду с привнесением элементов происходит их вынос в живые организмы или осадки (минералы), а для Cl, Br, S и I — также вынос и в атмосферу. Так, основная масса терригенного материала речного стока осаждается по периферии континентов. В океане выделяются следующие широтные зоны седиментации: ледниковые, умеренно гумидные, аридные и экваториальные гумидные. Все же главную роль в удалении металлов из морской воды играет биогенная аккумуляция.

Среди поверхностных вод гидросферы весьма значительны болота, общая площадь которых на Земле составляет 2682 тыс. км² (2,1 % территории суши).

По второму классификационному признаку (*температуре*) выделяются холодные и слаботермальные, горячие и умеренно нагретые (40—100 °С), сильно нагретые (200—375 °С) и флюидные (более 375 °С) воды.

По *щелочно-кислотным условиям* природные воды разделяют на 4 класса.

К *сильнокислому классу* относятся воды с $pH < 3$. Они распространены широко, но, как правило, на небольших площадях. Их кислотность обычно обязана окислению пирита и других дисульфидов, приводящему к образованию свободной серной кислоты. В сернокислых водах легко мигрирует большинство металлов (Fe, Cu, Al, Zn и др.).

К *слабокислым* относятся воды, pH которых колеблется от 3 до 6,5. Чаще всего их кислотность обусловлена разложением органических веществ, обеспечивающим поступле-

ние в воду углекислого газа, фульвокислот и других органических соединений. Подобные воды на Земле распространены исключительно широко.

Нейтральные и слабощелочные воды имеют рН от 6,5 до 8,5. Их реакция часто определяется отношением бикарбоната кальция к углекислому газу. Эти воды менее благоприятны для миграции металлов, осаждавая последние в виде нерастворимых гидроксидов и карбонатов. Такие воды характерны в основном для морей и океанов, а также аридных территорий.

Сильнощелочные воды с рН $> 8,5$ обычно обязаны своей реакции присутствию соды. В щелочных содовых водах легко мигрируют кремнезем, гуматы, алюминий и молибден. В этих условиях такие элементы, как Cu, Zn, Y, редкие земли иттриевой группы, Sc, Zr и др., обладают высокой миграционной способностью, образуя карбонатные растворимые комплексы.

Поверхностные воды относятся, как правило, к окисленному типу и по величине рН подразделяются на сильнокислые, нейтральные и щелочные (включая и содовые).

Воды также необходимо подразделять согласно их *минерализации*.

Ультрапресные воды ($< 0,1$ г/л) широко распространены в природе, к ним относятся многие атмосферные осадки, поверхностные и грунтовые воды материков районов влажного климата, а также ледниковые воды. Эти воды не насыщены минеральными соединениями, следовательно, соли из них не осаждаются. Наоборот, они обладают повышенной растворяющей способностью.

Пресные воды (0,1—1 г/л) характерны для большинства рек и озер влажного климата, многих грунтовых, пластовых и трещинных вод.

Солоноватые воды (1—3 г/л) широко распространены в степях, пустынях и сухих саваннах, в артезианских бассейнах. Они насыщены карбонатами кальция и магния и частично — сульфатом кальция, повышенные концентрации которых приводят к карбонатизации и огипсованию почв.

К соевым водам (3—36 г/л) относятся океанические, морские, а также многие поверхностные и подземные воды материков. Это самые распространенные воды нашей планеты.

Рассолы (> 36 г/л) характерны для некоторых соленых озер (Мертвое море в Израиле), глубоких горизонтов пластовых или трещинных вод изверженных пород. Обычно в биосфере преобладают хлоридные рассолы.

Таблица 2.4

Основные ионы океанической воды
(на 1 кг воды при S = 35 ‰; Cl = 19,375 ‰)

| Компонент | Количество, г | Эквивалент | Компонент | Количество, г | Эквивалент |
|---|---------------|------------|--------------------------------|---------------|------------|
| <i>Катионы</i> | | | <i>Анионы</i> | | |
| Na ⁺ | 10,7638 | 0,46806 | Cl ⁻ | 19,3534 | 0,54582 |
| Mg ²⁺ | 1,2970 | 0,10666 | SO ₄ ²⁻ | 2,7007 | 0,05623 |
| Ca ²⁺ | 0,4080 | 0,02035 | HCO ₃ ⁻ | 0,1427 | 0,00234 |
| K ⁺ | 0,3875 | 0,00991 | CO ₃ ²⁻ | 0,07021 | 0,00234 |
| Sr ²⁺ | 0,0136* | 0,00031 | Br ⁻ | 0,00659 | 0,00083 |
| | | | F ⁻ | 0,0013 | 0,00007 |
| | | | H ₃ BO ₃ | 0,1265 | — |
| Сумма | — | 0,60529 | Сумма | — | 0,60529 |
| * В настоящее время содержание Sr в океанической воде принимается 8·10 ⁻⁴ ‰. | | | | | |

Значительное количество подземных вод существенно минерализовано (причем содержание солей может достигать 200—250 г/м³ воды). Воды в океанах и морях также минерализованы: их средняя соленость составляет 35 г солей на литр воды. Соленость океанической воды определяется присутствием ограниченного числа ионов (табл. 2.4), так как представляет собой природный раствор, в котором в различных концентрациях присутствуют все химические элементы (табл. 2.5).

Изменение содержания солей в поверхностных океанических водах имеет зональный характер: соленость достигает двух максимумов у тропиков и снижается у экватора, а также в сторону Северного и Южного полюсов. В вертикальном разрезе соленость океанических вод понижается с глубиной.

Таблица 2.5

Содержание растворимых форм химических элементов в Мировом океане

| Элемент | Средняя концентрация | | Отношение концентрации в сумме солей к кларку гранитного слоя | Общая масса, млн. т |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---|---------------------|
| | в воде, мкг/кг ² | в сумме солей, 1·10 ⁻⁴ % | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Cl ⁻ | 19 353 000,0 | 55,29·10 ⁴ | 3252,0 | 26 513 610 000 |
| SO ₄ ²⁻ | 2 701 000,0 | 7,71·10 ⁴ | — | 3 700 370 000 |
| S ⁻ | 890 000,0 | 2,54·10 ⁴ | 63,0 | 2 119 300 000 |
| HCO ₃ ⁻ | 143 000,0 | 0,41·10 ⁴ | — | 195 910 000 |
| Na ⁺ | 10 764 000,0 | 30,75·10 ⁴ | 14,0 | 14 746 680 000 |
| Mg ²⁺ | 1 297 000,0 | 3,71·10 ⁴ | 3,1 | 1 776 890 000 |
| Ca ²⁺ | 408 000,0 | 1,16·10 ⁴ | 0,5 | 558 960 000 |
| K ⁺ | 387 000,0 | 1,11·10 ⁴ | 0,4 | 530 190 000 |
| Br | 67 300,0 | 1922,9 | 874,0 | 92 201 000 |
| Sr | 8100,0 | 231,4 | 1,0 | 11 097 000 |
| B | 4450,0 | 127,1 | 13,0 | 6 096 500 |
| SiO ₂ | 6200,0 | 176,0 | — | 8 404 000 |
| Si | 3000,0 | 85,0 | 0,00028 | 4 110 000 |
| F | 1300,0 | 37,1 | 0,05 | 1 781 000 |
| N | 500,0 | 14,0 | 0,54 | 685 000 |
| P | 88,0 | 2,5 | 0,0031 | 120 560 |
| I | 64,0 | 1,8 | 3,6 | 87 680 |
| Ba | 21,0 | 0,57 | 0,00084 | 28 770 |
| Mo | 10,0 | 0,29 | 0,22 | 13 700 |
| Zn | 5,0 | 0,14 | 0,0027 | 6850 |
| Fe | 3,4 | 0,097 | 0,0000027 | 4658 |
| U | 3,3 | 0,094 | 0,036 | 4521 |
| As | 2,6 | 0,074 | 0,039 | 3562 |
| Al | 1,0 | 0,029 | 0,00000036 | 1370 |
| Ti | 1,0 | 0,029 | 0,0000088 | 1370 |
| Cu | 0,90 | 0,025 | 0,0011 | 1233 |
| Ni | 0,50 | 0,014 | 0,00054 | 685 |
| Mn | 0,40 | 0,011 | 0,000016 | 548 |
| Cr | 0,20 | 0,0057 | 0,00017 | 274 |
| Hg | 0,15 | 0,0043 | 0,130 | 206 |
| Cd | 0,11 | 0,0031 | 0,019 | 151 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|-------|---------|-----------|------|
| Ag | 0,10 | 0,0029 | 0,065 | 137 |
| Se | 0,09 | 0,0026 | 0,019 | 123 |
| Co | 0,03 | 0,00086 | 0,0012 | 41,1 |
| Ga | 0,03 | 0,00086 | 0,0012 | 41,1 |
| Pb | 0,03 | 0,00086 | 0,0012 | 41,1 |
| Zr | 0,026 | 0,00070 | 0,0000041 | 34,0 |
| Sn | 0,020 | 0,00057 | 0,00021 | 27,4 |
| Au | 0,011 | 0,00031 | 0,26 | 15,1 |

По *ионному составу* в настоящее время выделено 615 классов вод. Для характеристики типов вод А.И. Перельман предложил использовать *геохимическую формулу вод*, в которой указываются преобладающие катионы и анионы и далее в числителе — ионы, находящиеся в избытке, а в знаменателе — в дефиците (по сравнению с обычным фоном).

Поверхностные воды, в частности озера, целесообразно подразделять и по характеру минеральных осадков на [24]:

- аккумуляторы наносов;
- концентраторы растворенных минеральных веществ;
- накопители органических веществ.

В озерах, концентраторах растворенных минеральных веществ (железо-, кальций- или кремнийнакапливающие озера), накопление этих веществ может происходить под действием как абиогенных (выпаривание или вымораживание), так и биогенных (концентрация элементов живыми веществами) процессов. Что касается озер, накопителей органического вещества, то наиболее типичными в этом отношении являются мелководные (глубиной 2—10 м), небольшие по площади, слабо проточные или непроточные, защищенные от ветра озера лесной зоны умеренного климата.

Атмосфера. Атмосферой называют газовую оболочку Земли, имеющую массу $55,15 \cdot 10^{15}$ т (90 % которой сосредоточено в слое до 16 км). Подобно твердому телу Земли воздушная оболочка также не представляет собой идеальной сферы: ее форма несимметрична относительно центра тяжести пла-

неты. В центре эклиптики атмосфера имеет выступ в направлении, противоположном Солнцу. Длина этого выступа (газового хвоста Земли) составляет около $120 \cdot 10^6$ м. По форме атмосфера Земли близка к эллипсоиду вращения, большая полуось которого в 1,2 раза протяженнее малой.

В состав атмосферы принято включать ту область вокруг Земли, в которой газовая среда вращается вместе с планетой как единое целое. С учетом особенностей рельефа Земли и распределения температуры по ее поверхности масса атмосферы составляет $5,27 \cdot 10^{18}$ кг. В теплое время года масса атмосферы на 10^{10} кг больше, чем в холодное. Это обусловлено активизацией биохимических процессов, сопровождаемых выделением газов. В результате тепло- и массообмена масса атмосферы также имеет и сезонное перераспределение. С января по июль из Северного полушария в Южное переходит около $4 \text{—} 10^{15}$ кг воздуха. Во время муссонных тропических ветров (вторая половина года) около 0,078 % массы атмосферы совершает обратный путь. По высоте масса атмосферы распределена также неравномерно: около 50 % сосредоточено в нижнем 5-километровом слое, 75 % — до высоты 10 км, 95 % — до 20 км и примерно 99 % находится в нижнем 30-километровом слое.

В биосфере газы встречаются в четырех основных формах:

- свободные газы (в наземной и подземной атмосфере);
- газы, растворенные в водах и нефти;
- адсорбированные и окклюдированные горными породами;
- газы в живых организмах.

Основными компонентами газов магматических пород являются азот, двуокись углерода и водород, примесями — метан и его гомологи, гелий, аргон и другие редкие газы. По ориентировочным расчетам, газы составляют лишь 0,05 % от массы литосферы и 0,6 % от гидросферы. Однако роль газов в биосфере не пропорциональна их массе, так как определяющее значение имеет их высокая подвижность в любых геосферах.

Состав атмосферы формировался параллельно с развитием Земли в специфических условиях, к которым относятся гравитационное (удерживающее основную массу воздуха) и магнитное (предохраняющее ее от солнечной радиации) поля, а также вращение планеты (обеспечивающее благоприятный тепловой режим).

Биогенное образование основных газов атмосферы (прежде всего кислорода и азота) было установлено еще В.И. Вернадским [5]. В настоящее время выясняется биогенное происхождение и других газов, входящих в состав атмосферы. Так, 50 % всего водорода атмосферы было образовано также в результате деятельности живого вещества [24]. Это обусловлено еще тем, что атмосфера находится в равновесии с почвами, где бактериями (часто вызывающими скопления горючих газов) формируется состав почвенного воздуха и, следовательно, имеющими влияние и на атмосферу в целом. Также доказано образование атмосферной окиси углерода в результате биогенных процессов. В частности, в океанических водах (особенно в зонах скопления водорослей) содержание окиси углерода в сотни раз превышает концентрацию, равновесную с атмосферой. А растения суши, наоборот, поглощают окись углерода.

Роль газов в биосфере зависит от их кларков и химической активности. Активные элементы с высокими кларками образуют *ведущие газы* (в первую очередь кислород, углекислый газ, водяной пар, сероводород, метан и водород). Они, растворяясь в водах, определяют условия миграции многих элементов, становясь «геохимическими диктаторами». Поэтому по составу ведущих газов именуются важнейшие геохимические обстановки в водах — окислительная, сероводородная и др.

Атмосфера Земли состоит из концентрических слоев: тропосферы, стратосферы, ионосферы, термосферы и экзосферы (рис. 2.11). Так как воздух сжимаем, то в направлении снизу вверх его плотность постепенно (но не монотонно) уменьшается и верхний разреженный слой без четкой границы переходит в межпланетное пространство.

Тропосфера — нижняя часть атмосферы, нагреваемая Солнцем. Ее высота определяется интенсивностью вертикальной конвекции — восходящих и нисходящих потоков воздуха, вызванных его нагреванием.

В экваториальных широтах конвекционные потоки поднимаются до высоты 17 км, в умеренных — до 11, а в полярных — до 8 км (табл. 2.6). За счет адиабатического охлаждения поднимающегося воздуха его температура снижается в среднем на 1 °С на каждые 6 км. Поэтому в верхней границе температура тропосферы снижается (над экватором до -70 °С, над Северным полюсом до -46...-65 °С).

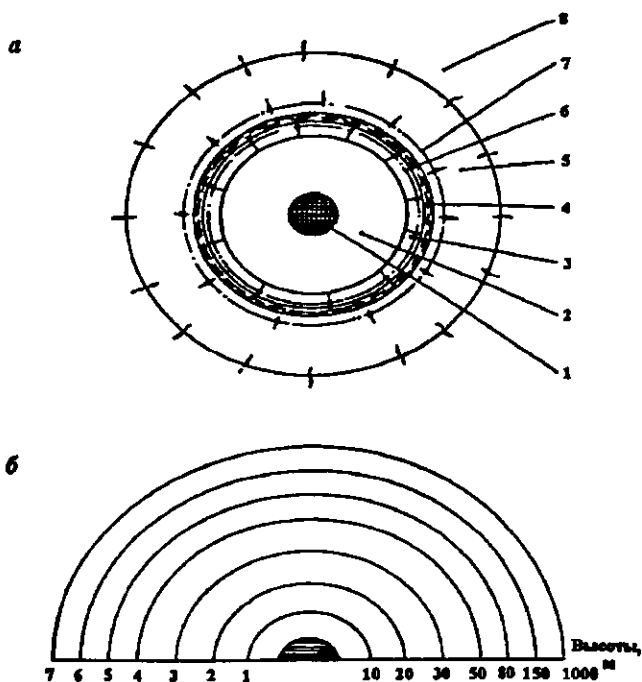


Рис. 2.11. Взаимоотношения элементов строения Земли:

a — взаимосвязь структур: 1 — ядро; 2 — магма; 3 — литосфера; 4 — гидросфера; 5 — атмосфера; 6 и 7 — соответственно нижняя и верхняя границы биосферы; 8 — космос;
б — строение атмосферы: 1 — тропосфера; 2 — граница биосферы; 3 — озоновый экран; 4 — стратосфера; 5 — мезосфера; 6 — термосфера; 7 — экзосфера

Таблица 2.6

Деление атмосферы в зависимости от расположения слоев

| Признаки деления | Слой атмосферы | Средняя высота нижней и верхней границ слоя, км |
|---|---|---|
| Вертикальное распределение | Тропосфера Стратосфера Мезосфера Экзосфера | 0—11 11—50 50—90 Выше 450 |
| Состав атмосферного воздуха: соотношение газов | Гомосфера Гетеросфера | 0—95 Выше 95 |
| Концентрация ионов | Атмосфера Ионосфера | 0—50 Выше 50 |
| Взаимодействие атмосферы с земной поверхностью | Пограничные (слой трения) Свободная атмосфера | 0—1 Выше 1 |
| Влияние на летательные аппараты | Плотные слои Околосферное космическое пространство | 0—150 Выше 150 |

Над тропосферой, после тонкого (около 1 км) переходного слоя — тропопаузы, располагается стратосфера. Она начинается на высотах, где преимущественно прекращаются конвекционные потоки (хотя обмен воздуха между тропо- и стратосферой все еще происходит).

В стратосфере содержится менее 20 % воздуха атмосферы. Падение температуры в нижней части стратосферы прекращается. Примерно до 20 км температура постоянна, составляя около $-60...-70$ °С. Выше (до 55 км) температура повышается на несколько градусов, так как воздух прогревается солнечными лучами.

Озоновый экран является верхней границей распространения организмов и теплового влияния земной поверхности. Озон поглощает солнечную радиацию на ультрафиолетовом участке спектра. В озоносфере происходит интенсивная вертикальная и горизонтальная циркуляция воздуха, вызванная неоднородным распределением тепла.

Постоянный газовый состав, удерживаемый в атмосфере до высоты 100 км, называется *гомосферой*. Над ней происходит диссоциация молекул газа на атомы ультрафиолетовой и корпускулярной радиацией Солнца. Выше 100 км атмосферу называют *гетеросферой*.

Выше 50 км находится *мезосфера*, которая завершается мезопаузой. Над ней расположена *термосфера*, простирающаяся до 800—1000 км. В этих пределах температура повышается: на высоте 150 км — до 220 °С, на отметке 600 км — до 1500 °С. Термосфера также поглощает рентгеновское излучение, защищая тем самым жизнь на Земле от вредного воздействия Солнца. Тропосферу и нижнюю стратосферу называют нижней, а более высокие слои — верхней атмосферой. На высотах 20—30 км слои космической пыли образуют облака.

Границы этих слоев не остаются постоянными: они изменяются главным образом в зависимости от широты места и времени года. Особенно это относится к слоям атмосферы, выделяемым по условию вертикального распределения температуры. Так, толщина тропосферы изменяется от 16—18 км над экватором до 8—10 км (иногда до 6 км) в полярных широтах.

Атмосфера, помимо функции вместилища и обеспечения жизни на планете, играет и роль защитной оболочки (механической, температурной, электромагнитной и т.д.). Так, благодаря наличию атмосферы многие природные космические тела не достигают поверхности Земли, сгорая в верхних слоях воздуха (за счет разогрева твердого тела астероида о газ при столкновении).

В первые безвоздушные стадии развития Земли космические тела беспрепятственно проникали на земную поверхность (подобное мы можем наблюдать на поверхности Луны): на Земле обнаружено более 100 астроблем (кольцевых структур мест падения гигантских метеоритов). Существует предположение, что залив Св. Лаврентия в Канаде является остатком гигантского ударного кратера диаметром около 290 км и глубиной порядка 6 км [41]. Сейчас на земную поверхность могут проникать только весьма крупные метеориты.

Кроме этого Солнце, в недрах которого царит температура порядка $13 \cdot 10^6$ °С, а на поверхности — примерно 6000 °С, каждую секунду излучает $3,8 \cdot 10^{26}$ Дж энергии. Хотя на Землю попадает лишь одна двухмиллиардная доля этой энергии, но и ее достаточно для угнетения (при соответствующих условиях) современных форм жизни. Солнце посылает на Землю два типа излучения: электромагнитные волны длиной от миллионных долей миллиметра до десятков километров и потоки заряженных частиц-корпускул, движущихся со скоростью около 1000 км/с и через сутки или двое достигающих Земли. Часть космического излучения на Землю приходит из-за пределов Солнечной системы.

От большей части этих излучений биосфера Земли надежно защищена сложной системой различных физических оболочек, через которые проникают только видимый свет, небольшая доля прилегающих к нему ультрафиолетовых и инфракрасных лучей и узкий участок радиоволн (рис. 2.12). Озоновый пояс Земли, расположенный на высоте 10—50 км

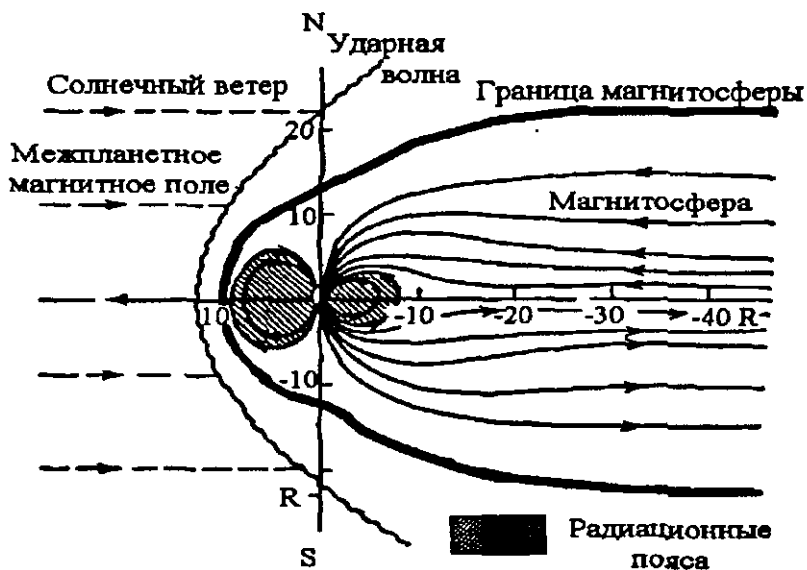


Рис. 2.12. Магнитосфера Земли (R — расстояние в радиусах Земли)

поглощает значительную часть ультрафиолетовой радиации Солнца, предохраняя биосферу Земли от проникновения избытка биологически активной радиации. В атмосфере Земли задерживаются и корпускулы, представляющие собой главным образом ядра водорода (протоны) и гелия (альфа-частицы), а также незначительное количество ядер тяжелых элементов.

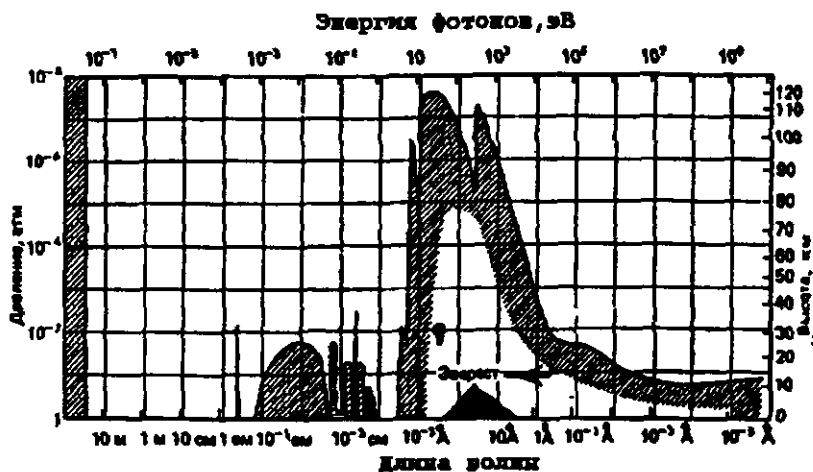


Рис. 2.13. Высота, на которой излучение различных длин ослабляется вышележащими слоями земной атмосферы в 10 раз. (Кроме оптического «око»», расположенного в интервале 2900—240 000 Å, атмосфера прозрачна для радиоволнового излучения в интервале длин волн от 1 до 20 см. Излучение в остальных участках спектра полностью или почти полностью поглощается в атмосфере Земли)

Существенно помогает атмосфере *магнитное поле* (ось которого направлена под углом 12° к оси вращения планеты), вызывающее образование ионосферы и двух поясов заряженных частиц вокруг Земли (рис. 2.13).

Величина этого поля различна во времени: от наших дней в глубь веков магнитное поле плавно нарастает, достигая максимума примерно в начале нашей эры (в 5 раз больше современного). Затем поле начинает убывать, вплоть до IV тыс. до н. э.

Благодаря магнитному полю наша планета окружена ионосферой (слоем разреженного ионизированного газа) на высотах от 70 до 500 км.

Внутренний экваториальный пояс с наибольшей плотностью частиц расположен на расстоянии около 3600 км от поверхности планеты. Он опоясывает Землю кольцом от 35° с. ш.

Внешний пояс, состоящий в основном из электронов, распространяется до широт 65°. Положение в пространстве, объем и плотность частиц в нем сильно меняются, а расстояние от Земли колеблется в пределах 25—50 тыс. км. Главное защитное свойство этих поясов в том, что они выполняют роль ловушек для идущих от Солнца частиц с большими энергиями.

Магнитное поле, отклоняя их от перпендикулярного направления на Землю, вовлекает в кругооборот вокруг планеты. От экватора к полюсу число попадающих на Землю заряженных частиц возрастает примерно на 10 %. В стратосфере этот широтный эффект в несколько раз больше, чем на уровне моря.

На верхней границе атмосферы интенсивность космических лучей в районе экватора в 5 раз меньше, чем в полярных областях. Это обусловлено отсутствием постоянных поясов заряженных частиц над полярными областями.

На основе изложенного выше можно заключить, что *живое вещество биосферы* подразделяется на растения, животные, грибы и микроорганизмы.

План лекции

1. Объяснить происхождение планеты Земля, описать виды ее эволюции и возникающие в результате этого особенности.

2. Охарактеризовать строение биосферы, с выделением литосферы (почв, кор выветривания, илов и осадочных пород), гидросферы и атмосферы.

3. Объяснить взаимосвязь климатической зональности и макрообъектов биосферы.

4. Раскрыть характеристику живого вещества биосферы.

Контрольные вопросы-задания

1. Опишите космическую, геологическую, океаническую и биосферную стадии эволюции Земли.

2. На что и по какому механизму влияет гелиоцентричное расположение планет?

3. Что такое «парниковый эффект»? Какие его виды Вам известны?

4. Перечислите главные оболочки Земли, основные их составляющие и параметры.

5. Объясните, почему все оболочки Земли должны исследоваться совместно.

6. Чем ограничивается литосфера? Опишите ее основные характеристики и параметры.

7. Что такое биокосное вещество?

8. Какие типы почв Вам известны и из каких горизонтов они состоят?

9. Что такое «почвенный профиль»?

10. По какому механизму происходит почвообразование в биосфере и чему подчиняется размещение почв?

11. Какие классы почв Вам известны?

12. Как происходит перераспределение химических элементов в почвах?

13. Объясните, как происходит накопление информации в почвах?

14. Раскройте механизм концентрации металлов в почвах.

15. Как влияет на биосферу климат?

16. Перечислите объекты в биосфере, служащие аккумуляторами солнечной энергии, и опишите механизм ее аккумуляции.

17. Объясните условия возникновения окислительно-восстановительной зональности природных макрообъектов.

18. Охарактеризуйте взаимосвязь между климатической зональностью и почвами, корами выветривания и илами.

19. Перечислите и охарактеризуйте существующие типы кор выветривания.

20. На какие классы, типы и виды делятся природные воды?

21. Дайте определение атмосферы Земли и перечислите ее основные газы.

22. На какие слои и на каких высотах подразделяется атмосфера Земли?

23. Охарактеризуйте состав биосферы.

Глава 3

Элементный химический состав биосферы

•
**3.1. Основные понятия
и определения**

•
**3.2. Анализ геохимии
элементов**

•
**3.3. Геохимия и
распределение живого
вещества в биосфере**

План лекции

•
**Контрольные вопросы-
задания**

Горняку нельзя быть не сведущим во многих других искусствах и науках. Прежде всего в философии, дабы он мог знать происхождение и природу мира, ибо благодаря этому сможет находить более легкий и удобный путь к недрам Земли и получать более обильные плоды.

Г. Агрикола

3.1

Основные понятия и определения

На функционирование биосферы в целом существенное влияние оказывает химический состав ее слагающих оболочек. Самый первый подход к определению химического состава *литосферы* предполагает использование данных по средней плотности планеты.

Методами геофизического обследования установлено, что средняя плотность Земли составляет $5,52 \text{ г/см}^3$, а пород только земной коры (верхней части литосферы) — $2,8 \text{ г/см}^3$. Отсюда был сделан вывод о повышенной плотности вещества земных глубин. Это может быть связано как с изменением состава (например, с увеличением удельного содержания тяжелых металлов — Fe, Ni), так и с фазовыми превращениями легких минералов (переход легкой разновидности кварца SiO_2 с плотностью $2,65 \text{ г/см}^3$ в ее тяжелую полиморфную форму — *стишовит* с плотностью $4,35 \text{ г/см}^3$ и т.д.).

Следующим шагом является подсчет фоновых концентраций (т.е. определяемых естественно происходящими процессами) элементов, позволяющий впоследствии количественно охарактеризовать степень загрязнения различных территорий.

Так, с 1940 г. концентрации Pb, Zn и SO₄ в ледниках Гренландии увеличились в 2—3 раза, в то время как в антарктических ледниках существенных изменений нет.

Аналогичные соотношения характерны и для загрязнения *атмосферы* в различных районах земного шара. Среднесуточная транспортировка в воздухе аэрозольных частиц варьирует от 100 кг/км² на плато Колорадо на западе США до 5 кг/км² над Новой Зеландией, 1 кг/км² над Антарктидой и 0,006—0,06 кг/км² над Арктикой. Над черноземной полосой России эта величина составляет около 10 кг/км².

Количественную распространенность химических элементов в земной коре в 1889 г. впервые установил американский ученый Ф.У. Кларк. Спустя 40 лет, продолжая исследования в этой области, российский академик А.Е. Ферсман ввел термин «*кларк*», под которым предложено было понимать среднее содержание химического элемента в земной коре, какой-либо ее части, Земле в целом, в планетах и других космических объектах. Выражается этот показатель в единицах массы (процентах, г/т и др.) или в атомных процентах. Впоследствии величины кларков послужили базой при расчетах *предельно допустимых концентраций* загрязнителей.

Основной геохимический закон — абсолютные количества химических элементов, т. е. кларки химических элементов, зависят от строения атомных ядер, а распределение элементов, связанное с их миграцией, — от наружных электронов. Таким образом, кларки элементов в земной коре зависят как от структуры атомного ядра, так и от строения электронных оболочек, определяющих химические свойства атомов, однако ведущая роль все же принадлежит ядерным свойствам — устойчивости ядер атомов, содержанию в них четного числа протонов и нейтронов, особенно кратного 4.

По направлению к земной поверхности увеличивается число минеральных видов. Так, считается, что *ядро Земли* представлено двумя основными элементами — железом и никелем (хотя возможны в небольших количествах и дополнительные включения). В *мантис* число минеральных видов уже превышает 10 [43]. Хотя *земная кора* и характеризуется резким преобладанием базальтов и гранитов (разделенных

промежуточным диоритовым слоем), в ней число разновидностей минералов уже достигает 4000.

В настоящее время установлено (табл. 3.1), что почти половина твердой земной коры состоит из одного элемента — кислорода. Таким образом, земная кора — это кислородсодержащее вещество. На втором месте стоит кремний, на третьем — алюминий. В сумме они составляют около 85%. Если к этому значению добавить содержание Fe, Ca, Na, K, Mg и Ti, то получим примерно 99,48%, т.е. практически почти всю массу земной коры. Остальные 80 химических элементов занимают менее 1%.

Таблица 3.1

Средний химический состав земной коры (до глубины 10—20 км)

| Элемент | Содержание, % по массе | Элемент | Содержание, % по массе |
|----------|------------------------|---------|------------------------|
| Кислород | 49,13 | Кальций | 2,35 |
| Кремний | 26,00 | Магний | 2,35 |
| Алюминий | 7,45 | Водород | 1,00 |
| Железо | 4,20 | Титан | 0,61 |
| Кальций | 3,25 | Углерод | 0,35 |
| Натрий | 2,40 | Хлор | 0,20 |

Элементы, кларки которых не превышают 0,01—0,0001%, называются *редкими*. Если они обладают слабой способностью к концентрации, то именуются редкими *рассеянными* (Be, In, Ra, I, Hf, Re, Sc и др.). Например, кларки урана и бериллия почти одинаковы ($2,5 \cdot 10^{-4}$ и $2,1 \cdot 10^{-4}$ %), но U — просто редкий элемент (так как установлены его месторождения), а Be — редкий рассеянный (он почти не концентрируется в земной коре и известен всего лишь один собственный минерал этого элемента). Для последующего изучения взаимодействия человека с биосферой также важно понятие «микроэлементы», под которым понимаются элементы, содержащиеся в данной системе в малых количествах (порядка 0,01% и менее). Например, Al — микроэлемент в организмах и макроэлемент в глиноземе.

Поведение химических элементов в биосфере определяется как их химическими свойствами, так и величиной кларка в

земной коре. Чрезвычайно наглядным является сравнение роли элементов с различными кларками, но близких по свойствам, например, серы ($4 \cdot 10^{-2} \%$) и селена ($5 \cdot 10^{-6} \%$): у них одинаковые валентные состояния и аналогичные соединения с H, SO_4 и другими веществами. Однако сера — ведущий элемент многих процессов биосферы, а также состава руд Pb, Zn, Cu, Cd и других металлов, вследствие чего она образует большое количество минералов, в то время как селен заметной роли в биосфере не играет, а его минералов — очень мало.

Еще одной составляющей биосферы, геохимия которой важна для изучения, является *тропосфера* (нижняя часть атмосферы), где до высоты 16 км над уровнем моря содержится около 80 % всех атмосферных газов с суммарной массой $5,27 \cdot 10^{21}$ г. Воздух атмосферы состоит из 78,08 % азота, 20,95 % кислорода, 0,93 % аргона, 0,03 % углекислого газа и ряда других газов в меньших количествах (в целом 0,02 %).

Весь *кислород* атмосферы (имеющий массу $1,2 \cdot 10^{21}$ г) практически был образован растениями только за время существования биосферы. Это подтверждается тем фактом, что, например, минерал уранит UO_2 встречается в породах только старше 2 млрд. лет (так как в присутствии кислорода он окисляется до U_3O_8 и растворяется водой). В то же время в слоях литосферы моложе 2 млрд. лет залегают преимущественно красноцветы — обогащенные оксидами железа глины (другими словами, породы с элементами, уже прошедшими через взаимодействие с кислородом). В настоящее время атмосфера содержит приблизительно 10^{15} т кислорода. Столько же проходит через живое вещество: животные поглощают кислород и выделяют углекислый газ, который в дальнейшем разлагают растения, возмещая убыль кислорода. Эти процессы поддерживают газовый режим атмосферы в состоянии *равновесия*.

В атмосфере представлен также и *озон* O_3 , который образуется при расщеплении молекул кислорода O_2 ультрафиолетовыми лучами и электрическими разрядами. Озон — неустойчивый газ и сильный окислитель. У земной поверхности его количество ничтожно мало и увеличивается после грозовых разрядов. Главная масса этого газа сосредоточена в вы-

сотах от 10 до 60 км (на высоте 22—25 км он создает озоновый экран). Но и там его количество невелико: при плотности воздуха, равной приземной атмосфере, он образовывал бы слой мощностью всего 2,5—5,2 мм.

Азот принадлежит к числу важнейших биогенных элементов, входя в состав белков и нуклеиновых кислот. В атмосфере азот играет роль разбавителя кислорода, регулируя темп окисления, скорость и интенсивность биогеохимических процессов.

Углекислый газ поступает в атмосферу как из недр Земли, так и в результате горения, дыхания животных и разложения органических соединений, а также техногенных процессов. Фотосинтез растений и дыхание животных поддерживают в атмосфере относительное равновесие кислорода и углекислого газа. Все же вертикальное и горизонтальное распределение CO_2 над материками и океанами, над участками с растительностью и без нее неодинаково. В целом основная концентрация CO_2 обнаруживается на высоте 1—2 км над сушей и 0,5—2 км над океанами. Над поверхностью морей и особенно океанов среднее содержание CO_2 по объему составляет не более 0,02—0,015 %. В промышленных регионах доля CO_2 увеличивается по сравнению с океанами и лесными массивами. В настоящее время за счет сжигания топлива количество углекислого газа в атмосфере резко растет и уже достигает 0,03 %.

Углекислый газ атмосферы играет весьма важную роль, образуя живое вещество планеты. К тому же вместе с водяным паром углекислый газ пропускает к земной поверхности световую радиацию (ультрафиолетовое излучение) и задерживает длинноволновое тепловое излучение. Поэтому увеличение CO_2 ведет к потеплению климата на Земле, таянию льдов и повышению уровня Мирового океана.

В атмосферу попадают и более редкие газы. Например, важнейшим источником атмосферного *аммиака* является почва. Находящиеся в почве органические вещества разрушаются определенными бактериями, и одним из конечных продуктов этого процесса является аммиак. Активность бактерий, приводящая к образованию аммиака, зависит в первую оче-

редь от температуры и влажности почвы. К существенным источникам атмосферного аммиака следует отнести также производство и внесение в землю искусственных удобрений.

Обязательная составная часть воздуха — *вода*, сосредоточена в газовой, жидкой и твердых фазах, преимущественно в нижнем пятикилометровом слое тропосферы. Водяной пар в атмосферу поступает и при испарении вод океанов и морей, рек, озер и болот, почвогрунтов и растительности. Ежегодно испаряется около $577 \cdot 10^3$ км³ воды (85,8 % этого количества — из океанов и морей). В итоге среднее содержание влаги в атмосфере составляет около $14 \cdot 10^3$ км³. Причем основная масса водяного пара сосредоточена в нижних слоях атмосферы (до высоты 2—3 км).

Нижние слои воздуха содержат минеральную и вулканическую пыль, продукты горения, семена и пыльцу растений, а также мельчайшие частицы морской соли, попадающие в воздух с ветром.

Из атмосферы ряд компонентов постоянно удаляется. Это в первую очередь кислород (при процессах окисления железа, марганца, соединений серы; при образовании воды и т.д.), диоксид углерода (образование угля, нефти, рассеянного в осадочных породах органического вещества, карбонатов), азот (за счет жизнедеятельности ряда бактерий и образования оксидов азота), водород и гелий (выход за пределы гравитационного поля Земли). Так, гелия в атмосфере осталось меньше 1/10 от его количества, выделившегося при радиоактивном распаде в течение 10^9 лет [2].

Компоненты, удаляемые из атмосферы в литосферу, образуют соединения, являющиеся, как правило, составными частями осадочных пород.

Кроме земной коры и атмосферы в биосферу входит и вещество *гидросферы* (состоящей из материковых и океанических вод). Общая масса всех вод Земли составляет около $1,5 \cdot 10^{24}$ г, причем подавляющая часть (94%) свободных вод — это соленые воды Мирового океана. Океан покрывает примерно 71 % земной суши, в его водах растворено много разнообразных солей (средняя соленость океана составляет 35 г/л), а также газов. Растворенные в океане газы находятся в при-

поверхностном слое в динамическом равновесии с атмосферой. При этом углекислого газа в водах содержится $1,4 \cdot 10^{20}$ г, что в 60 раз больше, чем в атмосфере, а кислорода — $8 \cdot 10^{18}$ г — в 130 раз меньше.

Таблица 3.2

Химический состав вод Мирового океана

| Элемент | Содержание, % по массе | Элемент | Содержание, % по массе |
|----------|---------------------------|----------|---------------------------|
| Кислород | 85,7 | Кальций | 0,04 |
| Водород | 10,8 | Калий | 0,038 |
| Хлор | 1,9 | Бром | $8,5 \cdot 10^{-3}$ |
| Натрий | 1,07 | Углерод | $2,8 \cdot 10^{-3}$ |
| Магний | 0,14 | Стронций | $0,8 \cdot 10^{-3}$ |
| Сера | 0,088 | Бор | $4,6 \cdot 10^{-4}$ |

Таким образом, в состав океанической воды входят: О — 85,7%; Н — 10,8%; Cl — 1,9% и Na — 1,07%, что составляет в сумме 99,5% (табл. 3.2). Это означает, что в химическом отношении основная часть гидросферы является водородно-кислородной средой. Кислород в воду океанов и морей поступает из атмосферы, а также в результате фотосинтеза водорослей. Его содержание в верхнем 10—150-метровом слое колеблется от 4 мг/дм³ у экватора до 7—8 мг/дм³ в полярных районах. С глубиной содержание кислорода уменьшается до 2,5—3 мг/дм³.

В водах морей и океанов содержится более 40 химических элементов. Кроме того, в морской воде содержится огромное количество растворенных газов (N₂, H₂S, CH₄ и др.), различных веществ и твердых минеральных частиц. Всего в океанах и морях растворено около $4,65 \cdot 10^{18}$ кг твердых веществ.

Главным поставщиком азота в гидросферу является атмосфера [22]. В морской воде он содержится в свободном состоянии и его количество с ростом температуры, а также повышением концентрации солей уменьшается. Свободного CO₂ в воде немного (0,51—0,44 см³ в 1 дм³ воды), но за счет содержания в химически связанном виде в карбонатах [CaCO₃ и CaHCO₃] его общее количество очень велико. Се-

редь от температуры и влажности почвы. К существенным источникам атмосферного аммиака следует отнести также производство и внесение в землю искусственных удобрений.

Обязательная составная часть воздуха — *вода*, сосредоточена в газовой, жидкой и твердых фазах, преимущественно в нижнем пятикилометровом слое тропосферы. Водяной пар в атмосферу поступает и при испарении вод океанов и морей, рек, озер и болот, почвогрунтов и растительности. Ежегодно испаряется около $577 \cdot 10^3$ км³ воды (85,8 % этого количества — из океанов и морей). В итоге среднее содержание влаги в атмосфере составляет около $14 \cdot 10^3$ км³. Причем основная масса водяного пара сосредоточена в нижних слоях атмосферы (до высоты 2—3 км).

Нижние слои воздуха содержат минеральную и вулканическую пыль, продукты горения, семена и пыльцу растений, а также мельчайшие частицы морской соли, попадающие в воздух с ветром.

Из атмосферы ряд компонентов постоянно удаляется. Это в первую очередь кислород (при процессах окисления железа, марганца, соединений серы; при образовании воды и т.д.), диоксид углерода (образование угля, нефти, рассеянного в осадочных породах органического вещества, карбонатов), азот (за счет жизнедеятельности ряда бактерий и образования оксидов азота), водород и гелий (выход за пределы гравитационного поля Земли). Так, гелия в атмосфере осталось меньше 1/10 от его количества, выделившегося при радиоактивном распаде в течение 10^9 лет [2].

Компоненты, удаляемые из атмосферы в литосферу, образуют соединения, являющиеся, как правило, составными частями осадочных пород.

Кроме земной коры и атмосферы в биосферу входит и вещество *гидросферы* (состоящей из материковых и оксанических вод). Общая масса всех вод Земли составляет около $1,5 \cdot 10^{24}$ г, причем подавляющая часть (94%) свободных вод — это соленые воды Мирового океана. Океан покрывает примерно 71 % земной суши, в его водах растворено много разнообразных солей (средняя соленость океана составляет 35 г/л), а также газов. Растворенные в океане газы находятся в при-

поверхностном слое в динамическом равновесии с атмосферой. При этом углекислого газа в водах содержится $1,4 \cdot 10^{20}$ г, что в 60 раз больше, чем в атмосфере, а кислорода — $8 \cdot 10^{18}$ г — в 130 раз меньше.

Таблица 3.2

Химический состав вод Мирового океана

| Элемент | Содержание, % по массе | Элемент | Содержание, % по массе |
|----------|---------------------------|----------|---------------------------|
| Кислород | 85,7 | Кальций | 0,04 |
| Водород | 10,8 | Калий | 0,038 |
| Хлор | 1,9 | Бром | $8,5 \cdot 10^{-3}$ |
| Натрий | 1,07 | Углерод | $2,8 \cdot 10^{-3}$ |
| Магний | 0,14 | Стронций | $0,8 \cdot 10^{-3}$ |
| Сера | 0,088 | Бор | $4,6 \cdot 10^{-4}$ |

Таким образом, в состав океанической воды входят: О — 85,7%; Н — 10,8%; Cl — 1,9% и Na — 1,07%, что составляет в сумме 99,5% (табл. 3.2). Это означает, что в химическом отношении основная часть гидросферы является водородно-кислородной средой. Кислород в воду океанов и морей поступает из атмосферы, а также в результате фотосинтеза водорослей. Его содержание в верхнем 10—150-метровом слое колеблется от 4 мг/дм³ у экватора до 7—8 мг/дм³ в полярных районах. С глубиной содержание кислорода уменьшается до 2,5—3 мг/дм³.

В водах морей и океанов содержится более 40 химических элементов. Кроме того, в морской воде содержится огромное количество растворенных газов (N₂, H₂S, CH₄ и др.), различных веществ и твердых минеральных частиц. Всего в океанах и морях растворено около $4,65 \cdot 10^{18}$ кг твердых веществ.

Главным поставщиком азота в гидросферу является атмосфера [22]. В морской воде он содержится в свободном состоянии и его количество с ростом температуры, а также повышением концентрации солей уменьшается. Свободного CO₂ в воде немного (0,51—0,44 см³ в 1 дм³ воды), но за счет содержания в химически связанном виде в карбонатах [CaCO₃ и CaHCO₃] его общее количество очень велико. Се-

родород H_2S и метан CH_4 вод гидросферы образуются в процессе разложения остатков органических веществ.

Отношение кларков химических элементов в океанической воде к кларкам земной коры называют *талассофильностью элементов*. Она максимальна для Cl (111), H (71), Br (30) и мала для Fe ($4,3 \cdot 10^{-8}$), Si ($6,8 \cdot 10^{-6}$), Be ($3 \cdot 10^{-5}$).

Соленость морской воды изменяется как во времени, так и в пространстве. Это обусловлено непостоянством соотношения между испарением с водной поверхности E и опреснением вод (связанными с атмосферными осадками P , речным стоком Q , таянием льдов, выпадением солей и т. д.). В районах, характеризующихся резким преобладанием E над $(P + Q)$, концентрация солей возрастает. Так, в тропической и субтропической зонах $E > (P + Q)$, поэтому между 15° и 25° широтами каждого земного полушария отмечается самая высокая соленость открытой части Мирового океана (более 37,5 %). У экватора обильные осадки превосходят испарение вод ($P \gg E$), поэтому здесь соленость воды на поверхности чаще всего ниже средней (34—34,7 %). В умеренных и высоких широтах обычно $E < (P + Q)$, вследствие этого значение солености с приближением к полюсам уменьшается до 30 %.

Между Мировым океаном, атмосферой и сушей постоянно происходит массообмен. Вынос солей из океана в атмосферу в размере $5 \cdot 10^{12}$ кг/год осуществляется при испарении и разбрызгивании вод во время ветрового волнения. Имеющийся между Мировым океаном и сушей солеобмен составляет около $5 \cdot 10^{11}$ кг/год (применительно к отдельным океанам эта величина изменяется от 10^{10} кг/год в Северном Ледовитом океане до $26 \cdot 10^{10}$ кг/год — в Тихом).

В геохимии биосферы весьма важен *ионный состав природных вод*. Наиболее распространенными в природных водах являются ионы Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , H^+ . Так, ион хлора присутствует почти во всех природных водах, причем его содержание меняется в очень широких пределах. Сульфат-ион также распространен повсеместно. Основным источником растворенных в воде сульфатов является гипс [22]. В подземных водах содержание сульфат-иона обычно выше, чем в воде рек и озер. Из ионов щелочных ме-

таллов в природных водах в наибольших количествах находятся ионы натрия, которые характерны для сильноминерализованных вод. Ионы кальция и магния в маломинерализованных водах также занимают ведущее место. Основным источником появления ионов кальция являются известняки, а магния — доломиты ($MgCO_3 \cdot CaCO_3$). Бикарбонатный и карбонатный ионы возникают в результате растворения карбонатных пород, причем карбонатный ион появляется в том случае, если вода принимает слабощелочную реакцию [30].

Концентрация ионов водорода в воде обусловлена диссоциацией угольной кислоты. Большинство природных вод имеет рН в пределах 6,5—8,6. Для поверхностных вод (в связи с меньшим содержанием в них углекислоты) рН обычно выше, чем для подземных.

3.2

Анализ геохимии элементов

Все химические элементы, находящиеся в биосфере, образуют различные, относительно устойчивые системы, получившие название *формы нахождения*. Относительная устойчивость форм нахождения элементов предопределяет последующую возможность их распада с объединением составных частей в новые формы совместного нахождения.

Формы нахождения химических элементов по существу определяют их геохимическую историю в биосфере. Элемент может проявлять индивидуальные свойства, находясь в растворе или расплаве, или «делегировать» свои свойства кристаллической решетке минералов, в которую входит, что определяет возможность изоморфного замещения его другими элементами (если он является главным элементов минерала), или в зависимости от кларка служить элементом-примесью. Сам минерал может находиться в составе пород или руд, быть породообразующим или аксессуарным, кристаллическим или колломорфным, принадлежать к эвтектоидным ассоциациям, т.е. конечным членам дифференцированных магматических серий (например, калиевый полевой шпат, кварц или нефелин) или, наоборот, к ранним кристаллизатам (на-

пример, оливин, магнетит, шпинель и др.). Минерал может быть легко растворимым (например, сульфаты большинства цветных металлов), летучим (например, киноварь) и т.д.

При этом тот или иной элемент может абсорбироваться на поверхности минералов, быть включенным в дефекты кристаллической решетки минералов, газово-жидкие или расплавные микровключения. Поэтому кроме параметров окружающей среды и характеристик химических элементов поведение их в биосфере предопределяют свойства минералов, а также пород или руд, в которые они входят.

В.И. Вернадский в 1937 г. предложил для анализа биосферы сравнивать концентрации химических элементов с кларками земной коры путем деления и назвал эту величину *кларком концентрации* (КК). При сопоставлении геохимических особенностей двух или большего количества химических элементов используют отношение кларков концентраций, что особенно информативно для родственных элементов, например К, Ва, Rb, Cs и др. [29].

Тысячелетиями человечество накапливало сведения о совместном нахождении разных элементов в земных недрах. Так, еще на заре цивилизации было известно, что золото часто встречается с серебром, свинец — с цинком, ртуть — с сурьмой и т.д. Это явление В.И. Вернадский предложил называть *парагенезисом элементов*.

Для водных систем парагенные ассоциации химических элементов обусловлены растворимостью, а также устойчивостью элементов при конкретных параметрах среды. Для пород они определяются валовым и минеральным составами. Парагенезис элементов в минералах зависит от типа кристаллических решеток и характера изоморфизма в них при замещении главных элементов второстепенными. Так, в халькопирите в этот парагенезис кроме Fe входят Cu, S, а также Re, In, Ge, Au, Co, Ni, Tl, Cd, Sb, Pt; в оливине — Mg, Si, O, Ni, Co, Ca; в полевом шпате — K, Si, Al, Pb, Cs, Li, Tl, Be, Ga, Sr; в уранините — U, Pb, Ra, He. Для ультраосновных пород парагенными являются Mg, Fe, Ca, Ni, Co, Mn, Pd, Pt; для гранитных пегматитов — K, Rb, Li, Cs, Be, TR, Zr, Nb, Ta, F, B.

Влияние кларков на способность элементов к минералообразованию или миграции в водной среде показывает зависимость количества минеральных фаз от кларков. С уменьшением кларка концентрации достижение величины соответствующего произведения растворимости, при котором возможно выпадение минеральных фаз, становится маловероятным.

Но неизвестен сульфат $RaSO_4$ (хотя реально и обладающий наименьшей растворимостью по сравнению с сульфатами Mg , Ca , Sr , Ba), так как кларк Ra чрезвычайно мал и его обычное содержание в природной воде составляет — 10^{-11} г/л. Среди родственных элементов способность к миграции в растворенном состоянии зависит от их химических свойств.

При анализе геохимии элементов необходимо учитывать и то, что химические элементы вступают во взаимодействие друг с другом не пропорционально их массам, а в соответствии с количеством атомов. Поэтому важно рассчитывать кларки не только в процентах по массе, но и в процентах от числа атомов, т. е. с учетом атомных масс.

3.3

Геохимия и распределение живого вещества в биосфере

Живое вещество в биосфере распределено весьма неоднородно: его основная масса сосредоточена в относительно узком пространстве, называемом *пленкой жизни* (рис. 3.1). Мощность концентраций жизни обычно измеряется единицами или десятками, значительно реже — одной-двумя сотнями метров. Остальная часть биосферы представляет собой зону разрежения живого вещества.

В настоящее время детально охарактеризованы две формы концентрации жизни:

- жизненные пленки, прослеживаемые на огромных площадях (например, планктонная пленка, покрывающая практически всю верхнюю часть водной толщи океана);

- сгущения жизни, имеющие локальное распространение (например, сгущения стоячих водосмов).

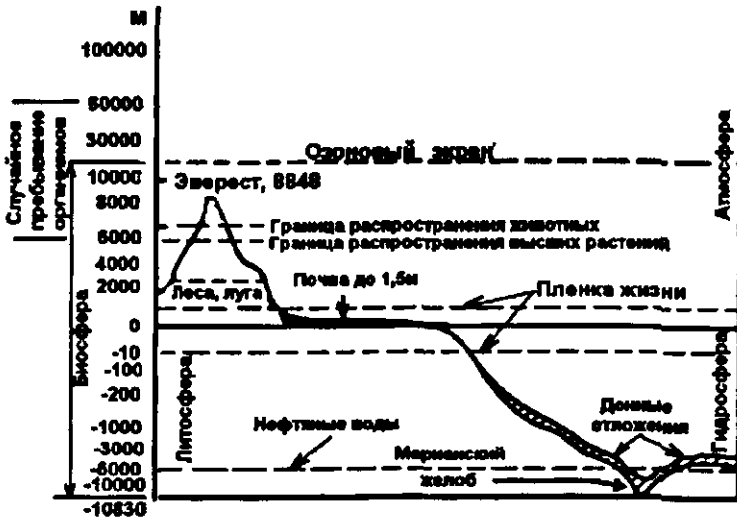


Рис. 3.1. Схема строения биосферы

Основные для биосферы три горизонтальные пленки жизни расположены на границах раздела «литосфера — гидросфера — атмосфера»: в водоемах близ поверхности, на дне морей и океанов, на поверхности суши.

На суше можно выделить пять горизонтов биосферы, имеющих сгущения живого вещества (рис. 3.2):

- наземную пленку жизни;
- почвенную пленку жизни;
- аэробный подземный экогоризонт;
- аэробно-анаэробный подземный экогоризонт;
- анаэробный подземный экогоризонт.

Живое вещество континентов распределяется неравномерно не только в вертикальном сечении, но и по площади.

В настоящее время на суше выделяют:

- пойменные сгущения жизни;
- тропические и субтропические леса гумидных областей;
- континентальные водоемы.

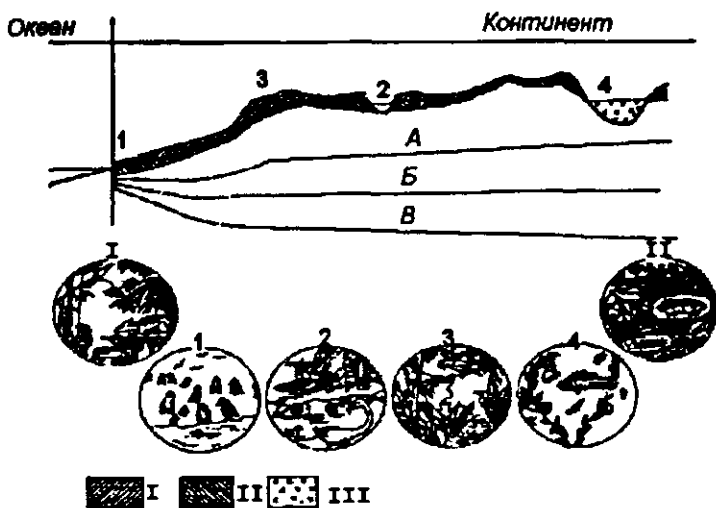


Рис. 3.2. Горизонты концентрации и разложения жизни на континенте: пленки жизни: I — наземная, II — почвенная; III — сгущение жизни: 1 — береговое; 2 — пойменное; 3 — тропические и субтропические леса гумидных областей; 4 — сгущение стоячих водоемов; A—B — разрежение жизни: A — аэробный подземный экогоризонт; B — аэробно-анаэробный экогоризонт; B — анаэробный подземный экогоризонт

Пойменные сгущения жизни — это скопления живого вещества в бассейнах великих рек, включая не только их плодородные долины, но и дельты. Эти объекты характеризуются наивысшей на суше продуктивностью: при ничтожной площади (менее 1 %) они продуцируют 10 % живого вещества (недаром все древние цивилизации зародились и развивались в речных долинах Нила, Тигра, Евфрата, Хуанхэ и др.). Превышение продукции более чем на порядок (по сравнению с другими наземными системами) объясняется обильным снабжением дельт и пойм минеральными элементами.

Тропические и субтропические леса гумидных областей представляют собой еще один тип сгущения живого вещества на континентах. Их фитомасса достигает рекордной величины — 650 т/га (тайга 200—250 т/га). В них насекомые (преимущественно термиты) быстро уничтожают отмершие части растений и деревьев. Толстые стволы деревьев поедаются насекомыми почти полностью за 3—5 лет, а сухие листья и мел-

кие ветви — за несколько месяцев. В результате во влажных тропических лесах, обладающих колоссальной биомассой, практически не накапливается косное органическое вещество.

В настоящее время площадь всех лесов в мире превышает 3,7 млрд. га и составляет 1/3 суши [21], причем средняя лесистость равна 29%, в лиственных лесах она составляет 66,7%.

Континентальные водоемы являются последним типом сгущения жизни на суше. Главная масса поверхностных вод суши сосредоточена в лужах, озерах и болотах. Синтез живого вещества автотрофов в сгущениях мелководных стоячих водоемов происходит по всей водной толще. Также весьма значительна деятельность илоядных животных в донных осадках озер. Наиболее активными илоедами в озерах являются черви и личинки двукрылых (мотыля и др.).

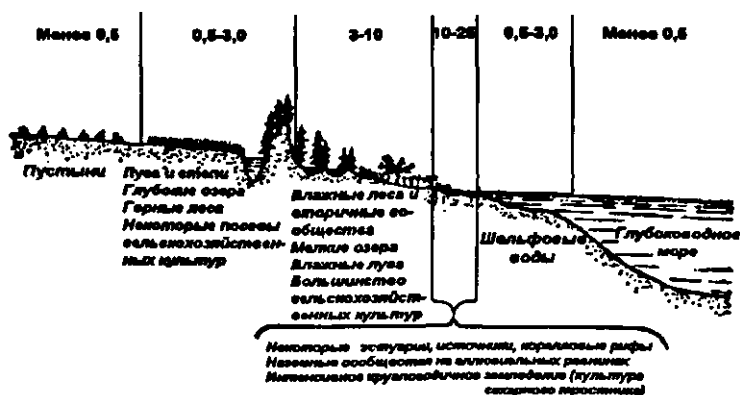


Рис. 3.3. Продуктивность (грамм сухого вещества на 1 м³ за сутки) различных экосистем в биосфере Земли

Как общее количество живого вещества, так и его годовичная продуктивность на площади континентов распределены крайне неравномерно: например, запасы биомассы в самых богатых и в самых бедных поясах на суше отличаются почти в 100 раз (рис. 3.3).

Распределение абсолютных масс живого вещества и годовичной продукции (табл. 3.3) определяется климатическими

факторами: температурой и количеством осадков, а также плодородием почв.

Таблица 3.3

Масса живого вещества (т/га, в сыром виде) различных географических поясов биосферы

| Географический пояс | Суша | Океан |
|-------------------------|--------|-------|
| Арктический | 1000 | 93 |
| Субарктический | 16 000 | 309 |
| Умеренный | 39 000 | 246 |
| Северный субтропический | 54 000 | 75 |
| Северный тропический | 17 000 | 24 |
| Экваториальный | 96 000 | 39 |
| Южный тропический | 21 000 | 20 |
| Южный субтропический | 34 000 | 30 |
| Южный умеренный | 35 000 | 48 |
| Субантарктический | 2000 | 68 |
| Антарктический | — | 64 |
| В целом | 94 000 | 1016 |

Влияние температуры на количество живого вещества различно: в океане прямой связи нет, а на континентах зависимость прямая. Например, биомасса лишайников и мхов в условиях высокогорья колеблется в пределах 2,5—23 т/га (при сплошном покрытии территории), а количество бактерий составляет всего 640 тыс. в 1 г почвы, в то время как в горно-луговых условиях — уже 1108 тыс. В субальпийском поясе создаются еще более благоприятные, чем в альпийской зоне, условия для произрастания луговой растительности. Ежегодно здесь накапливается в зависимости от микроусловий от 1,5 до 3 т наземной массы и 6—9 т — подземной.

В наземных системах среднегодовая температура определяет не только количество биомассы, но и тип господствующей растительности. Так, лес растет только в тех районах, где по крайней мере в течение четырех месяцев среднемесячные температуры превышают +10 °С. При этом в умеренных широтах обычно господствуют немногие виды растений (хвойный лес или ковыльные степи), а животный мир более раз-

нообразен. В тропическом лесу наблюдается обратная картина: огромное разнообразие растений и участие в их жизни относительно немногих, но специализированных видов животных.

Для болотообразования климатические условия являются «пусковым» механизмом. В процессе дальнейшего развития торфяника роль климатических факторов снижается. Ведущим фактором становится само торфонакопление, которое меняет все микроусловия среды.

Болото постепенно становится замкнутой системой, мало зависящей от внешних условий. Помимо ландшафтно-климатических существуют и экологические предпосылки торфонакопления: факторы, ограничивающие развитие потребителей автотрофного живого вещества, например — недостаток азота. Так, для интенсивной минерализации органики сапротрофами требуется, чтобы соотношение содержаний углерода и азота находилось в пределах 20—25. В болотах же это соотношение выше, поэтому разложение органического вещества происходит в замедленном темпе.

Сухость климата влияет в равной степени как на наземные, так и на океанические биоценозы: насыщенность жизнью экосистем гумидного пояса значительно выше, чем аридного (рис. 3.4).

В частности, анализ потенциальной продуктивности посевов показал, что фактором, лимитирующим формирование высокой продуктивности, является дефицит влаги. Например, урожай яровых зернистых культур при естественной влагообеспеченности колеблется в степных районах в пределах 25—45 ц/га, а в лесолуговой зоне — 50—100 ц/га.

Следовательно, фитопродуктивность положительно коррелирует с отношением суммы выпадающих осадков к среднегодовой температуре, которая в степных районах составляла 43—47 °С, в лесостепных — 50—55 °С, в лесолуговых — 95—105 °С.

Благоприятное влияние на биологическую продуктивность оказывает и естественный привнос абиогенного вещества из внутренних слоев земной коры.

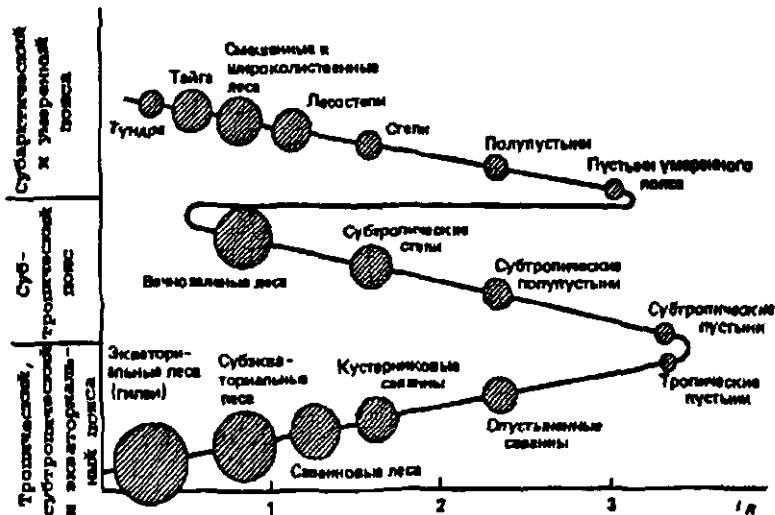


Рис. 3.4. Периодический закон географической зональности:

I_d — радиационный индекс сухости (отношение радиационного баланса к количеству тепла, необходимого для испарения годовой суммы осадков). Диаметры кружков пропорциональны биологической продуктивности ландшафтов

Поэтому высокая продуктивность фитопланктона наблюдается повсеместно в районе Тихоокеанического вулканического кольца, а для растительности областей современного вулканизма характерен гигантизм.

Кроме растительности Земли к территориальному концентрированию склонны и животные. С давних пор известны нашествия саранчи, вызывающие голод и бедствия. Так, в результате ее массового размножения в 125 г. до н. э. в Северной Африке погибло от голода более 800 тыс. человек. Уже в современное время наблюдается ежегодный перелет саранчи над Красным морем [24]. Пролет таких туч саранчи может занимать целый день (известен случай перелета в Аргентине тучи саранчи, занявшего 5 дней). Пространство, захваченное подобным скоплением саранчи, составляет 6 тыс. км² (известны тучи длиной до 120 км и шириной до 20 км), а вес — $4,4 \cdot 10^7$ т, что соответствует общему количеству меди, свинца и цинка, добытому человечеством в течение XIX века.

Таблица 3.4

Биомасса (сухой вес)

| Тип экосистемы | Площадь, $\times 10^6$, км ² | Биомасса растений, кг/м ² | | Мировая величина | |
|--------------------------------------|--|--------------------------------------|-----------|------------------------------------|------------------------------------|
| | | Колебания | В среднем | Биомасса растений, $\times 10^9$ т | Биомасса животных, $\times 10^6$ т |
| Влажные тропические леса | 17,0 | 6—80 | 45 | 765 | 330 |
| Тропические сезонно-зеленые леса | 7,5 | 6—80 | 35 | 260 | 90 |
| Вечнозеленые леса умеренного пояса | 5,0 | 6—200 | 35 | 175 | 50 |
| Листопадные леса умеренного пояса | 7,0 | 6—60 | 30 | 210 | 110 |
| Тайга | 12,0 | 6—40 | 20 | 240 | 57 |
| Лесо-кустарниковые сообщества | 8,5 | 2—20 | 6 | 50 | 40 |
| Саванна | 15,0 | 0,2—15 | 4 | 60 | 220 |
| Лугостепь | 9,0 | 0,2—5 | 1,6 | 14 | 60 |
| Тундра и высокогорье | 8,0 | 0,1—3 | 0,6 | 5 | 35 |
| Пустыни и полупустыни | 18,0 | 0,1—4 | 0,7 | 13 | 8 |
| Сухие пустыни, скалы, ледники и т.д. | 24,0 | 0—0,2 | 0,02 | 0,5 | 0,02 |
| Культивируемые земли | 14,0 | 0,4—12 | 1 | 14 | 6 |
| Болота и марши | 2,0 | 3—50 | 15 | 30 | 20 |
| Озера и водотоки | 2,0 | 0,01 | 0,02 | 0,05 | 10 |
| Материковые экосистемы в целом | 149,0 | — | 12,3 | 1837 | 1005 |
| Открытый океан | 332,0 | 0—0,005 | 0,003 | 1,0 | 800 |
| Зоны апвеллинга | 0,4 | 0,005—0,1 | 0,02 | 0,008 | 4 |
| Континентальный шельф | 26,6 | 0,001—0,4 | 0,01 | 0,27 | 160 |
| Заросли водорослей и рифы | 0,6 | 0,04—4 | 2,0 | 1,2 | 12 |
| Эстуарии | 1,4 | 0,01—6 | 1,0 | 1,4 | 21 |
| Морские экосистемы в целом | 361,0 | — | 0,01 | 3,9 | 997 |
| Общая биомасса Земли* | 510,0 | — | 3,6 | 1841 | 2002 |

* Биомасса организмов литосферы и азробноосферы несопоставимо мала.

Таблица 3.5

Параметры биологической продуктивности ландшафтов

| Ландшафт и регион его распространения | Б, ц/га | П, ц/га | $\frac{Lg П}{Lg Б}$ |
|---|------------|------------|---------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Первая группа — лесная | | | |
| <i>Гумидные тропики</i> | | | |
| Влажные вечнозеленые леса на красно-желтых ферролитных почвах | 6500 | 300 | 0,65 |
| То же на темно-красных почвах | 6000 | 270 | 0,64 |
| Влажные вечнозеленые заболоченные леса на ферролитных глеевых почвах | 5000 | 250 | 0,65 |
| Мангры | 1300 | 100 | 0,64 |
| Горные влажные тропические леса на красно-желтых ферролитных почвах | 7000 | 350 | 0,66 |
| Горные переменно-влажные тропические леса на красных ферролитных почвах | 4500 | 220 | 0,69 |
| <i>Семиаридные лесные тропики</i> | | | |
| Ксерофитные леса на коричневых, красных ферралитизированных почвах | 2500 | 170 | 0,65 |
| Горные ксерофитные леса на коричнево-красных почвах | 2000 | 150 | 0,66 |
| <i>Лесные гумидные субтропики</i> | | | |
| Широколиственные леса на желтоземах и красноземах | 4500 | 200 | 0,63 |
| То же на красноцветных рендзинах и терророссах | 3800 | 160 | 0,61 |
| Широколиственные леса, заболоченные с мелкими массивами болот | 4000 | 220 | 0,65 |
| Горные широколиственные леса на желтоземах и красноземах | 4100 | 180 | 0,62 |
| Субтропические влажные широколиственные леса Закавказья | 4219 | 245 | 0,66 |
| <i>Лесные семиаридные субтропики</i> | | | |
| Ксерофитные леса на коричневых почвах | 1700 | 160 | 0,68 |
| <i>Субборреальные гумидные лесные ландшафты</i> | | | |
| Широколиственные леса на бурых лесных почвах | 4000 | 130 | 0,59 |
| То же на рендзинах | 3700 | 120 | 0,58 |
| Горные леса на бурых горно-лесных почвах | 3700 | 120 | 0,58 |
| Широколиственные леса, заболоченные с мелкими массивами болот | 3000 | 130 | 0,60 |
| Широколиственные леса европейской территории СССР (ЕТС) | 3240 | 130 | 0,60 |
| Широколиственные леса приокеанического региона | 2280 | 86 | 0,57 |
| Широколиственные леса лесостепи ЕТС | 3026 | 110 | 0,59 |

Продолжение таблицы 3.5

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|------|------|------|
| Широколиственные леса степной зоны ЕТС | 2884 | 148 | 0,63 |
| Борреальные широколиственные леса на острых лесных почвах | 3700 | 80 | 0,53 |
| <i>Хвойно-широколиственные леса</i> | | | |
| ЕТС | 3217 | 144 | 0,61 |
| Приокеанический регион | 3158 | 135 | 0,60 |
| <i>Тайга, ельники</i> | | | |
| Северная тайга ЕТС, западная и восточная части | 1115 | 46 | 0,54 |
| То же, центральная часть | 2363 | 47 | 0,50 |
| Средняя тайга ЕТС, западная часть | 2068 | 63 | 0,54 |
| То же, центральная часть | 2373 | 60 | 0,52 |
| То же, восточная часть | 2365 | 58 | 0,52 |
| Южная тайга ЕТС и смешанные леса | 3044 | 75 | 0,54 |
| Подзона хвойно-широколиственных лесов ЕТС | 2431 | 130 | 0,61 |
| <i>Полидоминантные таежные леса из ели, пихты</i> | | | |
| Средняя тайга Западной Сибири | 2186 | 62 | 0,53 |
| То же, Средней Сибири | 1064 | 41 | 0,53 |
| Южная тайга Западной Сибири | 2391 | 65 | 0,53 |
| То же, Средней Сибири | 2478 | 80,5 | 0,56 |
| То же, приокеанический регион | 2757 | 86 | 0,56 |
| <i>Лиственничники</i> | | | |
| Северная тайга, Средняя Сибирь | 618 | 37 | 0,56 |
| То же, Восточная Сибирь | 602 | 35 | 0,56 |
| То же, приокеанический регион | 649 | 34,5 | 0,55 |
| Средняя тайга, Западная Сибирь | 237 | 83,4 | 0,57 |
| То же, Средняя Сибирь | 140 | 41 | 0,51 |
| То же, Восточная Сибирь | 1305 | 38,5 | 0,50 |
| Южная тайга, Средняя Сибирь | 1204 | 56 | 0,56 |
| <i>Лиственничники долинные</i> | | | |
| Северная тайга ЕТС | 4440 | 106 | 0,55 |
| Средняя тайга, Средняя Сибирь | 4081 | 82 | 0,54 |
| Южная тайга ЕТС | 5761 | 88,3 | 0,52 |
| <i>Сосняки</i> | | | |
| Северная тайга ЕТС, западная часть | 831 | 39,0 | 0,54 |
| То же, центральная часть | 1865 | 46,0 | 0,50 |
| Средняя тайга ЕТС, запад | 2293 | 75,7 | 0,56 |
| ЕТС, восток | 901 | 36,2 | 0,52 |
| Западная Сибирь | 1765 | 40,8 | 0,50 |
| Средняя Сибирь | 1241 | 29,6 | 0,47 |
| Южная тайга ЕТС | 2038 | 66,0 | 0,55 |
| Западная Сибирь | 2144 | 66,0 | 0,55 |
| Южная тайга, Средняя Сибирь | 2675 | 75,0 | 0,54 |
| Подзона хвойно-широколиственных лесов ЕТС | 2644 | 84,0 | 0,56 |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|------|------|------|
| Подзона широколиственных лесов ЕТС | 1512 | 83,0 | 0,59 |
| Подзона лесостепи ЕТС | 2625 | 98,8 | 0,58 |
| <i>Лесные болота</i> | | | |
| Черноольшанники, северная тайга ЕТС | 486 | 61,0 | 0,65 |
| То же, южная тайга ЕТС | 1080 | 55,0 | 0,57 |
| То же, подзона хвойно-широколиственных лесов ЕТС | 1526 | 104 | 0,63 |
| То же, подзона широколиственных лесов | 2192 | 110 | 0,61 |
| Березово-моховые низинные ЕТС | 205 | 73,0 | 0,80 |
| Березово-сосново-моховые переходные ЕТС | 495 | 26,6 | 0,52 |
| То же, Западная Сибирь | 116 | 34,0 | 0,74 |
| Туган древесные, Туркмения и Таджикистан | 1144 | 359 | 0,83 |
| <i>Мелколиственные леса</i> | | | |
| Северная тайга, каменная береза, приокеанический регион | 849 | 69,0 | 0,62 |
| Подзона мелколиственных лесов, Западная Сибирь | 2133 | 126 | 0,63 |
| Лесостепь, осинники ЕТС | 1636 | 159 | 0,68 |
| Березняки, Западная Сибирь | 1005 | 104 | 0,67 |
| Вторая группа — саванны, степи, луга | | | |
| <i>Саванны</i> | | | |
| Горные саванны на красно-бурых почвах | 400 | 120 | 0,80 |
| Саванны травяные, кустарники на красно-бурых ферролитных почвах | 400 | 120 | 0,79 |
| То же на черных тропических почвах | 300 | 110 | 0,82 |
| Саванны травяные, кустарники на солонцах | 200 | 70,0 | 0,80 |
| Саванны залуженные и заболоченные на лугово-красных ферролитных почвах | 600 | 140 | 0,77 |
| Опустыненные саванны на красновато-бурых почвах | 150 | 40,0 | 0,73 |
| Пойменные формации семнаридных тропиков | 2000 | 600 | 0,84 |
| То же, аридных тропиков | 1500 | 400 | 0,81 |
| <i>Субтропические степи, прерии</i> | | | |
| Кустарниково-степные формации на серо-коричневых почвах | 350 | 100 | 0,79 |
| То же на серо-коричневых солонцеватых почвах с мелкими массивами солонцов | 200 | 60,0 | 0,77 |
| То же на субтропических черноземовидных и сли- тых почвах | 250 | 80,0 | 0,79 |
| Псаммофиты на песчаных почвах и песках | 200 | 50,0 | 0,78 |
| Галлофитные формации на солончаковых почвах, солончаках | 15,0 | 5,0 | 0,59 |
| Пойменные формации | 2500 | 400 | 0,76 |
| Горные кустарниково-степные формации на серо-коричневых почвах | 300 | 80,0 | 0,82 |

Продолжение таблицы 3.5

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|------|------|------|
| <i>Субтропические полупустыни</i> | | | |
| Зональные полукустарничковые, Закавказье | 69,2 | 58,6 | 0,69 |
| Травяные, Закавказье | 57,0 | 70,4 | 0,05 |
| То же, Таджикистан и Киргизия | 114 | 104 | 0,97 |
| Сочно-солянковые, Закавказье | 40,3 | 26,5 | 0,89 |
| <i>Бореальные степи</i> | | | |
| Луговые, Западная Сибирь | 139 | 199 | 1,07 |
| То же, Средняя Сибирь | 177 | 172 | 1,02 |
| Настоящие умеренно-засушливые ЕТС | 192 | 200 | 1,01 |
| То же, Западная Сибирь и Казахстан | 178 | 174 | 1,00 |
| То же, Средняя Сибирь | 173 | 176 | 0,99 |
| То же, Восточная Сибирь | 112 | 123 | 1,00 |
| Настоящие засушливые | 135 | 137 | 1,00 |
| То же, Западная Сибирь и Казахстан | 178 | 162 | 0,98 |
| То же, Средняя Сибирь | 180 | 163 | 0,98 |
| Сухие северные степи ЕТС | 145 | 136 | 0,98 |
| То же, Западная Сибирь и Казахстан | 114 | 116 | 1,00 |
| То же, Восточная Сибирь | 89,5 | 83,3 | 0,99 |
| Сухие южные ЕТС | 57,0 | 64,0 | 1,01 |
| То же, Казахстан | 117 | 106 | 0,97 |
| То же, Восточная Сибирь | 106 | 98,2 | 0,98 |
| Солонцовые степи. Подзона настоящих засушливых степей ЕТС | 65,0 | 66,7 | 1,00 |
| То же, Казахстан | 35,0 | 40,0 | 1,00 |
| Подзона сухих степей ЕТС | 51,4 | 56,7 | 1,10 |
| То же, Казахстан | 61,8 | 50,8 | 0,95 |
| Степи на черноземах типичных и выщелоченных | 250 | 130 | 0,88 |
| То же на черноземах обыкновенных и южных | 200 | 80,0 | 0,82 |
| То же на черноземах солонцеватых | 200 | 80,0 | 0,82 |
| Остепненные формации на солонцах | 160 | 50,0 | 0,77 |
| Псаммофитные формации на песках | 180 | 80,0 | 0,84 |
| Сухие степи на темно-каштановых почвах | 200 | 90,0 | 0,84 |
| Пустынные степи на светло-каштановых почвах | 130 | 50,0 | 0,80 |
| Сухие пустынные степи на каштаново-солонцеватых комплексах | 140 | 50,0 | 0,79 |
| Сухие и пустынные степи на солонцах | 140 | 50,0 | 0,79 |
| Псаммофитные формации на песках в сухих и пустынных степях | 150 | 60,0 | 0,81 |
| Горные сухие степи на каштановых почвах | 150 | 70,0 | 0,84 |
| Горные степи на черноземах | 250 | 100 | 0,83 |
| Горные луговые степи на субальпийских лугово-степных почвах | 250 | 110 | 0,85 |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|------|-----|------|
| <i>Луга лесной зоны</i> | | | |
| Подзона северной тайги. Приокеанический регион. | 306 | 301 | 0,99 |
| Материковые и пойменные | | | |
| Подзона средней тайги ЕТС, материковые | 96,0 | 107 | 1,02 |
| То же, пойменные | 161 | 183 | 1,05 |
| Средняя Сибирь, пойменные | 118 | 126 | 1,01 |
| Подзона южной тайги ЕТС, материковые | 140 | 145 | 1,01 |
| Западная Сибирь, материковые и пойменные | 158 | 172 | 1,01 |
| Приокеанический регион, материковые, пойменные | 399 | 397 | 0,99 |
| Подзона хвойно-широколиственных лесов ЕТС, материковые и пойменные | 136 | 154 | 1,02 |
| То же, Восточная Сибирь | 118 | 134 | 1,03 |
| Подзона широколиственных лесов. ЕТС | 144 | 160 | 1,01 |

В морях и океанах также существуют зоны сгущения жизни — прибрежные, рифовые, апвеллинговые области подъема глубинных вод и некоторые другие (табл. 3.4). Биота океана по массе составляет менее 0,2% от биоты суши, однако ее продуктивность совпадает с биопродуктивностью растительной массы суши (примерно $6 \cdot 10^{16}$ г углерода в год).

Если на континентах распределение живого вещества определяется в основном климатом (табл. 3.5), то в морях и океанах зависит от многих других факторов, например от течений или местоположения устьев рек, несущих питательные вещества. Согласно этим факторам в океане выделяют две жизненные пленки (планктонную и донную) и три типа сгущений жизни (прибрежные, саргассовые и рифовые). Обе океанические жизненные пленки приурочены к границам раздела фаз: планктонная — к газообразной и жидкой, донная — к жидкой и твердой (рис. 3.5).

Количество живых организмов в планктонной пленке быстро убывает с глубиной (рис. 3.6). Эта пленка жизни резко отличается по составу живого вещества от наземных сгущений: здесь доминируют организмы, пассивно взвешенные в воде и неспособные противостоять течениям.

Совокупность автотрофных планктонных организмов называют фитопланктоном, а гетеротрофных — зоопланктоном. Фитопланктон представлен водорослями (главным образом одноклеточными) и фотосинтезирующими бактериями. Причем на долю одноклеточных диатомовых водорос-

лей приходится 70 % всей ежегодной продукции фитопланктона. Состав зоопланктона более разнообразен: наиболее значимой группой в нем являются мелкие рачки. В донной пленке жизни существует 157 тысяч из 160 тысяч видов морских животных [24].

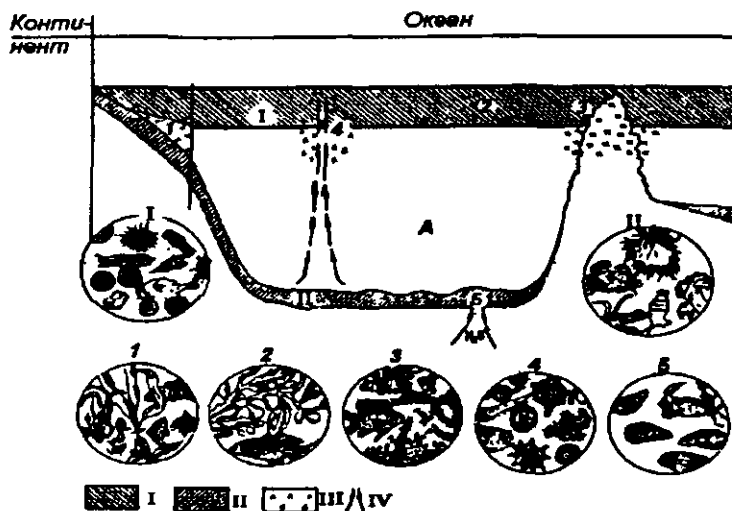


Рис. 3.5. Горизонты концентрации и разложения жизни Мирового океана: пленки жизни: I — планктонная; II — донная; III — сгущение жизни: 1 — прибрежное; 2 — саргассовое; 3 — рифовое; 4 — апвеллинговое; 5 — донное; IV — подъем глубинных вод; A — разрежение

Концентрация живого вещества в донной пленке шельфа может быть весьма значительной. Но все же в наиболее глубоководных участках океана биомасса составляет менее 1 г на 1 м² дна. Если образование планктонной пленки жизни обусловлено прежде всего проникновением солнечного света в верхние слои океана, то скопление жизни в донной пленке определяется потоками отмерших организмов. Поэтому между распределением биомасс планктонной и донной пленок жизни существует тесная корреляционная зависимость: участкам с высокой биомассой планктона соответствуют участки с повышенным содержанием живого вещества на дне.

Биосферное значение донной пленки жизни не меньше, чем планктонной. В ней складывается вещество, созданное жизнью и вышедшее из биогеохимического круговорота ато-

мов. Например, вследствие биогенного разложения детрит убывает из состава илов, но зато грунтовые растворы резко обогащаются продуктами распада, прежде всего углекислым газом, сероводородом, водородом и аммиаком; рН грунтового раствора при этом падает.

Прибрежные сгущения жизни возникают обычно там, где встречаются обе пленки — планктонная и донная (где имеются солнечный свет и твердый субстрат, обильные притоки минеральных и органических веществ с континентальных областей, а также интенсивное перемешивание водной толщи, дающее возможность многократного использования химических элементов.

Береговые сгущения жизни представляют собой прибрежные территории континентов и островов. Концентрация жизни здесь определяется главным образом процессом терригенного распада и сноса вещества суши.

Отличительной чертой прибрежных сгущений жизни является преобладание многоклеточных организмов над одноклеточными. Характерно при этом относительное однообразие жизни: от 1 до 12 видов организмов здесь могут составлять до 95% биоценозов.

Прибрежные сгущения жизни имеют огромное значение для биосферы в целом. Только, например, деятельность мидиевых банок регулирует коллоидный состав прибрежных вод, осадконакопление в пределах мелководного побережья и даже циркуляцию потоков вод в прибрежной зоне. Все эти функции осуществляются путем фильтрации мидиями прибрежных вод. В этом случае биогенная циркуляция создается за счет того, что вода, освобожденная от коллоидных и нерастворимых частиц, становится легче и поднимается вверх.

Рифовые сгущения жизни — одна из самых высокопродуктивных зон океана. Годовая продукция сухого органиче-

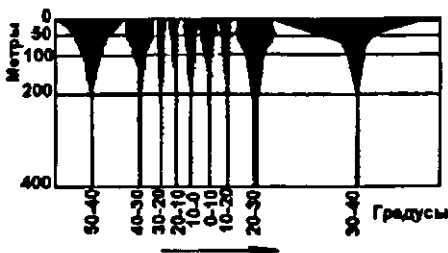


Рис. 3.6. Распределение биомассы планктона по глубине в зависимости от географической широты

ского вещества составляет здесь более 20 ц/га, что почти на порядок выше других океанических систем. Растут рифы (состоящие из карбоната кальция) со скоростью 10 см/год (иногда — до 25 см/год).

Помимо кораллов рифы создаются деятельностью разнообразных живых существ: зеленых и красных водорослей, моллюсков, иглокожих и других. Ткани самих кораллов пронизаны фотосинтезирующими симбиотическими водорослями зооксантеллами. В создании автотрофного живого вещества коралловых рифов большую роль также играют и цианобактерии.

Высокая продуктивность экосистемы коралловых рифов в значительной степени объясняется пористостью самого рифового сооружения, через организмы которого проходят огромные объемы воды, содержащей питательные вещества. Благодаря этому низкая концентрация биогенных элементов не лимитирует развитие коралловых рифов. Рифы, имеющие общую площадь 600 тыс. км², контролируют концентрацию растворенного органического вещества во всем океане [24].

Область распространения современных рифов ограничена водами, имеющими на протяжении года температуру не ниже 18°, с соленостью 2,7—4%. Вода также должна быть не замутненной, содержать значительное количество кислорода, причем кораллам необходим солнечный свет, что ограничивает глубину их проживания не более 40—50 м.

Другим типом сгущения жизни являются скопления саргассов в Саргассовом море, расположенном у восточных берегов Северной Америки. Его биомасса составляет 4—11 млн. т, т. е. примерно 1% всей биомассы живого вещества автотрофов Мирового океана. Они имеют низкую годовую продуктивность, что объясняется своеобразным гидрологическим режимом моря: оно ограничено по контуру эллиптическим течением и имеет слабую вертикальную конвекцию. Подобное сгущение жизни обнаружено и в Черном море. Здесь на площади 11 000 км² на мелководье располагается скопление не прикрепленной ко дну красной водоросли филлофоры, по биомассе (5,5 млн. т) мало уступающее сгущению Саргассового моря.

Если в саргассовых сгущениях продуктивность живого вещества ограничивается слабой перемешиваемостью вод, то в апвеллингах (участках подъема глубинных вод), обогащенных азотом и фосфором, продуктивность огромна. Самая мощная апвеллинговая продуцирующая система Мирового океана находится в районе Перу. С его площади, занимающей 0,02 % всей акватории океана, получают до 15—20 % мирового улова рыбы.

В жизненно разреженной области океана находятся в основном гетеротрофные организмы, питающиеся детритом (неживым органическим веществом), а также хищники. Чем мельче детрит, тем медленнее он достигает океанического дна. Так, органические остатки диаметром 2 мм достигают глубины 5 км через трое суток, 0,2 мм — через 2 года 4 месяца, а частицы 20 мкм — уже только через 233 года [24]. При таком медленном перемещении они многократно используются детритофагами.

В океане существуют аналоги (по концентрации жизни) континентальным пустыням. В Тихом океане, в районе Гавайских островов обнаружена огромная водяная пустыня. Концентрация живого вещества здесь составляет $3 \cdot 10^{-6} \%$.

В настоящее время уже составлены карты распределения первичной продуктивности и биомассы живого вещества на территории Мирового океана. Средняя первичная продуктивность океана оказалась весьма низкой: на большей части акватории она не достигает и $0,5 \text{ г/м}^2$ в сутки, что соответствует продуктивности полупустынь. Отличием от континентов является отношение биомасс живого вещества автотро-

Таблица 3.6

Распределение биомассы организмов Земли

| Среда обитания | Группа организмов | Масса, т | Доля, % |
|----------------|---------------------------|------------------------|---------|
| Континенты | Зеленые растения | $2,4 \cdot 10^{12}$ | 99,2 |
| | Животные и микроорганизмы | $0,02 \cdot 10^{12}$ | 0,8 |
| | Итого | $2,42 \cdot 10^{12}$ | 100,0 |
| Океаны и моря | Зеленые растения | $0,0002 \cdot 10^{12}$ | 6,3 |
| | Животные и микроорганизмы | $0,003 \cdot 10^{12}$ | 93,7 |
| | Итого | $0,0032 \cdot 10^{12}$ | 100,0 |
| Всего | | $2,4232 \cdot 10^{12}$ | |

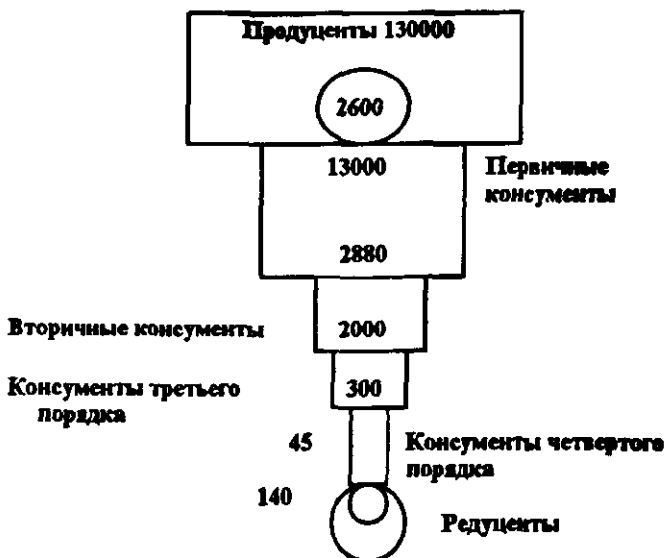


Рис. 3.7. Суммарная биомасса и продукция органического вещества в Мировом океане за год, млн. т (сырой вес)

фов и гетеротрофов: последняя в десятки раз больше. Объясняется это явление колоссальной продуктивностью и быстрой сменой поколений фитопланктона.

В настоящее время биомасса всех организмов суши (табл. 3.6) примерно в 800 раз превышает биомассу Мирового океана (рис. 3.7), причем растения по массе резко преобладают над животными. В океанах наблюдается обратное соотношение. Это связано главным образом с тем, что в морской среде наиболее благоприятные условия создаются для питания преимущественно животных. Отличительной особенностью живого вещества суши является его состав: абсолютным преобладанием по биомассе и продуктивности характеризуются высшие растения. Все остальные подцарства органического мира находятся в резко подчиненном положении.

Но и среди высших растений также существуют свои «лидеры» — древесные растения. Так, биомасса лесов составляет 84 % от общей биомассы живого вещества суши (при относительно меньшей продуктивности — около 40 %).

В состав живого вещества биосферы входят как органические, так и неорганические химические вещества. Морфологически минеральные образования живого вещества очень разнообразны.

В качестве примеров можно привести минеральные включения в тканях высших растений (фитолиты), капельки элементарной серы в клетках некоторых бактерий, раковины моллюсков и брахиопод, панцири диатомовых водорослей, скелеты животных и т.д. Только в составе живого вещества океана насчитывается около 20 неорганических минералов [24]. Они часто являются эфемерами и после отмирания организмов с течением времени переходят в другие, более устойчивые минеральные модификации. Многие минералы образовались непосредственно в телах организмов (опал в диатомеях, кальцит и арагонит в раковинах пелеципод, гастропод и др.). В человеческом организме образуется около 30 минералов.

Помимо организмов в морях и океанах глобальное образование биогенных минералов — карбонатных (CO_3) и силикатных (SiO_2) происходит путем построения минеральных скелетов морскими организмами, входящими в состав планктона (диатомовыми водорослями, радиоляриями, фораминиферами и др.). После отмирания их остатки осаждаются на дно. Таким способом сформировались за геологическое время осадочные карбонатные и кремнистые породы, составляющие основную часть осадочного чехла (слоя осадочных пород) Земли. Образование скелетов этих организмов зачастую происходило из ненасыщенных растворов, что возможно только благодаря прямому или косвенному использованию живыми организмами солнечной энергии.

При подсчете кларков живого вещества учитывается фитомасса. Живое вещество сложено в основном четырьмя элементами: О — 70 %, С — 18 %, Н — 10,5 % и N — 0,3 %. Медузы содержат около 100 % воды, млекопитающие — 60 %. В целом биосферу характеризует такая величина, как биофильность элементов: отношение среднего содержания в живом веществе к кларку данного элемента в литосфере. Этот показатель используют для сопоставления кларков земной коры и живого вещества [29]. Наиболее энергично в живом веще-

стве концентрируются углерод (биофильность 780), азот (160), водород (70), кислород (1,5) и хлор (1,1). У всех остальных элементов эта величина меньше 1 (в земной коре они сконцентрированы в большей мере, чем в живых организмах).

Считается, что между атомной массой элемента и его содержанием в живом организме имеется обратная связь. Отсюда следует, что биофильность и токсичность химических элементов — это две стороны одного явления: чем большее количество элемента требуется для живого вещества, тем менее токсичен он для организма.

При анализе геохимии живого вещества широко используют *коэффициент биологического поглощения*, представляющий собой отношение концентрации элемента в золе живых организмов к кларку. Сравнивая ряды поглощения, можно установить закономерность очень значительного поглощения сильных анионов (Cl, S, P), для которых коэффициент биологического поглощения составляет $10\cdot n$ — $100\cdot n$, и гораздо слабое поглощение катионов (Ca, Mg, Na, K), для которых этот коэффициент равен n .

Специфика химического состава отдельных растительных групп проступает достаточно отчетливо. Так, для мхов характерно интенсивное поглощение железа (коэффициент биологического поглощения равен 1), для хвощей — кремния (1), для грибов — фосфора (206) и т.д. Злаки богаты кремнеземом, бобовые — кальцием, а картофель и подсолнечник — калием. Морские водоросли по сравнению с наземными растениями накапливают элементы, характерные для морской воды (Mg, Na, K, S, Si, Fe, Sr, F, B и др.), и обеднены Ca, Mn, Al, Pb, Cs.

Эти и многие другие особенности химического состава растений объясняются геохимическими условиями территорий произрастания. Например, повышенное содержание железа в мхах объясняется тем, что мхи произрастают в заболоченных и влажных территориях, для которых характерна высокая интенсивность миграции Fe. В этой связи различают два типа концентрации химических элементов организмами. *Первый тип* объясняется повышенным содержанием элементов в окружающей среде.

Например, в районах расположения цинковых, никелевых или медных месторождений (а тем более рудников) все организмы характеризуются повышенным содержанием этих металлов. Высокое содержание данных элементов в окружающей среде оказывает влияние на организмы, приводящее к различным мутациям, обеспечивающим приспособляемость, которая со временем закрепляется наследственностью. Так возникает *второй тип* организмов, уже с генетически повышенным содержанием металлов.

Если разделить содержание элементов в золе наземных растений на их процент в почве, то полученные данные составят [24]: для кальция, натрия, калия, магния, стронция, цинка, бора и селена — единицы и десятки; для фосфора, серы, хлора, йода и брома — десятки и сотни.

У морских организмов отношение содержания металлов в организмах (на сухой вес) к их содержанию в морской воде измеряется десятками и сотнями тысяч (например, для титана, железа, марганца, никеля и кобальта), а иногда и превышает миллион (хром) [24].

Химический состав различных частей живых организмов не одинаков. Наибольшее содержание металлов наблюдается в листьях и тонких ветвях, меньшее — в коре и корнях и минимальное — в древесине. Это связано с возможностью скорейшего их вывода из растений. Также известно, что в организмах животных йод концентрируется в щитовидной железе, кальций — в скелете, фосфор — в скелете и мозговой ткани, кобальт — в печени и т.д.

План лекции

1. Дать понятие кларкам элементов и объяснить необходимость этого показателя для анализа геохимии биосферы.
2. Объяснить смысл понятий «кларки концентрации», «талассофильность» и «биофильность» элементов.
3. Охарактеризовать химический состав различных геосфер.
4. Описать геохимию биосферы и распределение живого вещества в разнообразных земных системах.

5. Раскрыть корреляцию концентрации живого вещества с различными природными факторами, а также по отношению к их частям.

Контрольные вопросы-задания

1. Преимущественно из каких элементов состоит земная кора?

2. Дайте определение кларкам химических элементов.

3. Что такое «распространенные», «редкие» и «рассеянные» химические элементы?

4. Что такое «микро-» и «макрокомпоненты» в различных системах?

5. Дайте определение основному геохимическому закону.

6. Что определяют кларки концентрации химических элементов?

7. От чего зависят миграционные свойства химических элементов в биосфере?

8. Какие формы нахождения химических элементов в биосфере Вам известны?

9. Каким образом геохимическое поведение элементов определяет их форма нахождения?

10. Как осуществляют анализ геохимии биосферы?

11. Объясните смысл «парагенезиса» элементов. Чем они определяются для водных, породных, почвенных и других систем?

12. Что демонстрирует зависимость минеральных фаз от кларков?

13. Опишите, к чему приводит уменьшение кларка концентрации в биосфере.

14. Как и где распределено живое вещество в биосфере?

15. Чем определяется распределение живого вещества на суше, а чем — в гидросфере?

16. Как происходит преобразование карбонатов в гидросфере?

17. Что такое «биогенные» минералы?

Глава 4

Изменение биосферы человеком

•
4.1. Общие проблемы антропогенного преобразования биосферы

•
4.2. Антропогенное преобразование и загрязнение атмосферы

•
4.3. Общепромышленное преобразование и загрязнение гидросферы

•
4.4. Индустриальное загрязнение и нарушение литосферы

•
4.5. Биосферные проблемы сельскохозяйственного комплекса

•
4.6. Проблемы радионуклидного загрязнения биосферы

•
План лекции

•
Контрольные вопросы-задания

Человеку суждено истребить самого себя
после того, как он сделает
Землю не пригодной для обитания.

Ж. Ламарк

4.1

Общие проблемы антропогенного преобразования биосферы

Биосфера испытывает мощнейшее отрицательное воздействие со стороны современной мировой промышленности и сельского хозяйства. Только в России в настоящее время функционирует около 28 тысяч предприятий, в том числе — 428 металлургических, 625 химических и нефтехимических, 5429 машиностроительных и т. д., выбрасывающих свыше 4000 видов не утилизируемых химических соединений [27].

В принципе любая деятельность человечества обычно сопровождается обеднением и деградацией биосферы. Непрерывный рост городов, сокращение площадей лесов, травяного и почвенного покрова, рост выбросов твердых, жидких и газообразных отходов привели к тому, что природные объекты оказались неспособными усваивать или полностью разрушать вредные компоненты, в результате чего происходит постепенное увеличение общего загрязнения биосферы.

Антропогенные изменения в той или иной мере уже охватили почти всю поверхность Земли. При этом изменяются площадь, состав и географическое размещение растительного покрова. Например, ежегодно сводится около 62 тыс. км² лесов и 155,4 тыс. км² подвергается деградации, а за последние несколько сотен лет уничтожено около 65 % лесов, что вызвало изменение климата, активни-

зирвало поверхностный сток, эрозию, а также понижение уровня грунтовых вод и другие негативные процессы. Климатические изменения объясняются тем, что имеющаяся до уничтожения растительность фильтровала (кроны хвойных деревьев на 1 га ежегодно задерживают свыше 32 т пыли, дубовых — 56 т, а буковых — 63 т) загрязнения атмосферы и улучшала ее состояние, выделяя антисептические фитонциды (если в 1 м³ воздуха в больших городах содержится около 36 000 бактерий, то в лесу — всего 490).

Леса поставляют 1/3 кислорода воздуха и являются поглотителями углекислоты и токсичных газов. Они уменьшают аэрозольное помутнение на 20—40 %, увеличивают ультрафиолетовую радиацию на 15—20 % и уменьшают концентрацию выхлопных газов на 5—40 % [21]. Леса также выступают в роли регулятора температуры атмосферы и поверхностной области земной коры, смягчая климат. Поэтому в странах умеренного пояса, покрытых большими лесами, лето более короткое, холодное и влажное, а зима более умеренная, сухая и продолжительная.

Леса способствуют накоплению влаги, усиливают инфильтрацию осадков и повышают уровень грунтовых вод. Леса на площади 100 тыс. м² увеличивают питание грунтовых вод на 0,3—0,8 км³.

Человечество кардинально и зачастую бесконтрольно преобразует большинство характеристик биосферы, главными из которых являются загрязнение и трансформация климата на планете.

Среди многообразия антропогенных климатизирующих факторов выделяют две основные группы, влияющие на состояние и динамику атмосферы и подстилающей поверхности [21].

К важнейшим из них, формирующим многолетний режим погоды, относятся приход и расход солнечной энергии, атмосферная циркуляция, вертикальный тепло- и влагообмен, а также взаимодействие тепла и влаги в системе «атмосфера — подстилающая поверхность».

Антропогенному воздействию наиболее подвержены прямая солнечная радиация и отражающие свойства поверхности Земли, которым и принадлежит основная роль в общем радиационном балансе. Так, загрязнение снижает исходную прозрачность атмосферы и уменьшает прямую солнечную радиацию, вследствие ее поглощения аэрозольными и твердыми взвешьями. В результате человеческой деятельности уменьшение прямой радиации колеблется на разных территориях в пределах от 1 до 50 % и более. В связи с этим ухудшается их освещенность и на планету поступает меньше тепла.

Большая роль в аккумуляровании радиации и формировании теплового режима принадлежит *альбедо*, т. е. отражательной способности различных поверхностей (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Величина отражательной способности (альбедо) поверхности Земли

| Поверхность | Альбедо | Поверхность | Альбедо |
|---------------------------------------|---------|-------------------------|---------|
| Снег | 85—40 | Лес лиственный | 20 |
| Почва светлая (лёсс, кварцевый песок) | 35 | Лес еловый | 10—15 |
| Почва темная | 15 | Вода при высоте солнца: | |
| Трава светлая | 25 | 45° | 5 |
| Трава темная | 20 | 15° | 20 |
| | | 5° | 55 |

В настоящее время альбедо Земли изменяется в направлении понижения отражательных свойств и в связи с этим повышается на ее поверхности температура.

Например, существенными факторами понижения общего альбедо Земли служит потемнение поверхности европейских и североамериканских ледников, связанное с осадением сажи и копоти из загрязненной атмосферы, а также — потемнение снежного покрова на огромных пространствах вблизи промышленных центров, снижение их альбедо составляет 40 % [21].

Распашка новых земель, увеличение площади пахоты (альбедо свежевспаханной почвы — 0,5 %), лесоразведение, озеленение, обводнение территорий, урбанизация, агломерирова-

ние и другие изменения поверхности Земли сопровождаются понижением альбедо и, следовательно, глобальным повышением температуры.

К факторам и условиям, повышающим температуру воздуха и грунтов, относятся:

- увеличение в составе атмосферы углекислого газа, свободно пропускающего лучистую энергию Солнца, но частично задерживающего отраженные тепловые лучи;
- выделение антропогенного тепла при сжигании различных видов минерального и органического топлива, а также при крупных и длительных пожарах;
- поступление в атмосферу электрической, ядерной и других видов энергии;
- сброс горячих и теплых вод;
- повышение аккумуляции солнечного тепла поверхностями с пониженным альбедо;
- увеличение площади поверхностей, выполняющих роль тепловых аккумуляторов (асфальт, каменные покрытия, стены, железные крыши зданий и т. д.), имеющих в летнее время температуру 60°C ;
- осушение почв и грунтов, плотная застройка, вырубка лесов и т. д.

Глобальное увеличение температуры верхних оболочек Земли (приводящее к резкому исчезновению мощного ледового покрова) вызовет перераспределение гравитационных нагрузок, изменит напряженное состояние земной коры и отразится на величине угла наклона земной оси, а также скорости вращения нашей планеты. Это существенно повысит тектоническую активность планеты, усилит горообразовательные процессы, землетрясения и извержения вулканов.

К антропогенным факторам и условиям, понижающим температуру, относятся:

- запыление атмосферы, препятствующее проникновению солнечных лучей на земную поверхность;
- повышение альбедо поверхностей (увеличение доли территории светлых тонов);
- озеленение местности;
- искусственное орошение и обводнение территорий;

- искусственное замораживание грунтов и вод;
- выделение тепла людьми, животными и микроорганизмами.

Так, лесоразведение оказывает благоприятное влияние на местный климат. Лесопосадки и озеленение территорий сокращают прямую солнечную радиацию. Густые кроны деревьев почти полностью задерживают солнечные лучи, поглощают и рассеивают их и тем самым уменьшают поступление тепла на землю.

Наличие леса сглаживает суточные и сезонные колебания температуры и удлиняет безморозный период. Лес повышает влажность воздуха, понижает испаряемость, вдвое уменьшает запыленность воздуха, поглощает углекислоту, выделяет кислород, антисептические фитонциды, улучшает общее состояние атмосферы.

Привнесение в биосферу любых новых физических, химических и биохимических компонентов называют *загрязнением*. Оно бывает как *природным*, так и *техногенным*. Количественной мерой *загрязнения биосферы* может быть величина, суммирующая коэффициенты концентрации или рассеяния по отношению к фоновому уровню:

$$Z_c = \frac{C_i - C_f}{C_f} + 1, \quad (4.1)$$

где C_i — отношение содержания химического элемента в оцениваемом объекте к фоновому C_f .

Однако эта оценка представляется по меньшей мере недостаточной. Во-первых, по-видимому, следует учитывать лишь превышение концентраций загрязняющих элементов над фоном. Во-вторых, необходимо ранжировать загрязняющие элементы по *степени токсичности*. К настоящему времени также не решены и вопросы суммарного влияния на биосферу нескольких элементов, вызывающих эффекты их антагонистического (снижающегося), синергетического (увеличивающегося) или эмерджентного (обуславливающего появление совершенно новых свойств) взаимодействия. Эта проблема очень остра, так как обычно в биосфере присутствуют и одновременно взаимодействуют большое количество и число химических элементов. При совместном присутствии в би-

осфере нескольких токсических элементов (1, 2, ..., n) сумма их концентраций не должна превышать единицы при расчете по формуле

$$\frac{C_1}{ПДК_1} + \frac{C_2}{ПДК_2} + \dots + \frac{C_n}{ПДК_n} < 1, \quad (4.2)$$

где C_1, C_2, C_n — фактические концентрации токсиканта;

$ПДК_1, ПДК_2, ПДК_n$ — предельно допустимые концентрации тех же веществ.

В ходе своей производственной или сельскохозяйственной деятельности человек создает значительное количество отходов, накапливаемых в различных геосферах и загрязняющих биосферу пылью, газами или растворами. Поэтому загрязнение геосфер — это прежде всего проблема отходов. В биосферном понимании к *отходам* следует относить все, что появляется в результате жизнедеятельности человека и не включается в природные или искусственные биогеоценозы.

Большую опасность для биосферы представляют отходы, полученные на основе синтеза новых веществ или привнесенные из других сфер и содержащие «чужеродные» вещества или элементы. В России ежегодно образуется около 20 млн. т (без учета горной промышленности) не утилизованных токсичных отходов, которые частично складировуются на территории предприятий или же сбрасываются (зачастую бесконтрольно) в канализационные сети, поверхностные водоемы, балки, овраги, полигоны бытовых отходов.

В общем случае отходы человеческой деятельности делятся на твердые сбросы, стоки и выбросы в атмосферу (табл. 4.2). Они также могут быть промышленными, коммунальными или бытовыми.

Значительные количества твердых отходов дают *тепловые электростанции* [26]. Только в масштабах СНГ ТЭЦ, работающие на угле и торфе, выбрасывают около 70 млн. т пылевидной золы и кусковых шлаков в год. За истекшее столетие на земную поверхность попало свыше 20 млрд. т шлака и рассеялось в виде аэрозоля почти 3 млрд. т золы. Отвалы вблизи крупной ТЭС обычно занимают 400—800 га ценных земель. Накопление громадных масс твердых отходов (порядка 110 млн. т

в год) сопровождает работу 300 российских ТЭС на угле, расходуемом на эти цели в СНГ в количестве 5 млрд. т/год.

Высокоотходны и металлургические отрасли: ежегодно металлурги СНГ накапливают свыше 52 млн. т доменных, 24 млн. т сталеплавильных и 2,4 млн. т ферросплавных шлаков.

Таблица 4.2

Концентрации химических элементов в различных видах отходов

| Загрязняющие вещества | Источники загрязнения | Кларк концентраций | | | |
|------------------------------|--------------------------|---|---|--|--|
| | | п · 1000 | п · 100 | п · 10 | п |
| Расеиваемые пыли | Промышленные предприятия | Hg 50; W 10; Sb 5,0; Cd 12 | Mo 8,3; Ag 7,3; Cu 7,3; Bi 4,0; Zn 3,8; Pb 3,8 | Sn 9,6; Co 5,6; Cr 5,4; V 3,1; Ni 2,3; Hf 1,7 | Mn 9,2; Zr 7,0; Ti 15; B 3,9; Sc 3,6; Be 2,0 |
| | Электростанции | — | — | — | Yb 9,0; Hg 6,0; B 6,0; Sc 6,0; Mo 6,0; As 6,0; Ag 3,0; Sb 3,0; Cu 3,0; Pb 2,7; Zn 2,5; B 8,0; Zr 2,0 |
| Твердые отходы (зола, шлаки) | Промышленные предприятия | Bi 25; Cd 8,0; Ag 2,5 | Sn 8,0; Sb 4,8; Zn 3,6; Cu 2,1; Cr 1,2 | Ni 5,0; V 4,0; W 3,7; Pb 3,2 | — |
| | Бытовой мусор | Bi 1,8 | Ag 6,8; Pb 2,0; Sn 1,9; Cd 1,7; Zn 1,4 | Cu 8,6; Sb 4,6; Cr 1,5; Hg 1,5; Mo 1,3 | Ni 3,0 |
| Стоки | Электростанции | — | — | — | Hg 6,0; Yb 3,0; Mo 3,0; Cu 3,0; Zn 2,0; Pb 2,0 |
| | Промышленные предприятия | Hg 100; Cr 12,5; Cd 10; Cu 6,5 | Pb 1,0; Zn 4,6 | F 7,6; As 1,0; Sr 1,0 | — |
| | Электростанции | — | — | Al 6,0; As 1,0; Cu 1,1 | Cr 3,0; F 2,5 |

Примечание. Цифры элементов — величина п.

Так, в черной металлургии на 1 т металла приходится 0,2—1 т шлака, в цветной — уже 10—100 т. Шлаки металлургических производств обычно содержат значительное количество ценных компонентов (табл. 4.3), которые зачастую не утилизируются, но всегда представляют собой мощный источник загрязнения биосферы. В составе осадков гальванического производства (130 предприятий СНГ) обнаружены высокие концентрации Zn, Sn, иногда Ag и Bi. Кларки концентрации ряда токсичных элементов в них также очень высоки: Cd — $n \cdot 1000$, (Pb, Cu, Cr) — $n \cdot 100$, Ni — $n \cdot 10$.

В машиностроении максимальное количество твердых отходов приходится на литейные цехи. В настоящее время образующаяся при этом технологическая пыль, обычно содержащая повышенные концентрации Mg, W, Cr, Ni, Cu и V, как правило, не утилизируется.

В химической промышленности наиболее объемными отходами являются фосфогипс (613 млн. т в год), пиритные огарки, галитовые отходы, Fe-купорос и др. Частично утилизируются лишь фосфогипс (9%) и пиритовые огарки. В шламе от получения химических реактивов кларк концентрации Cd достигает 2300, а Pb — $n \cdot 100$. В типографских отходах кларк концентрации свинца равен 5. Несовершенство технологических процессов химической промышленности приводит к тому, что каждый год количество твердых отходов увеличивается примерно на 115 млн. т. Около 94 млн. т твердых и 97 млн. т жидких отходов образуются в агрохимической промышленности. Общая площадь шламоохранилищ этой отрасли составляет в настоящее время примерно 10 тыс. га.

Коммунальные и бытовые твердые отходы (включающие городской мусор и осадки очистных сооружений) по объему сопоставимы с промышленными. Так, промышленные и бытовые отходы только городского сектора ежегодно составляют более 3,5 млрд. т, сточные воды — 500 км³, выбросы газов и аэрозолей — 1 млрд. т. Их количество оценивается в СНГ величиной 0,15—0,3 млн. т/год. Из них 124 млн. м³ вывозится на свалки, а остальной мусор уничтожается и сжигается на специальных заводах. Высокотоксичными являются и осадки очистных сооружений, величина которых в СНГ достигает 6—7 млн. т/год.

Таблица 4.3

Относительные концентрации химических элементов
в твердых промышленных отходах

| Вид отхода | Концентрация химических элементов | | | |
|--|-----------------------------------|------------------------|------------|------------------------------|
| | n-1000 | n-100 | n-10 | n |
| <i>Черная металлургия</i> | | | | |
| Шлак доменный | — | — | — | Mn, Cr, V, B, S |
| Шлак сталеплавильный и ферросплавный | — | — | Mn, Cr, V | — |
| <i>Цветная металлургия</i> | | | | |
| Шлак медеплавильный | — | Cu | — | — |
| Шлак свинцовоплавильный | Zn, Pb | Cu | — | — |
| Шлак никелеплавильный | — | Cr | Ni, Co, Cu | — |
| <i>Машиностроение и металлообработка</i> | | | | |
| Шлак чугуна | — | Mn | Cr | — |
| Шлак стали | — | Mn | Cr | V |
| Шлак алюминия | — | — | W | Cr, Co |
| Шлак магния | — | W | — | Zn, Cr, Co |
| Горелая земля | — | — | W | Mo, Zn, Cu, Pb |
| Пыль от пескоустановок | — | W, Mo | Cr, Ni, Cu | V, Co |
| Гальванические осадки | Cd | Cu, Cr, Pb | Ni, Zn | — |
| <i>Химическая промышленность</i> | | | | |
| Шлам очистных сооружений | Cd, Ag | As, Pb, Cr | Cu | Mo, Ni |
| Шлам производства красителей | Co, Ag | Cu | Zn, Ni | — |
| Шлам производства пластмасс | — | Zn, Co | Mo, Ni, Cr | Pb, Co, V |
| Отходы фенопластов | — | As | — | B, Co, V |
| Отходы резины | — | — | Zn | Cd, Cu |
| <i>Легкая промышленность</i> | | | | |
| Кожевенные отходы | Cr | — | — | — |
| <i>Полиграфическое производство</i> | | | | |
| Бумажная пыль | — | — | Sb | Zn, Pb |
| Осадки цехов цинкографии и гальванического | — | Sn, Zn, Cu, Ni, Cr, Sb | — | — |
| <i>Производство стройматериалов</i> | | | | |
| Бетонная смесь (брак) | — | — | — | Zn, Pb, Cu |
| <i>Энергетика</i> | | | | |
| Зола и шлак теплоэлектростанций | — | — | — | Pb, Mo, V, Be, Ni, Cu, Zn, W |

4.2

Антропогенное преобразование и загрязнение атмосферы

Установившийся в ходе миллионнолетней эволюции первоначальный состав атмосферы Земли в настоящее время изменяется под влиянием естественных (связанных с эволюцией каждой из сфер: лито-, гидро- и биосферы), а также антропогенных факторов. Так, в земную атмосферу поступает около 1 млн. т/год космической, $4 \cdot 10^6$ т/год вулканической (витающей годами) и около $2 \cdot 10^7$ т/год техногенной (не оседающей около месяца) пыли.

По ряду газопылеобразных загрязнителей (табл. 4.4) объем антропогенных выбросов уже приближается к объему природных (при извержениях вулканов, газопроявлениях из разломов земной коры, выделениях углеводородов из болот, тундр, торфяников, илов и т. д.), а по некоторым — более чем в 100 раз их превышает.

Таблица 4.4

Количество вредных веществ, поступающих в земную атмосферу

| Частицы радиусом < 20 мкм | Количество, $n \cdot 10^4$, т/год |
|--|------------------------------------|
| <i>Естественного происхождения</i> | |
| Почвенная пыль и продукты выветривания горных пород | 100—500 |
| Дым от пожаров и сжигания отходов | 3—150 |
| Морская соль | 300 |
| Частицы вулканических извержений | 25—150 |
| Частицы, образованные взаимодействием газообразных компонентов | 345—1100 |
| В том числе: | |
| сульфаты из сероводорода | 130—200 |
| соли аммония из аммиака | 80—270 |
| нитраты из окислов азота | 60—430 |
| углеводороды из растений | 75—200 |
| <i>Техногенного происхождения</i> | |
| Пыль | 10—90 |
| Частицы газообразных компонентов | 175—325 |
| В том числе: | |
| сульфаты из сернистого газа | 130—200 |
| нитраты из оксидов азота | 30—35 |
| углеводороды | 15—90 |

В результате различного рода эмиссии атмосферный воздух содержит жидкие и твердые аэрозоли как природного происхождения, так и образованные вследствие деятельности человека, а также последующих реакций. Все же газовые образования естественного происхождения компонентов атмосферного воздуха пока еще превосходят техногенные (табл. 4.5).

Таблица 4.5

Происхождение компонентов загрязнения земной атмосферы

| Компонент | Загрязнение, т/год | |
|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| | природное | техногенное |
| Озон | $2 \cdot 10^9$ | Незначительное |
| Углекислый газ | $7 \cdot 10^{10}$ | $1,5 \cdot 10^{10}$ |
| Угарный газ | — | $2,0 \cdot 10^8$ |
| Сернистый газ | $1,42 \cdot 10^8$ | $7,3 \cdot 10^7$ |
| Соединения азота | $1,40 \cdot 10^9$ | $1,5 \cdot 10^7$ |
| Взвешенные вещества | $(770—2200) \cdot 10^6$ | $(960—2615) \cdot 10^6$ |

За всю историю человеческой деятельности на сжигание добытой нефти, каменного угля, газа, дров и древесных углей, а также лесные пожары было израсходовано около $274 \cdot 10^{12}$ кг кислорода (за последние 50 лет примерно $246 \cdot 10^{12}$ кг, т. е. столько же, сколько за весь антропогенный период) [1]. Это означает, что убыль свободного кислорода в атмосфере за все время существования человека равна 0,0182 %. В настоящее время ежегодно во всем мире только на сжигание топлива затрачивается около 10^{13} кг свободного кислорода атмосферы.

В результате процессов горения кислород переходит в связанную форму: одна часть его соединяется с углеродом и образуется углекислый газ, а другая часть — с водородом и возвращается в атмосферу в виде водяного пара (это прибавляет атмосфере $288 \cdot 10^{12}$ кг пара, увеличивается его содержание в воздухе на 12 %).

Во второй половине XX века, и особенно к 1975—1990 гг., промышленная революция (начавшаяся в середине XIX ве-

ка) обусловила значительный рост выбросов газообразных компонентов, в том числе и искусственно созданных. За истекшие 100 лет в атмосферу поступило 360 млрд. т углекислоты (вследствие чего концентрация углекислого газа возросла на 13%), 1,35 млн. т кремния, 1,5 млн. т мышьяка, более 1 млн. т никеля, 900 тыс. т кобальта, по 600 тыс. т цинка и сурьмы, а также сотни и десятки тысяч тонн других токсичных металлов [21, 26].

В настоящее время мировое хозяйство ежегодно выбрасывает в атмосферу 230 млн. т оксида углерода, более 50 млн. т углеводородов, 120 млн. т золы, 150 млн. т диоксида серы, более 250 млн. т мелкодисперсных аэрозолей, значительное количество фтористых соединений, ртути и других токсичных веществ [1]. По данным ООН, ежегодно в атмосферу нашей планеты попадает 2,5 млрд. т пыли, 1,2 млрд. т оксидов азота, 100 млн. т метана, 70 млн. т соединений серы, 4 млн. т аммиака и т. д.

Основными антропогенными источниками загрязнения воздушной среды являются тепловые электростанции, выбросы которых составляют 43 % от всех выбросов в атмосферу [27]. Установлено, что органического топлива в сутки человечеством потребляется столько, сколько природа синтезировала его за тысячелетия. При ежегодном сжигании 7 млрд. т условного топлива в атмосферу выбрасывается около 1 млрд. т сажи и $143 \cdot 10^4$ Дж тепла. Имеющееся в настоящее время поступление в атмосферу SO_4 (вследствие сжигания топлива) эквивалентно выбросу примерно 200 млн. т H_2SO_4 . В связи с этим существенно снижается рН природных вод и почв.

В балансе техногенного загрязнения атмосферы выбросы предприятий черной металлургии составляют 14,7 %, нефтяной промышленности — 10,8 %, предприятий цветной металлургии — 8,4 %, прочих промышленных предприятий и транспорта — 23,1 %.

Объемы загрязнения атмосферы техногенными выбросами различаются *территориально*. Например, в России к основным регионам выбросов CO_2 относятся Центральный (до 20 тыс. т/км²), Ленинградская и Донецко-Приднепровская аг-

ломерации, многие районы Поволжья. По отраслевому признаку основными загрязнителями по CO_2 являются предприятия черной металлургии — 6714 тыс. т, Минтопэнерго — 988 тыс. т, нефтехимической — 677 тыс. т и угольной промышленности — 614 тыс. т, Газпрома — 561 тыс. т.

Так, в черной металлургии при коксовании 1 т угля образуется 300—320 м³ газа, содержащего, %: CH_4 — 20—34, CO — 4,6, CO_2 — 3, H_2 — 2,5; при мартеновской плавке на 1 т стали выделяется 3—4 тыс. м³ газов со средней концентрацией пыли 0,5 г/м³ и до 60 кг CO , а в процессе конвертирования чугуна дымовые выбросы содержат 10—12 г/м³ CO .

В 1996 г. в России общие выбросы в атмосферу загрязняющих веществ всей промышленностью составили 16,7 млн. т: наибольший «вклад» внесли предприятия энергетики — 28,5% (среди них лидируют ТЭС — около 90% всех выбросов). А так как во многих сжигаемых углях содержатся металлы (табл. 4.6), то происходит активное загрязнение ими и атмосферы.

Таблица 4.6

Содержание тяжелых металлов в углях

| Месторождение | Металл, мг/кг условного топлива | | | | |
|-----------------|---------------------------------|-------|-------|-------|--------|
| | Pb | As | V | Cr | Zn |
| Донецкое | 51—63 | 24—33 | 36—51 | 33—45 | 21—120 |
| Экибастузское | 16—32 | 12—24 | 32—96 | 16—80 | 48—200 |
| Канско-Ачинское | 2—5 | 3—9 | 2—6 | 3—9 | 5—11 |

Предприятия транспорта, теплоэнергетики, черной и цветной металлургии и другие ежегодно совместно выбрасывают в атмосферу примерно 25 млн. т загрязняющих веществ, которые в конечном счете вместе с осадками выпадают на поверхность Земли и увеличивают загрязнение почв, горных пород, вод и растительности. При техногенном загрязнении атмосферы содержащиеся в ней пары воды приобретают кислые свойства. Это объясняется тем, что угли и нефти в том или ином количестве содержат серу.

При их сжигании без предварительного обессеривания выделяются пары сернистой (H_2SO_3) и серной (H_2SO_4) ки-

слот. В еще большем количестве пары этих кислот выделяются при плавке колчеданных руд меди и других цветных металлов. Производство алюминия повсеместно сопровождается выделением паров особенно активной плавиковой кислоты (HF). Многие производства выделяют в воздух пары азотистой (HNO_2) и азотной (HNO_3) кислот.

Степень загрязнения атмосферы изменяется как по горизонтали, так и по вертикали. По вертикали загрязнения тропосферы отмечены космическими наблюдениями на высоту 20 километров и более. К настоящему времени воздушное загрязнение газами (90 %) и аэрозолями (10 %) захватило почти всю тропосферу (7—18 км), но главное загрязнение приходится на ее нижние слои.

Различают загрязнение атмосферы *местное, крупноплощадное, региональное, континентальное и глобальное* [21].

Закономерности *площадного загрязнения* обусловлены уровнем индустриализации и цивилизации, мощностью источников выбросов, климатической зональностью, подвижностью ингредиентов загрязнения и т.д.

Примером загрязнения континентального масштаба может служить «кислотный» дождь (с величиной рН = 2,3—5,6) в Скандинавии, вызванный эмиссией окислов серы из Великобритании и Германии.

Глобальное загрязнение атмосферы обусловлено тем, что хотя в настоящее время около 95 % антропогенных выбросов CO_2 и SO_2 выбрасываются в атмосферу в Северном полушарии Земли, эти загрязнения стали достигать уже зоны не только Арктики, но и Антарктиды. Выброс экологически опасных тонкодисперсных асбестозных волокон, образующихся при добыче (особенно при открытом способе) и переработке асбеста, характеризуется глобальным распространением на значительные (свыше 8000 км) расстояния от источников распространения. Другим примером служит радиоактивное загрязнение воздуха, вызванное ядерными взрывами, сохраняемое в атмосфере в течение нескольких месяцев и распространяемое на тысячи и десятки тысяч километров, захватывая территории нескольких стран. Тонкодисперсная пыль может переноситься на расстояние свыше 6000 км.

Таким образом, выброс активных и токсичных газообразных загрязнителей в атмосферу, а также метана из агрокультурных источников (рисовых полей, отходов животноводства, горения и окисления биомассы и т. д.) и антропогенных аэрозолей, а также искусственно созданных газов (типа хлор-фтор-углеродов) отрицательно влияет на состояние, состав и свойства атмосферы уже в *глобальном масштабе*, способствуя разрушению защитного озонового слоя, усиливая парниковый эффект и сокращая инсоляцию практически во всех районах нашей планеты.

Запыление атмосферы приводит к обратному явлению — понижению температуры, так как пыль служит экраном, задерживающим солнечную радиацию. Состояние атмосферы также изменяется и во времени: различают суточные, сезонные, годовые и вековые изменения.

Изменение содержания атмосферной пыли (природной и техногенной) происходит в зависимости от времени года, наличия растительного покрова и его вида, погоды и т. д. Так, на величину концентраций вредных примесей в атмосфере влияют не только исходные объемы их поступления и физико-химические свойства, но и метеорологические условия (табл. 4.7), определяющие перенос и рассеивание элементов в воздухе (смена направления или скорости ветра и др.). Все же *основные процессы удаления аэрозолей из атмосферы* — это осаднение частиц под воздействием гравитации, конденсации, вымывания дождем и т. д.

Таблица 4.7

Зависимость скорости осаднения при 0°C и 760 мм рт. ст. (без ветра) от радиуса частиц

| Радиус частиц, мм | Скорость осаднения, см/с |
|-------------------|--------------------------|
| 0,1 | $8 \cdot 10^{-6}$ |
| 1,0 | $4 \cdot 10^{-3}$ |
| 10,0 | 0,3 |
| 100,0 | 25,0 |

Нежелательной с точки зрения загрязнения приземного слоя воздуха является *инверсия температуры* (обеспечиваю-

щая смещение охлажденных слоев воздуха вниз и скопление их под поясами теплого воздуха), обуславливающая повышение температуры атмосферы с высотой вместо ее обычного (для нижних слоев) убывания на величину 0,5—0,6 °С на каждые 100 м высоты. Инверсия температуры препятствует развитию вертикальных движений воздуха и способствует образованию зон с повышенным содержанием примесей.

Таким образом, основными загрязнителями атмосферы являются промышленные предприятия, тепловые электростанции (табл. 4.8) и транспорт (их выбросы содержат оксиды N, S, C, углеводороды, радиоактивные элементы и твердые частицы). Например, только в России автотранспортом выбрасывается примерно 30 млн. т/год углеводородов, а в крупных городах Америки на долю выхлопных газов автомобилей приходится до 90 % загрязнения атмосферы, в СНГ — 25 % (причем на долю оксидов углерода примерно 50 %).

Таблица 4.8

Выбросы в атмосферу загрязняющих веществ от разного топлива

| Топливо | Теплота сгорания, МДж/кг | Выбросы, г/кВт·ч | |
|-----------------|-----------------------------|------------------|-----------------|
| | | SO ₂ | NO _x |
| Мазут | 38,8 | 15,9 | 2,4 |
| Уголь: | | | |
| подмосковный | 10,4 | 53,9 | 2,2 |
| донецкий | 24,2 | 21,6 | 2,8 |
| кузнецкий | 22,6 | 3,5 | 3,7 |
| канско-ачинский | 15,7 | 2,6 | 1,5 |
| экибастузский | 12,1 | 10,2 | 3,5 |

Огромный вред биосфере наносит тетраэтил свинца, добавляемый в бензин для повышения октанового числа (в Англии было констатировано развитие дегенеративности у детей, проживающих в придорожной полосе, а в Америке на дороге, ведущей в Вашингтон, произошла массовая гибель птиц, поедающих гусениц с повышенным содержанием свинца). В индустриальных процессах вместе с пылью и газами в атмосферу поступает огромное количество токсичных элементов (табл. 4.9).

Таблица 4.9

Относительные концентрации химических элементов

| Процесс | Содержание элементов | | | |
|---|----------------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| | п. 1000 | п. 100 | п. 10 | п |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| <i>Цветная металлургия</i> | | | | |
| Переработка лома баббита | Mg, Sb, Cd | In, Bi, Pb, Sn, Ag, Zn, As | Cu, Cr, Ti | W, Ni, Mo |
| Выплавка Sn | — | Sb, Ag, Sn, Zn, Pb, Cd, W | Cr, Ga, Bi, Mo | Cu, Co, V, Ni |
| Производство: алюминия | — | Cd, Zn, Sb, Pb, Cu, Mo | W, Sn, Cr, Bi, Mo | Mn, Ag, B, Co |
| аккумуляторов | Sb, Ag | Bi, Cu, Pb, Sn | Ni, As, Co, W, Zn, In, Ti, Cu | — |
| <i>Машиностроение и металлообработка</i> | | | | |
| Литье чугуна | — | — | Zn, W | Mo, Sn, Pb, Cu, Cr |
| Литье стали | — | — | Sn, Sb, Ni, W | Mn, Zn, B, Pb, Mo |
| Выбивка форм | — | — | W | Mo, Zn, B, Pb, Mo |
| Очистка форм пескоструйных установок | — | W, Mo | Cr, Ni, Cu | V, Co |
| Кузнечно-прессовое производство | — | Zn | W, Mn | Mo, Ni, Sn, Co, Pb |
| Механическая обработка цветных металлов | Pb, Zn, Cu | Cr, Ni | W, Sn | Co, Mo, V |
| Производство и заточка инструмента | W | Pb, Mo, Co, Sn, Sb | Cr, Ni, Cu, V | Se, Zn |
| <i>Химическое производство</i> | | | | |
| Производство: чистых веществ | W | Ob, Sn, Cd, Hf | Ag, Pb, Zn, Bi, Nb | Cu, Mo, Ni, Zn |
| масляных красок | Hg, Cd | Ag, Zn, Sn, Cu, Bi, W | Sb, Mo | Co, Sn, Ni |
| кокса | Hg | — | Pb, Sb, W, Zn | Mo, Sn |
| компонента пластмасс | — | — | Pb, Sb, Sn, W | Se |
| <i>Производство строительных материалов</i> | | | | |
| Обжиг цементной шихты | — | Ag | Sb | Sn, Ti, Cu, Mo, Ba |
| Помол цементного клинкера | — | — | — | Zn, Mo, Cu, Sc, Ba, Ag |
| Производство: керамзита | — | Pb | W, Ag, Bi, Mo | Co, Zn, Cu, Li, Ni, V, Cr |
| огнеупорного кирпича | — | Sb, Pb | Bi | Zn, Pb, Cu |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------------------------|-------------------|-------|----------------------|----------------------------------|
| | <i>Энергетика</i> | | | |
| Теплоэлектростанция: на угле | — | — | O, Pb, Mo, Ge, | Be, Li, V, Ni, Cu, Zn, Ag, W, |
| на мазуте | — | V, Ni | Cr, Zn, Mo, W, Pb | Cu, Ag, Sn |

В результате совместного действия техногенных источников загрязнения и природных атмосферных условий возникает весьма негативное явление, получившее название *смог* (от англ. *smoke* — дым, копоть и *fog* — густой туман). Смог имеет несколько разновидностей:

- *смог ледяной* (аляскинский) — сочетание газообразных загрязнителей, пылевых частиц и кристаллов льда, возникающих при замерзании капель тумана и пара отопительных систем в районах с суровым климатом в зимний период времени;
- *смог влажный* (лондонский) — сочетание преимущественно сернистого ангидрида, пылевых частиц и капель тумана;
- *смог фотохимический* (лос-анджелесский) — вторичное (кумулятивное) загрязнение атмосферы, возникающее в результате разложения загрязняющих веществ солнечными лучами (особенно ультрафиолетовыми). Главным ядовитым компонентом такого смога служит озон, дополнительными составляющими — угарный газ, соединения азота, перекись ацетилнитрата, азотная кислота [42].

Все же ресурсы атмосферного воздуха Земли пока неисчерпаемы. Так, запасы кислорода в атмосфере составляют 1200 трлн. т, или 20,94 % от его общего объема [17]. На фоне этой величины кажется мало ощутимой даже цифра 2,4 трлн. т — то количество кислорода, которое было израсходовано человечеством за исторический период. Однако качественные изменения воздуха под влиянием хозяйственной деятельности человека резко преобразуют биосферу в целом.

Кислород в основном расходуется при следующих антропогенных процессах:

- сжигание ископаемого топлива и леса;
- использование в различных технологиях производства продуктов потребления;
- сведение и дигрессии лесов, пастбищ и опустынивание;
- окисление органического вещества почвы при ее разрушении или истощении.

На эти процессы и ряд других ежегодно затрачивается примерно 30 млрд. т кислорода. С ростом промышленного производства эта цифра ежегодно увеличивается, и, следовательно, потери кислорода растут.

Однако наибольшие проблемы в биосфере в настоящее время связаны не с кислородом, а с газами атмосферы, содержащимися в ней в малых количествах. Так, за последние 300 лет концентрация CO_2 в воздухе повысилась примерно на 25 %. Быстро увеличивается содержание метана, окислов азота и таких чисто промышленных продуктов, как хлорфтор-углероды (фреоны) [17]. С накоплением в атмосфере CO_2 , N_2O , CH_4 , CCl_2F_2 , CCl_3F и тропосферного озона увеличивается парниковый эффект атмосферы, а с убылью стратосферного озона — облучение объектов биосферы аномальными дозами жесткого ультрафиолета.

Антропогенные воздействия изменяют и исходную влажность воздуха. Причем относительная влажность изменяется больше, чем абсолютная. На баланс влажности в атмосфере оказывают влияние температура, выделение влаги растениями, почвами, грунтами, водоемами, людьми, процессы конденсации и др. Вследствие транспирации влажность воздуха (в зависимости от видов растений) повышается до 10—25 % [21]. Так, испарение усиливается при повышении температуры или увеличении скорости ветра. Влажность повышается и в связи с обводнением территорий, устройством водохранилищ, прудов, каналов и других антропогенных водоемов. Кроме того, орошение земель, поливка улиц, скверов, подтопление, заболачивание территорий, искусственное увлажнение грунтов приводят к повышению влажности воздуха.

Наряду с этим действуют антропогенные факторы, понижающие влажность воздуха. К ним относятся:

- уменьшение испаряющей поверхности (вследствие застройки или искусственных покрытий);
- засыпка рек, ручьев, озер, болот, прудов;
- уничтожение растительности;
- перевод поверхностного стока в подземный (устройство водосточной сети);
- осушение местности;
- снегоуборка;
- повышение температуры воздуха и др.

Выпадение осадков усиливается при насыщении воздуха влагой, аэрозолями или разнообразными ядрами конденсации. Температурным инверсиям благоприятствуют озеленение, обводнение и орошение. Выпадение осадков уменьшается вследствие вырубки лесов, осушения земель, засыпки рек, озер, прудов и болот и т. д. Так, количество туманов увеличивается при запылении атмосферы, которое вызывает процессы конденсации влаги, а также в результате искусственного повышения уровня грунтовых вод, заболачивания, обводнения местности или орошения земель. Вырубка лесов, осушение почв и грунтов, понижение уровня грунтовых вод, ликвидация водосемов препятствуют формированию туманов.

Образование облачности связано с режимом влаго- и теплообмена. Ветровой режим обусловлен состоянием подстилающей поверхности и наличием термоградиентов, с которыми связаны местные конвекции воздуха. Застройка и озеленение местности, а также лесопосадки препятствуют свободному движению воздуха, уменьшают скорость ветра в нижней части атмосферы до 100—1500 раз и более.

В целом загрязнение атмосферы изменяет местный и даже региональный климат (прежде всего в мегаполисах), уменьшая солнечную радиацию на 30—40 %, увеличивая туманы и атмосферные осадки. Из-за этого в ряде городов уже запаздывают рассветы, раньше наступают сумерки и уменьшается солнечное освещение.

Еще одна угроза таится в образовании над странами Европы, части Северной Америки, юга Африки и урбанизированными районами Бразилии атмосферных «зонтиков» загрязнения соединениями серы и азота.

Их наличие приводит к выпадению *кислотных осадков*, пагубно влияющих на биосферу.

Из атмосферы загрязнители попадают в почву и воду, а оттуда — в живые организмы (табл. 4.10). В крупном промышленном городе в среднем за год выпадает до 400 т и более сажи, пыли и других твердых частиц на 1 км² [21].

Таблица 4.10

Среднее содержание химических элементов в золе древесных растений вблизи источников загрязнения, мг/кг

| Источники загрязнения | Токсикант | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------|-----|----|-----|------|-----|------|------|----|-----|
| | Sr | Ti | V | Ni | Cu | Ag | Zn | Pb | Sn | Mo |
| Завод цветных металлов | 717 | 650 | 10 | 393 | 2683 | 4,1 | 1583 | 492 | 24 | 53 |
| Завод черных металлов | 618 | 453 | 30 | 128 | 264 | 0,5 | 747 | 170 | 68 | 128 |
| Завод изделий из цветных металлов | 342 | 647 | 67 | 101 | 506 | 0,4 | 821 | 222 | 77 | 101 |
| Приборостроительный завод | 825 | 700 | 16 | 80 | 875 | 0,3 | 2275 | 6525 | 4 | 14 |
| ТЭЦ на угле | 770 | 570 | 42 | 72 | 225 | 0,3 | 1810 | 94 | 14 | 42 |
| Нефтеперерабатывающий завод | 922 | 488 | 31 | 61 | 142 | 0,1 | 756 | 47 | 5 | 5 |
| Фон | 994 | 670 | 16 | 65 | 180 | 0,3 | 990 | 88 | 8 | 12 |

Только одна ТЭЦ средней мощности выбрасывает в атмосферу до 400 т в сутки летучей золы, что по объему равно 26 железнодорожным вагонам.

Помимо прямых отрицательных экологических последствий кислотные выпадения из атмосферы инициируют и косвенные. К числу последних относятся мобилизация в ландшафтах тяжелых металлов природного и антропогенного происхождения, приводящая к загрязнению гидросферы (табл. 4.11).

В результате выпадения кислотных дождей на значительных площадях усиливаются процессы выщелачивания легко-, средне- и труднорастворимых солей, в том числе и ионов щелочноземельных металлов (кальция и магния). Это приводит к снижению запасов легкоподвижных соединений фосфора и калия, солей карбонатов, подкислению реакций почвенного покрова. Ненасыщенность кальцием гумуса уси-

Таблица 4.11

Бассейн реки Оки: загрязнение аквальных ландшафтов

| Элемент | Вода | | Донные осадки | | Биота | |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Фоновые территории | Загрязненные территории | Фоновые территории | Загрязненные территории | Фоновые территории | Загрязненные территории |
| As | $\frac{0,1-1,0}{0,01-0,05}$ | $\frac{1,5-3,5}{0,2-0,3}$ | $\frac{0,06-0,1}{0,3-5}$ | $\frac{1,5-3,5}{10}$ | $\frac{1-4}{1-10}$ | $\frac{10-75}{35-750}$ |
| Al | $\frac{0,01-0,05}{1-5}$ | $\frac{0,2-0,3}{7-35}$ | $\frac{0,3-5}{6-20}$ | $\frac{10}{30-250}$ | $\frac{0,1-0,6}{1,3-10}$ | $\frac{1,5-2,2}{30-2300}$ |
| Cd | $\frac{0,1}{45-150}$ | $\frac{0,5-0,8}{250-15000}$ | $\frac{< 0,3}{0,5-3,0}$ | $\frac{1,5-5}{10-40}$ | $\frac{0,3-0,7}{0,1-1,0}$ | $\frac{3,4-7,2}{2,5-72}$ |
| Co | $\frac{0,01-1,0}{40-300}$ | $\frac{*}{500-17000}$ | $\frac{0,9-1,3}{0,7-100}$ | $\frac{*}{200-8000}$ | $\frac{0,4-7,5}{1,5-5,0}$ | $\frac{12-18}{8-158}$ |
| Cr | $\frac{1-7}{2-400}$ | $\frac{10-96}{1500-20000}$ | $\frac{10-83}{0,2-5}$ | $\frac{179}{20-160}$ | $\frac{5,0-12}{0,3-5}$ | $\frac{20-75}{10-40}$ |
| Fe | $\frac{0,02-0,05}{1-5}$ | $\frac{0,08-0,12}{20-680}$ | $\frac{0,7-3,005}{1-15}$ | $\frac{5}{30-190}$ | $\frac{0,2-0,5}{0,3-10}$ | $\frac{1,5}{20-100}$ |
| Mn | $\frac{15-50}{250-400}$ | $\frac{75-150}{600-50000}$ | $\frac{200-600}{0,5-6,0}$ | $\frac{800-2000}{13-40}$ | $\frac{400-800}{0,15-8}$ | $\frac{1000-250}{10-96}$ |
| Ni | $\frac{0,8-3,0}{100-300}$ | $\frac{10-20}{400-1250}$ | $\frac{0,5-33}{0,3-3,5}$ | $\frac{*}{6-15}$ | $\frac{2-10}{1-5}$ | $\frac{14-20}{10-34}$ |
| Sb | $\frac{0,03-0,08}{30-80}$ | $\frac{0,1-0,3}{150-4500}$ | $\frac{0,1-1,0}{0,4-2,5}$ | $\frac{*}{5-26}$ | $\frac{2,5-5,0}{0,8-2,5}$ | $\frac{10-30}{5-34}$ |
| Se | $\frac{0,01-0,2}{10-60}$ | $\frac{0,5-2,3}{80-3000}$ | $\frac{0,3-1,0}{0,4-2,5}$ | $\frac{1,5-3,0}{40-290}$ | $\frac{0,2-0,5}{0,3-8,0}$ | $\frac{1,5-3,0}{10-115}$ |
| Sn | $\frac{0,1}{0,5-2,0}$ | $\frac{1,5-7,0}{6,0-850}$ | $\frac{5-10}{13-25}$ | $\frac{15-22}{5-250}$ | $\frac{3-8}{1-30}$ | $\frac{13-24}{50-5000}$ |
| Zn | $\frac{3-10}{5-50}$ | $\frac{15-30}{80-2500}$ | $\frac{10-80}{0,1-1,0}$ | $\frac{140}{2,5-40}$ | $\frac{3-20}{1,5-4,0}$ | $\frac{40-60}{6-30}$ |

Примечание: числитель — диапазон концентраций, ррп; знаменатель: для воды — коэффициент водной миграции, для донных осадков — коэффициент донной аккумуляции, для биоты — коэффициент биоаккумуляции.

ливают его смыв, особенно на склоновых и горных почвах, подстилаемых галечником.

Кроме того, усиление кислотности почв из-за подавления деятельности бактерий тормозит их гумификацию. Так, снижение рН почв вызывает освобождение и алюминия, токсически действующего на актиномицеты, ответственные за гумификацию растительных остатков.

4.3

Общепромышленное преобразование и загрязнение гидросферы

В настоящее время на планете ежегодно потребляется около 12 % всех пресных водных ресурсов, перемещаются огромные массы поверхностных и подземных вод, изменяется природный круговорот воды. Человек соединяет моря, трансформирует географию рек, создает огромные водохранилища, осушает болота, орошает безводные пустыни, откачивает из недр колоссальные объемы подземных вод. В России различными водными путями соединены Белое, Балтийское, Черное, Каспийское и Азовское моря. В бассейнах рек Волги, Дона, Камы, Ангары и других созданы крупнейшие водохранилища (протяженностью до 500—670 км и шириной 40—60 км).

Всего с 1900 до 1970 г. в мире было построено около 10 тыс. плотин с водохранилищами объемом более 0,1 км³. Сейчас таких водохранилищ уже свыше 14 тыс. Суммарная площадь всех искусственных водохранилищ составляет более 1,5 млн. км² (примерно 1 % суши). Эти искусственные «моря» оказывают существенное влияние на биосферу Земли.

Снижение ресурсов пресных вод (особенно в промышленно развитых районах) вызвано не столько увеличением их потребления, сколько растущим загрязнением (при сбросе в водные бассейны неочищенных или недостаточно очищенных стоков). Например, в Мировой океан ежегодно поступает 420 км³ сточных вод, а также более 6 тыс. км³ естественных вод, загрязненных стоками, и до 10—12 млн. т нефти [21]. Только в водоемы России ежегодно сбрасывается 8,5 км³ неочи-

щенных и 18,5 км³ не полностью очищенных сточных вод [25]. В результате примерно 60 % поверхностных пресных вод России уже сейчас относятся к разряду загрязненных и не могут быть использованы для питья.

Если суммировать общемировой сток производственных вод, насыщенных токсичными химическими элементами, то он уже превышает объем Амазонки — наиболее полноводной реки мира. Эта ситуация обусловлена реализацией стратегии естественной самоочистки вод от загрязнения.

Особенно сильно страдают от загрязнения реки, озера и внутренние моря. В России в большом количестве загрязненные сточные воды сбрасываются в бассейн Волги (11 км³ ежегодно), Ангары (1,8 км³), Урала (0,1 км³) и др. Так, загрязнение Волги нефтяными продуктами на ряде участков более чем в 100 раз превышает допустимые нормы. В качестве конкретного примера можно также привести ситуацию с хранением неочищенных промстоков АО «Волжский оргсинтез» (Волгоградская обл.), на протяжении 20 лет сбрасываемых в водоем Большой лиман. Фильтруясь из водоема в грунтовой поток, опасные компоненты отходов мигрируют в направлении рек Волга и Ахтуба.

Ежегодно в реки в виде производственных отходов сбрасывается более 2,3 млн. т свинца, 1,6 млн. т марганца, 1 млн. т цинка, около 0,5 млн. т меди и 6,5 млн. т фосфора (например, в реку Терек только на территории Северной Осетии ежегодно сбрасывается более 4320 м³ неочищенных сточных вод, содержащих около 3 т растворенных вредных веществ). Из металлов наибольшую опасность для гидросферы представляет ртуть и ее соединения. В настоящее время средняя концентрация ртути в Мировом океане равна 0,15 мг/м³, а ее общее количество в водах достигает 210 млн. т [27].

Только в 1988 г. в водоемы России было сброшено (тыс. т): органических веществ — 1750; ПАВ — 23; нефтепродуктов — 57; сероводорода — 100; сероуглерода — 77 и т. д. Общее количество нефти, поступающей в Мировой океан (табл. 4.12), если не будут приняты эффективные меры защиты, к 2000 г. достигнет 60 млн. т (200 тыс. т нефти могут превратить Балтийское море в биологическую пустыню).

Таблица 4.12

Загрязнение Мирового океана нефтью

| Источник загрязнения | Среднее годовое поступление, млн. т |
|--------------------------------|--|
| Внос реками | 6,11 |
| Транспортировка | 2,13 |
| Смыв с городских территорий | 1,6 |
| Береговые очистные предприятия | 0,6 |
| Естественный выход | 0,6 |
| Атмосфера | 0,3 |
| Муниципальные сбросы | 0,3 |
| Индустриальные сбросы | 0,3 |
| Прибрежная добыча | 0,07 |

Известно, что 1 т нефти способна образовать сплошную пленку площадью 2,6 км² [8]. В результате неблагоприятное положение сложилось в Каспийском море у побережья Азербайджана (4—16 ПДК), где основными загрязнителями являются предприятия объединений «Оргсинтез» и «Химпром» (г. Сумгаит). Высокое загрязнение (4—6 ПДК) отмечено для побережья Камчатки и Охотского моря, несколько ниже (1—3 ПДК) — для Японского, Баренцева, Белого и Балтийского морей. Космические снимки свидетельствуют, что уже 15 % поверхности Мирового океана содержит нефтепродукты (рис. 4.1).

В биосфере все взаимосвязано. Так, антропогенное загрязнение Мирового океана нефтепродуктами и химически активными отходами промышленности приводит к гибели фитопланктона на больших площадях, в результате чего существенно ухудшается газообмен и обуславливается постепенное увеличение дефицита кислорода в водах и атмосфере. Подавление жизнедеятельности или уничтожение фитопланктона происходит при концентрации нефтяных загрязнений уже свыше 800 мг/м³. Это, в свою очередь, резко сокращает выработку кислорода океаническими водорослями, доля которого в планетарном балансе весьма значительна (известно, что океан дает около 50 % кислорода, необходимого для существования жизни на Земле).

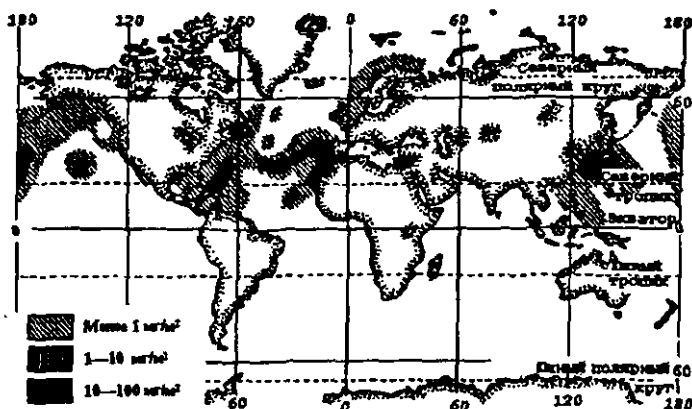


Рис. 4.1. Концентрация нефтяных агрегатов на поверхности Мирового океана

Большую опасность представляют фенольные соединения, содержащиеся в сточных водах предприятий нефтехимии, коксохимии, лесохимической, сланцевой и других отраслей промышленности. Обладая сильными антисептическими свойствами, фенольные соединения нарушают важные биологические процессы, протекающие в воде, ухудшают условия воспроизводства рыб и растительности. В качестве наиболее опасного загрязнителя вод в последнее десятилетие начали выступать поверхностно-активные вещества (ПАВ), широко применяемые при бурении нефтяных и газовых скважин. Они образуют стойкие пены, резко снижают эффективность биохимических процессов самоочистки вод, прекращают (даже при незначительных содержаниях) рост водорослей и т. д. Катастрофически увеличивается в сбросных водах концентрация диоксина и сходных ядовитых хлор-углеродных производных.

Еще большие опасения связаны с загрязнением пресных подземных вод. В настоящее время антропогенные воздействия на подземную гидросферу достигают глубин 6—8 км (хотя чаще всего проявляются на глубинах до 100 м) и охватывают по простиранию половину площади нашей планеты. В результате устойчивое загрязнение имеют уже около 5 % потребляемых подземных вод. Из общего числа очагов пример-

но в 22 % загрязнение носит интенсивный характер и превышает допустимые нормы более чем в 100 раз.

Химический состав подземных вод изменяется вследствие загрязнения атмосферы, поверхностных водоемов, снежного покрова, почв, накопления отходов производства и быта (терриконы, свалки и т. д.), применения удобрений, пестицидов и ядохимикатов, неправильного режима орошения (сопровождающегося увеличением минерализации земель и вод), сброса промышленных и хозяйственно-бытовых стоков (на поля фильтрации, пруды-отстойники, накопители, хвостохранилища и др.), подземного захоронения отходов производства, радиоактивного загрязнения среды (под влиянием ядерных взрывов, радиоактивных выбросов и утечек и пр.), солевой мелиорации грунтов, утечек канализации, нефтепроводов, использования токсичных строительных материалов и т. п.

Таким образом, к числу наиболее мощных факторов загрязнения подземных вод относят [21]:

- ежегодный выброс в атмосферу около 3 млрд. т аэрозолей;
- перенос солей атмосферными осадками (258 млн. т в год только по СНГ);
- сброс промышленных и бытовых стоков;
- рассеивание на сельскохозяйственных полях Земли 400 млн. т минеральных удобрений и 4 млн. т ядохимикатов в год;
- орошение и осушение земель (только в СНГ на площади 25 млн. га);
- засоление грунтовых вод и почвогрунтов на 40 % площади орошаемого земледелия мира;
- накопление на земной поверхности промышленно-хозяйственных отходов в количестве $6 \cdot 10^{11}$ т;
- ежегодное перемещение 6 км^3 пород при проведении земляных работ;
- извлечение из недр 100 млрд. т полезных ископаемых (25 т на 1 жителя планеты), с чем связано глобальное рассеивание химических элементов с последующим попаданием их в подземную гидросферу.

В результате перечисленных воздействий подземные воды загрязняются соединениями азота, сульфатами, хлоридами, фенолами, нефтепродуктами, а также фтором, хромом, медью, свинцом и др. Поэтому наряду с ростом минерального остатка увеличивается содержание сульфатов, хлоридов, углекислоты, соединений азота, калия, натрия, повышается общая и карбонатная жесткость, окисляемость и агрессивность вод.

Среди прочих видов трансформации вод также следует выделить и *тепловое загрязнение* гидросферы, приводящее к смене биоценозов (рис. 4.2).

В целом техногенное загрязнение или преобразование гидросферы обуславливают:

- изменение физических свойств воды (например, мутности, цветности, температуры и др.);
- изменение химического состава воды (в частности, появление в ней вредных веществ);
- образование плавающих загрязнений на поверхности воды, взвешенных или отложенных на дне;
- сокращение в воде количества растворенного кислорода (вследствие его расхода на окисление поступающих в водоем органических загрязняющих веществ и угнетения растительности);
- появление новых бактерий (в том числе болезнетворных).

С изменением состояния поверхностной гидросферы связаны значительные изменения биосферы и развитие широкого комплекса современных геологических процессов и явлений. Особенно интенсивно биосфера изменяется в результате создания антропогенной гидрографической сети (водохранилищ, прудов, каналов, озер или болот), регулирования речного стока и осуществления крупных водохозяйственных мероприятий (ирригации, осушения и пр.). В результате изменяются климат, растительность, почвы, рельеф, подземные воды, состояние грунтов, происходят затопление, подтопление или заболачивание местности, а также возникают эрозия, абразия, переформирование берегов, оползни, обвалы, суффо-

зия, карст, просадки, засоление, рассоление, набухание грунтов и многие другие геодинамические процессы.

Так, в горных районах, во время заполнения крупных водохранилищ наблюдается активизация *сейсмических явлений*. Наиболее сильный толчок происходит обычно через 1,5—3 месяца после заполнения водохранилища. Глубина очагов возбуждения таких землетрясений составляет обычно 3—5 км и редко 10—11 км. Поэтому зона их действия на поверхности не велика — до 10—15 км от эпицентра. Наибольшее влияние на возбуждение землетрясений оказывают водохранилища с глубиной более 90—100 м. Обводненность пород обуславливает повышение балльности землетрясений прилегающей территории на 1—3 балла.

Климат и погода на Земле во многом зависят и определяются наличием водных пространств, а также содержанием воды в атмосфере. Например, наличие больших масс воды в крупных антропогенных водоемах, которая имеет высокую теплоемкость и пониженное альбедо, оказывает значительное влияние на формирование местных климатических условий. Вода в водохранилищах медленнее нагревается и остывает, интенсивно испаряется (увлажняя воздух).

Гладкая поверхность зеркала водохранилища активизирует ветровой режим. Вследствие этих метеорологических особенностей водохранилища являются регуляторами местного климата: они сглаживают колебания суточных и сезонных температур, а также смягчают климат прилегающей территории [21].

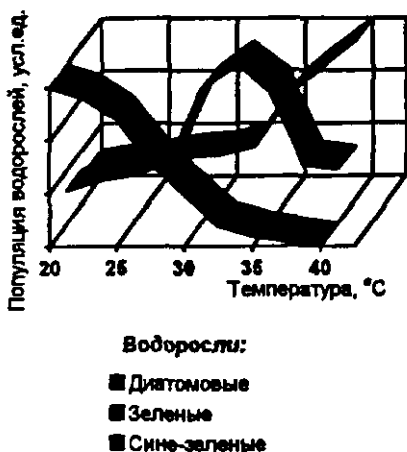


Рис. 4.2. Последовательность смены видового состава и формирования сообщества водорослей, вызываемая тепловым загрязнением

землетрясений прилегающей тер-

Выделяют *отепляющий* и *охлаждающий* периоды термического воздействия со стороны техногенных водохранилищ на биосферу. Первый, повышающий температуру воздуха, характерен для последней половины лета и осени. Вторым, понижающий температуру в береговой зоне, наблюдается весной и в первой половине лета. Поэтому вблизи водохранилищ летом прохладнее, глубокой осенью теплее и удлиняется безморозный период. В зоне влияния водохранилищ также наблюдается более высокая абсолютная и относительная влажность. Скорости ветра в зоне водохранилищ повышены (летом в 1,5—1,8 раза), так как с наличием температурного градиента в термическом режиме водоемов и суши связано образование бризов.

Радиус влияния водохранилищ на местный климат зависит от прилегающего ландшафта: в степных и равнинных условиях он наибольший и достигает 10—20 км, в горной местности — минимальный. Так, образование Вилдойского водохранилища существенно нарушило температурный режим пород не только вблизи плотины, но и на значительном расстоянии от ее створа. Общая длина этой зоны доходит до 1600 км (в том числе 700 км вверх от отбора и 900 км ниже плотины). Водоохранилище имеет охлаждающее влияние летом и отепляющее зимой (когда температура у плотины на 4—5 °С выше, чем в округе). В этой связи борта долины р. Вилдой, находившиеся ранее в мерзлом (–3...–6 °С) состоянии, за 3,5 года оттаяли на глубину 6 м, а повышение температуры мерзлых пород распространилось на глубину 35—40 м.

На состояние гидросферы существенное влияние оказывают другие оболочки Земли. Велико водоохранное значение леса: в лесах накапливаются влага и снег, снежный покров на 2—4 недели держится дольше (по сравнению с полем), тает медленнее, в результате чего уменьшается поверхностный сток (не превышающий 15—20 % от суммы осадков), увеличивается инфильтрация снеговых и дождевых вод, усиливается питание грунтовых вод и улучшается водоснабжение растительности. Мелиоративная эффективность лесных массивов зависит от видового состава деревьев, имеющих-

ся биоценозов, а также зонально-климатических условий территории.

Запасы и масштабы использования воды. Обеспеченность водой весьма различается территориально [1]. В настоящее время в ряде стран с развитой экономикой назревает угроза недостатка воды. Причины такого истощения — не только в неравномерном распределении водных резервов (табл. 4.13), но и в том, что вода после ее использования в существенной мере загрязняется и зачастую не очищается.

Таблица 4.13

Обеспеченность водой

| Страна | Среднегодовой сток рек, км ³ | Водообеспеченность на одного жителя, тыс. м ³ /год |
|----------|---|---|
| Бразилия | 5668 | 59,5 |
| СНГ | 4384 | 17,5 |
| КНР | 2880 | 3,8 |
| Канада | 2740 | 128,0 |
| США | 2345 | 11,4 |
| Индия | 1586 | 2,9 |

Водные ресурсы на территории стран СНГ также распределены весьма неравномерно и довольно неблагоприятно: лишь 14% речного стока приходится на районы, где размещено 80% промышленного и сельскохозяйственного производства и проживает около 85% населения.

Неравномерность распределения водных ресурсов по территории земного шара усиливается отклонениями в объемах стока рек во времени. Периоды высоких и низких вод наблюдаются синхронно в целых регионах (но не всегда совпадают по континентам). Наряду с вариациями стока существует и устойчивое уменьшение количества воды в водоемах суши, определяемое тем, что в последние десятилетия уровень Мирового океана повышается в среднем на 1,2 мм в год, что эквивалентно ежегодной потере суши 430 км³ воды. Причины этого обусловлены вырубкой лесов (каждую минуту с поверхности Земли исчезает 20 га лесов, главным образом тропических) и осушением болот, приводящих к уменьшению количества осадков на суше.

Запасы пресных вод на Земле составляют 35 млн. км³, т. е. всего 2% от запасов всей воды на планете. Основные запасы пресной воды сосредоточены в полярных льдах и снегах, айсбергах и горных ледниках и только всего 3% — в реках, озерах и водохранилищах.

Объем ежегодно возобновляемых пресных водных ресурсов сравним с суммарным годовым стоком рек в океан — 45 тыс. км³/год. Это и есть водные ресурсы, которыми располагает человечество для удовлетворения своих значительных потребностей.

В этой связи ресурсы пресной воды могут быть полностью исчерпаны уже в следующем столетии, поэтому проблема рационального и комплексного использования и охраны гидросферы является в настоящее время одной из важнейших в науке, изучающей биосферу.

Водные ресурсы рек СНГ составляют 4384 км³, единовременные же объемы воды в реках — 475 км³. Кроме рек значительные запасы воды сосредоточены в болотах Западной Сибири и Северо-Востока европейской части России (всего 3000 км³, из которых 1000 км³ приходится на болота Западной Сибири).

Существенную часть пресных водных запасов составляют также озера. В самых крупных из них сосредоточено до 26000 км³ воды; только в озере Байкал содержится 23000 км³ уникальной по своим качествам пресной воды.

Ресурсы подземных вод, пригодных для хозяйственно-питьевых целей, составляют 220—310 км³ в год, а разрешенный объем их эксплуатации находится на уровне 50 км³ в год. Искусственные водохранилища, созданные в целях получения электроэнергии, орошения и снабжения водой населения и промышленности, сосредотачивают в себе также значительные объемы воды. Так, запасы воды в 150 наиболее крупных водохранилищах составляют более 810 км³.

Проблема дефицита воды возникла только в условиях растущего водопотребления на бытовые, сельскохозяйственные и производственные нужды при быстром росте народонаселения и бурном развитии промышленности. Самый крупный потребитель воды — сельское хозяйство, на втором ме-

сте — промышленность и энергетика, на третьем — коммунальное хозяйство городов.

Развитие производительных сил сопровождается ростом потребления свежей пресной воды. Если в 50-х годах СССР использовал около 100 км³/год воды, то в 1988 г. — уже 350 км³. Сейчас на хозяйственно-питьевые цели в нашей стране приходится около 10% общего потребления.

Увеличение расхода воды промышленностью связано не только с быстрым ее развитием, но и с ростом водоемкости производств.

В настоящее время для производства 1 т сахара расходуется 100 т воды, 1 т стали — 300 т, 1 т меди — 500 т, 1 т бумаги — 1000 т, 1 т капрона — 5600 т, 1 т аммиака — примерно 1000 м³, 1 т синтетического каучука — 2000 м³ воды. Значительное количество воды потребляют теплоэлектростанции: только одна станция мощностью 300 тыс. кВт расходует до 120 м³/с воды, или более 300 млн. м³/год.

Огромное количество воды идет на орошение сельскохозяйственных территорий с возвращением части поверхностным и подземным стоком в гидрографическую сеть. Безвозвратное водопотребление — наиболее важный показатель изменения водных ресурсов под влиянием орошения.

В СНГ безвозвратное водопотребление составляет примерно 60% водозабора. Высокая продуктивность орошаемых земель стимулировала резкое увеличение их площади, составляющую более 230 млн. га. Поэтому хотя на орошаемые земли приходится лишь 1/6 часть всей площади посевов, они дают примерно половину сельскохозяйственной продукции мира. На таких землях растет, например, 2/3 мировых посевов хлопчатника.

Для того чтобы получить 1 т пшеницы, требуется 1500 т воды, 1 т риса — более 7000 т, 1 т хлопка — около 10 000 т воды. Животноводческие комплексы на промышленной основе также являются крупными потребителями доброкачественной пресной воды. Только для производства суточной нормы пищевых продуктов питания для одного человека требуется не менее 6 м³ воды.

4.4

Индустриальное загрязнение и нарушение литосферы

В настоящее время человечеством освоено и используется более половины континентальной территории Земли [21]: 4 % этой площади занято городами, промышленными объектами, рудниками, дорогами и другими инженерными сооружениями, 13 % — пашнями, садами и плантациями, 25 % — пастбищами и лугами, 5 % — искусственными лесонасаждениями и т.д. Остальная территория Земли занята естественными лесами и неиспользуемыми землями, в составе которых преобладают трудноосваиваемые по климатическим и инженерно-геологическим условиям (зоны Арктики, Антарктики, пустынь, полупустынь, высокогорья, болот и пр.).

Все составные части литосферы так или иначе испытывают техногенную трансформацию. Так, несмотря на свою существенную роль в функционировании биосферы, *почвы* оказались наименее защищенным ресурсом Земли, несущим колоссальные потери под натиском цивилизации. С течением времени под воздействием человека изменяются их состав, состояние и свойства, а также перестраивается направленность почвообразовательных процессов.

Антропогенные изменения почвенного покрова происходят в трех основных направлениях [21]:

- эволюция исходных (первичных) почв;
- образование новых почв;
- прекращение почвообразовательных процессов.

Антропогенная *эволюция* первичных почв связана с изменением условий почвообразования вследствие искусственной смены фитоценозов, которая в свою очередь обусловлена вырубкой лесов, вспашкой земель, процессами остепнения и опустынивания, мелиорацией (орошение, осушение, биологическое и химическое удобрение), загрязнением и другими воздействиями, изменяющими физико-механические и химические свойства почвенного покрова Земли. В результате, например, подзолистые почвы постепенно переходят в

новый (зачастую низший) тип — дерново-подзолистые, дерново-луговые, болотные и др.

Так, в прошлом вся лесолуговая зона Северной Осетии была покрыта лесами, с юга — буково-грабовыми (на бурых лесных почвах), а на севере и юго-западе — дубовыми широколиственными (на серых лесных почвах). Отступление лесов, осветление территории и дальнейшее вовлечение почв в сельскохозяйственное производство привело к эволюции почвенного покрова. Развитие дернового процесса способствовало образованию дерновых почв на месте бурых, а серые лесные почвы эволюционировали в темно-серые лесные, затем — в черноземы оподзоленные и выщелоченные. В результате, несмотря на довольно высокие запасы гумуса (7—11 %), эффективное плодородие таких почв низкое, что связано с их лесным прошлым. Оно выражается в таких свойствах почв, как высокая кислотность, ненасыщенность основаниями, тяжелый механический состав, наличие плотных иллювиальных горизонтов с глубины 30—50 см, низкая водопрочность структурных агрегатов, наличие часто верховодки и др. Все это в целом отражается на водном, воздушном и тепловом режимах почв, низкой биологической активности, подвижности зольных элементов питания и др.

Здесь же необходимо отметить, что при увеличении гумусированности повышается содержание обменного калия и подвижных форм P, Ca, Cu, Zn и др.

Прекращение почвообразовательного процесса обычно связано с затоплением местности водохранилищами, застройкой земель городами, поселкам дорогами, аэродромами, их покрытием насыпями, культурным слоем, асфальтом или срезкой (в связи с вертикальной планировкой местности) и т. д.

В целом масштабы деградации земель зависят от интенсивности действия климатических, гидрогеологических, морфодинамических, фито-, зоо- и антропогенных факторов (нерациональное ведение бочарного и орошаемого земледелия, чрезмерный выпас, уничтожение почвенно-растительного покрова промышленным, коммунальным и ирригационным строительством, горные разработки, технологические и аварийные промышленные выбросы в атмосферу, сброс сточных и

дренажных вод) и имеют свою региональную специфику: от деградации оленьих пастбищ на севере, дегуминификации, истощения и эрозии почв в Центральной России до опустынивания на ее юге.

В свою очередь, антропогенные изменения почвенного покрова оказывают влияние на свойства подстилающих грунтов, режим почвенных и приповерхностных подземных вод, а также на состояние биосферы в целом. Нарушение почвенного покрова активизирует геологические процессы выветривания, эрозии, дефляции, остепнения, опустынивания, трансформации многолетней мерзлоты, засоления грунтов, а также значительно влияет на микроклимат местности.

Другими словами, вследствие эрозии почвы, использования земель в промышленности, энергетике, градостроительстве, размещения транспортных линий и т.д. земная суша деградирует со скоростью 44 га в минуту. К тому же за последние 50 лет примерно 8,1 млн. км² когда-то продуктивных земель (пашни, леса, луга) уже превращено в пустыню.

В настоящее время земельный фонд России составляет 1709,8 млн. га. Земли промышленности, транспорта, связи и т. д. занимают немногим более 1 % всей территории РФ. В них учитываются земли промышленных предприятий (3 млн. га), полосы отвода вне городов автодорог общего использования (1,2 млн. га), земли железнодорожного транспорта (1 млн. га), предприятий связи, энергетике и прочих промышленных организаций (12,4 млн. га). Известно, что при сооружении магистрального трубопровода на каждые 100 км трассы разрушается в среднем 500 га земельных угодий, а при прокладке автодорог — не менее 250 га.

Одним из важнейших показателей характера трансформации биосферы является *пространственная структура загрязнения территории*, ранжирующая ее по степени опасности воздействия и включающая также данные о распределении источников загрязнения и количестве населения.

Почва поглощает из атмосферы аэрозоли, жидкости и твердые частицы. Поэтому выбросы промышленных предприятий, так же как и транспортных магистралей, интенсивно загрязняют почвы токсичными элементами. В результате

увеличения содержаний тяжелых металлов, поглощенных оснований, микроэлементов и водорастворимых солей хлора, серы и др. происходит изменение почвенной среды. Например, вблизи металлургических и химических заводов на расстояниях 0,5—3 км накопление ртути может достигать 5900%, а свинца — 1500—300%. Однако в большинстве случаев зона влияния промышленных предприятий не превышает 0,5—1,5 км. Нарушение или даже полная деградация растительного покрова от ТЭЦ наблюдается в радиусе 4—15 км. Влияние автотранспорта сказывается в придорожных ландшафтах в полосе до 50 м и заключается главным образом в повышении в почвах в 5—10 раз содержания свинца, так же как и в растениях. Кроме свинца в придорожных ландшафтах накапливаются Cd, V, Zn, Co, Cr.

Вещества-загрязнители попадают в почву в виде сложных органических и минеральных соединений (а также в металлическом состоянии), с последующим разложением до простых элементов или образованием новых соединений. Наибольшую опасность среди тяжелых металлов представляют ртуть, кадмий, свинец, ванадий, кобальт, молибден, марганец, медь, никель, олово, хром, цинк, титан и три металлоида — мышьяк, селен, сурьма. В полный перечень сложных вредных веществ, загрязняющих почву, в мире внесено более 10 тысяч наименований.

Таблица 4.14

Степень загрязнения почв

| Класс | Оценка степени загрязнения | Показатель снижения качества и количества получаемой продукции, % |
|-------|----------------------------|---|
| 0 | Практически чистые | Менее 5 |
| 1 | Слабо загрязнены | 6—10 |
| 2 | Умеренно загрязнены | 11—25 |
| 3 | Сильно загрязнены | 26—59 |
| 4 | Очень сильно загрязнены | 51—75 |
| 5 | Чрезмерно загрязнены | Более 75 |

Под *загрязнением почв* понимают увеличение концентраций содержащихся в них веществ выше предельно допустимого уровня, а также появление любого количества не свой-

ственных им веществ. По признаку снижения продуктивности или количеству биомассы различают 6 степеней загрязнения почв (табл. 4.14), а по видам загрязнений — 4 *класса веществ-загрязнителей* — физические, химические, биологические и радиоактивные.

После попадания в почвы тяжелые металлы могут находиться в разных формах. Они могут нести положительный заряд, выступая как катионы, или отрицательный, если являются анионами кислот (хромовой, молибденовой и др.). Амфотерные элементы в зависимости от pH почв также могут быть заряжены как положительно, так и отрицательно. В почвах имеются и нейтральные формы металлов.

На химическое состояние почв значительное влияние оказывают величина и характеристика их *сорбционной способности*. В результате сорбции тяжелые металлы легко накапливаются в почвах, но трудно выводятся. Так, периоды естественного полувыведения из почвы кадмия — 110 лет, цинка — до 510, меди — до 1500, свинца — до нескольких тыс. лет.

Другим важнейшим фактором, влияющим на состояние природной среды, является *степень увлажненности территории*, которая может быть оценена *индексом сухости*, т. е. отношением суммарной испаряемости с поверхности земли к величине осадков (орошению), выпадающих на той же территории. По этому признаку выделяют следующие почвы:

- избыточно влажные с индексом менее 0,45 г;
- влажные — от 0,45 до 1 г;
- недостаточно влажные — от 1 до 3 г;
- сухие — с индексом сухости более 3 г.

Степень увлажненности территории определяет условия рассеивания и нейтрализации промышленных или бытовых отходов в почвах, водных объектах и зоне аэрации. С этих позиций избыточно влажная и просто влажная почвы характеризуются преимущественным рассеиванием загрязняющих веществ (если, конечно, скорость их поступления не превышает возможностей выноса и нейтрализации природными процессами). В недостаточно влажной почве могут иметь место процессы как рассеивания, так и накопления загрязнений, а в сухой — всегда будут преобладать процессы концентрации загрязнителей.

Человечество, изменяя среду обитания в соответствии со своими потребностями, также существенно преобразует рельеф местности. Например, только в Москве засыпано более 100 ручьев и рек, а также большая часть оврагов и болот (с искусственным повышением отметок до 25 м). Причем мощность искусственных террас изменяется от 1 до 15 м, а намыленных песчаных массивов составляет чаще всего 2—8 м. Почти 40 % территории Нидерландов лежит ниже уровня моря. Здесь залив Зеидер-Зе после осушения был целиком превращен в сушу. Для этого было возведено большое количество водозащитных земляных дамб. В Нидерландах их протяженность превышает 1000 км, в низовьях Миссисипи — 2500 км, а на р. Тисса (в Венгрии) — около 3500 км.

Главнейший компонент литосферы — это горные породы, содержащие наряду с твердыми минеральными и органическими составляющими газы, подземные воды, а также различные микроорганизмы. Кроме того, геологическая среда включает многообразные объекты, созданные в пределах литосферы человеком и рассматриваемые как антропогенные геологические образования. Воздействие человека на природу охватывает все большую площадь и проникает в глубь планеты. Глубина отдельных строительных котлованов достигает 100 м, тоннелей 2000—2500 м. Поэтому в формировании структуры и свойств современной геологической среды существенную роль играют процессы взаимодействия различных геосфер (лито-, гидро-, атмо- и биосферы). Антропогенное воздействие обуславливает возникновение и развитие новых геологических процессов, приводящих к закономерным изменениям состава, состояния и всех свойств недр.

4.5

Биосферные проблемы сельскохозяйственного комплекса

Что нужно человеку для его существования? Количество калорий, достаточное для поддержания жизни одного человека, можно получить с площади 0,12 га. Для полноценного питания мясом, фруктами и овощами на одного человека не-

обходимо уже около 0,6 га площади. Еще нужно 0,4 га для производства разного рода волокон (ткани, бумаги, изделий из дерева и т. д.) и 0,2 га для создания инфраструктуры (жилье, дороги, аэропорты и т.д.). Таким образом, в настоящее время для создания нормальных условий жизни одному человеку необходимо от 0,7 до 1,2 га площади продуктивных земель. Кроме того, весьма необходимы рекреационные земли. Минимальная площадь нетронутых участков, обуславливающая нормальное функционирование биосферы Земли, должна составлять 1/3 от общей ее площади.

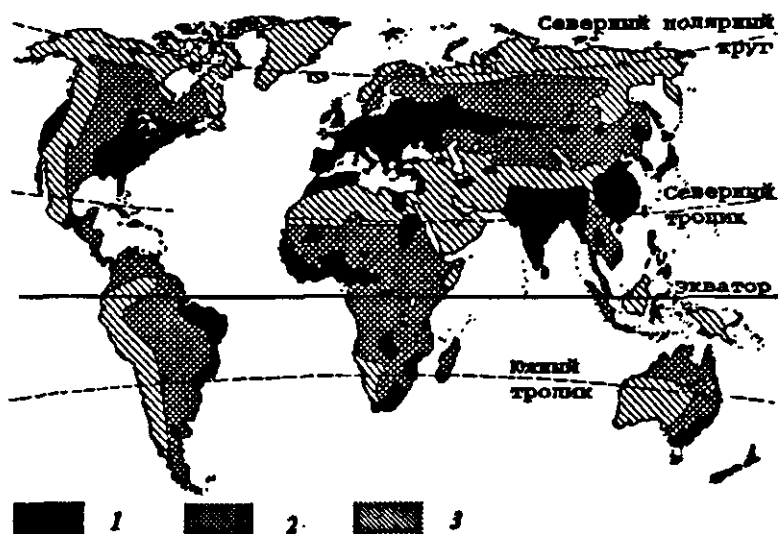


Рис. 4.3. Дифференциация земель по использованию:

1 — земли, используемые в настоящее время в интенсивном сельском хозяйстве (10—12 % площади суши); 2 — земли, которые можно будет использовать в интенсивном сельском хозяйстве благодаря техническому прогрессу (примерно 40—42 % площади суши); 3 — земли, даже теоретически не пригодные для интенсивного сельскохозяйственного освоения (48 % площади суши)

На нашей планете на долю земельных ресурсов приходится около 149 млн. км² (29,2 % от общей поверхности Земли) территории. И эти ресурсы должны обеспечить население Земли продовольствием. К тому же часть земельных ресурсов малопродуктивна и даже непригодна для сельскохо-

зяйственного использования (рис. 4.3, 4.4). Например, верхние пределы современного земледелия не превышают в Карачаево-Черкессии 2250 м, в Кабардино-Балкарии — 2250 м, в Северной Осетии — 2300 м, в Чечне — 2130 м и в Дагестане — 2490 м.



Рис. 4.4. Земельный фонд планеты:

1 — леса и лесопосадки (27 %); 2 — естественные луга и травянисто-кустарниковые пастбища (19 %); 3 — земельная площадь (13 %); 4 — сухие пустыни, скалы, прибрежные пески (12,2 %); 5 — ледники (11 %); 6 — тундры и лесотундры (4,7 %); 7 — полярные высокогорные пустыни (5 %); 8 — антропогенный бедленд (4,5 %); 9 — болота (вне тундр) — 4 %; 10 — озера, реки, водохранилища (2,2 %); 11 — земли промышленного и городского назначения (2 %)

На основе обеспечения продовольствием, а также материалами и энергией (а в последнее время — возможности поглощения биосферой стоков) были определены *пределы роста* земного населения [18]. В настоящее время средняя плотность населения мира составляет свыше 36 человек на 1 км². Наивысшая плотность населения в Монако (примерно 16 тысяч человек на 1 км²), затем следуют Сингапур (более 4 тысяч), Мальта (1200), Бахрейн, Бангладеш (свыше 600), Япония, Нидерланды, Бельгия (свыше 300 человек на 1 км²).

Сельскохозяйственный комплекс оказывает существенное влияние на современную биосферу. Достаточно сказать — за время существования земледелия человечество потеряло около 2 млрд. га плодородных почв, превратив их в пустынные, сильноэродированные, переувлажненные и деградированные земли [43]. Это больше площади современной пашни мира, составляющей около 1,5 млрд. га (10 % площади суши): в среднем по земному шару на одного жителя при-

ходится пашен 0,36 га, в России — 0,88 га, в США — 1,4 га. В настоящее время ежегодно теряется около 6—7 млн. га плодородных почв.

При функционировании сельскохозяйственного комплекса почвы подвергаются постоянному механическому (при обработке), химическому (под действием удобрений, ядохимикатов и тяжелых металлов и т. д.), биологическому (взаимодействие почвы с микроорганизмами, высшими растениями и животным миром), атмосферному (поступление газов, выпадение осадков и полив, температурный режим и т. д.) воздействию.

С ростом интенсификации сельского хозяйства происходит увеличение вложения в почву энергии. Так, затраты энергии составляют (ГДж/га в год): в примитивном натуральном хозяйстве — 2, в хозяйстве развивающихся стран — 12—15, в высокоинтенсивном земледелии развитых стран — 15—20. При достижении затрат энергии свыше 15 ГДж/га в год начинаются вредные для биосферы последствия.

Неблагоприятные процессы возникают по принципу «спускового крючка» (энергетических изменений, запускающих цепную реакцию и потому начинающих действовать иногда с уровня, в 10^6 раз более низкого, чем природный фон). При этом необходимо учитывать, что вложенная в земледелие энергия резко меняет структуру почвенного слоя (т.е. поверхности Земли) и сильно воздействует на обмен (круговорот) веществ. Только при ежегодной вспашке полей (при расходе на 1 га пашни 38,4 ГДж механической энергии) на поверхности планеты происходит взрыхление 6 тыс. км³ почвы. В результате усиливается обмен веществ в почвенном покрове, а также воздействие воздуха, влаги и тепла.

Кроме того, из активно функционирующей биосферы в настоящее время также выведено около 2 млрд. га почв (вследствие расположения на них промышленных и жилых зданий, дорог, складов, портов, трубопроводов, свалок и т. д.). Таким образом, 30—40 % общей площади почв суши полностью разрушено или подвергнуто сильнейшей деградации. Причем процесс разрушения почвенного покрова нашей планеты продолжается, ибо только в результате изъятия под

поселения и другие объекты в мире ежегодно разрушается до 8 гектаров и более почв (включая и агрономически ценные).

В России учитываются 7 категорий земель по назначению и 7 основных видов их использования — сельскохозяйственные, леса и кустарники, болота, аквальные, оленьи пастбища, под стройками и дорогами, прочие (табл. 4.15).

Таблица 4.15

Структура земельного фонда Российской Федерации по категориям земель и угодьям (по состоянию на 1995 г.)

| Категория земель | Земельные угодья, вид использования (млн. га) | | | | | | | | |
|------------------|---|-------|-------------------|--------|-----------|-----------------|---------------------------|--------|---------------------|
| | Сельскохозяйственные угодья | | Леса и кустарники | Болота | Под водой | Оленьи пастбища | Под постройками, дорогами | Прочие | Итого по категориям |
| | всего | пашня | | | | | | | |
| I | 186,6 | 122,9 | 134,4 | 15,8 | 19,6 | 253,3 | 3,6 | 54,4 | 667,7 |
| II | 3,8 | 0,2 | 620,5 | 77,1 | 12,9 | 60,1 | 1,7 | 62,5 | 838,6 |
| III | 24,4 | 5,9 | 5,0 | 1,6 | 0,9 | 0,0 | 5,0 | 1,7 | 38,6 |
| IV | 0,4 | — | 13,0 | 1,6 | 1,4 | 1,7 | 0,1 | 9,1 | 27,3 |
| V | 1,2 | 0,2 | 3,8 | 0,4 | 0,8 | 0,1 | 3,0 | 8,3 | 17,6 |
| VI | 0,0 | — | 0,1 | 0,7 | 18,2 | — | 0,0 | 0,4 | 19,4 |
| VII | 5,4 | 1,5 | 7,9 | 11,0 | 18,0 | 12,8 | 0,0 | 45,5 | 100,6 |
| Итого | 221,8 | 130,7 | 784,7 | 108,2 | 71,8 | 328,0 | 13,4 | 181,9 | 1709,8 |

Выделяются три группы процессов, влияющих на геохимическую структуру сельскохозяйственных территорий: агрогенные технологии, технологии, не связанные с агротехникой, и природные процессы.

В первую группу входят процессы обработки почвы, внесение удобрений, содержащих P, K, N, известкование, использование песков и глин, осушение или обводнение территорий и, наконец, внесение фунгицидов, гербицидов и инсектофунгицидов. В результате территория может быть загрязнена при использовании в качестве удобрений животноводческих или бытовых отходов, золы, шлаков, фосфогипса, пород вскрыши и загрязненных вод (для орошения).

Современная агротехнология далека от совершенства. Известно, что Y, REE, As, Cd вносятся в почву на три порядка больше, чем они поглощаются растениями. Для большин-

ства элементов увеличение содержаний в почвах все же еще незначительно. Однако для Sr это увеличение составляет 115 %, для Се — 135 %, для F — 145 %.

Наибольший вред приносит излишнее внесение минеральных удобрений: в почвах накапливаются токсичные и канцерогенные соединения азота, образуются избыточные концентрации фосфора и содержащихся в этих удобрениях Sr, REE, F, U, иногда Pb, As, Cd, V и Zn (табл. 4.16).

При внесении удобрений в пойменные угодья существенно растет подвижность практически всех элементов. В результате применения ядохимикатов (например, в США до 400 т/га) резко возрастает содержание ртути, концентрация которой увеличивается на 200—550 % по сравнению с природным фоном. Под влиянием минеральных удобрений в кислых почвах ухудшаются физико-химические показатели (кислотность, сумма поглощенных оснований, степень насыщенности ими, содержание подвижного алюминия). Для их поддержания на благоприятном уровне необходимо известкование почв из расчета 6—9 т/га CaCO_3 и систематическое внесение органических удобрений (10—12 т/га).

В России в результате длительного кризиса возрастает площадь сельскохозяйственных угодий с низким и очень низким содержанием фосфора, калия или с повышенной кислотностью (табл. 4.17). Так, если в 1986—1990 гг. в среднем за год было внесено органических удобрений 3,8 т/га, то в 1998 г. — уже 0,7 т/га. За этот же период в нашей стране поставка минеральных удобрений уменьшилась со 100 до 12 кг на 1 га пашни.

При антропогенных воздействиях во всех типах почв происходит постепенное уменьшение содержания гумуса. Например, среднегодовые его потери только в почвах горной и предгорной зон Северного Кавказа составляют 0,8—1,2 т/га. Уменьшение гумуса в почвах определяется и его расходом на урожай: так, на серых лесных и дерново-глеевых оподзоленных почвах Северной Осетии ежегодный расход гумуса при возделывании сельскохозяйственных культур составляет 1—1,2 т/га, на выщелоченных черноземах 1,5—1,6 т/га, а на орошаемых черноземах — 1,8—2 т/га (рис. 4.5).

Таблица 4.16

Концентрация химических элементов в фосфорных удобрениях (г/т)

| Исходное сырье | Удобрение | Марка | F | Mn | As | Sr | Y | Cd | Ce | Pb |
|---------------------------------------|-------------------------|-------|--------|-------|------|-------|-------|------|------|------|
| Апатитовый концентрат | Аммофос | С | 5507,4 | 200 | 14 | 565 | 91,1 | 0,2 | 260 | 2,0 |
| | | S | 1240 | 81,6 | — | 9,81 | 10,2 | — | 95 | 0,84 |
| | | Kc | 8,3 | 0,3 | 8,2 | 1,6 | 3,1 | 1,5 | 4,3 | 0,12 |
| | Нитро-аммофос | С | 2431 | 101,8 | 15,9 | 87,24 | 74,17 | 0,24 | 203 | 8,65 |
| | | S | 770 | 42,7 | 4,6 | 33,70 | 12,37 | 0,16 | 75,2 | 13,1 |
| | | Kc | 3,7 | 0,1 | 9,3 | 0,3 | 2,6 | 1,8 | 3,4 | 0,5 |
| Концентрат микро-зернистых фосфоритов | Аммофос | С | 10342 | 1400 | 34,0 | 160,0 | 84,5 | 0,9 | 14,0 | 20 |
| | | S | 370,4 | 575,4 | — | 90,5 | 12,0 | 0,5 | 5,8 | 14,9 |
| | | Kc | 15,6 | 1,4 | 20,0 | 0,5 | 2,9 | 9,2 | 0,2 | 1,2 |
| | Кальций-фосфат кормовой | С | 3371 | 915,6 | 15,0 | 1096 | 135,0 | 0,5 | 88,4 | 12,5 |
| | | S | 1900 | 196,9 | 27,2 | 274,2 | 65,8 | — | 5,0 | 23,0 |
| | | Kc | 5,1 | 0,9 | 9,3 | 3,2 | 4,7 | 3,8 | 1,5 | 1,6 |
| Концентрат ракушечных фосфоритов | Двойной супер-фосфат | С | 8216,1 | 768,1 | 26,2 | 1752 | 281,4 | 0,5 | 658 | 21,0 |
| | | S | 1656,3 | 24,68 | 33,0 | 8821 | 20,3 | — | 138 | 16,0 |
| | | Kc | 12,4 | 0,8 | 15,4 | 5,2 | 9,7 | 3,8 | 9,4 | 1,0 |

Таблица 4.17

Площади сельскохозяйственных угодий Российской Федерации с неудовлетворительными агрохимическими показателями плодородия в 1994 г.

| Экономический район | Повышенная кислотность почвы | | Низкое и очень низкое содержание | | | |
|------------------------|------------------------------|------|----------------------------------|-------|---------|------|
| | (рН < 0,5) | | фосфора | | калия | |
| | тыс. га | % | тыс. га | % | тыс. га | % |
| Северный | 602,5 | 33,2 | 284,2 | 15,7 | 462,6 | 25,5 |
| Северо-Западный | 558,5 | 47,1 | 643,1 | 20,2 | 815,4 | 25,6 |
| Центральный | 4276,9 | 46,6 | 3358,2 | 20,3 | 5122,0 | 31,0 |
| Волго-Вятский | 3118,8 | 33,6 | 1472,2 | 17,5 | 1366,2 | 16,3 |
| Центрально-Черноземный | 1864,8 | 15,9 | 1976,3 | 16,9 | 209,2 | 1,8 |
| Поволжский | 278,0 | 8,5 | 7150,3 | 26,6 | 1632,8 | 6,1 |
| Северо-Кавказский | 278,0 | 1,6 | 4869,0 | 278,0 | 762,0 | 4,2 |
| Уральский | 2781,2 | 11,2 | 10678,1 | 42,7 | 2199,7 | 8,8 |
| Западно-Сибирский | 2232,2 | 8,9 | 3286,4 | 13,1 | 1428,4 | 5,7 |
| Восточно-Сибирский | 661,9 | 5,4 | 4455,1 | 36,7 | 1245,6 | 10,3 |
| Дальневосточный | 1729,8 | 49,6 | 1977,2 | 56,7 | 411,7 | 11,8 |

Снижение содержание гумуса в почвах связано с уменьшением доли вносимых органических удобрений, отказом от травопольной системы земледелия, постоянным возделыванием пропашных культур, монокультурой, эрозией почв и другими факторами.

В течение трех ротаций полевого севооборота ежегодные потери гумуса из неудобряющейся почвы (пахотного горизонта) составляют: в каштановой почве 980 кг/га (или 1,23 % от общего содержания), обыкновенном черноземе — 1804 (0,82 %), выщелоченном черноземе — 1086 (0,65 %) и дерново-глиево-й почве 743 кг/га (0,27 %). В результате в почвах имеется, как правило, отрицательный баланс — выносятся больше, чем возвращается. Недостаток питательных веществ в почве восполняется за счет накопленных ранее запасов гумуса.

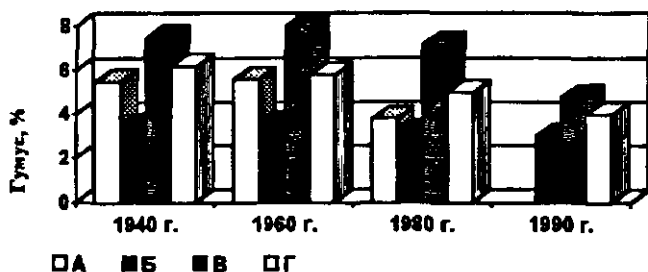


Рис. 4.5. Динамика содержания гумуса в почвах Северной Осетии: А — в среднем на трех основных типах почв; Б — на каштановых почвах; В — на выщелоченных черноземах, подстилаемых галечником; Г — на карбонатных почвах

На фоне ускоренной дегуминификации обостряется проблема переуплотнения почв под воздействием сельскохозяйственной техники и транспортных средств. Результаты исследований показали высокую плотность в горизонтах (в пределах 1,46—1,56 г/см³), следовательно, здесь сильно затруднено проникновение корневых волосков растений, поэтому в этих горизонтах корней мало, они проникают вглубь только по трещинам между призматическими структурными агрегатами, отсюда и низкое содержание гумуса. В почвах с глуби-

ны 20—25 см часто наблюдается сильное уплотнение, это так называемая плужная подошва, которая также затрудняет проникновение корней растений вглубь. По прогнозным оценкам, только в результате переуплотнения к 2000 г. может быть утрачено до 10—15 % используемых пашен.

Кроме технологических процессов на физические свойства почвы оказывает влияние и содержание гумусовых веществ. Например, более гумусированная дерново-подзолистая пахотная почва имеет и более прочную структуру не только в слое 0—20 см, но и в слое 20—40 см, а коэффициент корреляции между концентрацией гумуса и наличием водопрочных агрегатов составляет +0,65. В среднесуглинистых дерново-подзолистых почвах при повышении содержания гумуса от 1,6 до 3,1 % растет общая удельная поверхность на 15—18 м² и одновременно снижается плотность почвы на 0,07—0,1 г/см³.

Ко второй группе процессов относятся региональные, или локальные, выпадения из атмосферы загрязняющих веществ (связанные с промышленной деятельностью) и загрязнение территорий в районах транспортных магистралей. Природные процессы разлива загрязненных рек также могут нанести существенный урон сельскохозяйственным территориям. При вспашке территорий и уборке урожая происходит загрязнение микрокомпонентами (Mn, Ni, Cr, Co, V), содержащимися в выхлопах тракторов и комбайнов. В результате концентрация, например, Ni в почвах может увеличиться на 40 %, а V — на 10 %.

В Северной Осетии вертикальная зональность почв по большинству тяжелых металлов характеризуется увеличением их количества в верхних слоях почвы от каштановых почв к дерново-глеевым, поэтому территория лесолуговой зоны (предгорная полоса) более загрязнена ими, чем лесостепная или степная. Причем содержание одних металлов (стронция и рубидия) в пахотном слое не увеличивается (кроме дерново-глеевой почвы, где идет увеличение их концентраций), других (железа, марганца, меди, никеля, титана, циркония и т. д.) — имеет тенденцию к увеличению, что является следст-

нием как воздействия природных факторов, так и техногенного загрязнения почв выбросами.

В свою очередь, сельскохозяйственные территории в результате смыва удобрений и ядохимикатов загрязняют водные системы. Так, в 1988 г. был зафиксирован интенсивный смыв фосфорных удобрений с сельскохозяйственных территорий Южной Скандинавии, вызвавший бурное развитие синезеленых водорослей в Балтийском море и массовую гибель промысловых рыб. В настоящее время в Америке принимаются меры по уменьшению попадания фосфора в водные бассейны в связи с опасностью снижения отношения Ca/P в воде и пищевых продуктах.

Все это приводит к тому, что в водотоках сельскохозяйственных территорий формируются потоки рассеяния широкой группы элементов, включая токсичные. При этом наибольшую опасность представляют отходы свиноводческого комплекса (где зачастую для удаления навоза предусмотрен гидросмыв), а также птицефабрики. Из 295 специализированных свиноводческих хозяйств России промышленные очистные сооружения с применением азротенков имеют только 52, а 119 используют животноводческие стоки в растениеводстве с помощью ирригационных систем и методов, на специализированных гидромелиоративных полях. В результате вокруг этих предприятий на значительных территориях происходит фильтрация жидкой фракции навоза в почву и грунтовые воды.

С ирригацией связаны также и процессы засоления, заболачивания и обводнения почв, а с осушением — обезвоживания, иссушения торфяных почв и дефляции.

В России сельским хозяйством в 1994 г. было забрано из водоемов и подземных источников $31,2 \text{ км}^3$ (32,4 % от общего водозабора) пресной воды, из которой при транспортировке потеряно до 19 %. На орошение использовали примерно $1,4 \text{ км}^3$ воды. Общее водоотведение составило $10,7 \text{ км}^3$: из них сброшено в водоемы $9,5 \text{ км}^3$, остальное — на рельеф местности. Объем загрязненных сточных вод, поступивших в водоемы, составил $3,2 \text{ км}^3$.

В результате сельскохозяйственной и промышленной деятельности в последнее время угрожающий характер при-

няло *затопление* и *подтопление* (под которыми понимается повышение уровня грунтовых вод) территорий.

В мире потери от затопления земель составляют более 100 тыс. км². В России подтоплено около 9 млн. га земель, в том числе — 5 млн. га сельскохозяйственных [8]. Всего же в условиях избыточного увлажнения находятся 16,1 млн. га сельскохозяйственных угодий (из них 10,3 млн. га — кормовые угодья, 5,7 млн. га — пашни).

Общая площадь земель различного назначения, подтопленных водохранилищами, составляет 866,1 тыс. га (522,1 тыс. га сельскохозяйственных угодий).

В зонах орошаемого земледелия в результате фильтрационных потерь из ирригационной сети, плохого состояния или отсутствия гидрографической сети, дренажей и водоотводных коллекторов нарушается водный баланс значительных площадей, что сказывается не только на мелиоративном состоянии орошаемых земель, но и на гидрологическом режиме прилегающих территорий.

По данным мелиоративного кадастра, площадь ирригационно-подтопленных земель только на уровне грунтовых вод выше 1,5 м составляет 296 тыс. га. Крупный ущерб территориям наносится *эрозионными процессами* (рис. 4.6), которые могут быть вызваны водными и воздушными потоками (различают нормальную, или геологическую, и ускоренную, антропогенную эрозии).

Водная эрозия уносит с полей несвязанные частицы почвы, азот, фосфор, кальций, калий и другие биологически важные химические элементы. Ежегодно с пахотных земель России удаляется 0,56 млрд. т наиболее плодородной части почв. Например, в Северной Осетии смыв почвы с зяби (в зависимости от условий рельефа и погоды) составляет 2—50 т/га. Отмечены факты катастрофического смыва почвы — до 350—500 т/га.

При смыве 1 мм тилучного предкавказского чернозема теряется около 700 кг/га гумуса, 35 кг/га азота и 25 кг/га фосфора.

Смыву в большей степени подвержены склоновые земли, занятые черными парами и пропашными культурами.

Так, при крутизне склона около 10° годовой смыл с чистого пара составляет $500 \text{ м}^3/\text{га}$, с посева кукурузы на зеленую массу (до фазы появления 10 листьев) — $150 \text{ м}^3/\text{га}$, а с посева клевера (по 2-му году) смыто почвы $0,04$ и $0,19 \text{ м}^3/\text{га}$.

Водная эрозия может быть не только *плоскостной*, но и *овражной*. Смыл почв под влиянием талых, дождевых и ливневых вод при уклонах более 3° быстро приводит к их струйчатым размывам с последующим образованием оврагов. Средний ежегодный суммарный прирост длины овражной сети составляет 20 тыс. км, сокращение пашни за счет развития оврагов — 100—150 тыс. га. В России по масштабу овражности выделяется Дагестан ($1,45 \text{ га}/\text{км}^2$ в год).

Ветровая эрозия (дефляция) вызвана выдуванием и развеванием почв, навеванием на них мелкодисперсных пород или песков. Она распространена преимущественно на почвах легкого механического состава (песчаных и супесчаных), а также на сильно иссушенных пылеватых почвах с разрушенной (в результате неправильного сельскохозяйственного использования) структурой. Ветровая эрозия незакрепленных почв может происходить в любое время года и при разной силе ветров, но наиболее опасна она весной (когда почва взрыхлена и на ней еще не развились сельскохозяйственные структуры) при силе ветра свыше $15 \text{ м}/\text{с}$. Особое влияние ветровая эрозия оказывает на почвы засушливых областей

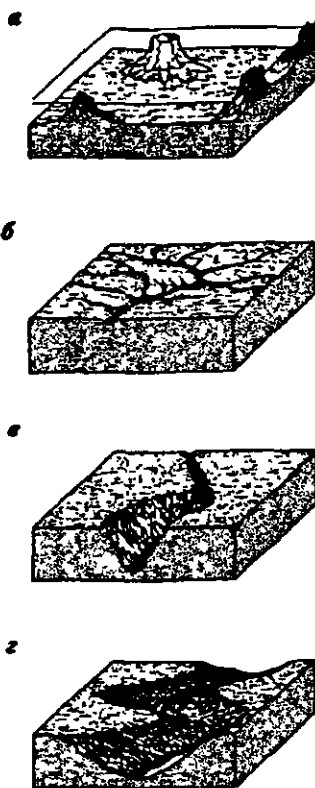


Рис. 4.6. Формы эрозии:
 а — плоскостная; б — струйчатая; в — овражная; з — боковая речная

(в России — это, например, регионы Дагестана или Ростовской области).

К настоящему времени ветровой и водной эрозии подвержено около 54 млн. га сельскохозяйственных угодий, в том числе — 33 млн. га пашни. Кроме того, 30 % всех сельскохозяйственных угодий относятся к группе дефляционно-опасных. Так, по данным Роскомзема, в республиках Мордовия и Чувашия, Ханты-Мансийском автономном округе эродировано более 90 % сельскохозяйственных угодий. По общему количеству эродированных территорий выделяются Белгородская область (88 %), Ростовская область и Удмуртская Республика (72%), Кабардино-Балкарская Республика (68%), Республика Марий Эл (60%). Более половины сельскохозяйственных угодий эродировано в Саратовской области и Республике Хакасия. Еще в 14 субъектах Российской Федерации сельскохозяйственные угодия эродированы в пределах 30—50 % площади. В Северной Осетии (Республика Алания) эрозионные процессы продолжаются на площади, равной 216 тыс. га (27 % всей территории республики). Здесь дефляции подвержены почвы на площади 77,4 тыс. га, наряду с этим более 202 тыс. га относятся к переувлажненным и заболоченным территориям. Из-за нерационального использования земель в этой республике около 3,7 тыс. га подвержено вторичному засолению, а более 40 % площади горных почв имеют неблагоприятную (кислую) реакцию среды. В результате этих процессов на нашей планете теряется примерно 26 млрд. т почвы в год.

Крайне нерационально используются также и кормовые угодья (бессистемный выпас или перевыпас, несоблюдение мер ухода за пастбищами, увеличение частоты скашивания). В 1994 г. в сельскохозяйственном обороте было задействовано 10,1 млн. га сбитых пастбищ, что составило 16,7 % от их общей площади. Весьма высока доля пастбищ в земельном фонде Республики Дагестан — 2740,7 тыс. га (79,6%).

Процессы опустынивания, ранее рассматривающиеся как мелкорегиональные в связи с проблемами деградации пастбищных земель только Калмыкии (82,7 % ее территории подвержены этим процессам, а площадь открытых развееваемых

песков составляет более 150 тыс. га) и равнинной части Дагестана, в настоящее время в разных степенях проявления уже отмечены на территории 17 субъектов Российской Федерации. Чрезвычайная ситуация сложилась на пастбищных землях Астраханской области, где чрезмерная нагрузка от домашних животных привела к дигрессии степных фитоценозов и развитию дефляционных процессов на площади 1,3 млн. га, из которых 382,8 тыс. га перешли в развеваемые пески. Опустыниванием охвачены земли Ростовской области (до 50 % территории сальских степей), Алтайского края (примерно 37 % территории кулундинских степей), до 15 % равнинных территорий Республики Тува. Эта проблема обострилась в Краснодарском и Ставропольском краях, Волгоградской, Воронежской, Омской, Оренбургской, Саратовской областях, республиках Хакасия и Бурятия.

Деграцию оленьих пастбищ необходимо рассматривать как северный вариант опустынивания. Деграция земель в тундровой зоне происходит в результате перегрузок оленьих пастбищ, нарушения почвенного и растительного покровов при неконтролируемом бездорожном проезде автотранспорта, освоения месторождений полезных ископаемых, проведения геологоразведочных работ.

Общая площадь деградированных оленьих пастбищ превышает 230,1 млн. га (табл. 4.18), что составляет более 68 % их площади.

В результате всех этих процессов прогрессируют засоление земель, образование подвижных песков и оврагов, истощение и загрязнение водных источников. *Засоление почв* — процесс повышения содержания в почве легкорастворимых солей (карбоната натрия, хлоридов и сульфатов), обусловлен как исходной засоленностью почвообразующих пород, так и приносом солей грунтовыми или поверхностными водами. Почвы считаются засоленными при содержании токсичных для растений солей более 0,1 % по весу или более 0,25 % солей в плотном остатке (для безгипсовых почв). Засоление почв бывает *первичное* (остаточное), а также *вторичное*, вызванное, как правило, нерациональным орошением сельскохозяйственных территорий.

Таблица 4.18

Площадь деградированных оленьих пастбищ (млн. га)

| Зона оленеводства | Распределение площадей по степени деградации | | | Итого деградированных пастбищ |
|--------------------|--|---------|---------|-------------------------------|
| | Слабая | Средняя | Сильная | |
| Европейская | 5,2 | 10,0 | 8,7 | 23,9 |
| Западно-Сибирская | 13,2 | 10,0 | 12,0 | 35,2 |
| Средне-Сибирская | 4,0 | 20,8 | 16,0 | 40,8 |
| Восточно-Сибирская | 6,5 | 15,7 | 5,0 | 27,2 |
| Северо-Восточная | 20,3 | 50,7 | 32,0 | 103,0 |
| <i>Итого</i> | 49,2 | 107,2 | 73,7 | 230,1 |

Районы древнего орошаемого земледелия имеют очень высокий процент засоленных почв. Так, в долине р. Инд засолено 10 млн. га из 15 млн. га всей площади (примерно 67%), в долине р. Нил — 1,2 млн. га из 1,7 млн. га (более 80%), в Ираке засолено около 50% орошаемой площади, а в США — свыше 27% [42]. В почвах сельскохозяйственных угодий снижается содержание гумуса и основных элементов минерального питания растений (около 90% всего азота почвы, 80% серы и 60% фосфора сосредоточено в гумусе), повышается кислотность, ухудшается общее культурно-техническое и агрофизическое состояние сельскохозяйственных земель. Установлено, что за период интенсивной эксплуатации в течение XX века черноземные почвы потеряли более половины имевшихся в них запасов гумуса, утратили водопроницаемое рыхлое строение и зернистую структуру, ослабили многие свои экологические функции.

Количество выносимых водно-растворимых веществ зависит от механического и химического состава почв, их сельскохозяйственного использования, объема выпадающих осадков, способов и норм орошения, видов и норм вносимых минеральных удобрений, а также применяемых ядохимикатов. Из легких по механическому составу почв выносятся примерно в 2 раза больше водно-растворимых солей, чем из суглинистых, а вынос с угодий, занятых пропашными культурами, в 2—2,5 раза превышает вынос с угодий, занятых кормовыми травами. Строительство дренажных систем способству-

ет улучшению промывного режима подзолистых почв и переносу различных химических веществ в нижележащие горизонты, что приводит к загрязнению грунтовых и даже более глубоко залегающих подземных вод.

В нашей стране к 1996 г. более 40 % площади пашни имели низкое содержание гумуса (менее 4 %), 22 % — фосфора и 9 % — обменного калия. По существу, большинство черноземов России вышли за пределы порога своей устойчивости и оказались в критическом состоянии деградации и переходе на более низкий уровень состояния и плодородия.

Одна из главных причин столь удручающего положения — длительное господство одностороннего утилитарного взгляда на почву только как на объект сельскохозяйственной продукции и место для размещения различных производств. К сожалению, взгляд на почву как на систему, имеющую глобальные экологические функции, в силу ряда причин сильно запоздал во времени, в результате человечество оказалось не подготовленным к возникшему кризису.

4.6

Проблемы радионуклидного загрязнения биосферы

История атомной энергетики началась в 1954 г. с пуском первой в мире АЭС мощностью в 5000 кВт (Россия, г. Обнинск Калужской области). В настоящее время в мире эксплуатируется более 500 АЭС, дающих примерно 20 % всей производимой электроэнергии. С начала развития атомной промышленности возникла и в дальнейшем нарастала радиологическая угроза, связанная с накоплением радиоактивных отходов (РАО). Так, по оценкам МАГАТЭ, производство реакторами 1000 МВт электроэнергии приводит к необходимости ежегодного захоронения 200—500 м³ твердых радиоактивных отходов среднего уровня активности.

Радиационные катастрофы, загрязнение радионуклидами обширных территорий и значительных объемов подземных вод, превращение открытых водоемов в хранилища РАО и непрерывно увеличивающаяся опасность новых аварий на

предприятия атомной промышленности — все это превратило проблему радиогеоэкологии в грозную суперпроблему планетарного масштаба [23].

Таблица 4.19

Источники радионуклидного загрязнения России

| Радионуклиды | Объекты |
|--|--|
| <i>1. Атомные электростанции</i> | |
| Йод-129,131,133,135; ИРГ*; цезий-134,137; тритий; стронций-89,90; америций; радиоуглерод; церий-141,144; плутоний-239; барий-140; ниобий-85; теллур-132; молибден-99; рутений-105; цирконий-95; иттрий-91 и др. | Кольская; Ленинградская; Смоленская; Курская; Томская; Нововоронежская; Балаковская; Белоярская; Билибинская; Красноярская; Костромская; Калининская |
| <i>2. Урановые месторождения</i> | |
| Уран, радий, радон, торий | Ловозеро; Северное Приладожье; Баковогорское; Невское; Бештау; Долматовское; Стрельцовское; Алданское; Слюдянка; Прихотское и др. |
| <i>3. Радиохимические и металлургические комбинаты</i> | |
| Йод-131; цезий-137,134; ИРГ; стронций-90; натрий-24; кобальт-60; марганец-54, 56; европий-152, 154, 155; цинк-65; плутоний-239; церий-144; тритий; рутений-106; хром-51; радиоуглерод; актиноиды; скандий-46; кобальт-58 и др. | Электросталь; Ангарский; Арзамас-16; Первомайский; Кирово-Чепецкий; Красноярск-26; Красноярск-45 |
| <i>4. Горно-химические комбинаты</i> | |
| Уран, радий, радон, торий | Лермонтовский; Краснокаменский |
| <i>5. Ядерные реакторы НИИ</i> | |
| См. п. 1 и 3 | Сосновый Бор; Санкт-Петербург; Дубна; Обнинск; Москва; Протвино; Троицк; Подольск; Димитровград; Нижний Новгород; Екатеринбург; Новосибирск; Норильск |
| <i>6. Прочие производства атомной промышленности</i> | |
| См. п. 1 и 3 | Мурманск; Санкт-Петербург; Полярный; Северодвинск; Иоканьга; Рыбачий; Нижний Новгород; Находка; Корсаков; Комсомольск-на-Амуре; Магадан; Советская Гавань; Владивосток; Александро-Сахалинский и др. |

* ИРГ — инертные радиоактивные газы.

Источниками радиоактивного загрязнения всех составных элементов биосферы являются ядерные взрывы, добыча радиоактивных минералов подземным, открытым и геотехнологическим способами, а также переработка руд и хранение хвостов обогатительных фабрик и металлургических заводов.

Среди этих источников и атомные электростанции, заводы, производящие плутоний и другие делящиеся материалы, места захоронения радиоактивных отходов и др. Всего источников 218, они распространены на всей территории России и каждый характеризуется особым спектром радионуклидов (табл. 4.19) [11, 12, 31, 32, 61].

Так, для урановых месторождений — это уран, радий, радон, иногда торий. Вокруг атомных электростанций, работающих в нормальном режиме, в небольшом количестве характерны газообразные продукты — радиоактивные изотопы криптона, ксенона, водорода и углерода, которые в общем не оказывают существенного влияния на биосферу. Большее значение имеют радиоактивные изотопы кобальта, марганца и других металлов, выбрасываемых в окружающую среду со сточными водами. Но и их влияние незначительно.

Иное положение при авариях, которые имели место в США, Англии и СНГ. При аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. в биосферу поступили радиоактивные изотопы йода, стронция, цезия, рутения и других элементов середины периодической системы Д.И. Менделеева. «Чернобыльский след» помимо территории Украины и Белоруссии распространился на часть Брянской, Тульской, Орловской и других областей России. Авария на предприятии «Маяк» на Южном Урале в 1957 г. («Кыштымский след») также привела к загрязнению радионуклидами (общей активностью 20 млн. Ку) значительной территории.

На территории России с 1965 по 1988 г. был произведен 81 *подземный ядерный взрыв* (табл. 4.20) с весьма широкой географией — от Астраханской области на юге до Мурманской на севере, от Ивановской области на западе до Саха-Якутии и Бурятии на востоке.

Таблица 4.20

Мощность подземных ядерных взрывов
и их распределение по регионам России

| Регион России | Число взрывов | Суммарная мощность, кт ТЭ |
|-----------------------|---------------|---------------------------|
| Астраханская область | 15 | 126 |
| Саха-Якутия | 12 | 151 |
| Красноярский край | 9 | 109 |
| Пермская область | 8 | 28 |
| Тюменская область | 8 | 107 |
| Башкортостан | 7 | 39 |
| Оренбургская область | 5 | 39 |
| Архангельская область | 4 | 63 |
| Коми | 4 | 29 |
| Иркутская область | 2 | 20 |
| Мурманская область | 2 | 6 |
| Ивановская область | 1 | 3 |
| Калмыкия | 1 | 8 |
| Кемеровская область | 1 | 15 |
| Ставропольский край | 1 | 10 |
| Читинская область | 1 | 10 |
| <i>Всего</i> | 81 | 764 |

Эти взрывы проводились как с исследовательской целью, (например, изучение тектонического строения земной коры на полигоне Новая Земля в Северном Ледовитом океане), так и для промышленных целей (табл. 4.21): при создании подземных емкостей для хранения газового конденсата, увеличения отдачи нефтяных скважин, перекрытия аварийных газовых факелов, дробления руды и т. д.

Таблица 4.21

Распределение подземных ядерных взрывов на территории России

| Цель взрыва | Число взрывов |
|---|---------------|
| Глубинное сейсмозондирование земной коры | 33 |
| Интенсификация добычи нефти и газа | 21 |
| Создание подземных емкостей | 19 |
| Захоронение биологически опасных жидких отходов | 2 |
| Перекрытие скважин аварийных газовых фонтанов | 1 |
| Прочие | 5 |

По направлению производимого результата различают три *типа* подземных ядерных взрывов: наружные, приповерхностные и глубинные. При взрывах *наружного* действия образуется воронка и происходит выброс огромной массы грунта. Эти взрывы наиболее сильно загрязняют биосферу: после них радиоактивные продукты обнаруживаются на значительном удалении от места проведения работ. *Приповерхностные* взрывы сопровождаются разрыхлением и вспучиванием недр, в результате чего радиоактивные газы интенсивно прорываются в атмосферу. При *глубинных* (камуфлетных) ядерных взрывах (глубина от 500 м до 2 км) воронка не образуется, но радиоактивные газы также часто выходят на дневную поверхность. Например, на трассе предполагаемого канала Печора-Колва в Пермской области (100 км севернее г. Красновишерска) подземные ядерные взрывы (3 заряда по 15 килотонн каждый) были проведены на глубине 130 м (взрыв наружного действия). А в Якутии взрыв, произведенный на глубине 100 м, был приповерхностным, поскольку меньше была его мощность (порядка 2 килотонн). Самый мощный взрыв (до 40 килотонн) был произведен в Архангельской области (в 65 км от г. Нарьян-Мар) на глубине 1,5 км.

Каждый подземный ядерный взрыв сопровождается множеством радиационных, физико-механических, термических и химических процессов, вызывающих не всегда прогнозируемые последствия для биосферы. Некоторые из них продолжают в течение многих лет и распространяются на значительные расстояния, охватывая недра, гидро-, атмо- и биосферу.

Зона подземного ядерного взрыва представляет собой уже действующий или потенциальный источник:

- возникновения и распространения обширных ореолов радиоактивного загрязнения недр и других объектов биосферы;
- загрязнения атмосферы образующимися и выходящими на поверхность газами;
- возбуждения опасных инженерно-геологических процессов (подвижек горных пород, просадок земной поверхности, активизации оползней, осыпей, горных обвалов);
- нарушения электромагнитных и геофизических полей.

Наиболее неблагоприятным в радиационном отношении оказался взрыв «Кратон-3», произведенный в 1978 г. на территории Республики Саха (Якутия). Тогда из-за грубых нарушений технологии произошел аварийный выброс продуктов деления в биосферу. Для ликвидации последствий этого выброса пришлось проводить работы по дезактивации местности, а также захоронению радиоактивного грунта и оборудования. Сегодня средняя мощность дозы на рекультивированной территории представляет 30—50 мкР/ч, что в два раза выше естественного фона. Общая площадь остаточного радиоактивного следа составляет 45 га.

В 1971 г. на объекте «Глобус-1» в Ивановской области (40 км от г. Кинешмы) произошел выход на поверхность газообразных радиоактивных продуктов взрыва. В настоящее время на участке площадью примерно 1 га вокруг скважины наблюдается повышенный в два раза (по сравнению с естественным) радиационный фон.

Радиоактивное загрязнение местности произошло и на объекте «Тайга», где в 1971 г. был произведен взрыв трех ядерных устройств на трассе канала Печора-Колва. В результате взрыва образовалась траншея, где мощность дозы составляла до 1 мР/ч. На расстоянии 300 м от траншеи радиационная обстановка равняется естественному фону.

Проект «Грифон» в Пермской области (20 км от г. Осы) предназначался для увеличения добычи нефти при помощи подземного ядерного взрыва. Сразу после взрыва радиационная обстановка в районе работ оставалась нормальной. Но начиная с 1976 г. стало увеличиваться число скважин, дающих загрязненную нефть, вплоть до радиационного загрязнения всего месторождения. Аналогичная ситуация отмечается на Гежском нефтяном месторождении Пермской области.

Негативное состояние отмечено и на Астраханском газоконденсатном месторождении (объект «Вега» — 35 км севернее Астрахани), где при помощи подземных ядерных взрывов было создано 15 подземных емкостей для хранения конденсата. Деформация 8 из незаполненных емкостей и прорыв в них подземных вод привели к тому, что радиоактивный рассол выжимается на дневную поверхность.

Огромную опасность представляют собой открытые полигоны временного хранения радиоактивных отходов (хотя по объему высокоактивные отходы (ВАО) — лишь небольшая часть общего количества отходов, с ними связано более 90 % суммарной радиоактивности) [23]. Только в России на предприятиях атомной энергетики образуется свыше 1,5 млн. т опасных отходов, а утилизируется и обезвреживается всего 22,4 %, в спецхранилища помещается 46,4 %, передается другим ведомствам и организациям 31,2 % [27].

Наиболее распространенным *видом* ВАО в большинстве стран (в том числе и в России) являются *жидкие* отходы [23]. Основная их часть накапливалась в связи с производством оружейного плутония. В дальнейшем главным источником *жидких* ВАО стал процесс переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ) с целью извлечения урана и плутония. Всего на таких полигонах в России хранится около 1,5 млн. кюри отработанного ядерного топлива и загрязненного оборудования (самый крупный из них — это территория ПО «Маяк»).

Первоначально вместо утилизации и консервации подобных отходов использовался их сброс в воды Мирового океана. Так, в 1946 г. впервые была проведена операция по сбросу отходов США в северо-восточной части Тихого океана, примерно в 80 км от побережья Калифорнии, а последняя известная операция по сбросу отходов была выполнена в 1982 г. на расстоянии примерно 550 км от европейского континентального шельфа в Атлантическом океане.

Более 75 % всех мировых сбросов в океан провели предприятия атомной промышленности Великобритании. Так, в период 1974—1982 гг. ежегодные сбросы в Ирландское море превышали 100 кКи, причем влияние этих сбросов прослеживалось до Баренцева и Карского морей, куда течением Гольфстрим приносило до 25 % сбрасываемых РАО. Время перемещения морской воды, содержащей радиоактивные сбросы, из Ирландского моря (вокруг Шотландии, вдоль западного побережья Англии, а затем — берегов Голландии, Германии, Дании и Норвегии) до Кольского полуострова составляет примерно 5 лет.

Суммарная активность РАО, сброшенных в различных районах Мирового океана до 1982 г., оценивается в 1,2—1,7 МКи (без учета сточных вод заводов по переработке ядерного топлива, утерянных ядерных боеприпасов и других источников ионизирующего излучения, а также РАО, попавших в океан вследствие проведенных подводных и надводных ядерных взрывов). Основная масса технологических РАО (98 %) была сброшена в Атлантический океан.

Практикуемый ныне сброс разбавленных растворов радиоактивных отходов в Мировой океан в придонные глинистые образования может быть квалифицирован лишь как «кажущееся» обезвреживание, так как механизм воздействия малых доз радионуклидов на биосферу детально не изучен (с учетом долгосрочных последствий, возможности возникновения лавинных процессов и мутаций).

В России в 1949—1951 гг. жидкие отходы, в том числе и ВАО, образующиеся в процессе радиохимического производства на ПО «Маяк» (Челябинская обл.), сбрасывались в р. Теча [23]. В дальнейшем отходы низкого уровня радиоактивности (НАО) стали сливать в специально созданные открытые водоемы, а отходы среднего уровня радиоактивности (САО) (а до 1953 г. и ВАО) — в природное озеро Карачай. Общее количество сброшенных радионуклидов оценивается в 2,76 млн. Ки, значительная часть из них — долгоживущие.

Сооружение в 1951—1964 гг. плотин в верховье р. Теча прекратило поступление отходов в открытую гидрографическую сеть. Однако дно этой реки и заболоченные пойменные почвы в ее верховье были уже значительно загрязнены. В дальнейшем для хранения ВАО были сооружены специальные емкости и хранилища.

В настоящее время уровни содержания радионуклидов в основных компонентах речной системы на 2—4 порядка величин превышают фоновые концентрации. Радиоактивный след тянется в реки Исеть и Тобол и далее — до Северного Ледовитого океана. Каскад водоемов в верховье р. Течи содержит 2 млн. Ки.

За весь период работы ПО «Маяк» в воздух выброшено не менее 150 млн. Ки газообразных продуктов. На террито-

рии предприятия захоронено около 2 млн. Ки твердых радиоактивных отходов, более 900 млн. Ки высокоактивных жидких отходов хранится в специальных контейнерах.

В 1957 г. на предприятии «Маяк» произошел взрыв емкости с радиоактивными отходами. Из них 2 млн. Ки поднялось в атмосферу и, двигаясь в северо-восточном направлении, сформировало «Восточно-Уральский радиоактивный след». Содержание стронция-90 на этой территории в 100 раз выше фоновых значений (максимум наблюдается на центральной оси).

В целом выбросы от ПО «Маяк» привели к радиоактивному загрязнению десятков квадратных километров территории Уральского региона и рек Обь-Иртышского бассейна.

В последнее время проявились новые опасности для окружающей среды. Сравнительно недавно стали очевидными размеры *радоновой опасности*: радон образуется повсеместно и постоянно при распаде U^{238} и подстерегает каждого человека в его жилище.

Весьма высок вклад в радиационный фон и *электростанций, работающих на угле*. Согласно Проекту Энергетической программы в балансе топливно-энергетических ресурсов России уголь составляет 14 %. В общем балансе выработки электроэнергии ТЭС в 1990 г. составляли 73,8 % (из них 27 % работали на угле, 60 % — на газе и 13 % — на нефти). Техническое и экологическое состояние тепловых электростанций России зачастую не удовлетворяет современным требованиям: не на всех установлены эффективные системы пылеулавливания, газоочистки и удаления отходов, более 11 % энергоблоков требуют замены, так как превысили установленный ресурс эксплуатации, а 17,7 % его уже выработали на 75 %.

Таблица 4.22

Средние выбросы радионуклидов в атмосферу (МБк/год)

| Элемент | | | | | |
|---|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| K ⁴⁰ | U ²³⁸ | Pb ²¹⁰ | Po ²¹¹ | Th ²³² | Ra ²²⁶ |
| <i>Выработанная электроэнергия для мира</i> | | | | | |
| 4000 | 1500 | 5000 | 5000 | 1500 | — |
| <i>То же для СССР</i> | | | | | |
| 20000 | 2000 | 8100 | 740 | 2000 | 1100 |

При сгорании угля выделяется гораздо больше аэрозольных частиц, чем при сгорании любого другого топлива. Количество радионуклидов, выброшенных в атмосферу, колеблется для различных электростанций в зависимости от их исходной концентрации в углях и совершенства очистки выбросов ТЭС (табл. 4.22) [10]. Например, Запорожская ТЭС, сжигая 3,4 млн. т угля в год с высоким содержанием минеральной составляющей (35—40 %), ежегодно выбрасывает в атмосферу около 0,13 млн. т золы. При этом радон практически не улавливается действующими системами очистки.

Содержание радионуклидов в угле примерно соответствует гранитным кларкам. Лишь в отдельных случаях (за счет привнесенного урана) оно может быть резко повышено. Так, в подмосковном угле содержание урана в среднем составляет 9,15 г/т, а тория — 11,65 г/т. При сгорании за счет уменьшения объема золы по сравнению с исходной угольной массой обеспечивается повышение удельного содержания радионуклидов. Сгорание угля происходит в топках при температурах, близких к 1700 °С [12]. При этом большая часть минеральной фракции плавится с образованием стекловидной золы. Тяжелые частицы падают под топку, однако наиболее летучая, тонкодисперсная часть золы вместе с потоком газов попадает в атмосферу (табл. 4.23).

Таблица 4.23

Средняя концентрация радионуклидов в летучей золе

| Радионуклид | K ⁴⁰ | U ²³⁸ | Ra ²²⁶ | Pb ²¹⁰ | Po ²¹⁰ | Th ²³² | Th ²³⁰ | Ra ²²⁸ |
|--------------|-----------------|------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Концентрация | 500 | 200 | 200 | 600 | 600 | 200 | 200 | 200 |

Радиоактивность золы и выбрасываемых в атмосферу твердых частиц, образующихся при сжигании подмосковного угля, превышает 370 Бк/кг (достигая временами 520 Бк/кг). Радиоактивность кузбасских, донецких и экибастузских углей составляет 20—40 Бк/кг.

При сжигании таких углей на ТЭС за счет термохимических процессов в выбросах возрастает содержание Ra²²⁶ и Pb²¹⁰, причем последний особенно интенсивно накапливается

в золе. После сжигания угля концентрация в золе Pb^{210} увеличивается в 5—10 раз, а Ra^{226} — в 3—6 раз.

Сжигание углей в топках тепловых электростанций загрязняет биосферу радионуклидами в 40 раз интенсивнее, чем атомные электростанции. Например, в столице Алтайского края г. Барнауле основной вклад в загрязнение территории естественными радионуклидами (ЕРН) вносят ТЭЦ и около 20 котельных, работающих на угле Канско-Ачинского (КАТЭКа) и Новокузнецкого бассейнов [57]. Эти угли отличаются высокими значениями зольности (20—31 %), содержаниями ЕРН и серы. На Луганской ТЭС, работающей на донбасском каменном угле, в радиусе 20 км отмечается превышение содержания ThO_2 (торотраста) в воздухе в десятки раз по сравнению с допустимым.

В окрестностях Новочеркасской ТЭС, работающей на донбасском угле, в радиусе около 10 км содержание ThO_2 в воздухе превышает допустимые нормы в среднем в 80 раз [12]. Торий является одним из наиболее опасных радионуклидов: 70 % его попадает в кости животных и человека. Очень велика *кратность накопления*: отношение максимально накопленного тория к ежедневному накоплению — 925 (урана — 11). Допустимые концентрации тория в воздухе — $9,3 \cdot 10^{-4}$ Бк/м³ (урана-238 — $8,1 \cdot 10^{-2}$).

Облучение населения от АЭС на порядок ниже, чем от ТЭС аналогичной мощности (табл. 4.24). Даже если реальную эффективность очистки тепловых выбросов от золы принять равной 98,5 % (как в современных ТЭС), то и в этом случае доза радионуклидов в выбросах превысит аналогичную дозу, получаемую населением вблизи АЭС с реактором РМБК, примерно в 5 раз, а с реактором ВВЭР-44 — в 40 раз. При нормальной работе АЭС образуются лишь β -излучатели, которые в 20 раз менее опасны для организма, чем α -частицы. Изотопы Ra, Po и других тяжелых элементов, имеющиеся в выбросах ТЭС, при нормальной работе АЭС не образуются.

Население в зоне влияния ТЭС, работающих на угле, получает повышенное облучение при вдыхании радионуклидов во время прохождения шлейфа выбросов, с пищевыми продуктами, питьевой водой и при внешнем облучении (табл. 4.25).

Таблица 4.24

Средние индивидуальные дозы облучения населения СССР от ТЭС и АЭС в 1980—1981 гг.

| Источник облучения | Вид облучения | Эффективная эквивалентная доза, мкЗв/год |
|---|---------------|--|
| Угольные электростанции суммарной мощностью 7 ГВт (эл.) | Внешнее | 0,05 |
| | Внутреннее | 1,90 |
| | Всего | 1,95 |
| Атомные электростанции суммарной мощностью 12 ГВт (эл.) | Внешнее | 0,09 |
| | Внутреннее | 0,08 |
| | Всего | 0,17 |

Таблица 4.25

Выбросы ЕРН, накопленные на почве, и их содержание в атмосфере в районе расположения номинальной ТЭС мощностью 1 ГВт (эл.)

| Показатели | Радионуклиды | | | | | |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| | Ra ²²⁶ | Ra ²²⁸ | Pb ²¹⁰ | Po ²¹⁰ | Th ²³² | K ⁴⁰ |
| Годовой выброс, Ки | 0,53 | 0,3 | 2,2 | 2,0 | 0,53 | 5,3 |
| Плотность загрязнения территории, мКи/км ² | 10,5 | 2,5 | 31,0 | 19,0 | — | 105,0 |
| Концентрация в воздухе, $n \cdot 10^{-18}$, Ки/л | 1,7 | 1,1 | 4,0 | 3,9 | 1,7 | — |

Основной вклад в облучении костной ткани и костного мозга дает Po²¹⁰, а легких — Th²³².

Примером миграции радионуклидов в системе «уголь—зола—почва» может служить Назаровская ТЭС КАТЭКа, которая 20 лет работает с недостаточной очисткой топливных газов. Эта ТЭС находится в лесостепной зоне [12]. Концентрации ЕРН в углях следующие (в 10^{-4} %): U²³⁸ — 5,2—5,8; Th²³² — 5—8,8, что характерно для многих бурогоугольных бассейнов России. Концентрации Th в золе по сравнению с углем возрастают в 2 раза, Ra — в 2—7,5 раза. Уран в основном связан с органикой, выбрасываемой в атмосферу, с парогазовой фракцией и концентрируется в аэрозолях. В атмосферу уходит в среднем 90 % U, 76 % Th и 60—88 % Ra. В результате в почвах района Назаровской ТЭС содержание радионуклидов в 1,5—4,5 раза выше фоновых значений. Эти аномаль-

ные зоны на поверхности почвы в зонах выбросов ТЭС формируются за счет твердых выпадений урана и тория.

План лекции

1. Описать общие проблемы антропогенного воздействия на биосферу, обуславливающие изменения климата, а также загрязнения.

2. Объяснить опасность для биосферы различных отходов человеческой деятельности.

3. Раскрыть имеющееся антропогенное преобразование и загрязнение атмосферы, гидросферы и литосферы.

4. Показать особенности влияния сельскохозяйственного комплекса на биосферу.

5. Описать проблему радионуклидного загрязнения биосферы.

Контрольные вопросы-задания

1. Какие отходы представляют наибольшую опасность для биосферы?

2. Раскройте основные пути решения проблемы отходов.

3. Перечислите основные источники загрязнения атмосферы.

4. Чем определяется загрязнение атмосферы?

5. Какие виды загрязнителей атмосферы Вам известны?

6. Какие основные процессы удаления пыли из атмосферы уже установлены?

7. От чего зависит скорость осаждения пыли в атмосфере?

8. Превышение каких элементов в составе атмосферы наиболее опасно?

9. Какие соединения обуславливают разрушение озонового слоя?

10. На что расходуется кислород при антропогенной деятельности?

11. С какими газами связаны главные проблемы атмосферы? Чем это можно объяснить?

12. Каковы причины повышения дефицита пресной воды на материках?

13. Что дает изучение пространственной структуры загрязнения территории?

14. Что может служить количественной мерой промышленного загрязнения биосферы?

15. Какими изотопами происходит загрязнение биосферы при работе АЭС?

16. За счет чего происходит заражение среды в районах работы ТЭС?

17. Сравните величины радиоактивного загрязнения от ТЭС и АЭС в безаварийном режиме работы.

Глава 5

Изменение биосферы горнопромышленным комплексом

•
5.1. Общие сведения по преобразованию
биосферы горной промышленностью

•
5.2. Загрязнение и нарушение литосферы
горнопромышленным комплексом

•
5.3. Загрязнение и нарушение гидросферы
горнопромышленным комплексом

•
5.4 Загрязнение атмосферы
горнопромышленным комплексом

•
План лекции

•
Контрольные вопросы-
задания

*Глава написана совместно с
канд. техн. наук Т.В. Чекушиной
(ИПКОН РАН)*

5.1

Общие сведения по преобразованию биосферы горной промышленностью

Среди современных разрушающих биосферу технологий добыча полезных ископаемых по многоплановости и необратимости воздействий вышла в нежелательные лидеры. На долю разработки и освоения минерального сырья (угля, нефти, горючих сланцев, попутного и природного газа, металлов, неметаллических твердых полезных ископаемых, минеральных удобрений, строительных материалов) приходится свыше 80 % общего антропогенного воздействия на литосферу (предполагается, что в течение примерно 50 лет за счет процессов рассеяния полученных человеком металлов в поверхностных отложениях земной коры содержание мышьяка повысится в 250, ртути в 100, свинца в 10 и оксидов железа в 2 раза).

Применяющиеся процессы добычи полезных ископаемых (под которыми понимаются не только извлечение минералов, но и весь комплекс вскрытия, подготовки, дробления, выдачи на поверхность, измельчения, обогащительный и металлургический передел) пока еще не могут не нарушать исходное равновесие экосистемы, вызывая необратимые изменения в биосфере [1].

Подземный и открытый способы разработки месторождений твердых полезных ископаемых, скважинный способ добычи нефти, природного газа, серы, солей, цветных и других металлов существенно влияют на газовый, водный, термический и геохимический режимы территорий расположения горнодобывающего комплекса, на микроклимат отдельных регионов и частично даже на глобальный климат планеты.

В связи с интенсивным ростом промышленного производства, обуславливающим постоянно возрастающую потребность в различных видах минерального сырья, добыча полезных ископаемых в мире удваивается каждые 10—15 лет [10]. Следствием этого является то, что за последние 25—30 лет из недр было извлечено около 15 млрд. т железной руды, 70 млрд. т угля, 25 млрд. т нефти, 12 трлн. м³ природного газа, миллиарды тонн минеральных удобрений, строительных материалов, десятки миллионов тонн меди, свинца, цинка, алюминия, сотни тысяч тонн остальных цветных и редких металлов, сотни тонн золота и многих других полезных ископаемых.

Только в России в настоящее время действуют более 600 шахт и рудников с подземной добычей угля, руд черных и цветных металлов, минеральных удобрений, а также свыше 4000 карьеров и разрезов. Минеральное сырье перерабатывают более 2000 обогатительных фабрик (ОФ), в *угольной промышленности* на экологическую обстановку биосферы негативное влияние оказывают 230 шахт и 65 разрезов (в 1995 г. на них было добыто 250,2 млн. т угля), 74 обогатительные фабрики, 350 предприятий угольного машиностроения, производства строительных материалов, а также многочисленные строительно-монтажные предприятия, автобазы, управления водно-канализационного хозяйства и др. Разработка месторождений *горно-химического сырья* осуществляется 35 карьерами и 20 рудниками (с превышением 55 % удельного веса добычи полезного ископаемого открытым способом). В *железорудной промышленности* в настоящее время открытым способом разрабатываются 3 месторождения — Лебединское, Стойленское и Михайловское; подземная добыча производится на Коробковском месторождении (на Яковлевском месторождении строится подземный рудник).

В XX веке техногенный перенос материала на поверхности Земли достиг огромных размахов: ежегодно в процессе ведения горных работ перемещается не менее 1 км³ горных пород, что вполне соизмеримо с денудацией суши всеми реками мира.

Интенсификация добычи минерального сырья сопровождается постоянным расширением масштабов и площадей

негативного влияния на все компоненты биосферы и, в конечном счете, на здоровье населения, а также состояние зданий, сооружений, оборудования, природных объектов гидросферы (рек, озер, прудов и т. д.) и атмосферы. К 1990 г. человек изменил исходные природные ландшафты 55 % территории Земли, т. е. 2,3 га на каждого жителя планеты.

Увеличение объемов добычи разнообразных полезных ископаемых (при сохранении тенденций по форме и величине нагрузки на биосферу) позволяет прогнозировать дальнейшее ухудшение природных условий. В настоящее время этот процесс имеет объективный характер и наблюдается в государствах с различным политическим устройством, формами хозяйствования и технологическим уровнем. Уже в разных странах установлено отрицательное воздействие на биоту со стороны горных предприятий. Так, в Уэльсе и Сомерсете (Англия) в районе складирования отвалов образовались аномалии с содержанием свинца в растениях 275 мкг/т, что значительно выше ПДК. В результате этого произошел падеж домашнего скота. То же отмечено и в Шотландии (дороги в придорожной полосе были построены из отвалов местного рудника). В Западном Казахстане зафиксированы случаи строительства фундаментов домов с использованием отвалов уранового рудника, а в Ловозере улицы города мостились песком из россыпей, содержащих радиоактивный лопарит. В Киргизии, в поселке рудника Ак-тюз, некоторые дома были построены с использованием торийсодержащих песков местной обогатительной фабрики. На Чиатурском месторождении (Грузия) установлено резко повышенное содержание марганца в кукурузе, клевере и люцерне. В районе фосфоритовых рудников Айдахо (США) отмечается загрязнение свинцом, кадмием и цинком почв, а также произрастающих вблизи отвалов люцерны и кормовых трав.

Другой особенностью функционирования горного производства является то, что добыча и переработка полезных ископаемых — вид техногенеза, имеющий высокую концентрацию в пространстве. Только в Свердловской области находятся в разработке или были отработаны за последние 25 лет 208 месторождений твердых полезных ископаемых (кро-

ме месторождений глин), в том числе: марганца — 4, железа — 25, цветных металлов — 32 (из них Cu — 9), рудного золота — 5, неметаллических полезных ископаемых — 58, золотоплатиновых россыпей — 38, строительных материалов — 40, угольных — 6. В районе Эллиот-Лейк (Канада) на площади 48 км² существовало 11 крупных рудников и гидрометаллургических заводов (ГМЗ) с суммарным производством 13,2 тыс. т урана в год. В бассейне Витватерсранд (ЮАР) находилось 26 рудников и 17 ГМЗ, на плато Колорадо (США) действовало до 1000 рудников и 27 ГМЗ, в штате Вайоминг (США) — до 45 рудников и 18 ГМЗ.

Сегодня результатом горнопромышленной деятельности человека являются уже не локальные территории и даже не отдельные районы, а целые регионы интенсивной добычи сырья: Донбасс, Кузбасс, Норильск, Урал и их аналоги за рубежом. Так, добычу угля в России производят в восьми основных угольных бассейнах: Кузнецком (примерно 93 млн. т угля), Канско-Ачинском (31 млн. т), месторождениях Восточной Сибири (33 млн. т), Печорском и Донецком (22 и 18 млн. т), месторождениях Урала (11 млн. т), Подмосковном (3,5 млн. т).

Следующая особенность функционирования горнопромышленного комплекса — образование многочисленных отходов (твердых, жидких или газообразных) производства.

Если на 1 т угля в среднем образуется около 3 т отходов в процессе добычи и 0,2—0,3 т в процессе потребления, а на 1 т стали 5—6 т отходов при добыче и 0,5—0,7 т в процессе переработки, то на 1 т цветных металлов (ввиду их низкого содержания в рудах) уже образуется не менее 100—150 т отходов при добыче и более 50—60 т при переработке. На 1 т редких, благородных и радиоактивных металлов образуется (в связи с их еще более низким содержанием в рудах) до 5—10 тыс. т отходов в процессах добычи и от 10 до 100 тыс. т при переработке. Однако величина утилизации отходов, возникающих при функционировании горнодобывающего и перерабатывающего производств в смежных или сопутствующих процессах, не превышает 6—10 %. Общее количество всех видов неутилизованных отходов горного производ-

ства в России составляет около 45 млрд. т. Под их складирование занято 250 тыс. га земель.

Горнодобывающие предприятия, ежегодно выбрасывая более 20 млн. т пылегазовых веществ, являются крупнейшими загрязнителями атмосферы. Так, в угольной промышленности России (при добыче примерно 337 млн. т угля в год) атмосферные выбросы составляют ориентировочно 394 тыс. т, а сброс загрязненных вод равен 0,6 млрд. м³ (или 84 % их общего количества).

В газовой промышленности при добыче 640 млрд. м³ природного газа вредные выбросы в атмосферу составляют 2138 тыс. т (около 20 % общих выбросов в стране H₂S, SO₂, NO₂ и др.), а в гидросферу — примерно 21 млн. т неочищенных сточных вод.

Нефтедобывающая промышленность дает 2,5 млн. т атмосферных выбросов (10 % от общих), 21 млн. м³ загрязненных сточных вод и нарушает приблизительно 12,7 тыс. га земель. Нефтеперерабатывающей промышленностью в атмосферу выбрасывается более 1,5 млн. т загрязняющих веществ (3,83 кг на 1 т перерабатываемой нефти), а сброс сточных вод достиг 16,5 млн. м³ (из них — 3 млн. м³ без очистки).

На этих предприятиях отмечается значительное количество и других (твердых или жидких) отходов. Например, только обогатительные фабрики ежегодно направляют в хвостохранилища и очистные сооружения до 10 км³ твердых и жидких отходов. Твердые минеральные отходы горного производства под действием температурно-влажностных факторов и химических процессов с течением времени трансформируются и в виде пылевидных фракций или аэрозолей попадают в атмо- и гидросферу, а также загрязняют почвы.

Важное значение имеет вид добываемого полезного ископаемого. Например, в отличие от горнодобывающих предприятий цветной металлургии, в которых главная доля (до 85 %) загрязнения биосферы связана с воздействием тяжелых металлов, сульфатов, нитратов, хлоридов и других соединений, в уранодобывающей промышленности основная доля (90 %) загрязнения связана со слаборадиоактивными твердыми отходами.

При этом особую опасность представляют отходы, накапливаемые в хвостохранилищах, где радоновыделение (учитывая высокую степень измельчения хвостов и длительный срок их хранения) в 4—5 раз превышает радоновыделение из подземных выработок. Влияние хвостохранилищ на радиационное загрязнение окружающей среды соизмеримо с действием АЭС и во много раз превышает влияние собственно горных работ.

Добыча и переработка полезных ископаемых, кроме того, предусматривает использование мощной и разнообразной добычной и транспортной техники. Так, сжигание органического топлива в дизелях и двигателях внутреннего сгорания часто формирует уровень загрязненности в пределах прилегающих территорий.

Особенности организации горного и перерабатывающего производства (многостадийность передела от добычи сырья до изготовления продукта, географическая разобщенность элементов технологической цепи, большая численность предприятий и др.) способствуют миграции химических элементов, загрязняющих биосферу. Технологическая цепь производства включает в себя предприятия, где геоматериалы дезинтегрируют всеми доступными средствами: взрыванием, сухим дроблением в дробилках, мокрым измельчением в мельницах, активацией в быстроходных аппаратах, располагаемых на земной поверхности, где происходит воздействие на них природных факторов (осадков, ветра, температур, лучистой энергии), которые продолжают процесс естественной и технологической дезинтеграции.

В основе отрицательного влияния технологий на биосферу лежит изменение путей фильтрации газов и жидкостей при структурных нарушениях литосферы, взаимного расположения элементов различных оболочек относительно друг друга, трансформация природного и техногенного баланса твердой, жидкой и газообразной компоненты природной среды.

Деятельность рудников, карьеров и перерабатывающих заводов вызывает необратимые изменения в виде:

- разрушения земной коры;

- перераспределения в литосфере напряжения или горного давления;
- изъятия из оборота почв над обрушенными участками;
- загромождения отвалами поверхности;
- заболачивания или, наоборот, обезвоживания почв;
- изменения химического, биохимического и физического состояния пород, почв, вод, воздуха и растительности;
- изменения характера атмосферных явлений и запыленности;
- увеличения радиоактивного уровня в регионах;
- изменения видов и количества флоры и фауны в окрестностях;
- возникновения биогенных мутаций и др.

Подобная разноплановая трансформация биосферы требует не менее разностороннего подхода при ее охране. Поэтому технические и технологические решения по охране биосферы весьма разнообразны и зависят от следующих факторов:

- типа месторождения (его масштаба, геологических и гидрогеологических условий залегания);
- вида полезного ископаемого (например, месторождения металлических руд — урановых, цветных и черных металлов и др., угля, сланцев, горно-химического сырья или строительных материалов и камня, нефти и газа);
- системы отработки месторождения (открытая, подземная или геотехнология) и переработки минерального сырья (обогащение, гидро- или пирометаллургия);
- технологической схемы разработки месторождения (с обрушением земной поверхности или закладкой выработанного пространства и др.) и переработки минерального сырья (обогащение гравитационное, электромагнитное, флотационное и пр.);
- ландшафтно-геохимических характеристик территории (особенностей климата — теплый или суровый, сухой или влажный и т.д.; рельефа местности — равнинный, холмистый, горный; состава почв — пески, глины, чернозем и других факторов).

5.2

Загрязнение и нарушение литосферы горнопромышленным комплексом

Для горнодобывающей промышленности характерно образование и складирование значительного объема минеральных отходов. Например, вовлечение в переработку апатитовых руд с содержанием P_2O_5 около 4% по существующей технологии предполагает сброс в хвосты более 96% добытой рудной массы. В связи с этим растут объемы хвостохранилищ, их высота и занимаемые площади. Так, мощность массивов отходов рудообогащения зачастую достигает десятков метров. И если расширение площадей хвостохранилищ приводит к нарушению растительного и почвенного покрова в рамках отведенных границ, то увеличение их высоты создает благоприятные ситуации для пылеобразования и загрязнения биосферы на значительных расстояниях, достигающих десятков и сотен километров.

В настоящее время в Российской Федерации эксплуатируется более 300 крупных хвосто- и шламохранилищ вместимостью от 500 до 600 тыс. м³, которые представляют реальную и потенциальную угрозу для биосферы (так, произошедший в 1992 г. на хвостохранилище Магнитогорского металлургического комбината прорыв дамбы привел к выбросу 2 млн. м³ жидкого шлама).

В отвалах только предприятий цветной металлургии РФ уже накоплено свыше 6 млрд. т крупнотоннажных отходов, в том числе примерно 5 млрд. т вскрышных и вмещающих пород, около 1 млрд. т хвостов обогащения, свыше 300 млн. т шлаков металлургического и более 150 млн. т шламов глиноземного производства. Ежегодное поступление в отвалы твердых минеральных отходов превышает 300 млн. т.

В урановой промышленности основная масса радиоактивных отходов горнопромышленного комплекса — отвалы пустых пород, склады забалансовых руд и хвостохранилища ГМЗ. Удельная активность хвостов гидromеталлургических заводов низкая — α -излучение составляет $(11,1—18,5)10^3$ Бк/кг [11]. В процессе переработки руд распадаются корот-

коживущие естественные радионуклиды, такие, как протоактиний-234, торий-234 и др. Поэтому в хвостах ГМЗ остается около 70 % первоначальной рудной, естественной активности. В хвостохранилищах накапливаются огромные массы тория-230 с периодом полураспада $8 \cdot 10^4$ лет, радия-226 с периодом полураспада $0,16 \cdot 10^4$ лет, остаточного урана и его долгоживущих изотопов с периодом полураспада в сотни миллионов лет, следовательно, радиоактивность хвостов ГМЗ будет сохраняться огромный период времени.

В основном радиоактивность хвостов создается наличием радия-226, большая часть которого остается в твердых радиоактивных отходах, так как его содержание в растворах не превышает 1 % при концентрации от 9,2 до 185 Бк/л. Наибольшее содержание и удельный вес радиоактивности наблюдаются в шламовой части хвостов: чем ниже крупность измельченного рудного материала, тем выше удельный вес активности радия-226 (табл. 5.1).

В России наибольшее количество минеральных отходов образуется на Норильском горно-металлургическом комбинате, где ежегодно складировается около 4,7 млн. т отвальных металлургических шлаков, а в хвостохранилище уже накоплено 350 млн. т песков. Отходы производства хибинских апатитовых рудников, карьеров и обогатительных фабрик, достигающие сотни миллионов тонн, приводят к резкому нарушению природного равновесия (возникновение техногенных землетрясений, выход на поверхность захороненных сточных вод, песчаные вихри, сход каменных лавин и селей, резкое изменение рН грунтовых вод и их локальное загрязнение фтором, фосфором, серой и углекислотой). Общие отходы углеобогатительных фабрик только в 1988 г. составили 114 тыс. т.

Таблица 5.1

Зависимость активности хвостов ГМЗ от их фракционного состава

| Крупность, мм | Выход класса, мм | Активность Ra^{226} , Бк/кг | Удельный вес активности, % |
|----------------|------------------|-------------------------------|----------------------------|
| +0,15 | 5,0 | 407—3000 | 0,7 |
| -0,15 + 0,074 | 30,0 | 2200—6000 | 24,7 |
| -0,074 + 0,043 | 30,0 | 3000—9500 | 31,4 |
| -0,043 | 35,0 | 3600—13500 | 43,8 |

В СНГ из общей площади земельного отвода под горные предприятия в среднем 20 % занимают карьерные отвалы, 13 % отводится под хвостохранилища обогатительных фабрик, 5 % занято отвалами и отходами шахт, 3 % превращено в непригодные земли вследствие оседания и провалов земной поверхности.

В настоящее время разработка месторождений полезных ископаемых сопровождается значительным увеличением не только объемов извлекаемых пород, но и глубины горных работ. Глубина отдельных рудников в Южной Африке уже достигла отметок 3950 м, в Индии — 3800 м. Глубина добычи угля в Европе доходит до 1300 м. Глубина откачек газа, нефти и воды составляет 8—10 км. Глубина некоторых шахт в ряде горнодобывающих районов СНГ уже превышает 1,2 км. Так, глубина рабочих горизонтов на рудниках Норильска и шахтах Центрального Донбасса превышает 1000 м. В будущем, возможно, более 150 рудников (с общей годовой добычей около 100 млн. т) станут разрабатывать месторождения на глубинах от 500 до 1200—1300 м. Уже сейчас в России при разработке месторождений полезных ископаемых свыше 30 карьеров имеют глубину более 150 м [31]. Глубина многих железорудных карьеров составляет 300 м, глубина карьера (трубки) «Мир» — 480 м, карьера «Центральный» ПО «Ураласбест» — 620 м, проектная глубина карьеров цветных металлов и асбеста (Киембаевский и Джетыгаринский) — 400—600 м, угольных разрезов в Кузбассе и Экибастузе — 300—600 м. В ближайшей перспективе около 70 % угольных и рудных карьеров будут иметь глубину от 150 до 500—700 м.

В результате добычи полезных ископаемых в земной коре происходят значительные изменения физических полей, глубинных геологических процессов, а природные ландшафты трансформируются в горнопромышленные ландшафты. Так, следствием влияния отработки месторождений полезных ископаемых на литосферу является образование в недрах пустот (горных выработок), проседающих земель, загрязненных участков поверхности, разрушенных почв, возникновение техногенных землетрясений, горных ударов и т. д. Например, только в районе Курской магнитной аномалии

(КМА) горными работами нарушено свыше 30 тыс. га площадей, а около каждого карьера (в радиусе 30—35 км) создались депрессионные воронки подземных вод с общей площадью осушения около 100 тыс. га.

Разработка месторождений полезных ископаемых сопровождается изъятием значительных территорий. Только для получения стройматериалов в республиках бывшего СССР ежегодно изымалось около 1200 га земельных угодий. Проектные площади хвостохранилищ ряда крупнейших горно-обогатительных комбинатов позволяют оценить масштабы такого нарушения земель (га): Лебединский — 1950, Стойленский — 1800, Оленегорский — 1350, Качканарский — 1130, Михайловский — 940, Ковдорский — 900. В России в окрестностях рудников и шахт расположено более 2 тыс. отвалов и терриконов, в которых хранится более 3 млрд. м³ геоматериалов. В среднем под породные отвалы отводится 0,1 га площади земли на каждые 1000 т сырья. В результате в СНГ площадь, занятая отвалами горнодобывающих и перерабатывающих производств, составляет свыше 10 млн. га. Всего с 1945 по 1991 г. на территории бывшего СССР было заскладировано около 150 млрд. т минеральных отходов. Значительная их часть накопилась на предприятиях Урала (свыше 600 млн. м³), Кривбасса (более 400 млн. т окисленных железистых кварцитов), КМА (около 1 млрд. м³ вскрышных пород), на Северо-Востоке России при отработке россыпей (более 1,5 млрд. м³ минерального сырья). В 1996 г. в угольной промышленности объем образования вскрышных (вмещающих) пород и отходов обогащения составил 736,2 млн. м³ (из них было полезно использовано около 395,0 млн. м³).

В мире в результате горнотехнической деятельности уже нарушено более 15—20 млн. га земель, из них 59 % площади использовано под различные горные выработки, 38 % — под отвалы пустой породы или отходов обогащения, 3 % представляют собой места оседания, провалов и других нарушений поверхности, связанных с подземными разработками.

В СНГ площадь земель, нарушенных в результате производственной деятельности горных предприятий (без учета площадей, занятых под отвалы), в настоящее время составляет

(с учетом добычи торфа) свыше 2 млн. га, из которых около 500 тыс. га — это земли сельскохозяйственного назначения. Так, например, за время существования Лебединского карьера было разработано и перемещено различными видами транспорта 1,1 млрд. м³ горной массы. За это время во внешние отвалы уложено 800 млн. м³ пород вскрыши и 260 млн. м³ отходов обогащения. В результате только под хвостохранилища на Лебединском и Стойленском ГОКах было отчуждено около 2000 га земельных площадей.

Весь земельный отвод Лебединского ГОКа (включая горнопромышленные объекты, водохранилище и зоны застройки социально-культурного назначения) составляет около 19,8 тыс. га. Под карьер занято 1100 га, действующие отвалы рыхлой вскрыши — 650 га, окисленных кварцитов и кристаллических сланцев — 300 га, хвостохранилище — 1520 га. С нарушенной площади сельскохозяйственных угодий (4,1 тыс. га) снято 22,3 млн. м³ чернозема, который был использован (8,5 млн. м³) для рекультивации отработанных площадей отвалов (1950 га) и улучшения малопродуктивных сельскохозяйственных угодий (10,5 млн. м³ на площади 2650 га).

Помимо использования земель существует целый ряд отрицательных воздействий горной промышленности:

- сдвигание массива горных пород на подрабатываемых территориях;
- оседание поверхности;
- снос породы с отвалов;
- рассеяние загрязняющих веществ, оказывающих комплексное негативное воздействие на состояние земельных ресурсов.

В результате добыча и переработка полезных ископаемых на горных предприятиях сопровождаются существенными *нарушениями естественных ландшафтных комплексов* (в первую очередь почвенного покрова). Ежегодно горными работами нарушается около 150 тыс. га земель, из них на сельские угодья приходится около 40 %. Например, добыча 1 млн. т железной руды приводит к нарушению от 14 до 640 га земли, угля — от 2,6 до 43 га, руд для производства минеральных

удобрений — от 22 до 97 га, 1 млн. м³ строительных материалов — от 1,5 до 583 га. Только в угольной отрасли России нарушено уже 106,4 тыс. га земли (из них 2,16 тыс. га в 1996 г.). Наибольшие изменения земной поверхности и загрязнение окружающей среды происходят при открытом способе разработки месторождений полезных ископаемых (на долю которого к тому же приходится свыше 75 % объемов горного производства).

Всего за период 1976—1990 гг. площадь земель России, нарушенных при добыче полезных ископаемых, прокладке магистральных трубопроводов, проведении геолого-разведочных и других работ, составила 1,57 млн. га (в среднем 100 тыс. га за год). Из этого количества на добычу угля приходится около 13 %, руд цветных металлов — 21 %, руд черных металлов — 4 %, сырья для стройматериалов — 6,5 %, торфа — 40 % [14].

Степень нарушения земель зависит прежде всего от параметров месторождения и способа разработки (открытый, подземный или геотехнологический), структуры месторождений и их характеристик, типа полезных ископаемых и системы транспортировки:

1) для открытого способа разработки характерно образование карьерных выемок; занятие земель под внешние отвалы; оползневые смещения грунтов; оседание или уплотнение грунтов вокруг карьеров в результате осушения окружающего породного массива; суффозионные воронки, ослабляющие борта карьеров и устойчивость отвалов; эрозия почв на прилегающих территориях;

2) для подземного способа разработки — оседания массивов горных пород при отработке пластовых и пластообразных горизонтальных или пологозалегающих месторождений; провалы (промышленный карст) при разработке наклонных и крутопадающих месторождений, а также горизонтальных и пологопадающих месторождений большой мощности; оползневые смещения грунтов, вызываемые сдвижением или обрушением массивов горных пород над выработанными пространствами; занятие отвалами земли; затопление грунтовыми водами осевших земель; уплотнение грунтов и эрозия почвы;

3) для геотехнологического способа разработки — проседание земной поверхности при гидродобыче через скважины без последующей закладки выработанных полостей или с ее отставанием; загрязнение и трансформация недр; разрушение почвенного слоя вокруг эксплуатационных скважин и трубопроводов; занятие земель отстойными прудами (бассейнами), канавами и дорогами;

4) для всех способов обогащения — занятие земель хвостохранилищами и отстойными прудами.

При отработке месторождений нефти и газа на земной поверхности фиксируются следующие ландшафтные нарушения:

- образование на устьях скважин кратеров, заполненных минерализованной водой;
- уничтожение растительности;
- появление промоин на склонах;
- покрытие прилегающих территорий коркой песчано-глинистой смеси.

При этом происходит засорение и недр: только нефтяники Башкирии оставляют в земных недрах более 2 тыс. т металла в год (преимущественно в виде неизвлекаемых обсадных труб скважин).

Значительное поступление загрязняющих веществ в литосферу происходит в зонах коммуникаций и транспортных узлов (90 т пыли на 1 км железнодорожного полотна в год). При эксплуатации нефтепроводов наибольший ущерб окружающей среде наносят аварийные утечки нефти и газа.

Наиболее уязвима для открытых и подземных работ та часть биосферы, которая представляет собой синтез атмо-, гидро- и литосферы — почвы. Состав почв в районах горных работ изменяется как при прямом физическом воздействии (их разрушении), так и вследствие дезинтеграции минералов воздушными и водными потоками, нередко комбинированно дополняющими друг друга, а также в результате их химического преобразования.

Суммарный экогеохимический показатель экологичности извлекаемых на дневную поверхность минералов рассчитывается по следующей формуле:

$$Э_{\Sigma} = \frac{1}{Y} \sum Э_i, \quad (5.1)$$

где Y — показатель устойчивости минерала, учитывающий химические, биохимические, механические и гидроаэродинамические характеристики и имеющий три градации (10, 5, 1).

Среди минералов самый высокий экогеохимический показатель у самородной ртути — $1 \cdot 10^8$, затем киновари — $5 \cdot 10^6$, теллуридов и селенидов — $1 \cdot 10^6$, галхаита — $7 \cdot 10^5$, галенита и арсенопирита — $5 \cdot 10^5$, акташаита — $3 \cdot 10^4$, молибденита — $2 \cdot 10^4$; среди минералов группы оксидов и солей кислородных кислот наиболее неблагоприятны для биосферы хризоберилл — $5 \cdot 10^6$, берtrandит — $5 \cdot 10^6$, уранит — $8 \cdot 10^4$, торинит — $5 \cdot 10^4$, торит — $4 \cdot 10^4$, берилл — $4 \cdot 10^4$, целестин, барит, стронцианит, витерит и флюорит — $3 \cdot 10^4$, шеелит, лопарит и эвдиалит — $2 \cdot 10^4$, пироклор — $1 \cdot 10^4$ и т.д. (для кальцита $Э_{\Sigma} = 1-5$).

Выбросами в атмо-, гидро- и биосферу горные предприятия оказывают прямое влияние на почвы прилегающих районов площадью до сотен квадратных километров и косвенное — на примыкающую поверхность планеты.

На почвы также оказывают влияние и мобильные частицы геоматериалов, развиваемые движением рудничного автотранспорта, вследствие пыления отвалов, выветривания поверхности выработок и сброса шахтных вод. Так, только в черте г. Кривой Рог (Украина), где накоплено более 3 млрд. т пород в отвалах и 2 млрд. т хвостов обогащения, в воздух выбрасывается свыше 1,2 млн. т веществ, а из подземных пустот откачивают около 40 млн. м³ высокоминерализованных вод в течение года. Все это в конечном итоге попадает в почвы и гидросферу. Примерно такое же положение характерно и для Норильска, Магнитогорска, Усть-Каменогорска и многих других городов, связанных с горной промышленностью.

Наиболее нарушенной техногенной деятельностью на комбинате «Норильский никель» (в состав которого входят 3 плавильных завода, 2 обогатительные фабрики, карьер вблизи руч. Медвежий и рудники Заполярный, Маяк, Комсомольский, Октябрьский, Таймырский и Глубокий) оказалась прилегающая площадь в 7 млн. га (2/3 в тундре и 1/3 в лесотундре). Интенсивность загрязнения почв вблизи обогатительных

фабрик обычно очень высока. Так, в районах размещения полиметаллических обогатительных фабрик превышение фоновых содержаний достигает двух десятков для свинца и порядка для кадмия. В табл. 5.2 приведены данные рентгеноспектрального анализа образцов почв и растений, отобранных между Норильском и Талнахом в северо-восточном направлении от Медного завода [8].

Таблица 5.2

Содержание меди, никеля и кобальта в почвах и растениях, отобранных между Медным заводом в Норильске и южной окраиной Талнаха (% масс.)

| Природная среда | Содержание | Расстояние от Медного завода, км | | | | |
|-----------------------|------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0,6 | 2,3 | 3,7 | 10,1 | 16,8 |
| Верхний горизонт почв | Cu | 2,06 | 0,654 | 0,023 | 0,037 | 0,018 |
| | Ni | 0,2 | 0,258 | 0,015 | 0,024 | 0,008 |
| | Co | 0,008 | 0,010 | 0,004 | 0,006 | 0,003 |
| Кора лиственницы | Cu | Н | 0,171 | 0,073 | 0,080 | 0,146 |
| | Ni | Н | 0,047 | 0,016 | 0,047 | 0,034 |
| | Co | Н | 0,002 | 0,001 | 0,004 | 0,002 |
| Мхи зеленые | Cu | Н | 3,55 | 0,148 | 0,229 | 0,206 |
| | Ni | Н | 1,29 | 0,090 | 0,096 | 0,111 |
| | Co | Н | 0,04 | 0,005 | 0,004 | 0,001 |
| Лишайники | Cu | Н | Н | 0,233 | 0,137 | 0,169 |
| | Ni | Н | Н | 0,101 | 0,079 | 0,096 |
| | Co | Н | Н | 0,003 | 0,002 | 0,002 |
| Хвоя ели | Cu | Н | 0,020 | — | 0,007 | 0,005 |
| | Ni | Н | 0,012 | — | 0,012 | 0,007 |
| | Co | Н | 0,002 | — | 0,001 | 0,001 |
| Хвоц полевой | Cu | — | — | 0,034 | 0,024 | — |
| | Ni | — | — | — | 0,005 | — |
| | Co | — | — | — | 0,002 | — |

Примечание: — нет сведений; Н — не произрастает.

Накопление загрязняющих веществ влияет на исходные свойства почвы, изменяет в ней общую численность и видовую принадлежность микроорганизмов, что сопровождается изменением способности почв к самоочищению. Характер почвы меняется и в результате техногенного изменения факторов почвообразования (рельефа местности и микроклимата).

При рассмотрении влияния горнопромышленного комплекса на литосферу необходимо учитывать климатические и температурные особенности региона. Например, зачастую катастрофический характер принимают процессы, происходящие в криолитозоне, занимающей значительную (до 40 %) территорию нашей страны. В данных областях наличие и характер распространения мерзлых пород, а также их соотношение с тальми массивами определяют весь комплекс изменений, возникающих под влиянием техногенеза. В результате теплового воздействия в этих зонах идет интенсивная деградация мерзлых толщ. Так, в г. Воркуте за период существования города мерзлая толща потеряла 25 % своих первоначальных запасов холода. В итоге в некоторых городских кварталах и промплощадках шахт верхняя часть многолетнемерзлых пород опустилась, что вызвало деформацию и выход из строя более 60 % всех построенных до 1977 г. зданий и сооружений.

Отдельной серьезной проблемой, возникающей при функционировании горнодобывающего комплекса, являются техногенные *землетрясения* и *горные удары*. В настоящее время уже установлено существование четкой связи между масштабами горных работ (заскладированным на поверхности объемом пород добычи и переработки) и проявлениями горного давления в динамичной форме [14].

Количество горных ударов, зафиксированных с 1970 г. на горных предприятиях, составляет более 400. Только за период 1978—1990 гг. на рудниках ПО «Апатит» произошло свыше 20 горных ударов (из них 16 — на Кировском руднике). Сила удара, который классифицирован специалистами как техногенное землетрясение, зафиксированное на Кировском руднике 16 апреля 1989 г., достигала 5,5—6 баллов. Это землетрясение, записанное всеми сейсмическими станциями Скандинавских стран и европейской части СНГ, вызвало нарушения целостности зданий в г. Кировске и пос. Кукисвумчорр.

На самом руднике во всех выработках, пересекаемых тектоническим нарушением, произошли выбросы породы, разрушение крепи, деформация рельсовых путей и кран-балки, деформирование и смещение проводников, а также направляющих главного ствола и лифтового восстающего. Были

разрушены бетонные фундаменты тяжелого горного оборудования.

Другим примером может служить горно-тектонический удар, произошедший 5 января 1995 г. на Верхнекамском калийном месторождении, руднике № 2 АО «Сильвинит», спровоцированный землетрясением с эпицентром вблизи с. Чашкино Пермской области. Из-за тектонических воздействий, возникших в отработанных зонах шахтного поля, произошло разрушение междукамерных целиков и оседание земной поверхности на глубину 4,8 м, а также массовое обрушение более 3 млн. м³ горных пород на площади 600×500 м.

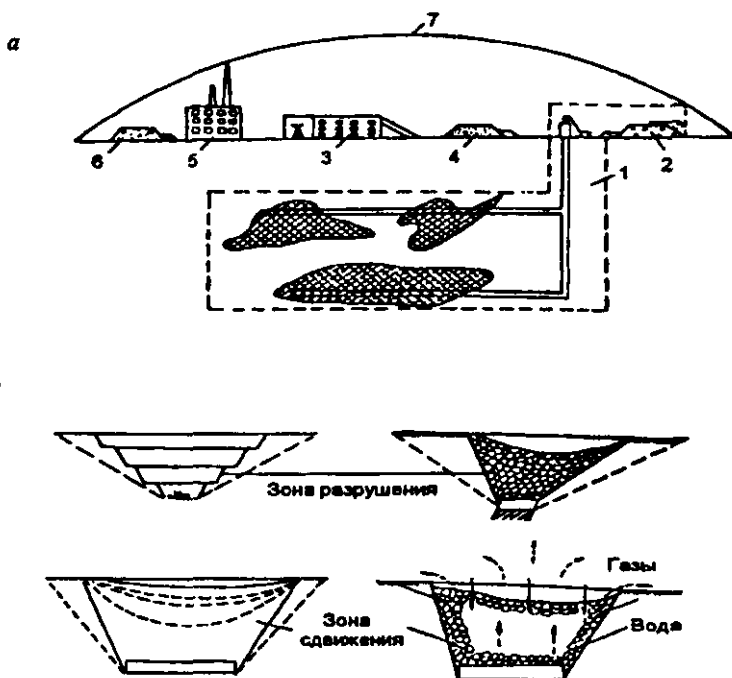


Рис. 5.1. Отрицательное влияние объектов добычи и переработки руд на земную поверхность:

а — комплекс объектов добычи и переработки: 1 — рудник, 2 — рудные отвалы, 3 — обогатительная фабрика, 4 — отвалы фабрики, 5 — металлургический завод, 6 — отвалы завода, 7 — зона влияния на окружающую среду; *б* — механизм разрушения биосферы открытыми и подземными работами

Сильные геодинамические события (которые можно отнести к техногенным землетрясениям), обусловленные освоением недр, в последние годы также отмечены и в Германии (на калийном месторождении Верра), Словакии (в Остраво-Карвинском угольном бассейне), а также в некоторых районах России (на северо- и южноуральских бокситовых рудниках, на железорудном Таштагольском месторождении в Горной Шории и др.). Известны также случаи мощных подвижек в верхней части земной коры, спровоцированные интенсивной эксплуатацией нефтяных и газовых месторождений.

Беспрецедентный масштаб извлекаемых минеральных ресурсов ведет к их быстрому истощению, накоплению на поверхности Земли, в атмосфере и гидросфере большого числа отходов, постепенной деградации природных ландшафтов, сокращению биоразнообразия, снижению природного потенциала территорий и их жизнеобеспечивающих функций.

Таким образом, в современных условиях все технологии добычи и переработки в той или иной степени разрушают литосферу (рис. 5.1) и сопровождаются физическим разрушением земель с изменениями гидрогеологических условий региона и его ландшафта, перемещением пород по вертикали и горизонтали, выносом на дневную поверхность растворенных в воде минералов и т. д.

5.3

Загрязнение и нарушение гидросферы горнопромышленным комплексом

Горная промышленность оказывает влияние на поверхностные и подземные воды, зачастую трансформируя последние в шахтные. Рудничные (шахтные) — это дренируемые горными выработками и откачиваемые на поверхность подземные (грунтовые, поровые, пластовые или трещиновые) воды, содержащие растворенные металлы, органические и химические соединения, а также минеральные взвеси. Только в том случае, когда водоприток из окружающего породного массива в горные выработки незначителен или вовсе отсутствует, рудничные воды представляют собой жидкие техно-

логические отходы горного производства (от бурения с промывкой, орошения, гидрозакладки, гидросмыва рудной мелочи и т. д.).

Средний рудник сбрасывает на рельеф около 1000 м³/ч сточных вод с высокой степенью минерализации. В водные объекты только Уральского региона ежегодно сбрасывается около 1 млн. м³ загрязненных стоков без очистки. В результате качество воды в р. Урал продолжает ухудшаться. Здесь отмечено загрязнение цинком до 75 ПДК, медью — до 43 ПДК, обнаружены хлорорганические пестициды (до 0,684 мкг/л). Максимальная концентрация меди в р. Бява достигает 1239, цинка — 490 ПДК.

В целом горные предприятия РФ по добыче черных и цветных металлов извлекают на поверхность более 1,3 млрд. м³ загрязненных сточных вод в год. Кроме солей в биосферу в виде минеральных взвесей выбрасываются тысячи тонн комплексных руд. Примером могут служить оловянные рудники Дальнего Востока РФ, образующие значительные техногенные ореолы рассеяния и нарушающие исходное природное геохимическое равновесие (загрязняющие грунтовые и подземные воды железом, медью, цинком, мышьяком, оловом и другими элементами). Отвальные воды этих предприятий содержат Cu, Fe и S в концентрациях, соизмеримых со средними их содержаниями в рудах, а концентрации Zn и Cd значительно превышают эти величины.

Горный комплекс является весьма водоемким. Ежегодно только в цветной металлургии РФ потребляется около 1200 млн. м³ пресной воды. Сточные же воды предприятий этой отрасли загрязнены минеральными веществами, флотореагентами, большинство которых токсичны (цианиды, ксантогенаты, нефтепродукты и др.), солями тяжелых металлов (медь, свинец, цинк, никель и т.д.), мышьяком, фтором, ртутью, сурьмой, сульфатами, хлоридами и т. д.

Например, вследствие функционирования АО «Норильский никель» в воде озера Кыллах-Кюэль вблизи отвалов рудника Комсомольский содержание меди, никеля и кобальта превышает ПДК соответственно в 1650, 3150 и 640 раз [8].

В результате горные разработки обостряют проблему нехватки пресной воды. Например, расход воды в зависимости от мощности обогатительной фабрики составляет от 100 до 1000 м³/ч. Потребление и загрязнение воды горнодобывающими предприятиями доходит до 10 м³ на 1 т добытого полезного ископаемого. За период с 1950 по 1990 г. расход воды в промышленности возрос в 3,5 раза. Для технологических целей расходуется дефицитная пресная вода. В то же время горные объекты выдают на поверхность сотни и тысячи кубических метров минерализованной воды, которая дренируется литосферой, влияя на геохимические процессы прилегающих участков биосферы.

Депрессионная воронка карьеров или рудников может оказывать влияние на территорию, в десятки раз превышающую площадь горного отвода. Количество вод, удаляемых из шахт и рудников, зависит от гидрогеологических условий месторождения и масштаба предприятия и может составлять 2—3 тыс. м³/сут и более.

Помимо рудничных вод в окружающую среду поступают загрязненные воды из отвалов и хвостохранилищ. Например, в настоящее время только на предприятиях КМА потери загрязненной воды на инфильтрацию из хвостохранилищ оцениваются в 6—8 тыс. м³.

Значительные объемы потребляют и сбрасывают в окружающую среду обогатительные фабрики (табл. 5.3), на которых образуются следующие виды производственных сточных вод:

- технологические хвосты (твердые и жидкие отходы непосредственно обогащения);
- сливы и фильтрат от сгущения и обезвоживания концентратов (жидкие отходы вспомогательных процессов обогащения);
- смывные стоки (от смыва полов и стен, после охлаждения масел, подшипников, компрессоров, гидрообеспыливания и др.);
- сточные воды после мокрой очистки отходящих дымовых газов в срубберах.

Таблица 5.3

Потребление и сброс сточных вод обогатительных фабрик, млн. м³/год

| Подотрасль | Водопотребление | | | | Сброс сточных вод |
|------------------------|-----------------|--------------|-----------|-----------|-------------------|
| | Всего | В том числе: | | | |
| | | свежее | оборотное | повторное | |
| Полиметаллическая | 137,8 | 60,0 | 19,3 | 58,5 | 94,3 |
| Вольфрамо-молибденовая | 106,9 | 69,7 | 21,2 | 16,0 | 70,9 |
| Медная | 362,1 | 52,6 | 233,0 | 76,5 | 43,3 |
| Никель-кобальтовая | 107,3 | 27,3 | 67,9 | 12,1 | 36,9 |
| Редкометалльная | 214,6 | 27,0 | 170,7 | 16,9 | 31,3 |
| Золотоизвлекающая | 45,7 | 22,4 | 17,1 | 6,2 | 13,1 |
| Сурьмяно-ртутная | 1,9 | 0,8 | 0,4 | 0,7 | 1,0 |
| Плавикошпатная | 16,8 | 2,6 | 12,1 | 2,1 | 1,3 |
| Оловянная | 62,7 | 3,7 | 54,7 | 4,3 | 1,0 |

В России со сточными водами горных предприятий за год сбрасывается до 17,8 Мт (по сухому остатку) растворенных веществ (табл. 5.4), в том числе: 8 Мт хлоридов, 5,4 Мт сульфатов и 0,126 Мт нитратов [14].

Нерастворимые, коллоидные и растворенные примеси шахтных вод бывают минеральными, органическими, бактериальными и биологическими. *Минеральные загрязнения* представлены песком, глинистыми частицами, частицами руды, растворами кислот, щелочей и другими веществами. *Органические загрязнения* являются остатками деревянной крепи, растений, других масс и веществ растительного происхождения. *Загрязнения животного происхождения* — это остатки животных тканей, продуктов разложения организмов и др. *Бактериальные и биологические загрязнения* свойственны хозяйственно-бытовым сточным водам и стокам подсобных сельскохозяйственных подразделений горных предприятий.

В России в 1996 г. загрязненные воды в объеме 625,6 млн. м³ сбрасывали 257 предприятий угольной отрасли. Хотя в этой отрасли функционируют около 400 очистных сооружений, предприятия сбрасывают в поверхностные водоемы в среднем около 81 % загрязненных и требующих очистки сточных вод (в основном это минерализованные, с высоким содержанием железа шахтные воды).

Таблица 5.4

Загрязненность вод обогатительных фабрик, мг/л

| Загрязняющие примеси | Вольфрамомолибденовые | Медные и сурьмяно-ртутные | Полиметаллические | Никель-кобальтовые |
|----------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------|--------------------|
| Сухой остаток | 2000—13 000 | 2600—3800 | 460—5400 | 360—2000 |
| Ионы кальция | 160—200 | 160—950 | 16—230 | 10—140 |
| Ионы магния | — | 26—60 | 5—30 | 8—40 |
| Ионы хлоридов | 140—740 | 200—4500 | 5—170 | 10—300 |
| Ионы сульфатов | 250—5900 | 400—4500 | 40—1500 | 20—400 |
| Ионы сульфидов | 0—1000 | 0—5 | — | — |
| Ионы меди | 0—50 | 0—0,2 | 0,3—10 | 0,02—1,8 |
| Ионы свинца | 0,4—17 | — | 0,2—0,8 | — |
| Ионы цинка | 0,3—1 | 0,09—10 | 0,3—1800 | — |
| Ионы никеля | — | — | — | 0,02—0,13 |
| Ионы железа | 0,3—1,4 | 0,2—0,3 | — | 0,07—13 |
| Цианиды и роданиды | 0—0,8 | — | 0—30 | 0—21 |
| Ксантогенаты | 0—0,04 | 0,5—24 | — | — |
| Мышьяк | 0,1—6 | 0—0,05 | 0—0,1 | — |
| Фенолы | 0,1—7 | 0—7 | — | — |
| Нефтепродукты | 0—33 | 0,03—5 | 0—9 | — |
| Сурьма | 0,1—25 | — | — | — |
| Молибден | 0—740 | — | — | — |

С ними в гидросеть поступает большое количество взвешенных веществ, сульфатов, хлоридов, нефтепродуктов, железа, меди, никеля, алюминия, кобальта, магния, марганца и др. Например, в сточных водах углеобогатительных фабрик Восточного Донбасса содержание растворимых солей составляет 1600—4000 мг/л, а их ионный состав (мг/л): K^+ , Na — 270—717, Ca^{2+} — 108—369, Mg^{2+} — 46—169, Cl — 215—444, SO_2 — 793—2376, HCO_3 — 110—292.

Наибольшие объемы сточных вод сбрасывают такие предприятия угольной отрасли России, как Киселевскуголь (Кемеровская обл.), шахта им. Ленина (Пермская обл.), шахта им. Ленина (Ростовская обл.), шахта им. Кирова (Кемеровская обл.).

Кроме этого *поверхностные природные воды* интенсивно загрязняются рудничными стоками, зачастую содержащими высокие концентрации урана (на Стрельцовском месторож-

дении в Забайкалье). Высокие концентрации свинца и кадмия зафиксированы в стоках сульфидных месторождений Западного Алтая: Николаевского (200 и 500 мкг/л Pb и Cd соответственно), Кольванского (30 и 170 000), Змеиногорского (40 и 200).

Таким образом, на состояние гидросферы оказывают существенное воздействие взрывные работы, эксплуатация рудных и нерудных карьеров, шахт и рудников (в том числе добыча песка, гравия из русел рек или на побережье морей), разрушение плодородного растительного слоя почвы, уничтожение растительности в пределах шахтных земельных отводов, прокладка дорог и коммуникаций, слив загрязнений с площадок и строительно-эксплуатационные процессы в различных стадиях освоения предприятий.

При выборе технологических схем и устройств для очистки вод горнопромышленного комплекса необходимо использовать принцип дифференциации, основным критерием которого служит *тип* добываемого полезного ископаемого. Например, производственные сточные воды **нефтепромыслов** состоят в основном (90—98 %) из высокоминерализованных пластовых вод, извлеченных на земную поверхность вместе с нефтью. Поэтому такие сточные воды (даже после их очистки от нефти и механических примесей) не могут сбрасываться в поверхностные водоемы, так как это приведет к их засолению, и подлежат обратной закачке в продуктивные горизонты, что и предусматривается технологической схемой разработки большинства нефтяных месторождений.

Очищенные шахтные и карьерные воды *цветной металлургии* прежде всего должны использоваться на производственные нужды самого предприятия (тушение отвалов, гидрозакладку, борьбу с пылью на поверхности шахт и карьеров, мокрое обогащение полезных ископаемых и т. п.).

На урановых горных предприятиях загрязнение поверхностных и подземных рудничных вод природными радионуклидами, а также другими тяжелыми токсичными металлами является следствием неуправляемого процесса их формирования. В связи с этим особого внимания заслуживает задача изоляции рудников от поступления подземных вод из гор-

ных массивов. Для этого, например, изолируют поверхностные водотоки и водосмы от горных выработок; в водонасыщенных породах осуществляют специальные методы проходки горных выработок (в основном стволов); применяют системы разработки, обеспечивающие сохранность налегающих пород (системы с закладкой выработанного пространства); сбрасываемые воды подают в гидрографическую сеть по лоткам и трубопроводам.

На урановых рудниках, где осушение вызывает не только понижение уровня вод, но и приводит (в результате изменения сложившегося гидрогеологического и геохимического режима) к повышенному окислению и выщелачиванию радиоактивных и токсичных металлов, управление процессом формирования рудничных вод должно прежде всего заключаться в установлении возможных путей поступления загрязнения и своевременном их перекрытии.

Такими профилактическими мерами могут быть:

- *защитный дренаж*, т.е. откачка поступающих к руднику загрязненных вод или вод, способных особенно интенсивно растворять уран, торий и другие радионуклиды;
- *защитный барраж*, т.е. закачка через скважины технической воды перед движущимся фронтом загрязненной;
- *химическое подавление* растворимости радионуклидов за счет использования специально приготовленной воды (с повышением рН снижается растворимость большинства радионуклидов);
- *раздельный сбор и откачка* загрязненных и чистых вод.

Специальные требования предъявляются и к водам горно-обогатительных комбинатов *черной металлургии*. Например, Лебединский ГОК является крупнейшим водопотребителем в регионе. Расход технической и технологической воды на производственные нужды только за 1994 г. составил 676,4 млн. м³ (в том числе оборотной воды — 668,3 млн. м³, или 98,8 %). Свежей воды из Старооскольского водохранилища было взято всего лишь 2,2 млн. м³. При осушении Лебединского месторождения ежегодно откачивается около 60 млн. м³ воды, которая используется в технологических процессах Лебединского ГОКа и на нужды рядом расположенного комби-

ната «КМАруда». Техническая и технологическая оборотная вода применяется непосредственно в технологии производства окатышей, концентратов и при разработке рыхлой вскрыши в карьере способом гидромеханизации. Свежая речная вода расходуется практически только на компенсацию испарения и фильтрационных потерь в хвостохранилище.

5.4

Загрязнение атмосферы горнопромышленным комплексом

Горная промышленность является существенным ускорителем процесса обмена газообразными продуктами техногенной деятельности и недрами планеты (табл. 5.5), так как в процессе добычи минерального сырья реализуются технологии, связанные с высвобождением огромных масс газов (как природных, так и техногенных). Например, только в угольных месторождениях России, Украины и Казахстана до глубины 1700 м содержится около 17 трлн. м³ метана (в том числе в Кузбассе — 13, Печоре — 1,9, Донбассе — 1,2 и Караганде — 0,5 трлн. м³). В результате при горнопромышленном освоении углеметановых месторождений происходит существенное загрязнение атмосферы метаном.

Ярким примером этого процесса является проветривание горных предприятий, выносящее на земную поверхность значительное количество газов, распространяемых атмосферными явлениями далее по планете. Значительное количество выбросов соединений углерода приходится на углеобогажительные фабрики (табл. 5.6). При этом по выбросам CO₂ на первом месте стоит сушильное отделение.

Самовозгорание терриконов угольных шахт (на предприятиях этой отрасли горят 58 породных отвалов) приводит к поступлению в атмосферу в течение суток в среднем свыше 10,8 кг CO, около 5—6 кг SO₂, 0,6 кг H₂S и NO_x с 1 м² поверхности. Всего в 1996 г. предприятиями угольной отрасли было выброшено в атмосферу 650,8 тыс. т вредных веществ (в том числе 377,9 тыс. т метана). Из всего количества выбросов около 50 % приходится на АО «Воркутауголь».

Таблица 5.5

Динамика выброса минеральных веществ в атмосферу РФ предприятиями различных отраслей промышленности, тыс. т/год

| Источник загрязнения | 1991 г. | 1992 г. | 1993 г. |
|--------------------------------|---------|---------|---------|
| Цветная металлургия | 2116 | 1975 | 3795 |
| Черная металлургия | 4036 | 3571 | 3227 |
| Нефтедобывающая промышленность | 2345 | 2137 | 1862 |
| Угольная промышленность | 236 | 269 | 384 |
| Российская Федерация (в целом) | 31 801 | 28 127 | 24 788 |

Таблица 5.6

Примерная масса выбросов в атмосферу от типовой углебогатительной фабрики средней мощности, т/год

| Производство | Пыль | CO ₂ | SO ₂ | NO + NO ₂ | H ₂ S | Σ |
|-----------------------|-------|-----------------|-----------------|----------------------|------------------|--------|
| Котельная | 15,6 | 67,5 | 96,3 | 2,6 | — | 182,0 |
| Аспирационная система | 86,4 | — | — | — | — | 86,4 |
| Сушильное отделение | 800,7 | 450,0 | 577,8 | 17,2 | — | 1845,7 |
| Породный отвал | — | 137,0 | 13,4 | 1,4 | 6,9 | 158,7 |
| Итого | 902,7 | 654,5 | 687,5 | 21,2 | 6,9 | 2272,8 |

Выброс различных газов из шахт и рудников — источник изменений, происходящих в атмосфере. Под действием выбросов меняются:

- баланс углекислого газа (угрожающий необратимыми изменениями климата планеты);
- соотношение газовой, жидкой и твердой фаз (определяющее общее состояние биосферы);
- озоновый слой (разрушение которого приводит к отрицательному воздействию солнечной радиации на живой организм);
- активация температурной инверсии (препятствующая циркуляции воздушных масс).

На территории РФ в атмосферном воздухе допускается следующее количество химических веществ, мкг/л [47]: NO₂ — 0,9—18; SO₂ — 0,05—4; SO₃ — 0,05—4; H₂S — 0,02—1,0; Pb — 2—40; As — 1,1—2,2; Cd — 0,2—0,3; Hg — 5—15.

Одним из интенсивных источников загрязнения атмосферы периодического действия является *массовый взрыв* на карьерах. Количество выбрасываемых при этом в атмосферу пыли и газа зависит от объема взрывааемых пород, количества взрывчатых веществ, а также типа последних и некоторых геологических и технологических характеристик. При массовых взрывах образуется пылегазовое облако объемом 15—20 млн. м³. Высота подъема выбросов достигает 1500—1600 м. Распространяется пылегазовое облако на значительные расстояния: при массовых взрывах на карьерах ПО «Кривбас-сруда» концентрация пыли в воздухе на расстоянии 1,0—1,5 км в течение часа составляет 6—10 мг/м³. Из такого облака в радиусе 2—4 км рассеивается от 200 до 500 т мелкодисперсной пыли, содержащей 93—99 % частиц размером менее 5 мкм [27]. Интенсивность выпадения пыли достигает фоновых величин только на расстоянии 3—10 км от карьеров. Техногенный выброс пылей, содержащих соединения металлов, в десятки раз превышает выбросы природных источников (вулканы, лесные пожары, переносимые ветром пыли и т.п.).

Таблица 5.7

Источники эмиссии метана в атмосферу

| Источник | Доля, млн. т |
|---|--------------|
| Животные | 115 |
| Фекальные воды | 20 |
| Рисовые поля | 110 |
| Свалки | 30 |
| Гниение биомассы | 55 |
| Болота и тундры | 115 |
| Термиты | 40 |
| Океан и пресноводные бассейны | 15 |
| Системы добычи и транспортировки газа и нефти | 45 |
| Добыча угля | 30—50 |
| Всего | ≈ 540 |

Горные предприятия существенно загрязняют атмосферу и газами (табл. 5.7). Например, добыча угля сопровождается выделением свыше 30 млрд. м³ метана и свыше 20 млрд. м³ углекислого газа. В процессе добычи угля только на шахтах СНГ выделяется в год до 15 млрд. м³ метана, по шахтам России — около 7,5 млрд. м³ (в том числе 0,7—0,8 млрд. м³ —

шахтными дегазационными системами с концентрацией метана 10—60 %, 6—7 млрд. м³ — вентиляционными системами шахт при концентрации 0,1—1 ‰). В результате содержание метана в атмосфере увеличивается на 1% в год, что создает дисбаланс между объемами его выделения и разрушения. С экологической точки зрения большую тревогу также вызывают и такие *газовые отходы* технологического производства, как сернистый газ и другие соединения серы, оксиды углерода и азота, составляющие в сумме свыше 1 млрд. т в год.

Наибольшее количество загрязняющих веществ в атмосферный воздух выбрасывают следующие горные предприятия: концерн «Норильский никель» (г. Норильск, Красноярский край), АО «Комбинат «Южуралникель» (г. Орск, Оренбургская обл.), комбинат «Печенганикель» (г. Никель, Мурманская обл.), комбинат «Североникель» (г. Мончегорск, Мурманская обл.), АО «Красноярский алюминиевый завод» (г. Красноярск), АО «Ачинский глиноземный комбинат» (г. Ачинск, Красноярский край).

Среди предприятий *цветной металлургии* основную нагрузку на атмосферу (по объему выброса) оказывает концерн «Норильский никель», выбросы которого составляют 10 % валового выброса загрязняющих веществ в атмосферу всей промышленности Российской Федерации. По количеству и составу газовых выбросов в Норильском районе в порядке убывания экологической опасности предприятия можно расположить в следующий ряд: никелевые заводы — медные заводы — хвостохранилища — склады пирротиновых концентратов — металлургический цех — аглофабрика.

Особенностью районов расположения предприятий этого концерна является легкая экологическая уязвимость природной среды, ассимилирующая способность которой в связи с неблагоприятными физико-географическими и природно-климатическими условиями в несколько раз ниже, чем в средних широтах. На Кольском полуострове, где имеется существенная концентрация горных производств, активная поверхность хвостохранилища АНОФ-2 составляет 100 га. Пыление рабочих пляжей любых хвостохранилищ может начаться через 7 суток после прекращения орошения (табл. 5.8).

Таблица 5.8

Запыленность воздуха над Фнагдошским хвостохранилищем

| Место отбора проб воздуха | Запыленность воздуха, мг/м ³ | |
|---|---|---------------------|
| | до рекультивации | после рекультивации |
| Юго-восточный борт в 150 м в направлении с. Дзуарикау | 10 | 0,45 |
| Южный борт в 60—80 м | 5,6 | 0,35 |
| Северо-восточный борт в 10—15 м | 6,4 | 0,40 |
| Южный борт в 15—20 м от автотрассы | 5,2 | 0,35 |

Запыленность воздушного бассейна в районе деятельности горных предприятий зависит от многих факторов и составляет (мг/м³): на рудниках Кривого Рога — 0,3—1,2; Урала — 0,3—2,1; Джезказгана — 1—2,5; Зырянском — 0,9—3; «Молибден» — 0,9; Квайсинском — 1; Иультинском — 1,3; рудниках Балхашского ГМК — 1,5—2,9; Садонском и Ардонском — 1,3—2; «Ингулец» — 1,5—3 (причем ПДК составляет всего 0,5).

Таким образом, выбросы пыли часто представляют наибольшую опасность и приводят к превышению ПДК в воздухе наиболее токсичных элементов 1-й группы опасности — Pb, Hg и Cd (табл. 5.9). Поэтому в атмосфере необходимо различать агрегатное состояние вредных веществ, которые могут находиться в воздухе в виде пыли, газов, паров, аэрозолей, а также в виде смеси паров и аэрозолей. Агрегатное состояние минеральных веществ в атмосфере обуславливает характер их неблагоприятного воздействия на биосферу.

Таблица 5.9

Кларки концентрации химических элементов в пыли молибден-вольфрамового ГОКа

| Источник пыли | > 1000 | 1000—10 | 100—10 |
|---|--------------------|----------------|-------------------|
| Карьер | Bi | As, Sb, Mo, Sn | W, Pb, Zn, Cu, Ag |
| Шахта | Bi, Sb | W, Mo, As | Sn, Ag, Pb |
| Дробилка | Bi, Sb | W, Mo, Pb, As | Sn, Ag, Cu |
| Участок погрузки редкометалльных концентратов | Bi, Sb, As | W, Mo, Pb | Ag, Zn, Sn, Cu |
| Участок погрузки сульфидных концентратов | Bi, As, Cd, Ag, Sb | W, Mo, Pb | Cu, Zn |

По способу образования пыль поступает в воздух в результате дезинтеграции (механического разрушения породы и руды, бурения, взрывания, дробления, сухого измельчения, сухой транспортировки и перегаривания горнорудных материалов). Возможен процесс образования пыли как дисперсной конденсации, возникающей при возгонке материалов (обжиге руд и т. д.). *Источниками выброса пыли в атмосферу* являются также поверхностная эрозия, испарение шахтных вод, вторичное дробление, транспорт, вынос пыли на спецодежде и т. д.

По происхождению различают следующие виды пыли:

- органические (растительные, животные, микроорганизмы);
- неорганические (минеральные и металлические);
- смешанные.

В процессе проветривания рудников в атмосферу попадают взвешенные фракции пыли размером менее 2 мкм, доля которых достигает 50 %. На 1 м³ добытой руды приходится 0,2 кг пыли и до 40 л условной окиси углерода.

Обычно на горных предприятиях дробление, классификацию, упаковку и транспортировку минералов осуществляют на земной поверхности с запылением атмосферы. Например, в цементной и известковой промышленности загрязнителями среды являются цехи обжига и помольный [1]. В цехе подготовки сырья пылят дробилки и сушильные барабаны. Газы сушильных барабанов содержат 15—40 г/м³ пыли, а аспирационный воздух сырьевых мельниц — 40—50 г/м³. В цехе обжига пыль образуется в сушильных барабанах и цементных печах. В первом случае газы содержат 9—150 г/м³ пыли, во втором — 10—20 г/м³. В аспирационном воздухе цементных мельниц содержание пыли достигает 120 г/м³, а в составе уноса готового цемента — 6 %. До 10 % цемента теряется при перевозке продукта в автосамосвалах открытого типа. Еще 5—10 % теряется при перегрузке цемента в расходные емкости на складах.

Особую опасность представляет асбестонозная пыль, вызывающая специфическую реакцию организма. Распространенным источником загрязнения атмосферы являются цехи

переработки геоматериалов в процессе приготовления асфальта, керамзитового гравия и пирита.

К специфическим факторам, оказывающим вредное воздействие на биосферу при разработке *урановых месторождений*, относят:

- ионизирующее излучение, источником которого являются радиоактивные элементы, находящиеся в рудах и породах, обнаженных горными выработками;
- радиоактивный газ радон, содержащийся в атмосфере горных выработок, и дочерние продукты его распада;
- радиоактивные минералы семейства урана, содержащиеся в виде пыли и аэрозолей в рудничной атмосфере.

Основным источником радиоактивной опасности в урановых рудниках является радон и продукты его распада. Все остальные факторы (в том числе γ - и β -излучение в горных выработках, а также содержащиеся в рудничном воздухе долгоживущие радиоактивные аэрозоли, уран, радий и т. п.) имеют второстепенное значение.

Выделение радона из руд и пород в атмосферу урановых рудников и карьеров определяется размерами эманулирующих поверхностей, возрастом месторождения, содержанием урана и коэффициентом радиоактивного равновесия, трещиноватостью, структурой и плотностью горных пород, их температурой, влажностью и т. д.

Радон поступает в рудничную атмосферу в основном с поверхности обнаженных рудных тел и вмещающих пород, кусков отбитой и транспортируемой руды, различных каналов (аэродинамически связанных с действующими горными выработками), а также из рудничных вод. В небольшом количестве он выделяется из витающей пыли и аэрозолей.

Обычно загрязнение воздуха радоном и продуктами его распада вблизи ГМЗ не превышает ПДК. Основную долю радиоактивного загрязнения территории этих заводов и прилегающих территорий вносят аэрозоли. Но их концентрации слишком малы и не представляют опасности для биосферы.

Существенную роль играют отходы уранового производства. Из-за пыления пляжей хвостохранилищ наблюдается радиоактивное загрязнение окружающей среды короткожи-

вущими продуктами распада радона-222. Наибольшую опасность представляют рудные склады, отвалы забалансовых руд и металлосодержащих пород, где радон и аэрозоли разбавляются массами воздуха. Зоны загрязнения промплощадок, в пределах которых загрязненность атмосферы превышает фоновую, достигают 500—600 м.

Территория, прилегающая к промплощадке, загрязняется при эксплуатации складов и транспортировке руд. Количественно уровень загрязненности составляет $(18,5—25)10^{-2}$ Бк/л на расстоянии 100—150 м с наветренной стороны и $(3,1—11,1)10^{-2}$ Бк/л — на расстоянии 200—250 м с подветренной. Влияние хвостохранилищ переработки руд на окружающую среду соизмеримо с выбросами АЭС и намного превышает влияние урановых рудников.

Таким образом, при разработке урановых месторождений атмосфера загрязняется пылеобразными и газообразными отходами, содержащими радиоактивные изотопы U^{238} , U^{235} , Th^{232} . Источником загрязнения являются *промплощадки* рудников и *зоны обрушения* пород с выходом на земную поверхность. Уровень загрязнения атмосферы радоном и аэрозолями зависит от количества и дебита источников, характеристики выброса вентиляционных струй и т.д.

Предприятия нефтяной и газовой отрасли выбрасывают в атмосферу значительные количества углеводородов и их производных (48 % от суммарного выброса в атмосферу), сероводорода, оксидов серы, углерода (33 %) и азота, токсичных и дурнопахнущих газов и пыли (20 %). В России ежегодно этой отрасли выбрасывается в атмосферу вредных веществ около 1650 тыс. т. Основная доля выбросов (98 %) приходится на жидкие и газообразные вещества. Отрасль неудовлетворительно используется и попутный газ, извлекаемый при добыче нефти. Ежегодно теряется или бесполезно сжигается в факелах около 7,1 млрд. м³ нефтяного газа (примерно 20 % извлекаемого газа). Основная часть этих потерь приходится на месторождения Западной Сибири.

Дополнительный ущерб атмосфере наносят аварии на буровых установках и платформах, а также на магистральных газо- и нефтепроводах. Например, прорыв нефтепрово-

да в Новокуйбышевске в 1993 г. привел к значительному загрязнению воздуха (более 30 ПДК этилбензолом).

План лекции

1. Дать общие сведения о преобразовании биосферы горной промышленностью, основанные на таких ее особенностях, как постоянно возрастающие объемы, территориальная концентрация производства, многоотходность.

2. Раскрыть пути и последствия загрязнения литосферы (прежде всего почв и недр) горной промышленностью.

3. Описать условия и последствия нарушения гидросферы горными предприятиями.

4. Показать загрязнение атмосферы горнопромышленным комплексом.

Контрольные вопросы-задания

1. Каким образом добыча полезных ископаемых изменяет природное равновесие в биосфере?

2. Что лежит в основе отрицательного влияния горных технологий на биосферу?

3. Какие необратимые изменения в биосфере вызывает деятельность горных предприятий?

4. Чем сопровождается добыча минерального сырья?

5. Какая часть биосферы наиболее уязвима при ведении горных работ?

6. Объясните механизм разрушения почв на территориях, прилегающих к горным предприятиям.

7. Раскройте механизм негативных влияний горных предприятий, расположенных в криолитозоне.

8. Какие существуют примеси в шахтных водах?

9. Как горные работы разрушают атмосферу?

10. На каком расстоянии нивелируется влияние горных предприятий на атмосферу?

11. От чего зависит уровень загрязнения атмосферы радоном на урановых рудниках?

12. Чем определяются технологические решения по охране биосферы от воздействия горных предприятий?

Глава 6

Общие закономерности миграции элементов во внешних оболочках Земли

6.1. Общие сведения о миграции элементов •

6.2. Механическая миграция элементов •

6.3. Физико-химическая миграция •

6.4. Биогенная миграция •

6.5. Техногенная миграция •

6.6. Биогeoхимический круговорот атомов •

План лекции •

**Контрольные вопросы-
задания**

Живое вещество всегда в течение всего геологического времени было и остается неразрывной закономерной составной частью биосферы, источником энергии, ею захватываемой из солнечных излучений, — веществом, находившимся в активном состоянии, имеющим основное влияние на ход и направленность геохимических процессов химических элементов во всей земной коре.

В.И. Вернадский

6.1

Общие сведения о миграции элементов

Миграция химических элементов — это процесс их перераспределения в пространстве от исходных содержаний и форм нахождения. Здесь нужно выделять процессы, приводящие к концентрированию или рассеиванию элементов.

По условиям миграции в биосфере все химические элементы подразделяются в соответствии со средой (воздушная и водная) и формой их нахождения, а также интенсивностью и контрастностью передвижения, способностью к концентрированию на геохимических барьерах или перемещению, например, в природных водах в виде катионов или анионов. В общем случае в биосфере целесообразно выделять 4 типа миграции химических элементов: механическую, физико-химическую, биогенную и техногенную. Естественно, их характеристики значительно различаются на континентах и в океанических областях.

Также очевидно, что даже в пределах суши условия миграции химических элементов в различных областях, например в тундровых, гумидных, таежных, степных или пустынных ландшафтах, существенно различны.

Закономерности миграции химических элементов на границе литосферы, гидросферы, атмосферы и в биосфере в целом определяются как свойствами самих химических элементов (строением ядра атомов и электронных оболочек, обуславливающим летучесть, растворимость, взаимодействие с другими веществами, а также приводящим к осаждению из растворов и расплавов), так и параметрами внешней среды (ее составом, T , P , рН, Eh и др.).

Химические элементы, ионы и их соединения, определяющие условия всеобщего поведения в биосфере, называются *ведущими*. Для гидротермальных систем ими являются S, SiO₂, F, Cl, CO₂, H⁺, OH⁻; для океанической воды — O₂, Cl⁻, Na; для вод таежных болот — Fe²⁺, H⁺, Mn²⁺ и др.; в рассолах — Na, Cl, F и т.д.

Главными параметрами водных систем, определяющими миграцию и осаждение элементов, являются Eh и рН. Обычный путь миграции элементов в водной среде (от источника до мест осаждения), как правило, заканчивается на *геохимических барьерах*, где на коротком расстоянии в результате резкого изменения параметров окружающей среды происходит их концентрация (табл. 6.1).

Наглядным примером природных геохимических барьеров служат дельты рек, впадающих в океаны, где смешиваются речные (пресные) и океанические (соленые) воды. Особенно интенсивное осаждение элементов (до десятков тонн в сутки Al₂O₃ и Fe₂O₃) происходит при впадении р. Зеленой вулкана Эбеко (остров Парамушир Курильской островной гряды) в океан. Под влиянием вулканических фумарол воды этой реки характеризуются крайне низким значением рН и на топографических картах обозначены как сернокислотные. При их попадании в океаническую щелочную среду происходит концентрация многих элементов.

Таблица 6.1

Типы концентрации элементов на геохимических барьерах биосферы из кислородных вод [29]

| Геохимический барьер | Сильнокислый, pH < 3,0 | Кислый и слабокислый, pH = 3 - 6,5 | Нейтральный и слабощелочной, pH = 6,5 - 8,5 | Сильно щелочной (содовый), pH > 8,5 |
|--------------------------------------|---|--|--|--|
| КИСЛОРОДНЫЙ А | A1 Fe | A2 Fe, Mn, Co | A3 Fe, Mn, Co | A4 Mn |
| СУЛЬФИДНЫЙ сероводородный и др. В | B1 Tl, Pb, Cd, Bi, Sn | B2 Tl, Fe, Co, Ni, Pb, Cu, Zn, Cd, Hg, U | B3 Tl, Cr, Mo, U, Se, Re, V | B4 Cu, Ag, Zn, Cr, Mo, U, V, As |
| ГЛЕБВЫЙ С | C1 Cu, U, Mo | C2 Cu, U, Mo | C3 Cu, Cr, U, Mo, Re, Se, V | C4 Cu, Ag, Cr, Mo, U, Re, Se, V, As |
| ЩЕЛОЧНОЙ D | D1 Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Pb, Cd, Hg, Be, Al, Ga, Y, TR, Cr, P, As, U | D2 Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, Be, U | D3 — | D4 — |
| КИСЛЫЙ E | E1 — | E2 — | E3 Si, Mo | E4 Cu, Zn |
| ИСПАРИТЕЛЬНЫЙ F | F1 Na, K, Rb, Tl, Cl, Mg, S, Ca, Sr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Al, Mo, U | F2 — | F3 Li, Na, K, Rb, Tl, N, B, F, Cl, Br, I, Mg, Ca, S, Zn, Mo, U, V, Se | F4 Li, Na, K, Rb, Tl, N, B, F, Cl, Br, I, Cu, Zn, Mo, U, Se |
| СОРЕЦИОННЫЙ G | G1 Al, Sc, Ga, Si, Ge, P, V, As | G2 Si, Ba, Zn, F, Cd, S, Ni, Co, Pb, Cu, U, P, Cl, Br, P, V, Mo, As | G3 Li, Na, K, Rb, Cs, Tl, Zn, Cl, Br, I, B, F, S, P, V, Mo, As | G4 Al, Sc, Ga, Si, Ge, P, V, As |
| ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ H | H1 — | H2 Mg, Ca, Ba, Mn, Zn, Pb, Co, Ni | H3 Li, Mg, Ca, Sr, Ba, Zn, Pb | H4 Zn, Cu, U |
| ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ N | Анионы и катионы металлов | | | |
| РАДИАЦИОННО-ХИМИЧЕСКИЙ R | Анионы и катионы химических элементов | | | |

В 1988 г. массовый смыв фосфатных удобрений с полей Южной Скандинавии в Северное море привел к интенсивному развитию сине-зеленых водорослей, что можно рассматривать как осаждение фосфора на биогеохимическом барьере. К природным геохимическим барьерам относятся также и краевые зоны болот (мезобарьеры).

Геохимические барьеры подразделяются:

- по отношению к элементам — комплексные и простые;
- по расположению — латеральные и радиальные;
- по динамике — подвижные и стационарные;
- по характеру массопереноса — диффузионные и инфльтрационные.

Среди природных барьеров (искусственные аналоги которых называются техногенными) выделяются следующие классы:

- механические (обычно формируются на участках резкого уменьшения интенсивности механической миграции);
- физико-химические (образуются при контрастном изменении параметров среды — m , T , P , E_h , pH);
- электрохимические (возникают при функционировании электромагнитного поля);
- радиационно-химические (образуются при распаде радионуклидов);
- биогеохимические (появляются при ведущей роли биогеохимических механизмов концентрирования элементов).

Кислородный геохимический барьер возникает в местах изменения геохимической обстановки с восстановительной на окислительную, т.е. когда растворы, содержащие химические вещества (соединения) в восстановительной форме, соприкасаются с кислородсодержащими водами (элементами).

Окислительный железный (марганцевый, медный, ванадиевый) геохимический барьер формируется в местах изменения геохимической обстановки с глессовой перед барьером на окислительную после него, когда миграционные воды с растворенными соединениями встречаются с сульфатом окиси железа (марганца, меди, ванадия).

Окислительный серный геохимический барьер возникает при изменении геохимической обстановки с сероводородной перед барьером на окислительную, когда миграционные сероводородные воды встречаются с кислородсодержащими водами (элементами). На окислительном серном барьере осуществляется осаждение серы.

Восстановительный сероводородный геохимический барьер образуется при изменении геохимической обстановки с окислительной или глеевой перед барьером на восстановительную (сероводородную) после него, т.е. когда кислородсодержащие воды с растворенными в них химическими соединениями, мигрируя, встречают сероводород. В зоне действия этого барьера происходит осаждение солей многих металлов и образование природных или техногенных сульфидных руд [48—50, 53, 54].

Восстановительный глеевый геохимический барьер характеризуется изменением геохимической обстановки с окислительной перед барьером на глеевую после него.

Сульфатный геохимический барьер образуется в местах изменения геохимической обстановки с карбонатной или хлоридной перед барьером на сульфатную и характеризуется осаждением солей Ba, Sr, Ca.

Карбонатный геохимический барьер возникает при смене геохимической обстановки с хлоридной, сульфатной или гидрокарбонатной перед барьером на обстановку с насыщенными CO_3^{2-} водами; при этом происходит осаждение солей Ca, Fe, Ba, Sr.

Щелочной геохимический барьер характеризуется изменением геохимической обстановки с нейтральной, кислой или щелочной перед барьером на более щелочную после него.

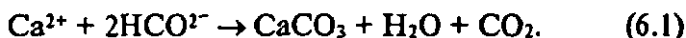
Кислый геохимический барьер возникает в местах изменения геохимической обстановки с нейтральной, кислой или щелочной перед барьером на более кислую.

Испарительный геохимический барьер характеризуется наличием сильноминерализованных вод перед барьером и более минерализованных — после него, когда миграционные воды, поступая в замкнутый объем, испаряются.

Адсорбционный геохимический барьер характеризуется малоактивными водами до и после барьера, а также наличием сорбента; в зоне его действия осаждаются R^+ , R^{2+} , P, S, V, Cr, Zn, Ni, Cd, U, As, Mo, Mg, Re, Am, Pt, Ag, Y.

Гидродинамический геохимический барьер возникает там, где изменяется геохимическая обстановка с энергичной миграцией (перед барьером) на спокойную миграцию (после него) и характеризуется осаждением Pt, Fe, Ta, Zn, Cr, Ni, Th, Tl, Sn, Pb, Au, Rn, Ir, W, Ag.

Температурный геохимический барьер образуется в области резкого изменения температур. **Термодинамические барьеры** широко распространены в гидротермальных системах при резком изменении T и (или) P . Например, при резком падении давления CO_2 осаждается кальцит:



Электромагнитный геохимический барьер возникает в местах изменения знака электрического потенциала. **Радиационно-химический барьер** появляется под воздействием радиоактивного излучения нестабильных элементов. Изменение параметров системы поперек геохимических барьеров называется их *градиентом*, а отношение концентраций элементов на входе и выходе — *контрастностью*.

6.2

Механическая миграция элементов

Механическая миграция элементов происходит в твердом виде, как правило, под действием гравитационных (механических) сил. Элементы в различном состоянии (атомы, ионы, кластеры, минералы, растворы, расплавы или породы) перемещаются при движении пластичной мантии Земли, ее конвекции, движении магмы (что особенно наглядно проявляется при вулканических извержениях), перемещении воды континентов (в реках или озерах) и океанов, протрузиях твердых пород, перемещении в воздухе пылевых частиц и суспензий. Поэтому необходимо подразделять механическую

миграцию элементов по средам — твердой, водной и воздушной.

В результате имеющихся тектонических подвижек и эрозии породы, образовавшиеся на глубине, попадают в поверхностную оболочку биосферы, где составляющие их элементы и соединения перераспределяются агентами выветривания. Важный механизм подобной миграции — *круговорот воды* (рис. 6.1, табл. 6.2). Его до известной степени можно сравнить с биогеохимическим круговоротом (разд. 6.6), так как внешним источником энергии в обоих случаях служит излучение Солнца.

Круговорот воды — главный агент механической работы, а биогеохимический круговорот — химической. Правда, вода тоже выполняет некоторую химическую работу (растворение, выветривание и т.д.), но она осуществляется при участии живого вещества: за счет организмов, находящихся в водах или продуктах их жизнедеятельности (CO_2 , гумуса и других химически активных веществ).

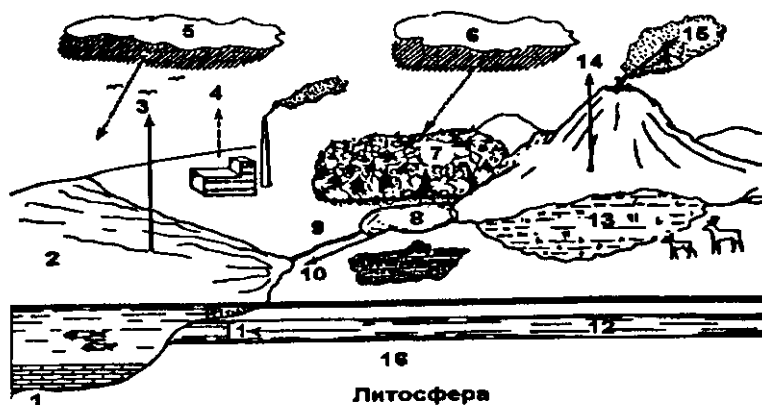


Рис. 6.1. Круговорот воды (мм) и количество воды в каждом резервуаре (км^3): 1 — донные осадки; 2 — океан — $1338 \cdot 10^6$ (96,5 % от мировых запасов); 3 — испарение с поверхности океана (1400); 4 — антропогенное усиление испарения; 5 — осадки над океаном (1270); 6 — осадки над сушей (800); 7 — вода в живом веществе — 1120 (0,0002 %); 8 — озеро — 76 400 (0,013 %), 9 — река — 2120 (0,002 %); 10 — поверхностный сток (300); 11 — сток подземных вод (15); 12 — подземные воды — $10,5 \cdot 10^6$ (0,76 %); 13 — болото — 11 470 (0,0008 %); 14 — испарение с поверхности суши (485); 15 — ювенильные воды (относительно исчезающе малая величина); 16 — гравитационные и капиллярные подземные воды (солёные) — $23,4 \cdot 10^6$ (1,7 %); 17 — водной пар — 12 900 (0,04 %)

На Земле существует следующий баланс воды (тыс. км³): приход (осадки) — 108,4; расход (испарение) — 71,1 и поверхностный сток — 37,3. Следовательно, испарение за год с поверхности океана слоя воды толщиной 113 см эквивалентно удалению за такое же время 405·10¹² м³ воды (или 0,03 % объема океана). Примерно такое же количество воды поступает в океан за счет осадков (90 %) и речного стока (10 %). В настоящее время уровень моря повышается со скоростью 0,2 см/год. Это соответствует возникшему дисбалансу в водном режиме планеты пока еще менее 0,2 %.

Таблица 6.2

Мировой водный баланс

| Показатели | Земной шар | Мировой океан | Суша |
|---------------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Площадь, млн. км ² | 510 | 361 | 149 |
| Осадки: мм м ³ | 1130 577·10 ¹² | 1270 458·10 ¹² | 800 199·10 ¹² |
| Испарение: мм м ³ | 1130 577·10 ¹² | 1400 505·10 ¹² | 485 72·10 ¹² |
| Сток в океан: мм м ³ | — — | 130 47·10 ¹² | 315 47·10 ¹² |

Круговорот воды характеризуется различными масштабами и скоростью (табл. 6.3). Это и водообмен «океан—океан», когда имеется сток воды из Тихого и Северного Ледовитого океанов в Атлантический и Индийский (табл. 6.4), и «океан—материк» (вода, испаряясь с поверхности океана, переносится ветрами на континенты и с речным стоком снова возвращается в океан), и гораздо меньшие круговороты ландшафта (обусловленные испарением воды в теплую погоду, что приводит к облачности и выпадению осадков).

Одной из крупных составных частей круговорота воды является *система океанических течений* (существенно влияющая на формирование климата Земли, а следовательно, и на ее биосферу), возникающая в результате поглощения коротковолнового излучения солнечной энергии в экваториальной области и длинноволнового излучения Земли в северных ши-

ротах. С этими течениями также связано и грандиозное перемещение химических элементов как в составе взвешенных частиц, так и в растворенном виде.

Поверхностные и грунтовые воды являются составной частью самоорганизующейся системы геохимического ландшафта, имеющей тесную связь с огромной массой воды в атмосфере, испарением воды на континентах и в океане, а также с поступающими из глубоких горизонтов литосферы термальными водами и рассолам

Таблица 6.3

Скорость водообмена между различными системами

| Водообмен | Период, лет |
|--|-----------------|
| Подземные льды | 10 000 |
| Полярные ледники и постоянный снежный покров | 9700 |
| Мировой океан (перемешивание) | 2500 (63) |
| Горные ледники | 1600 |
| Подземные воды | 1400 |
| Воды озер | 17 |
| Почвенная влага | 1 |
| Воды рек | 16 дней |
| Влага в атмосфере | 8 дней |
| Воды болот | 5 дней |
| Вода в организмах | Несколько часов |

Таблица 6.4

Водный баланс океанов

| Показатели | Океан | | | | |
|---------------------------|--------------------|-------|----------------|-----------------------|---------|
| | Атланти- ческий | Тихий | Индий- ский | Северный Ледовитый | Мировой |
| Осадки: | | | | | |
| см/год | 78 | 121 | 101 | 24 | 103 |
| 1000 км ³ /год | 74 | 214 | 76 | 2 | 367 |
| Испарение: | | | | | |
| см/год | 104 | 114 | 138 | 12 | 113 |
| 1000 км ³ /год | 99 | 202 | 103 | 1 | 405 |
| Речной сток, | | | | | |
| 1000 км ³ /год | 19 | 11 | 5 | 3 | 38 |
| Водообмен, | | | | | |
| 1000 км ³ /год | -6 | 23 | -22 | 5 | — |

Многие особенности механической водной миграции определяются *структурой воды*. Так, в породах различают связанную и пленочную воду. *Пленочная* (рыхлосвязанная по-

ровая) вода характеризуется разрушением водородных связей, уменьшением диэлектрической постоянной, повышением минерализации, резким уменьшением температуры замерзания.

Например, в опале часть поровой воды замерзает при $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$, часть — при $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и последние порции — почти при абсолютном нуле. Большое количество подземных вод являются поровыми: только в глинах ее масса составляет около $1,1 \cdot 10^{22}$ г.

Механическая миграция элементов в водной среде определяется прежде всего существованием поля силы тяжести. Гравитация обуславливает как течение воды рек и озер континентов, так и закономерности поведения взвешенных частиц пород и минералов, а также растворенных ионов и соединений элементов.

Предшествующие ей стадии (раздробление горных пород и минералов и механическая денудация) также происходят в гравитационном поле при воздействии температуры, воды и биогеохимических факторов. Диспергирование минералов ведет к резкому увеличению их растворимости, разложению, протеканию таких реакций, которые при других условиях были бы невозможны из-за соотношения свободных энергий реагирующих и образующихся веществ.

Годовой вынос взвешенных частиц в створе реки ($\text{т}/\text{км}^2$) характеризует интенсивность механического стока, зависящий от климата, геологического строения территории и рельефа. Он минимален в гумидных лесных равнинах, где преобладает вынос растворенных веществ, т.е. *химическая денудация*.

Соотношение среднегодовой мутности воды и ее минерализации коррелирует с соотношением механической и химической денудации. В современную эпоху механическая денудация преобладает над химической. В странах СНГ в среднем снижение высоты земной поверхности в год составляет 27 мкм, из которых только 38,5% приходится на химическую денудацию. В мире снижение поверхности суши имеет величину 90 мкм в год.

В бассейнах горных рек преобладает механическая, а равнинных рек — незначительно химическая денудация. Таким образом, наиболее существенными факторами в механической миграции элементов являются климат, рельеф и литология бассейнов рек. Кроме рек известны и другие случаи формирования ореолов механического рассеяния пород и элементов, например на склонах гор в виде осыпей.

Механическая миграция химических элементов может происходить и в воздушной среде. В атмосфере механический перенос вещества следует выделять по уровням:

- глобального масштаба — в стратосфере (15—60 км), в основном в связи с вулканическими извержениями;
- в тропосфере (8—12 км) с миграцией на сотни и тысячи километров;
- в нижних слоях атмосферы (до 8 км) с локальной миграцией на десятки и сотни километров из различных источников поступления песка, пыли или соли.

Так, природными источниками пыли могут быть легко развеваемые породы или солончаки (как в случае грандиозного «соляного шторма» в 1933 г. в США). В последнее время установлено, что естественное запыление атмосферы связано преимущественно с вулканической деятельностью. Например, при извержении вулкана Кракатау в 1883 г. в атмосферу было выброшено около 18 км^3 вещества, распределившись на площади $82,7 \text{ тыс. км}^2$. Извержение вулкана Толбачик на Камчатке вызвало временное прекращение авиационных рейсов над Тихим океаном (полеты стали небезопасными из-за возможного попадания вулканического пепла в двигатели самолетов).

Антропогенное уничтожение растительного покрова активизирует дефляцию, движение песков, образование пыльных бурь. В результате ветровой эрозии поражены огромные площади земель. Так, пыльные бури долгое время были настоящим бедствием для Китая. Однако после того как вдоль Великой китайской стены было высажено 500 миллионов деревьев, влияние пыльных бурь в значительной мере было нивелировано.

С золотой аккумуляцией связывают возникновение «известковой коры» Армении и Австралии, а также образова-

Размеры ионов возрастают с ростом порядкового номера элемента, расположенного в одном периоде (Li — 0,65, Na — 0,95, K — 1,33, Rb — 1,49, Cs — 1,63 Å), а в рядах — уменьшаются с ростом валентности (Na — 0,95, Mg²⁺ — 0,74, Al³⁺ — 0,57, Si⁴⁺ — 0,37 Å).

С атомными радиусами тесно связаны представления об *изоморфизме* — способности химических элементов (атомов, ионов, комплексов) замещать друг друга в пределах данного типа кристаллической решетки минералов. Различие радиусов ионов и атомов, изоморфно замещающих друг друга, не должно превышать 15 %. Однако существуют и исключения из этого правила: различия радиусов, замещающих друг друга: Si и Al равны 46 %, а Si и Ti — 64 %.

Катионогенность, или *анионогенность*, элементов зависит от соотношения валентности и ионного радиуса элементов (W/R_i), которое называют *ионным потенциалом*. С этим понятием также связана электроотрицательность элемента. Элементы с резко различной электроотрицательностью образуют ионную связь, с близкой — ковалентную.

В составе минералов существуют также и *свободные радикалы*, возникающие в земной коре под действием радиоактивности, ультрафиолетового излучения и других факторов, и значительно влияющие на их растворимость. Так, в минералах установлены свободные радикалы Ti³⁺, Zr³⁺, Hf³⁺, Mo⁵⁺, W⁵⁺, VO²⁺, CO³⁻, SO²⁻, SO³⁻, Ni⁺ и др. Они представляют собой заряженные дефекты атомной структуры минералов — электронно-дырочные центры.

Доминирующие по распространенности в водной среде ионы, такие, как H⁺ или OH⁻, диктуют поведение остальных химических элементов, определяя кислотный или щелочной характер водной среды. Поэтому их называют *ведущими*. Различные валентные состояния элемента характеризуются существенными различиями в его поведении, обуславливая способность к миграции или концентрированию.

Таким образом, поведение химических элементов определяется в основном тремя факторами: их химическими свойствами, типом геохимической обстановки и минераль-

ние гипса в суглинках Усть-Урта. Золотое происхождение приписывается многим лёссам и пескам пустынь.

Уничтожение лесов и растительного покрова в горных территориях также оживляет и склоновые геологические процессы. В горных районах Кавказа, Крыма, Карпат, Средней Азии, Казахстана и в других местах с этим связано развитие плоскостной и линейной эрозии, селей, оползней или осыпей.

6.3

Физико-химическая миграция

Физико-химическая миграция элементов обычно происходит после различных реакций преобразования вещества, например, в растворенном или газообразном виде. Так, значительное перераспределение элементов в условиях развития процессов выветривания связано с растворимостью соединений в воде. Легкорастворимые соединения мигрируют в гидросфере, находясь в форме истинных или коллоидных растворов.

Хотя физико-химическая миграция атомов и зависит от всего строения атома, но электронная структура при этом играет ведущую роль. Поэтому при изучении физико-химической миграции первоначально необходимо рассмотреть особенности химических элементов, определяющие этот процесс.

Потенциал ионизации элемента — величина энергии, необходимой для отрыва электрона от атома. Она сильно варьирует для различных элементов и их электронов: для газообразного H — 13,595 эВ, He — 24,581 эВ, для второго электрона He — 54,403 эВ и т.д. Отрыв каждого последующего электрона требует все возрастающих затрат энергии, что в условиях земной коры естественным путем может быть достигнуто в принципе.

Потенциал возбуждения — это важная геохимическая константа, определяемая как разность между последовательными потенциалами ионизации.

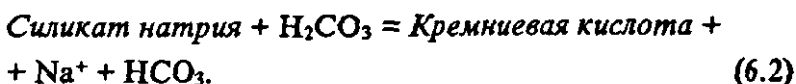
Ионные радиусы — геохимические параметры, рассчитанные исходя из принципа аддитивности: межатомные расстояния получены как сумма радиусов катионов и анионов.

ды миграции химических элементов. Например, в кислородной воде зоны гипергенеза:

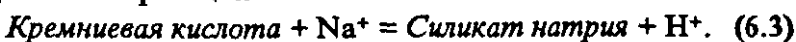
- очень сильная миграция ($10n-100n$) — S, Cl, B, Br;
- сильная миграция ($n-10n$) — Ca, Na, Mg, F, Sr, Zn, U, Mo, Se, Au;
- средняя интенсивность миграции ($0, n-n$) — Si, K, Mn, P, Ba, Rb, Ni, Cu, Li, Co, Cs, As, Tl, Ra;
- слабая и очень слабая миграция (менее $0, 0n$) — Al, Fe, Ti, Zr, Th и др.

Произведение растворимости является важной геохимической характеристикой поведения элементов и минералов. Оно является постоянной величиной при неизменных температуре и давлении. Использование справочных данных относительно величин свободных энергий при заданных P и T позволяет рассчитать направление реакций в природных условиях. В земной коре невозможны самопроизвольные реакции с увеличением изобарного потенциала, которые могут протекать только за счет поступления энергии извне.

Химическое выветривание на суше можно представить следующей реакцией:



Если бы не существовал механизм нейтрализации угольной кислоты, морские и океанические воды становились бы все более щелочными. Роль такого природного нейтрализатора выполняют ионы водорода, которые, будучи компонентом глинистых минералов, обособляются в профиле выветривания. Со временем они в составе речного стока поступают в океан и обеспечивают нейтрализацию его щелочных вод согласно реакции обмена:



Высвобождающийся ион H^+ объединяется с HCO_3^- , образуя H_2CO_3 , которая затем разлагается на воду и углекислый газ (поступающий в атмосферу).

Для водных систем существенную роль играет процесс *диффузии* — самопроизвольный и необратимый перенос вещества, приводящий к установлению равновесия концентра-

ным составом исходных (преобразуемых) пород. Различные минералы обладают различной податливостью к выветриванию.

Это во многом обеспечивает различный характер и интенсивность миграции элементов. Так, щелочные амфиболы выветриваются гораздо легче, чем альбит, поэтому натрий амфиболов обладает более высокой миграционной способностью, чем натрий альбита. Если уран входит в состав трудноразрушаемого циркона, то его миграционная способность незначительна, а если в состав легкоразрушаемых урановых черней, — высокая. Податливость минералов к выветриванию во многом зависит от климата: в сухих степях, например, кальцит, гипс и доломит устойчивы, а во влажном климате — нет.

Многое в миграции элементов определяется и общей геохимической обстановкой среды. Например, для *кислого глеевого класса коры выветривания* характерна кислая реакция среды, обеспечивающая вынос катионов и образование глинистых минералов (преимущественно гидрослюдистого типа). Здесь приобретают высокую миграционную способность железо и марганец, частично фосфор и некоторые редкие элементы. *Карбонатная глеевая кора выветривания* развивается в условиях нейтральной и слабощелочной восстановительной среды. Если миграция железа в этих условиях происходит на сравнительно небольшие расстояния и с малой интенсивностью, то марганец мигрирует весьма энергично.

Таким образом, общая тенденция формирования коры выветривания заключается в выносе наиболее подвижных элементов и относительном концентрировании наименее подвижных (Al, Fe, Ti). Часть химических элементов поступает в кору выветривания с атмосферными осадками. Это особенно относится к хлору и сере — *циклическим элементам*.

Для оценки интенсивности водной миграции химических элементов используется *коэффициент водной миграции (K_х)*, равный отношению содержания элемента в минеральном остатке H₂O к кларку земной коры или к кларку вмещающих пород [29]. По величине этого коэффициента выделяются ря-

ций в результате теплового движения металлов, ионов, молекул и коллоидных частиц.

Окислительно-восстановительные условия вод измеряются величиной E_h , что позволяет судить о миграционной способности элементов. В зоне гипергенеза в кислой среде E_h обычно ниже 0,4 В, в щелочной — ниже 0,15 В.

В биосфере выделяются два типа вод с восстановительной обстановкой — *сероводородные* с H_2S , HS , а местами — с S^{2+} (где осаждаются многие металлы в виде сульфидов) и *глеевые*. Главным критерием восстановительной обстановки служит наличие Fe^{2+} , CH_4 и других углеводородов, H_2 и отсутствие свободного кислорода. E_h обычно меньше нуля, до $-0,5$ и $-0,3$ (цвет вмещающих пород — черный, серый и зеленый). В этой обстановке мигрируют многие металлы, часто в составе металлоорганических комплексов.

Таким образом, условия миграции или концентрирования химических элементов являются функцией E_h и рН, давления, CO_2 , O_2 , H_2S и других компонентов, которые в сумме определяют их *поля устойчивости*.

В физико-химической миграции элементов важное значение имеет и *растворенное органическое вещество* (РОВ), образующееся в результате разложения растительных и животных остатков преимущественно в гумидном климате. Реки и озера этих регионов содержат до 100 г/л РОВ, включающих фульвокислоты, легко растворяющие радионуклиды и многие токсичные металлы из загрязненных естественных и техногенных объектов. В биосфере общее количество РОВ в 10 раз превышает запасы нефти, в 2,5 раза — запасы торфа и только в 2 раза меньше запасов каменного угля. В реках Амазонии РОВ составляют 70 % растворенных веществ, в ультрапресных водах горной тайги Якутии — 10—15%.

В зоне гипергенеза также огромную роль играют *коллоидное* и *метаколлоидное* состояния растворенного вещества. При этом поверхностная энергия коллоидных частиц превращается в энергию сорбции и в результате ионного обмена могут образовываться новые минералы. Для некоторых кри-

сталлических минеральных решеток (например, для цеолитов) также наиболее характерны процессы ионного обмена.

Вещества, поступившие в растворы при выветривании горных пород из атмосферы или космоса, при подводных извержениях и кристаллизации магматических расплавов, вместе с обломочным материалом постепенно переходят в осадки, дающие начало новым горным породам. Осадки отлагаются в открытых морских водоемах или озерах, а также выпадают из подземных вод. Наиболее интенсивное выпадение веществ в осадок происходит при смене геохимических условий. При диагенетических изменениях идет не только уплотнение, но и перераспределение веществ, в результате которого могут происходить как концентрация, так и рассеяние элементов.

Физико-химическая миграция элементов в *воздушной среде* может происходить во взвешенном (коллоиды) и в *газообразном состоянии*. Несмотря на незначительность массы атмосферы (0,00 п % от земной коры и 0,1 % от гидросферы), геохимическая роль миграции газов чрезвычайно велика. Недавно были получены данные о разрушении озонового слоя мантийными CH_4 и H_2 , выделяющимися из срединно-океанских хребтов. Приуроченность озоновой дыры к Антарктиде объясняется наличием в ее пределах вулканов и кольцом окружающих срединно-океанских хребтов.

6.4

Биогенная миграция

Согласно закону, установленному выдающимся отечественным исследователем А.И. Перельманом (1916—1998 гг.), миграция химических элементов в биосфере или осуществляется при непосредственном участии живого вещества (миграция первого рода), или же протекает в среде, геохимические особенности обстановки которой (концентрация O_2 , CO_2 , H_2S и др.) обусловлены преимущественно живым веществом, как нынешним, так и действовавшим на Земле в течение всей ее геологической истории (миграция второго рода).

Таблица 6.5

Соотношение оболочек, составляющих биосферу, с живым веществом

| Оболочка | Масса, г | Соотношение |
|----------------|----------------------|-------------|
| Живое вещество | $2,4 \cdot 10^{12}$ | 1 |
| Атмосфера | $5,15 \cdot 10^{15}$ | 21 461 |
| Гидросфера | $1,5 \cdot 10^{18}$ | 602 500 |
| Земная кора | $2,8 \cdot 10^{19}$ | 11 670 000 |

Геологический эффект деятельности отдельного живого элемента весьма незначителен. К тому же масса живого вещества по сравнению с массой земной коры ничтожна (табл. 6.5): если представить себе литосферу в виде глиняной чаши весом 4 кг, то вся гидросфера, помещающаяся в этой чаше, весила бы 350 г, вес атмосферы примерно был бы равен весу медной монеты, а вес живого вещества — весу почтовой марки.

Однако живые организмы действуют практически в течение бесконечно большого промежутка времени. В итоге мы получаем грандиозную по величине работу.

Биогенная миграция атомов может быть двух видов — химической и механической.

Первые живые организмы возникли около 3,8 млрд. лет тому назад в бескислородной атмосфере, после чего начался природный процесс — *фотосинтез*, приведший к формированию кислородной атмосферы. Благодаря этому процессу в атмосфере уменьшилось содержание углерода и выросло количество кислорода (в начале эволюции не весь кислород оставался в атмосфере, частично он вступал в химические реакции и окислял поверхностные минералы и горные породы). За миллиарды лет растения очистили атмосферу от CO_2 .

В настоящее время растения продуцируют кислород в количестве $3,7 \cdot 10^{11}$ т/год. Общее количество кислорода атмосферы составляет $1,18 \cdot 10^{15}$ т.

Образование массы живого вещества из неорганических соединений происходит главным образом в результате реакции фотосинтеза:



В процессе фотосинтеза растительность земного шара ежегодно образует более 100 млрд. т органического вещества.

Фотосинтез — это процесс, идущий с увеличением свободной энергии и прямо или косвенно обеспечивающий доступной химической энергией все земные организмы. Молекула, с помощью которой автотрофные организмы улавливают световую энергию, необходимую для фотосинтеза, представляет собой зеленый пигмент — *хлорофилл*. Хлорофилл поглощает световую энергию, сосредоточенную в видимом спектре с длиной волны от 0,4 до 0,69 мкм (голубой и красный цвета).

Кроме хлорофилла некоторые организмы (например, водоросль багрянки) содержат дополнительный фермент (*фикоэритрин*), способствующий фотосинтезу. Это дает им определенные преимущества в освоении жизненного пространства, особенно гидросферы. Дело заключается в том, что при проникновении солнечного света в воду в первую очередь происходит поглощение красной части спектра, затем — оранжевой, желтой и зеленой; глубже всего проникают синие и фиолетовые лучи. Хлорофилл неспособен их эффективно использовать, и растения, обладающие только этим пигментом, не встречаются на глубине более 100 м. Фикоэритрин синие лучи поглощает, и благодаря этому багрянки достигают глубины 180 м.

Однако при фотосинтезе не только выделяется кислород (сильный окислитель), но и возникают органические вещества (сильные восстановители). Биогенное вещество, образующееся после отмирания живых организмов, попадая на дно водоемов или в болотные почвы, разлагается, и в условиях недостатка кислорода возникает резко восстановительная среда.

В результате при разных типах брожения (рис. 6.2) из биогенного вещества создаются газы различного состава. Состав этих газов определяется также видовой принадлежностью сапротрофов и структурой исходных продуктов. Так, при разложении органики в анаэробных условиях образуются водород, аммиак, органические кислоты и анионы SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- .

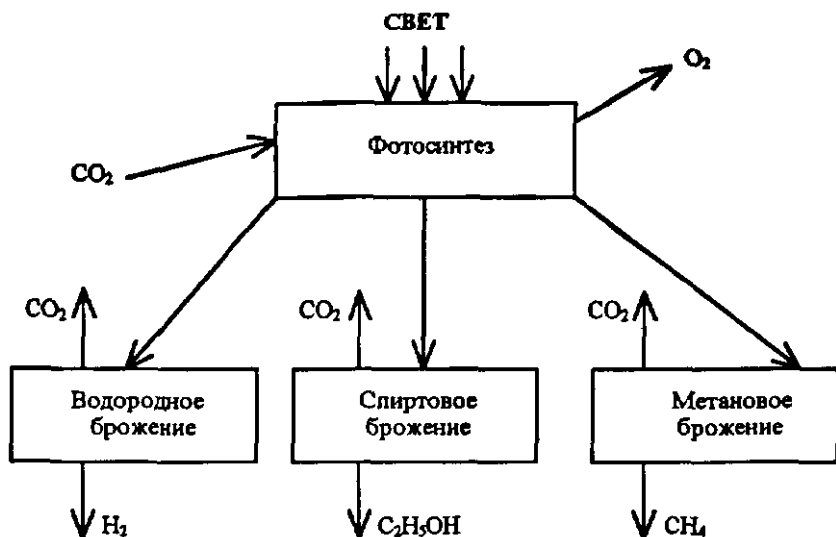


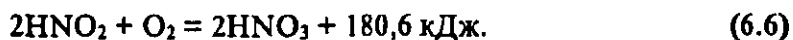
Рис. 6.2. Схема фотосинтеза живого вещества и микробиологического разложения

Роль водорослей в биосфере ясна: являясь автотрофами, они осуществляют функцию зеленого экрана на тех 70,8 % поверхности нашей планеты, которые покрыты водой. Водоросли дают 25 % всего кислорода, поступающего в атмосферу.

До последнего времени недооценивалась роль микроорганизмов. Между тем циано-бактериальные сообщества (сине-зеленые водоросли), благодаря фотосинтезу образующие разнообразные органические вещества, существуют около 3,5 млрд. лет. В сумме они составляют огромную массу органики и, следовательно, могут влиять не только на процессы миграции элементов, но и даже на глобальные изменения климата и состава атмосферы.

Помимо фотосинтеза имеются и другие процессы, в результате которых живые организмы создают из минеральных элементов окружающей среды органическое вещество своего тела. Необходимую энергию они получают за счет различных химических реакций (*хемосинтеза*). Например,

были обнаружены группы микроорганизмов (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter* и др.), способные окислять аммиак до солей азотистой и затем азотной кислоты по реакции:



Выделяющаяся при таком окислении энергия используется микроорганизмами для синтеза органических веществ из углекислого газа, воды и минеральных веществ. Здесь в отличие от фотосинтеза *прямая солнечная энергия* не используется. В настоящее время известны микроорганизмы, также окисляющие серу и сероводород, двухвалентное железо, марганец, водород, метан и уголь.

Таблица 6.6

Интенсивность биологического поглощения расщепляемых элементов фотосинтезирующими организмами Мирового океана

| Элемент | Содержание, $1 \cdot 10^{-4} \%$ | | | | Кэффициент биологического поглощения | |
|---------|-------------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--|--------------------|
| | в сухой биомассе | | в сырой биомассе | | Фито- планктон | Бурые водоросли |
| | Фито- планктон | Бурые водоросли | Фито- планктон | Бурые водоросли | | |
| Be | — | 740,0 | — | 148,0 | — | 2,2 |
| Sr | 260,0 | 1400,0 | 52,0 | 280,0 | 6,4 | 35,0 |
| B | — | 120,0 | — | 24,0 | — | 5,4 |
| F | — | 4,5 | — | 0,9 | — | 0,7 |
| I | 300,0 | 1500,0 | 60,0 | 300,0 | 940,0 | 5000,0 |
| Ba | 15,0 | 31,0 | 3,0 | 6,2 | 290,0 | 300,0 |
| Zn | 2600,0 | 150,0 | 520,0 | 30,0 | 104 000,0 | 6000,0 |
| Mo | 1,0 | 0,45 | 0,2 | 0,009 | 20,0 | 9,0 |
| Cu | 200,0 | 11,0 | 40,0 | 2,2 | 44 000,0 | 240,0 |
| As | — | 30,0 | — | 6,0 | — | 2300,0 |
| V | 5,0 | 2,0 | 1,0 | 0,4 | 520,0 | 210,0 |
| Mn | 75,0 | 58,0 | 15,0 | 11,6 | 37 000,0 | 29 000,0 |
| Ni | 36,0 | 3,0 | 7,2 | 0,6 | 140 000 | 1200,0 |
| Ti | 80,0 | 12,0 | 16,0 | 2,4 | 16 000,0 | 2400,0 |
| Co | 5,0 | 0,7 | 1,0 | 0,14 | 33 000,0 | 4700,0 |
| Ag | 0,28 | 0,25 | 0,056 | 0,05 | 560,0 | 500,0 |
| Cd | 0,4 | 0,4 | 0,08 | 0,08 | 720,0 | 720,0 |
| Pb | 5,0 | 8,4 | 1,0 | 1,68 | 33 000,0 | 56 000,0 |
| Hg | — | 0,003 | — | 0,006 | — | 200,0 |
| Cr | 3,5 | 1,3 | 0,7 | 0,26 | 3500,0 | 1300,0 |

Бактерии бывают *хемо- и гетеротрофными* (хемоорганотрофными), *аэробными* (им необходим для дыхания свободный кислород) и *анаэробными* (существуют в бескислородной среде, используя для дыхания кислород химических соединений), *психрофильными* (холодолюбивыми) и *термофильными, барофильными*, обитают как в кислой (табл. 6.6), так и в щелочной среде [20].

В целом микроорганизмы очень устойчивы к изменениям окружающей среды (их находят даже в ядерных реакторах). Например, в 1883 г. все живое вещество на острове Кракатау было уничтожено вулканическим извержением, а уже через 3 года цианобактерии росли на вулканических пеплах и туфах. В другом случае, после испытания США атомного оружия на атолле Бикини первыми живыми существами, вернувшимися туда, были бактерии.

Микроорганизмы подразделяются и по степени влажности среды обитания: *ксерофилы* (рост которых начинается при относительной влажности воздуха в пределах 85—90 %), *мезофилы* (растущие при влажности 90—95 %) и *гигрофилы* (развивающиеся при влажности свыше 95 %) [44].

Микроорганизмы могут использовать солнечную энергию прямо (микроводоросли) или косвенно, через другие виды организмов. Например, пигментированные клетки, содержащие хлорофилл, способны поглощать видимый свет. Эта поглощенная радиация генерирует активный водород, используемый клеткой. Такие организмы называют *фотоавтотрофными*. Более высокоорганизованные растения и водоросли получают водород при фотоллизе воды, тогда как пурпурные и зеленые серные бактерии его получают при окислении соединений серы.

Существует специфическая группа *литотрофных* бактерий, способных развиваться за счет окисления окиси углерода, — группа карбоксидобактерий.

Определенные виды микроорганизмов обладают способностью избирательно накапливать металлы (золото, серебро, висмут, кадмий, кобальт, хром, медь, ртуть, марганец, никель, титан, ванадий и уран). Отдельные виды бактерий (*магнитогенные*) и некоторые организмы более сложной органи-

зации обладают способностью синтезировать микрокристаллы магнетита или извлекать их из сульфидов, карбонатов и ионных образований [60].

Бактерии также способны к обеспечению окислительно-восстановительных реакций. Даже скальные породы претерпевают преобразование живым веществом. Цианобактерии, бактерии, грибы и лишайники воздействуют на горные породы растворами как неорганических кислот (угольной, азотной, серной), вплоть до 10 %, так и органических [24]. Химически активными веществами обладают и высшие растения — например, корни елей, растущих на бедных питательными элементами почвах, также выделяют сильные кислоты, разлагающие минеральные соединения.

При строительстве Киевского метрополитена сложилась аварийная ситуация, причиной которой стали тионовые бактерии. Бактерии без доступа кислорода находились в песках в угнетенном состоянии, в процессе строительства метро они получили возможность активного существования и размножения, так как в забой стали закачивать сжатый воздух. В результате их жизнедеятельности рН подземных вод стал менее 1 (т.е. бактерии закислили подземные воды до состояния концентрированной кислоты), что привело к разрушению железобетонных конструкций метрополитена.

Под влиянием микроорганизмов может происходить не только растворение, но и осаждение металлов из растворов. Например, светло-зеленый плесневый грибок *Penicillium glaucum* в течение суток переводит золотоносный хлорный раствор в голубое коллоидное золото с его выделением на своих пленках. *Aspergillus oryzae* превращает разбавленный раствор хлорида золота в его коллоидный раствор красного цвета. Наиболее эффективными в осаждении золота являются плесневые грибы *Aspergillus niger* и *A. oryzae*, осаждающие золото через собственные метаболиты (протамины и глобулины) из кислых растворов. Плесневые грибы способны поглощать как ионное, так и коллоидное золото, что объясняется способностью свободных функциональных групп белков плесени ионизироваться в растворах и электростатически взаимодействовать с коллоидами. В биомассе микроскопических

грибов *Cephalosporium sp.* и *Aspergillus niger* удельная концентрация золота достигает 30 г/г.

Бактерии *Metallogenium* играют основную роль в концентрации марганца и железа в донных осадках. Одни виды железобактерий концентрируют исключительно окись марганца, другие — только окись железа, а третьи — оба этих компонента. Вспышки продуктивности разных видов железобактерий обуславливают зональность донных осадков — чередование в них слоев с разным соотношением окислов железа и марганца. Амплитуда физико-химических условий окружающей среды, при которых возможны существование и рудообразующая деятельность бактерий, широка: рН от 5,8 до 7,5, Eh от +20 до +700 мВ, содержание кислорода — от следов до 10 мг/л.

Образование железомарганцевых конкреций происходит в два этапа. Сначала окисные соединения этих металлов восстанавливаются в донных осадках сульфатвосстанавливающими и другими бактериями, и восстановленные соединения железа и марганца поступают из ила в воду. На втором этапе происходит обратный процесс — железобактерии окисляют растворенные в придонной воде закисные соединения железа и марганца с образованием ферригидрита, вернадита и других минералов. Причем образование вернадита возможно лишь при очень быстром окислении двухвалентного марганца до четырехвалентного — настолько интенсивного, что осуществляться оно может только с участием живого вещества [24]. Бактериогенное окисление железа и марганца в этом случае происходит при таких низких концентрациях растворов, что хемогенное осаждение исключается. Часть окислов осаждается при минерализации металлоорганических соединений, весьма устойчивых к химическому окислению.

Образование стратиморфных медных руд обязано деятельности как некоторых обитателей моря — членистоногих и моллюсков (например, осьминогов и каракатиц), имеющих голубую кровь, цвет которой обусловлен гемоцианином (медьсодержащим пигментом), так и некоторых специфических микроорганизмов.

Скопления гниющей органики создают восстановительную обстановку, обусловленную присутствием сероводорода (для выделения которого достаточно десятых долей процента органического вещества в осадках). Образование стратиформных руд происходит при взаимодействии сероводорода с низкотемпературными растворами, несущими медь. При этом важная предпосылка рудообразования — это отсутствие в окружающей среде потребителей сероводорода (тионовых бактерий).

Бокситы могли образоваться путем минерализации и перераспределения остатков высших растений, содержащих значительное количество глинозема (так, в золе плаунов содержится до 30 % алюминия). Алюминий в теле растений образует комплексные алюмоорганические соединения. Железобактерии *Metallogenium* разлагают соединения такого рода с осаждением гидроокиси алюминия. Отложение бокситов происходило на суше, в болотах или мелких заболоченных пресноводных водоемах. *Bac. megaterium*, *Bac. mesentericus*, *Bacterium sp.* накапливают уран в своих клетках в 500—35000 раз больше, чем в окружающей среде.

Кроме бактерий в процессах превращения и перераспределения вещества биосферы участвуют и вещества органического происхождения. Так, зачастую продукты разложения степных трав образуют растворы нейтральной и слабощелочной реакции, некоторые полыни и опад саксаула дают щелочную (рН = 8—8,5) реакцию, а масса отмершей хвои, вереска, лишайников и сфагнома — кислую (рН = 3,5—4,5) [24]. Активная роль *гуминовой кислоты* проявляется в окислительно-восстановительных реакциях, что связано с наличием в ее составе функциональных групп (карбокислых, спиртовых, метокислых, карбонильных), а также хиноннов и фенольных гидроксильных. Карбокислые группы и частично фенольные гидроксилы обуславливают способность гуминовых кислот обменивать Н-ионы на катионы металлов (К, Na, Ca, Mg, Cu, Zn и др.). Хинонные группы, служащие акцепторами водорода, играют большую роль в реакциях окисления.

Из гумусовых веществ значительной активностью по отношению, например, к золоту обладают низкомолекулярные органические кислоты. Однако наиболее интенсивно золото

растворяется в фульвокислотах, а также в жирных и ароматических оксикислотах, жирных многоосновных карбоновых кислотах и аминокислотных карбоновых кислотах.

Важным свойством гумусовых кислот является способность вступать в реакции с гидратами полуторных оксидов и образовывать с ними как растворимые, так и не растворимые соединения, а с поливалентными металлами — комплексные соединения.

Изучение взаимодействия гумусовых кислот с ионными формами железа и алюминия показало, что реакции между ними идут по типу хелатообразования. Максимальное количество железа, которое может быть связано с фульвокислотами, достигает 650—711 мг на 1 г органического вещества, а с гуминовыми кислотами — 119—152 мг; алюминий связывается слабее — 89—92 мг на 1 г углерода (причем только с гуминовыми кислотами).

Гуминовые кислоты как высокомолекулярные малорастворимые соединения играют роль комплексообразующих сорбентов, обладающих высокой емкостью по отношению к ионам металлов. Например, 1 г гуминовых кислот сорбирует (в мг): кадмия 9, золота 16, меди 18, свинца 34.

Растительность тоже активно регулирует динамику многих геологических процессов, а также состояние почв и грунтов. Так, она часто участвует в процессах выветривания горных пород. Например, с фитогенным выветриванием связаны развитие трещиноватости, диспергации, изменение гранулометрического и химико-минералогического состава грунтов, увеличение содержания углерода или органогенных соединений.

В районах, где происходит природное соленакопление, растения содержат много (до 40—55 %) минеральных солей. Необычен и состав их зольной части: содержание натрия иногда составляет 65 % (на золу), хлора — до 48 %, SO_4^{2-} — до 36 %, магния — до 4,5 %. Сбрасывая листву, растения засоляют почву (опад саксаула, например, содержит 50 % легкорастворимых солей). При разложении отмершей органики в первую очередь выщелачиваются соли NaCl , Na_2SO_4 , MgCl_2 . Остальное зольное вещество растений представлено

кальцием, калием, фосфором, железом, кремнием — элементами, которые в процессе минерализации отмершей органики освобождаются очень медленно и быстро захватываются живым веществом.

Экстрагированные из отмершей органики хлориды и сульфаты натрия или магния мигрируют с водами поверхностного и подземного стока, собираясь в бессточных впадинах (центрах соленакопления), а также в Мировом океане. Например, 16 млн. т солей (половина солевого привноса) ежегодно поступает в Аральское море из биогенного вещества. Эти соли абиогенно выпадают из пресыщенных растворов, образуя различные отложения.

Лес регулирует поверхностный сток и режим водоемов, а также выполняет снегозадерживающую и снегораспределительную функции, снижает скорость ветра и выдувание снега. При вырубке лесов до 70 % дождевых и почти 100 % снеговых вод стекают по поверхности почв, вследствие чего весной и летом при дождях возникают большие разливы, а в сухое время реки мелеют или высыхают.

Велико водоохранное значение леса. В нем скапливается снег, который держится дольше на 2—4 недели, чем в поле, тает медленнее, в результате чего уменьшается поверхностный сток (не превышает 15—20 % от суммы осадков), увеличивается инфильтрация снеговых и дождевых вод, усиливается питание грунтовых вод, улучшается водоснабжение растительности. Лесная подстилка предохраняет почву от чрезмерного промерзания и улучшает влагооборот. Лес ослабляет ветры и этим препятствует сдуванию снега или образованию пыльных бурь.

Кроме того, лес повышает влажность воздуха, понижает испаряемость, вдвое уменьшает запыленность воздуха, поглощает углекислоту, выделяет кислород, антисептические фитонциды и улучшает общее состояние атмосферы.

Мелиоративная эффективность лесных насаждений зависит от видового состава деревьев, биоценозов, зонально-климатических условий местности.

В биогенной миграции особое значение имеют животные, свобода перемещения которых определяет их основную биосферную функцию перевода органики в дисперсное со-

стояние вследствие ее равномерного рассеивания от живых и погибших растений к местам роста и развития следующих поколений организмов.

Помимо растений (вытягивающих питательные вещества из почвы) животные — единственные представители живого вещества биосферы, перемещающие вещество против направления стока. И если насекомые перемещают вещество на десятки метров от растений, то позвоночные транспортируют его уже на расстояния, измеряемые километрами, а сезонные миграции перелетных птиц и некоторых рыб осуществляют глобальный обмен веществ в биосфере.

Животные осуществляют и транспортировку чужого репродуктивного вещества (спор, пыльцы и семян высших растений), способствуя его расселению в биосфере.

Будучи биотрофами, животные потребляют часть продукции автотрофов и благодаря этому производят регуляторную и стабилизирующую функцию в биосфере. Так, уничтожая часть продукции, они предохраняют экосистемы от перепроизводства неразложившейся отмершей органики, которая препятствует возобновлению растительности. По современным данным, наземная растительность без ущерба для нормального воспроизведения выносит изъятие до 75 % своей биомассы, в то время как биотрофы (травоядные животные) не могут прокормиться при снижении запасов растительного корма более чем на 50—70 %.

Механическая биогеенная миграция атомов обусловлена прежде всего миграцией птиц и животных. Она также отчетливо проявляется и в наземной биосфере с хорошо развитым почвенным покровом, позволяющим животным создавать глубокие укрытия (первые метры от земной поверхности). Благодаря выбросам землеросов в верхние слои почвы попадают первичные неветрившиеся минералы, которые, разлагаясь, поставляют химические элементы в биосферу.

То же самое относится и к морским экосистемам. На дне океанов или морей организмы также строят (роют, сверлят и т. д.) себе укрытия даже в скальном грунте. Сверлящая дея-

тельность моллюсков может приводить к изменению береговой линии и к другим серьезным последствиям.

Поглощая те или иные элементы и выделяя продукты метаболизма, животные активно воздействуют на среду своего обитания. Наиболее активными в этом отношении являются фильтраторы (в водной среде) и детритоядные организмы (в почвах и донных осадках водосмов). Причем, если растительность активно влияет на изменение газового состава атмосферы и соответственно на ионный состав океанических вод, то животные почти не оказывают влияния на атмосферу, но изменяют катионный состав морских вод [24].

Недавно было установлено, что живое вещество изменяет не только химические, но и физические параметры биосферы, ее термические, электрические и механические характеристики. Так, осеннее потепление окружающей среды («бабье лето») вызвано имеющимся пиком деятельности сапротрофов и интенсивным окислением листовного покрова нашей планеты, в результате чего происходят реакции с выделением значительного количества тепла.

На Черном и Белом морях российскими учеными установлен биоэлектрический эффект, заключающийся в создании живым веществом (фитопланктоном) электрического поля с отрицательным, а придонным скоплением отмершего органического вещества — с положительным зарядом.

Таким образом, живое вещество, покрывающее сплошной пеленой поверхность земного шара, представляет собой длительно (более трех миллиардов лет) и постоянно действующий *механизм преобразования* энергии солнечных лучей в потенциальную, а затем в кинетическую энергию геохимических процессов. Живые организмы не просто аккумуляторы и передатчики энергии, но и агенты сортировки и перераспределения атомов — они изменяют химический состав биосферы и всех оболочек Земли.

Но где же в наибольшей степени сосредоточена геологическая работа живых организмов, где наиболее интенсивно происходит аккумуляция солнечной энергии и обратное ее выделение в виде энергии геохимических процессов? Таким местом являются ландшафты суши и поверхностные слои моря.

Наряду с биогенной аккумуляцией минеральных соединений в биосфере, в частности в такой ее важной подсистеме, как элементарный ландшафт, протекают противоположные процессы разрушения органических веществ, путем перехода химических элементов из органических соединений в минеральные. Эти процессы протекают в растениях в форме дыхания, в результате которого сложные органические соединения разлагаются до таких простых минеральных веществ, как углекислый газ и вода. Однако синтез органических веществ в растениях намного превышает разложение и в целом растительность их накапливает.

Значительно интенсивнее разложение органических веществ протекает в телах животных, для которых растения являются единственным первоисточником химической энергии. Потребности передвижения и поддержания температуры тела обуславливают окисление в процессе дыхания животного большого количества органических веществ. В качестве конечных продуктов этого окисления образуются углекислый газ и вода. Однако выделение углекислого газа животными не компенсирует его поглощения из атмосферы в ходе фотосинтеза.

Основную роль в разложении остатков растений и животных в биосфере играют различные микроорганизмы, распространенные повсеместно — в атмосфере, почвах, коре выветривания, гидросфере. Особенно много микроорганизмов в почвах и илах: в 1 г их местами содержится миллиарды единиц. Меньше микроорганизмов в поверхностных водах, но и здесь в 1 м³ озерной воды их насчитывают сотнями, тысячами и миллионами.

Для своих жизненных процессов микроорганизмы используют химическую энергию, заключенную в органических соединениях. В результате белки, жиры, углеводы и другие богатые энергией органические соединения превращаются в более простые и бедные энергией соединения, вплоть до конечных продуктов — углекислого газа, воды, аммиака и др. Суммарная разлагающая активность микроорганизмов выше, чем у растений или животных.

Но иногда даже при совместной деятельности различных живых организмов полного разложения биогенного вещества все же не происходит. Деятельность сапротрофов может быть подавлена как сухостью климата (в пустыне), так и чрезмерной увлажненностью обстановки (в болоте), низкой температурой (в тундре) или токсичностью среды (район современных горных разработок). В воде сфагновых болот, например, имеются фенолы, обуславливающие ее стерильность.

Способность биологического вида накапливать определенные химические элементы по отношению к кларку называется биогеохимической активностью. Так, обогащение Na и Cl, вероятнее всего, связано с ареалами обитания флоры и фауны на засоленных почвах, богатство злаков Si — с вулканическими ландшафтами, Al — с латеритами. Резкий дефицит или избыток элементов иногда чреват заболеваниями растений, животных и человека. На территории целесообразно выделять биогеохимические области с дефицитом I, дефицитом или избытком F, избытком и дефицитом Cu, дефицитом Co в почвах и т.д.

6.5

Техногенная миграция

Человек как вид появился на Земле более 2,6 млн. лет назад, 200—300 тыс. лет назад он научился использовать огонь, около 100 тыс. лет назад — добывать его, а сегодня человечество стало ведущей геологической силой на планете.

Для анализа проблем, связанных с техногенной миграцией химических элементов, необходимо учесть имеющуюся иерархию с последующим подразделением на *глобальный, региональный и локальный уровни* (табл. 6.7).

В *техносфере* осуществляются все виды миграции: механическая, физико-химическая и биогеохимическая, но доминирует техногенная миграция элементов. Многие процессы техногенеза по масштабам превышают природные. Например, ежегодно из недр извлекается больше металла, чем выносится речным стоком: Pb — почти в 70 раз, Cr — в 35, Cu — в 30, P — в 20, Fe, Mn — в 10, Zn — в 5, Al — в 3 раза.

Таблица 6.7

Иерархия процессов миграции химических элементов в ноосфере

| Источники загрязнения | Потоки миграции | Размеры ареала | Элементы, соединения, изотопы |
|---|---|----------------------------------|--|
| Глобальные | | | |
| Ядерные взрывы: испытания в атмосфере Катастрофы | Атмосфера, гидросфера | Глобальные, региональные | Sr ⁹⁰ ; Cs ¹³⁷ , Pu, Am, Ce ¹⁴⁴ , Y ⁹⁰ , Ru ¹⁰⁶ |
| Вулканические извержения | Атмосфера | Глобальные | CO ₂ , SO ₂ , CH ₄ |
| Выбросы высоких заводских труб | Атмосфера | Глобальные, региональные | SO ₂ , CO, CO ₂ |
| Региональные (отходы, сливы, выбросы в атмосферу) | | | |
| ТЭЦ на угле | Атмосфера, почвы | $r = 20 \text{ км}^2$ | ThO ₂ , U, Th, Ra, Sr, Pb, Cu, Ni |
| АЭС | Атмосфера, гидросфера, почвы | $r = 400 \text{ км}^2$ | Sr ⁹⁰ ; Cs ¹³⁷ и др. |
| Металлургические заводы | Атмосфера, гидросфера, почвы | $s = 50\text{—}100 \text{ км}^2$ | Pb, Hg, Cd, Co, Ni, As, Sb, Se, Sr, Cu, Zn, V |
| Приборостроительные заводы | Атмосфера, гидросфера, почвы | $s = 10\text{—}15 \text{ км}^2$ | Pb, Hg, Cd, Co, Ni, As, Sb, Se Sr, Cu, Zn, V |
| Химические заводы | Атмосфера, гидросфера, почвы | $s = 10\text{—}15 \text{ км}^2$ | Hg, Pb, Cd, As, Sr, Se, P, Sb и др. |
| Производство стройматериалов | Атмосфера, почвы | $s = 10\text{—}20 \text{ км}^2$ | SiO ₂ , Sr, CaSiO ₄ |
| Транспортные магистрали | Атмосфера, почвы | $s = 5\text{—}10 \text{ км}^2$ | Pb, Cd и др. |
| Сельскохозяйственные комплексы | Атмосфера, гидросфера, почвы | $s = n \cdot 100 \text{ км}^2$ | P, Sr, RBE, F и др. |
| Горнорудные предприятия | Атмосфера, гидросфера, почвы | $s = 50\text{—}100 \text{ км}^2$ | U, Pb, Cd, Sr, Zn, Cu, Hg и др. |
| Локальные | | | |
| Отдельные приборы, машины, установки, минералы, реактивы | В зависимости от принадлежности $s = 0,01\text{—}0,1 \text{ км}^2$ | | |

При сжигании угля в выбросы и золу переходит также больше металла по сравнению с речным стоком: V — в 400, Mo — в 35, Cr — в 20 раз.

Человечеством ежегодно перемещаются миллиарды тонн угля, нефти, руд, удобрений (содержащих P, U, Sr, REE), стройматериалов. Темпы техногенной миграции элементов несопоставимы с природными процессами: образовавшиеся за миллионы лет месторождения многих полезных ископаемых разрабатываются всего за несколько лет. Вместе с продуктами сельского хозяйства техногенно мигрируют миллионы тонн K, сотни тонн P и N.

Ускорение темпов миграции элементов в XX веке наглядно иллюстрируют исторические данные. Уже в государствах античного мира был замечен эффект техногенной миграции: например, существенно изменена природа р. Нил в Египте, р. Аму-Дарья в Хорезме, рек Тигр и Евфрат в Вавилонии, р. Хуанхе в Китае. Этот этап преобразования природы человеком начался около 8000 лет назад. В XX веке техногенез стал главной причиной миграции элементов.

Ежегодно добывается 100 млн. т минерального сырья и каустобиолитов, а горные и строительные работы перемещают около 1 км³ горных пород, что вполне сопоставимо с объемом пород, вынесенных всеми реками. За 1901—1980 годы в мире было добыто 71 % Au, 87 % Cu, 86 % Fe, 90 % угля и бокситов и 100 % U от полученного из недр за весь исторический период. Под влиянием техногенеза происходят диспергирование и золизация вещества суши, что ведет к росту поверхностной энергии и роли процессов сорбции.

Техногенные тренды отчасти усиливают природные, но чаще вносят совершенно новые тенденции в преобразование биосферы. Появляются миллионы новых соединений, используемые технологии переводят металлы в металлическое (восстановленное) состояние, производится огромное количество энергии, выделяются изотопы, сверхчистые вещества, отсутствующие в природных условиях.

Наблюдается также и стремительный рост числа используемых химических элементов: в античную эпоху применялось лишь 19 элементов, в XVIII веке — 28, в XIX — 50, в на-

чале XX века — 60. Сейчас практически используются 89 элементов Периодической таблицы Д.И. Менделеева и многие из их изотопов. Появились и используются искусственные, отсутствующие в природе элементы (Pu, Np, Cf и др.).

В этой связи необходимо оперировать понятием **технофильность** элемента. Эта величина, показывающая степень вовлечения химического элемента в техногенез, равна отношению ежегодной добычи элемента к его кларку. Мировая ежегодная добыча углерода составляет миллиарды тонн, железа — миллионы тонн, меди — сотни тысяч, ртути — тысячи, платины — десятки тонн, германия — десятки килограммов. Кроме полезности еще несколько факторов обусловили столь отличающиеся уровни добычи различных элементов. Так, способность создавать в земной коре относительно высокие природные концентрации обусловила добычу ртути еще в древности, в то время как индий с большим кларком в природе рассеян и его применение началось сравнительно недавно. Малая распространенность золота (кларк $4,3 \cdot 10^{-7}$), несмотря на высокую ценность, ограничивает масштабы добычи этого металла. Кремний, второй по распространенности после кислорода элемент (кларк 29,5), является основой строительных материалов и извлекается в огромных количествах, а его химический аналог германий (кларк — $1,4 \cdot 10^{-4}$) добывается весьма незначительно.

Максимальная технофильность, даже без учета потребляемой растительной массы, оказывается у углерода ($1,1 \cdot 10^{11}$). В настоящее время уголь и нефть используются в основном как источники энергии. Наименее технофильны Y, Ga, Cs, Th.

Технофильность химических элементов варьирует в миллионы раз, в то время как их кларки — в миллиарды, что означает уменьшение геохимической контрастности техносферы по сравнению с природной средой. А это, по существу, ведет к уменьшению *энтропии биосферы*.

В результате техногенеза из недр на поверхность земли извлекается огромное количество наиболее технофильных элементов: ландшафт обогащается Fe, Si, Pb, Hg, Cu, Sb и другими химическими элементами.

6.6

Биогеохимический круговорот атомов

По укрупненным оценкам, общая масса живого вещества (в сухом виде составляющая $2-4 \cdot 10^{18}$ г) в миллиард раз меньше массы Земли ($5,98 \cdot 10^{27}$ г). Если учесть, что обновление живого вещества на планете непрерывно происходит в среднем раз в 8 лет (фитомасса суши обновляется за 15 лет, а океана — за 1 день; вся биомасса океана — за 33 дня), то общая масса живого вещества, образованного за всю историю Земли ($6,5 \cdot 10^{27}$ г), даже превышает массу планеты. Отсюда ясна та гигантская работа по преобразованию среды, которую осуществляет биота.

Необходимо учитывать, что различные зоны и территории обладают разной продуктивностью и, следовательно, различной работой по преобразованию прилегающих сред. Так, биомасса почвенных животных всей биосферы составляет около 500 млн. т; общая биомасса остальных животных суши меньше на 1—2 порядка. Биомасса океана состоит из 300 млн. т растительного вещества и 6 млрд. т зоопланктона и бентоса в сухом виде [15]. Поэтому наибольшей продуктивностью обладают пойменные сгущения жизни: при площади менее 1% они производят примерно 10% живого вещества суши. Биота океана по массе составляет менее 0,2% от биоты суши, однако их продуктивности совпадают (примерно $6 \cdot 10^{16}$ г углерода в год).

Биосфера — это гигантский «химический комбинат», на котором из смеси веществ (изверженные породы, морская вода и т.д.) получают простые и чистые соединения, состоящие порой из двух-трех главных элементов. Продукцией этого природного «комбината» являются и целые горы поваренной соли, образованной из двух элементов (натрия и хлора), и толщи известняков (Ca, C, O). Следовательно, поступление в биосферу солнечной энергии и ее преобразование в энергию геохимических процессов приводит к дифференциации химических элементов, росту разнообразия, последовательному накоплению информации.

Таблица 6.8

Интенсивность биологического поглощения и ежегодный захват элементов растительностью суши [22]

| Элемент | Коэффициент биологического поглощения | Захват годовым приростом фитомассы | |
|---------|---------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
| | | всей суши, тыс. т | на 1 км ² , тыс. т |
| Mn | 6,86 | 41 400 | 276,0 |
| Zn | 19,60 | 8625 | 57,5 |
| Sr | 3,48 | 6900 | 46,0 |
| Ti | 0,20 | 5606 | 37,4 |
| B | 50,0 | 4312 | 28,8 |
| Ba | 0,66 | 3881 | 25,9 |
| Cu | 9,09 | 1725 | 11,5 |
| Zr | 0,88 | 1294 | 8,62 |
| Rb | 0,56 | 862,5 | 5,75 |
| Br | 36,36 | 690,0 | 4,60 |
| F | 0,097 | 603,8 | 4,03 |
| Pb | 3,73 | 431,2 | 2,87 |
| Ni | 1,54 | 345,0 | 2,30 |
| Cr | 1,03 | 310,5 | 2,07 |
| V | 0,39 | 258,8 | 1,73 |
| Li | 1,00 | 258,8 | 1,73 |
| Co | 2,74 | 172,5 | 1,15 |
| La | 0,33 | 138,0 | 0,92 |
| Y | 0,44 | 138,0 | 0,92 |
| Mo | 9,23 | 103,5 | 0,69 |
| I | 12,0 | 51,75 | 0,35 |
| Sn | 1,85 | 69,00 | 0,46 |
| As | 1,58 | 60,37 | 0,40 |
| Cs | 0,79 | 43,12 | 0,29 |
| Be | 0,80 | 17,25 | 0,12 |
| Se | 7,14 | 8,63 | 0,057 |
| Ga | 0,05 | 8,63 | 0,057 |
| Ag | 12,50 | 6,90 | 0,046 |
| U | 0,15 | 5,18 | 0,035 |
| Hg | 7,58 | 2,16 | 0,014 |
| Sb | 0,50 | 0,86 | 0,006 |
| Cd | 0,63 | 0,86 | 0,006 |

Разлагая те или иные минералы, организмы избирательно извлекают из них кальций, калий, натрий, фосфор, кремний и многие микрокомпоненты. Так, слоновая трава в аф-

риканских саваннах из одного гектара почвы ежегодно извлекает 250 кг кремнезема, а также 80 кг щелочных и щелочноземельных металлов, а джунгли (с той же площади) — уже 8 т кремнезема.

Живые организмы при своем существовании постоянно обмениваются химическими элементами с биосферой (табл. 6.8). Например, в пшенице полная смена атомов происходит: для фосфора за 15 суток, а для кальция — за 1,5 суток [24]. Через тело человека в течение его жизни проходит до 75 т воды, 17 т углеводов, 2,5 т белков и 1,3 т жиров. Причем геохимический аспект физиологического функционирования живых организмов обратно пропорционален их размерам, следовательно, наиболее значимой оказывается деятельность микроорганизмов и бактерий. Такое же важное значение имеет и количество пищи, пропускаемой через организм. В этом отношении максимальным геохимическим эффектом на суше обладают грунтоеды (в среднем пропускающие через свой кишечник за 200 лет почвенный слой мощностью 1 м), а в океане — илоеды и фильтраторы. В результате их деятельности почвенный или иловый субстрат существенно обогащается кальцием, железом, магнием и фосфором.

Организмы, поглощающие из морской воды карбонаты и кремнезем (рис. 6.3), не только изменяют ее солевой состав, но и влияют на кислотность среды (за счет повышения относительного содержания щелочей). Значительно преобразуют водную среду и птичьи базары. Так, в период гнездования птиц содержание фосфатов и нитратов в морской воде на площади свыше 200 км² повышается более чем в 100 раз.

Кроме этого в ходе микробиологических процессов в биосфере образуются гумус и более простые вещества, например органические кислоты.

При этом такие элементы, как кальций, магний, натрий, калий, сера, фосфор, освобождаются из органических соединений, в результате чего образуются соответствующие катионы и анионы (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} и др.). Новообразования частично снова могут поглощаться организмами, а также входить в состав почвенных, грунтовых, речных и других вод, находиться в адсорбированном состоянии в коллоидах

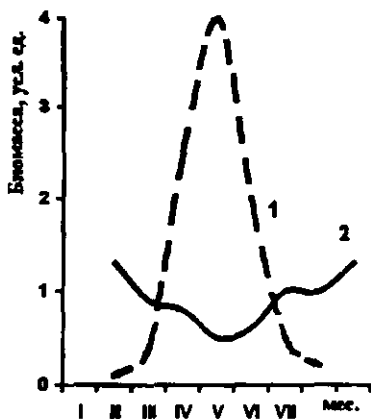


Рис. 6.3. Сезонные изменения биомассы диатомовых водорослей (1) и содержания кремния (2) в поверхностном (0—25 м) слое воды оз. Байкал

или, наконец, соединяясь между собой, переходить в твердую фазу почв, образуя кристаллические осадки — различные соли.

Ископаемые угли соответствуют древним торфам, горючие сланцы образовались из сапропелей, накапливающихся в озерных, а чаще — в морских системах.

Совокупность процессов разложения органических веществ, в ходе которых химические элементы освобождаются из состава сложных, богатых энергией органических соединений и образуют более простые и бедные энергией различные минеральные соединения (CO_2 , H_2O , CaCO_3 , Na_2SO_4 и др.), носит название минерализации органических веществ.

В результате минерализации часто выделяется энергия, поглощенная при фотосинтезе. Носителями этой энергии преимущественно являются природные воды, которые, обогащаясь такими продуктами минерализации, как CO_2 , органические кислоты и др., приобретают высокую химическую активность и выполняют значительную химическую работу в биосфере (растворение, окисление, гидролиз и др.).

Биогенная аккумуляция и рассеяние вещества не протекают изолированно, а образуют единый круговорот элементов. В качестве примера можно привести круговорот в пределах одного почвенного горизонта: здесь микроорганизмы поглощают из окружающего раствора минеральные соединения, которые снова (в процессе обмена веществ или после смерти организмов в результате разложения их остатков) возвращаются в раствор.

Эти круговороты не представляют замкнутых циклов: в результате каждого из них геохимический ландшафт не возвращается в прежнее состояние, а приобретает некоторые новые свойства. Часть веществ надолго изымается из миграции, закрепляясь в почве в форме труднорастворимых соединений, некоторые вещества удаляются в реки и не включают в новые циклы миграции исходного ландшафта.

Миграция химических элементов в ландшафте характеризуется не только *циклическостью*, но и определенной общей направленностью, приводящей к изменению геохимического состава и свойств ландшафта, к переходу его в новое состояние.

Таким образом, происходит **биогеохимический круговорот элементов в биосфере** (рис. 6.4). Например, в связи только с фотосинтезом в современной биосфере в круговорот ежегодно вовлекается 1 млрд. т азота, 260 млн. т фосфора и 200 млн. т серы. Сегодня можно утверждать, что большинство атомов химических элементов земной коры неоднократно побывало в различных организмах во время многочисленных сложнейших круговоротов или косвенно в них участвовало. Следовательно, элементы биосферы создают на Земле систему, в которой поток атомов образует круговорот одновременно в органической и неорганической средах (табл. 6.9).

Максимально биогеохимический круговорот атомов проявлен в почвах (благодаря растениям, животным, микроорганизмам и интенсивному воздействию воздуха и атмосферных осадков). В почвах происходит разложение органического вещества микроорганизмами, особенно интенсивно в тропиках, наименее интенсивно — в тундре.

По корневой системе в верх растений перекачиваются P, S, Ca и микрокомпоненты. В гумусе накапливаются Be, Co, Ni, Zn, Ga, As, Cd, Se и другие элементы. Вниз с нисходящей водой направляется поток вещества, что приводит к выщелачиванию.

В результате биогеохимического круговорота атомов в почвах образуется несколько горизонтов: выщелачивания, выветривания, биогенной аккумуляции, гумусовый, элювиальный и иллювиальный.

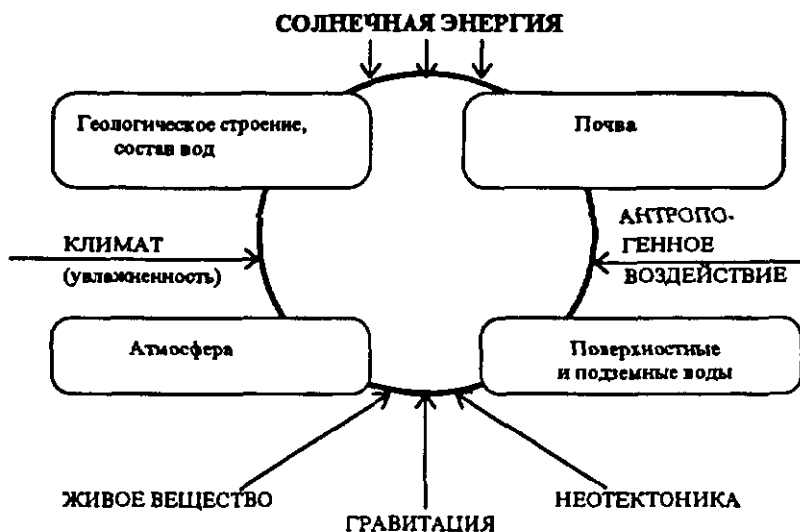


Рис. 6.4. Формальная модель водной миграции элементов

Кроме этого в процессе биогеохимического круговорота атомов в биосфере возникает и окислительно-восстановительная зональность, которая отчетливо прослеживается в озерах: окислительная зона вверху, восстановительная — внизу.

Биогеохимический круговорот химических элементов характеризуется следующими основными показателями:

1) *емкостью*, обусловленной удельным соотношением элементов:

- количеством химических элементов, находящихся одновременно в составе живого вещества ландшафта — биомассой (в ц/га);
- структурой биомассы (соотношение зеленой части, многолетней наземной части, корней, животных, микроорганизмов и т.д.);

2) *скоростью*, определяемой количеством живого вещества, образующегося и разлагающегося в единицу времени, и зависящей от:

- ежегодного абсолютного прироста биомассы (ц/га) и его структуры;
- ежегодного относительного прироста (% от биомассы);

Таблица 6.9

Состав, масса и ежегодная продукция живого вещества биосферы [22]

| Химический элемент | Содержание, % по массе | Масса, т | Ежегодная продукция, т |
|--------------------|------------------------|---------------------|------------------------|
| O | 70,0 | $4,5 \cdot 10^{12}$ | $2,6 \cdot 10^{11}$ |
| C | 18,0 | $1,3 \cdot 10^{12}$ | $3,1 \cdot 10^{10}$ |
| H | 10,5 | $6,7 \cdot 10^{11}$ | $1,6 \cdot 10^{10}$ |
| Ca | 0,5 | $3,2 \cdot 10^{10}$ | Нет данных |
| N | 0,3 | $1,9 \cdot 10^{10}$ | $2,5 \cdot 10^{10}$ |
| K | 0,3 | $1,9 \cdot 10^{10}$ | Нет данных |
| Si | 0,2 | $1,3 \cdot 10^{10}$ | » |
| P | 0,07 | $4,5 \cdot 10^9$ | $5,6 \cdot 10^8$ |
| S | 0,05 | $3,2 \cdot 10^9$ | Нет данных |
| Mg | 0,04 | $2,6 \cdot 10^9$ | » |
| Na | 0,02 | $1,3 \cdot 10^9$ | » |
| Cl | 0,02 | $1,3 \cdot 10^9$ | » |
| Fe | 0,01 | $6,5 \cdot 10^8$ | $8,0 \cdot 10^7$ |
| Al | 0,005 | $3,2 \cdot 10^8$ | $1,1 \cdot 10^8$ |
| Ar | 0,002 | $1,3 \cdot 10^8$ | Нет данных |
| Mn | 0,001 | $6,5 \cdot 10^7$ | $6,0 \cdot 10^7$ |
| B | 0,001 | $6,5 \cdot 10^7$ | Нет данных |
| Ti | 0,0008 | $5,1 \cdot 10^7$ | $8,0 \cdot 10^6$ |
| F | 0,0005 | $3,2 \cdot 10^7$ | Нет данных |
| Zn | 0,0005 | $3,2 \cdot 10^7$ | $7,2 \cdot 10^6$ |
| Rb | 0,0005 | $3,2 \cdot 10^7$ | $8,0 \cdot 10^5$ |
| Cu | 0,0002 | $1,3 \cdot 10^7$ | $1,6 \cdot 10^6$ |
| Br | 0,00015 | $9,6 \cdot 10^7$ | Нет данных |
| Ni | 0,00005 | $3,2 \cdot 10^6$ | $4,0 \cdot 10^5$ |
| Pb | 0,00005 | $3,2 \cdot 10^6$ | $8,0 \cdot 10^4$ |
| As | 0,00003 | $1,9 \cdot 10^6$ | $2,4 \cdot 10^3$ |
| Co | 0,00002 | $1,3 \cdot 10^6$ | $1,2 \cdot 10^5$ |
| Mo | 0,00001 | $6,4 \cdot 10^5$ | $1,6 \cdot 10^5$ |
| Li | 0,00001 | $6,4 \cdot 10^5$ | $8,3 \cdot 10^4$ |
| V | 0,00001 | $6,4 \cdot 10^5$ | Нет данных |
| Cs | 0,00001 | $6,4 \cdot 10^5$ | » |

- ежегодного абсолютного опада (ц/га) и его структуры;
- ежегодного относительного опада (% от биомассы).

Работа, производимая жизнью, состоит в переносе и перераспределении химических элементов в биосфере, создании из них новых тел, благодаря чему значительная часть атомов, составляющих материю земной поверхности, нахо-

дится в непрерывном круговороте. Все почвы и минералы верхних слоев земной поверхности (черноземы, глины, известняки, месторождения руд, углей и нефти) образовались и продолжают образовываться, в том числе и под действием жизни (табл. 6.10). Химический состав природных вод также в значительной степени сформирован живыми организмами, это относится и к составу атмосферы.

Таблица 6.10

Разведанные запасы химических элементов и их ежегодное накопление живым веществом [24]

| Элемент | Мировые запасы сырья, т | Концентрация при фотосинтезе, т/год |
|----------|-------------------------|-------------------------------------|
| Углерод | 10^{12} | 10^{11} |
| Фосфор | 10^{10} | 10^9 |
| Железо | 10^{11} | 10^8 |
| Марганец | 10^8 | 10^7 |
| Медь | 10^8 | 10^7 |
| Цинк | 10^7 | 10^7 |
| Никель | 10^7 | 10^6 |
| Хром | 10^8 | 10^5 |
| Кобальт | 10^6 | 10^5 |
| Молибден | 10^6 | 10^5 |

Таким образом, главный механизм, определяющий единство и целостность биосферы, — *биогеохимический круговорот атомов*.

Круговорот кислорода. В атмосфере Земли кислород содержится в виде O_2 , CO_2 , O_3 ; в воде — в растворенном виде как газ и в соединении с водородом — H_2O ; в литосфере — в форме различных оксидов (Fe_2O_3 , Na_2O , MgO_4 , SiO_2 , K_2O и т. д.) и солей ($CaCO_3$ и др.). Самый большой запас кислорода находится в виде углекислого кальция осадочных пород, но за исключением небольшого количества, высвобождаемого в результате вулканической деятельности, он в этом месте недоступен живым организмам.

Анализ воздуха из пузырьков, запечатанных в кремнистых породах архея, показал, что на ранних стадиях сущест-

вованя Земли это была смесь аммиака, углекислого газа и метана. Кислород, первоначально накопившись в результате жизнедеятельности водорослей в Мировом океане, стал выделяться в атмосферу, окисляя аммиак с образованием паров воды и свободного углекислого газа. В настоящее время, когда водоросли стали основным компонентом планктона приповерхностной части океана, в воде резко уменьшилось содержание углекислого газа и началось его поглощение из атмосферы.

В природном биогеохимическом круговороте участвует в основном атмосферный кислород. Образование свободного кислорода происходит главным образом в результате фотосинтеза растений, а потребление — в ходе дыхания, реакции окисления (в том числе сжигания топлива) и других химических преобразований (только в СНГ для сжигания добываемого из недр топлива необходимо свыше 11 млрд. т воздуха, что намного больше ежегодной потребности в нем населения этих стран). Человечество наряду с другим живым веществом стало мощной геологической силой, в значительной мере определившей своеобразие состояния земной коры, воды и атмосферы.

В настоящее время общее количество свободного кислорода оценивается количеством $1,18 \cdot 10^{15}$ т. Это количество накопилось за время существования земной растительности. Время круговорота кислорода составляет примерно 2500 лет.

Сейчас свободный кислород образуется со скоростью примерно $1,55 \cdot 10^9$ т/год, а расходуется со скоростью около $2,16^{10}$ т/год [3]. Таким образом, расход кислорода в техногенную эру — больше его поступления в атмосферу от природных источников.

Круговорот углерода. Содержание углерода на нашей планете очень велико. Суммарные запасы каустобиолитов измеряются величиной $n \cdot 10^{13}$ т [24]. Однако это составляет только 0,36 % всего органического углерода, содержащегося в осадочных породах континентального сектора. Основная масса углерода аккумулирована в карбонатных отложениях дна океана ($1,3 \cdot 10^{16}$ т), в кристаллических породах ($1 \cdot 10^{16}$ т), каменном угле и нефти ($0,34 \cdot 10^{16}$ т). В атмосфере углекислого

газа сравнительно немного ($1,3 \cdot 10^{12}$ т) — менее 1/10 000 общего его запаса.

Таким образом, если принять мощность земной коры в среднем 16 км, то на 1 см² планеты имеется почти 6 кг углерода. Из этого количества лишь 0,125 г приходится на атмосферу; 7,5 г — на океаны; 0,1 г содержится в растениях и 0,0015 г — в животных. Остальное количество заключено в различных минералах, т.е. в неживой природе. Растения ежегодно усваивают 175 млрд. т углерода, при этом земные — только 20 млрд. т, а водные, главным образом оксанический планктон, — 155 млрд. т.

Все разнообразие форм существования углерода в биосфере можно разделить на следующие группы:

- живое вещество;
- продукты отмирания и жизнедеятельности живого вещества;
- кислородные минеральные соединения (окислы, карбонаты);
- неокислородные соединения (углеродистые вещества) — самородный углерод, карбиды, твердые углеродные полимеры, асфальт, нефть, природный газ и др.

Резервы углерода в биосфере также разделяются на подвижные и неподвижные [36].

Подвижные резервы углерода включают углеводороды и окислы углерода в водных и газовых потоках; живое вещество; отмершие остатки организмов в почве и донных отложениях; скопления углеводородов в стратосфере.

Количественно подвижные резервы углерода оцениваются в атмосфере — $7 \cdot 10^{11}$ т, живом веществе — $7 \cdot 10^{11}$ т и литосфере (нефть и газ) — $8 \cdot 10^{11}$ т. Всего в подвижных резервах биосферы содержится $4,5 \cdot 10^{13}$ т углерода.

Все *неподвижные резервы* углерода сосредоточены в литосфере (в виде карбонатных отложений, минералов, карбонатных руд, рассеянного в породах углеродистого вещества, твердых углеродистых минералов, графита, алмазов, скоплений угля и горючих сланцев). Не менее $1 \cdot 10^{17}$ т неподвиж-

ного углерода находится в осадочной оболочке литосферы. Масса углерода, перешедшего из подвижного резерва углерода в неподвижный, почти на 3 порядка больше, чем его находится в современном подвижном резерве.

Естественный биогеохимический круговорот CO_2 протекает по схеме (рис. 6.5): биоассимиляция углерода из атмосферы, наземной или водной среды растениями → потребление органических соединений животными → окисление органических веществ до углекислого газа в процессе дыхания и разложения отходов → возврат углекислого газа в ато-, гидро- и литосферу.



Рис. 6.5. Количественные параметры круговорота углерода

Ежегодно в результате фотосинтеза на Земле образуется более 100 млрд. т органического вещества, усваивается 200 млрд. т CO_2 и выделяется примерно 145 млрд. т свободного кислорода [27]. Процесс выделения углекислого газа из атмосферы занимает период в среднем около 6,3 года.

Для сохранения относительной стабильности естественного биогеохимического круговорота углерода приход органического вещества должен компенсироваться расходом, т.е. его потреблением животными и микроорганизмами (работа которых оценивается величиной порядка $232,5 \cdot 10^9$ т сухого органического вещества).

Суммарная же биомасса животных и микроорганизмов планеты в сухом виде составляет $23 \cdot 10^9$ т. Поэтому наземные организмы должны ежегодно разрушать массу органического вещества, в 10 раз превосходящую их собственную.



Рис. 6.6. Круговорот углерода с указанием некоторых фондов и годичных переносов ($n \cdot 10^{15}$ г)

Ассимилированный в процессе фотосинтеза углерод включается в углеводы, а в процессе дыхания весь углерод, содержащийся в органических соединениях, превращается в диоксид (рис. 6.6).

Избыток CO_2 в атмосфере принимается гидросферой, а затем фиксируется в виде карбонатов в литосфере. Увеличение содержаний CO_2 в атмосфере, связанное, например, с увеличением вулканической деятельности, влечет за собой интенсивное ее отторжение вследствие накопления биомассы или карбонатов (увеличения скорости фиксации в литосфере). В наземных экосистемах в круговорот вовлекается ежегодно 12% содержащегося в атмосфере углекислого газа. Время переноса атмосферного углерода равно примерно восьми годам. В связи с этим система круговорота атмосферного углерода значительно более чувствительна к внешним воздействиям, чем у кислорода. Нарушение этого механизма может привести к быстрой деградации всей биосферы. В результате этого процесса в течение двух-трех десятков лет углеродные запасы атмосферы должны полностью поглощаться. Затем соединения углерода откладываются в виде сапропеля, гумуса, торфа, за счет которых в будущем возможно образование угля и неф-

ти. Приблизительно так должен происходить природный безотходный круговорот углерода. Однако он уже значительно нарушен техногенной деятельностью человека (рис. 6.7).

Известно, что содержание углерода в истории биосферы Земли колебалось в значительных пределах и в современный период характеризуется одним из самых низких значений (среднее его содержание в атмосфере 0,046 %). С середины XIX века процесс перехода углекислого газа в атмосферу резко ускорился за счет сжигания топлива (в год сжигается 4 млрд. т каменного и бурого угля, 3,5 млрд. т нефти и нефтепродуктов и др.).

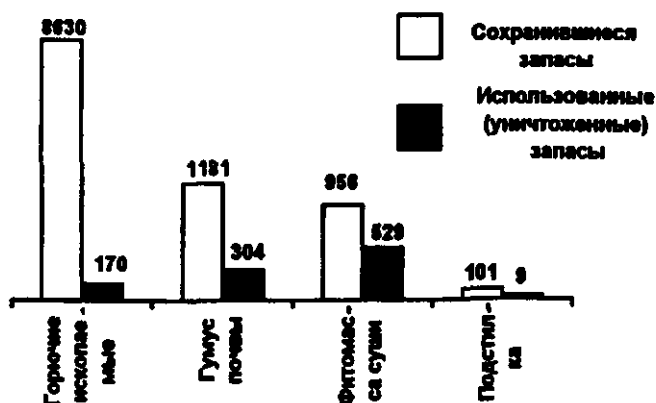


Рис. 6.7. Убыль органического углерода за историческое время (млрд. т Сорг)

Только в 1988 г. в атмосферу с территории нашей страны было выброшено 1,212 млрд. т CO_2 (18 % от мирового поступления). Основной вклад вносит сжигание топлива (%): угля — 44, газа — 28, нефти, газового конденсата и его производных — 25, попутного газа нефтяных месторождений — 0,7; сжигание дров — 1,4; производство цемента — 16; лесные пожары — 0,6.

В настоящее время баланс CO_2 по планете имеет следующие показатели ($\cdot 10^9$ т углерода):

- индустриальные выбросы +5,26;
- вырубка лесов +1,6;
- эрозия почв +1,85;

- поглощение биосферой $-4,8$;
- поглощение океаном $-1,1$;
- остаток в атмосфере $-2,81$.

Следовательно, в атмосфере Земли остается около 3% от индустриальных выбросов CO_2 . В результате удельное содержание углекислого газа в атмосфере увеличилось на 22% и продолжает постоянно расти [4]. За последнее столетие на Земле было сожжено около 100 млрд. т угля; при этом в воздух выброшено в виде аэрозоля более 3 млрд. т золы, являющейся отходами промышленности. В настоящее время сжигается около 1,5 млрд. т твердого топлива.

Преобразуя уголь в энергию, мы вынуждены расходовать в 2,5 раза больше (по массе) атмосферного кислорода. Подсчитано, что если сжечь все известные запасы угля, содержание кислорода в воздухе по массе снизится с 23,2 до 22,7% [26]. Одновременно происходит увеличение концентрации углекислого газа и других вредных выбросов. Пока в атмосфере содержится приблизительно $2 \cdot 10^{18}$ г углекислого газа. При полном сжигании запасов всех известных угольных месторождений суши его количество возрастет более чем в 10 раз.

Количество углекислоты порядка 10^{-1} % по весу и даже несколько больше в общем благоприятно для жизни (опыты в фитотронах показали, что при утроении содержания в воздухе углекислого газа почти все культурные растения растут быстрее и созревают на 7—10 дней раньше с превышением на 30—40% урожайности), тогда как среднее ее количество в тропосфере близко к $3 \cdot 10^{-2}$ % [4]. Это объясняется тем, что миллионы лет тому назад предки современных растений адаптировались к гораздо более высокому содержанию в воздухе углекислого газа и сейчас их потомки испытывают недостаток в этом основном продукте потребления и живут на голодном пайке.

Но повышение давления CO_2 в воздухе одновременно увеличило бы растворяющую деятельность угольной кислоты, содержащейся в циркулирующих водах, усилило бы перенос и перекристаллизацию карбонатных пород, вынесло

бы огромное количество CO_2 в морские бассейны, повысив в них концентрацию CaCO_3 .

Круговорот метана. Углеводороды как одна из важных форм существования углерода занимают важное место в обмене веществом и энергией между внутренними геосферами и биосферой, между природной средой и обществом. Например, метан выделяется при разработке угольных месторождений. Он также растворен в нефти и при ее извлечении на поверхность (т.е. после снятия давления) выделяется в атмосферу.

Среди колоссальной массы углерода (более 5 млрд. т/год), выбрасываемого в атмосферу техногенными источниками, углеводороды играют заметную роль. Практически вся промышленность и транспорт используют углеводородное сырье в качестве источника энергии. Поэтому, хотя и в разных количествах, эти соединения присутствуют во всех промышленных выбросах. Основная доля углеводородов в техногенных выбросах приходится на многочисленные источники добычи нефти и газа.

В 80-х годах нашего столетия добыча углеводородного сырья во всем мире достигла 4,5 млрд. т, из них около 1,5 млрд. т составляют углеводороды природного газа. Принимая величину коэффициента средних технологических потерь газа на промыслах за 0,075, получим более 0,1 млрд. т ежегодного выноса углеводородов (преимущественно метана) в атмосферу. Итак, мощность углеводородных потоков в атмосферу составляет примерно 1 млрд. т в год, что отвечает ежегодной убыли метана из атмосферы. В настоящее время в обмене метана участвуют потоки рассеяния трех генетических групп: биосферные, литосферные и техносферные. Вклад этих потоков следующий: биогенные источники 50—60 %, литосферные и техносферные — 20—25 %.

В целом процессы, в результате которых возникают углеводородные потоки в биосфере, представляют собой:

- биогенный синтез из продуктов распада биомассы;
- природную дегазацию внутренних оболочек Земли — литосферы и мантии;
- добычу и переработку горючих ископаемых, в первую очередь нефти и газа.

Таблица 6.11

Типы геохимических потоков углеводородов

| Типы потоков | Форма проявления углеводородных потоков | | | |
|--------------|---|---|--|--|
| | Нелокализованные | | Локализованные | |
| | Расcеяние | Концентрация | Расcеяние | Концентрация |
| Биосферные | Выделение УВ почвами, донными отложениями, болотами, биотой, осадочными породами | Накопление углеводородов в торфяниках, лигнитах | Выделение УВ микроорганизмами в термальных источниках | Ферментативное образование «биогаза» в скоплениях биомассы |
| Литосферные | Холодная УВ дегазация литосферы и мантии по зонам разломов и сейсмической активности | Образование газогидратов, битуминозных пород, горячих сланцев, УВ в углях | Вынос УВ продуктами грязевого и лавового вулканизма, газогидротермальной деятельности рассеяния скоплений углеводородов | Образование скоплений нефти, газа, руд в литосфере |
| Техносферные | Хронические выделения газов и жидких УВ на месторождениях горючих ископаемых, производственные и бытовые сбросы, выхлопные газы | Водный сток УВ в каскадных ландшафтно-геохимических системах концентрации | Выход нефти и газа на поверхность по трещинам, горным выработкам. Аварийные и технологические сбросы нефти, газа, сточных вод в ландшафтах | Перетоки углеводородов из залежей и другие коллекторы. Ферментативное образование «биогаза» за счет скопления органических продуктов техногенеза. Добыча и транспортировка нефти, газа, транспортировка нефтепродуктов |

Эти источники дают начало четырем видам углеводородных потоков (табл. 6.11).

Биосферные потоки возникают в результате биогеохимических процессов в твердом субстрате биосферы (почвах, донных отложениях, органогенных образованиях) и атмосфере.

Метан образуется везде, где органическое вещество разлагается в бескислородной среде. Метанообразование с разной скоростью идет во всех гидроморфных и полугидроморфных ландшафтах — болотах, пресноводных озерах, морских маршах, затопляемых лугах, поймах и др. Скорость и годовая продукция метана в почвах разных природных зон приведены в табл. 6.12.

Таблица 6.12

Скорость глобальной продукции метана в гидроморфных и полугидроморфных ландшафтах разных природных зон

| Природная зона, ландшафт | Скорость образования CH_4 , г/год·м ³ | Общая площадь ландшафтов, 10 ⁶ км ² | Годовая продукция метана, млн. т |
|---|---|---|----------------------------------|
| Тундра | 17,0 | 8,0 | 1,3—13,0 |
| Лесные ландшафты | | 44,0 | 0,4 |
| Болота, марши | 50—100 | 2,6 | 130—260 |
| Пресноводные озера | 50—100 | 2,5 | 1,25—25,0 |
| Элювиальные и транссэлювиальные ландшафты | 0,44 | 30,0 | 10,0 |
| Рисовые поля | 206 | 1,35 | 280,0 |
| <i>Всего</i> | | | ~ 510 |

Чеки рисовых полей являются постоянными поставщиками газов: за летний период с 1 га они выделяют примерно 220 кг углеродов в виде углеводородов и CO_2 .

Скорость микробиологического продуцирования метана в затопленных рисовых чеках при 30 °С изменяется для разных типов почв от 1 до 3,9 см (0,07—0,2 г) в день на 100 г сухой почвы. Минимальные скорости продуцирования CH_4 отмечены в песчаных почвах, максимальные — в перегнойных.

Для одних и тех же типов почв скорость генерации метана зависит от температуры. Скорость генерации метана уменьшается при понижении температуры инкубации с 30 до 20 °С — в 5 раз, с 30 до 10 °С — в 18 раз, а с повышением температуры с 30 до 40 °С увеличивается в 1,5 раза.

Средняя величина современной генерации метана в почвах колеблется от 200—300 до 500 млн. т в год (причем основная часть этой продукции приходится на болотные ландшафты и орошаемые рисовые поля).

Общие запасы углеводородов в почвенном покрове мира (исключая зоны арктических, южных и каменистых пустынь, ледники и снежники) оцениваются приблизительно в 2—3 млрд. т (при среднем содержании углеводородов 0,002—0,003 %). Поскольку ежегодное поступление липидов в почву составляет в среднем 10—12 % от запасов в почве, то ежегодное глобальное поступление углеводородов в почву можно оценить в 200—300 млн. т, что соответствует ежегодному выделению углеводородов живым веществом.

Литосферные потоки образуются во внутренних геосферах вне зоны биогеохимических реакций. В них источником углеводородов служат продукты дегазации мантии, углеродистые вещества земной коры, в том числе ее осадочной оболочки. Энергетический источник этих потоков — эндогенная энергия Земли. Общая величина разгрузки глубинных газов литосферы составляет $5,3 \cdot 10^8$ т, в том числе — углеводородов — $2,2 \cdot 10^8$ т; углекислого газа — $2,7 \cdot 10^8$ т; азота — $0,24 \cdot 10^8$ т; водорода — $0,06 \cdot 10^8$ т; сернистых газов — $0,02 \cdot 10^8$ т (табл. 6.13).

Приведенные данные показывают, что баланс углерода в биосфере Земли зависит от площадного вывода углеродистых газов из глубинных частей литосферы. Наиболее весомую долю при этом вносит вывод углерода с площади дна Мирового океана и молодых горных образований на суше. Доля углерода, выносимого в виде углеводородов, абсолютно преобладает над долей углерода, выносимого в форме CO_2 .

Таблица 6.13

Величина разгрузки водорода и углеродистых газов
в различных геоструктурных зонах Земли

| Геоструктурные зоны | Площадь, 10 ⁶ км | Количество газов, л·10 ⁶ т/год | | |
|---|--------------------------------|---|-----------------|----------|
| | | H ₂ | CO ₂ | Углероды |
| Альпийская складчатая область | 150,0 | 0,14 | 119,0 | 54,0 |
| Платформы и древние склад- чатые области | 350,5 | 0,20 | 14,2 | 35,3 |
| Мировой океан | 361,9 | 5,80 | 119,7 | 123,3 |
| Всего углерода, л·10 ⁶ т/год | — | — | 74,4 | 167,6 |

К этим потокам добавляются потоки, образующиеся в результате природного рассеяния нефтяных и газовых месторождений, также доходящие до поверхности Земли. Таким образом, величину 0,2 в млрд. т в год метана можно рассматривать как минимальную оценку вклада литосферы Земли в углеводородный баланс атмосферы.

Современные литосферные техногенные потоки являются результатом естественной дегазации недр, в основном осадочных горных пород и скоплений горючих ископаемых, спровоцированной геотехническими комплексами (скважинами или горными выработками). Такие потоки проявляются в виде выходов нефти и газа на земную поверхность, в шахты и штольни, в форме межпластовых перетоков флюидов на разрабатываемых месторождениях, образовании техногенных залежей углеводородов в недрах [51, 52]. Усилению потоков способствуют многочисленные искусственные каналы миграции, возникшие в результате взрывного нарушения горного массива.

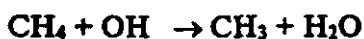
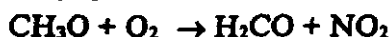
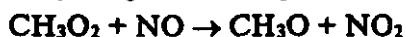
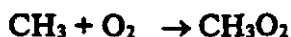
Время существования метана в атмосфере — 12 лет. Современные данные показывают, что содержание метана в атмосфере в настоящее время несколько больше $1,4 \cdot 10^{-4}$ %, что отвечает общей массе метана в атмосфере Земли (около 4 млрд. т). Высота однородной атмосферы для метана в Северном полушарии составляет 7,6—7,8 км, в Южном — 9,0—9,7 км. Вторжение потоков углеводородов в биосферу происходит на фоне географической зональности, в результате чего наблюдается разнообразие ответных реакций природных систем. Например, при низких и средних температу-

рах кислород не окисляет метан, но более энергичный трехатомный озон вступает с метаном в реакцию окисления (разрушаясь при этом). Таким образом, происходит разрушение озонового слоя планеты.

Имеются три основных источника стока метана из атмосферы Земли:

- его диссипация в верхние слои атмосферы и космическое пространство;
- поглощение почвенными микроорганизмами;
- окисление в атмосфере (в результате которого свыше 90 % общего метана выводится из атмосферы).

Деструкция метана происходит главным образом в результате следующих реакций:



Биогеохимические потоки углеводородов завершаются захоронением в донных отложениях морей и океанов. С нисходящими потоками из биогеохимического круговорота ежегодно выводится от 25 до 580 млн. т органического углерода. Углеводороды в этом углероде составляют десятые доли процента, редко — больше.

Круговорот азота. Основным резервуаром газообразного азота служит атмосфера (где газ занимает 78 % объема). Однако в отличие от кислорода и углекислого газа круговорот азота имеет ряд особенностей:

- усваивать азот из воздуха могут только отдельные виды так называемых азотфиксирующих организмов (например, сине-зеленые водоросли и симбиотические бактерии);

- являясь химически инертным, азот не принимает непосредственного участия в окислительных процессах, а только входит в состав белков и нуклеиновых кислот;
- разложение азотсодержащих веществ с выделением газообразного азота осуществляется, как правило, с помощью ряда специализированных микроорганизмов.

Среди микроорганизмов выделяют олигонитрофилы, которые за вегетационный период могут синтезировать до 80 кг/га азота, а сине-зеленые водоросли могут связать его до 200—250 кг/га. В связи с этим большая часть биогеохимических превращений азота происходит в почве, где его освоение растениями облегчается предварительным растворением (рис. 6.8). Содержание азота в тканях живых организмов составляет примерно 3%.

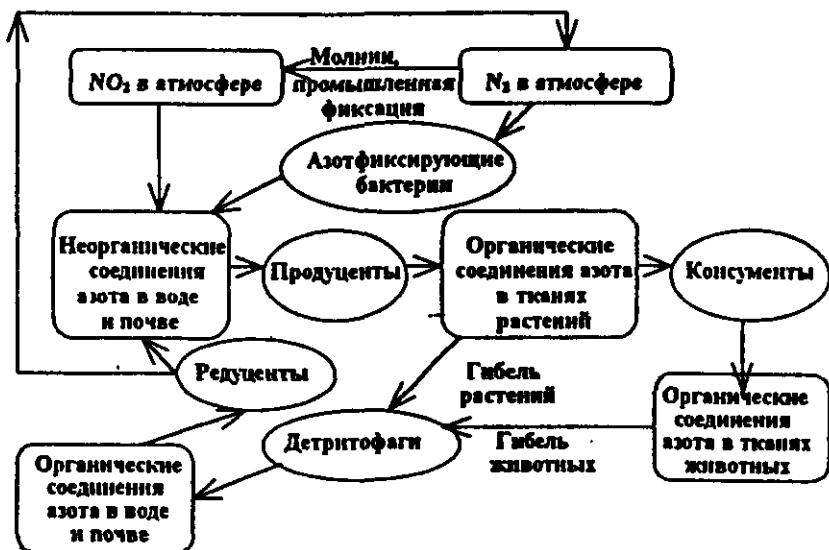
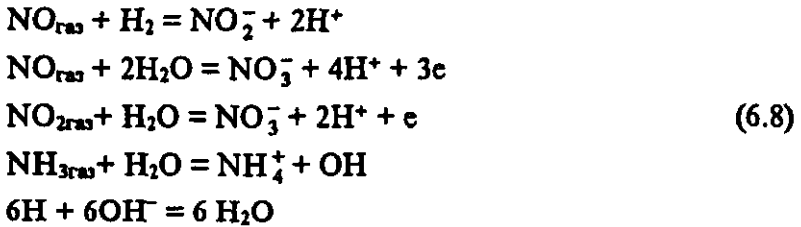


Рис. 6.8. Круговорот азота

В окружающую среду органический азот попадает в виде аминогрупп. При его недостатке в почве бактерии могут использовать азот нитратов и нитритов. В процессе денитрификации азот переводится в газообразное состояние и частично фиксируется растениями, а остальной его объем попадает в виде свободного газа в атмосферу.

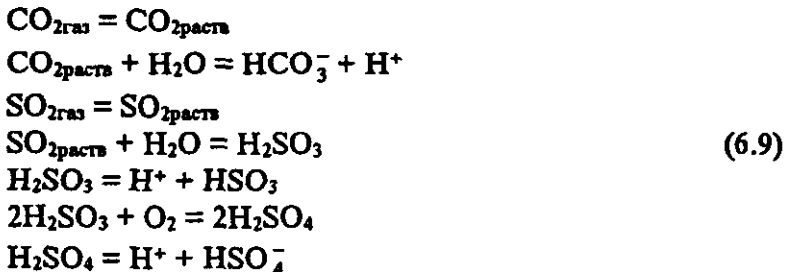
Свободная кислотность атмосферных осадков, контролируемая NO_x , может полностью нейтрализоваться аммиаком:



Несколько иначе происходит формирование залежей селитры. Селитра накапливается в высокогорных засушливых районах благодаря жизнедеятельности дробянок: цианобактерий и нитрифицирующих бактерий. Так, нитрифицирующие бактерии образуют 96 г азотной кислоты на каждый грамм построенных при этом органических веществ. Не в меньших количествах нитраты образуются и в других климатических поясах Земли (рис. 6.9).

Но в высокогорных областях и пустынях меньше потребителей неорганического азота: высших растений, лишайников и даже денитрифицирующих бактерий. Поэтому на высокогорье отложения селитры исчезают на той высоте, на которой появляются первые лишайники. В естественных условиях процессы связывания и освобождения азота уравнивают друг друга. Искусственное же внесение азота с удобрениями (достигшее 30 млн. т/год и сравнявшееся с естественным потоком азота в биосфере) нарушает это равновесие, что приводит к его избытку в некоторых почвах и водоемах.

Круговорот серы. Основным источником свободной кислотности атмосферных осадков являются CO_2 и оксиды серы, причем в числе последних преобладает диоксид серы:





Сочетание природных круговоротов атомов и техногенных выбросов формирует различное соотношение химических веществ (в частности, серы) в разные эпохи.

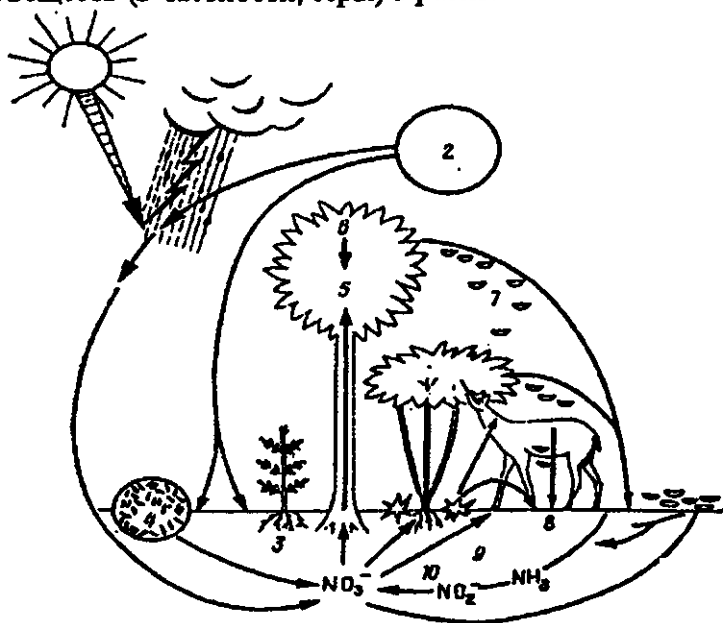


Рис. 6.9. Схема биогеохимического цикла азота:

1 — электро- и фотохимическое связывание; 2 — атмосферный азот; 3 — клубеньковые бактерии; 4 — азотфиксирующие бактерии; 5 — синтез белков; 6 — фотосинтез; 7 — опад; 8 — разложение сапротрофами; 9 — аммонификация; 10 — нитрификация

В XIX веке концентрация сульфатов в атмосферных осадках превышала содержание в них нитратов и ионов аммония как основного нейтрализатора свободной кислотности. В результате концентрация сульфатов в атмосфере повысилась. Например, на высоте 300—1300 м она достигла 27—98,6 мг/л. Облачные воды с 50-х годов стали преимущественно сульфатно-аммонийными, аммонийно-магнесьными (кальциевыми). В 1990 г. среднегодовое поступление серы с осадками на территорию Европы составляло 21 млн. т.

Круговорот фосфора. Степень вещественной замкнутости биогеохимического круговорота фосфора весьма значительна: глобально — порядка 98 %, в тайге — 99,5 %.

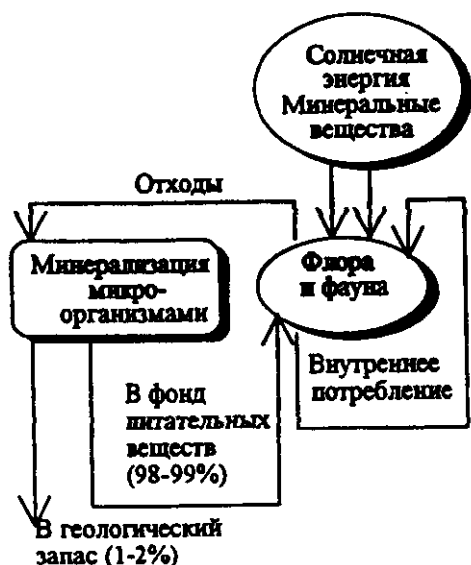


Рис. 6.10. Круговорот веществ в природе

Фосфор концентрируют многие организмы. Скелеты позвоночных содержат до 60 % фосфата кальция, а раковины некоторых брахиопод (*Lingula* и *Obolus*) — практически 100 %.

В планктоне двуокиси фосфора содержится в 1000 раз больше, чем в морской воде. Богаты фосфором также чешуя и скелеты рыб. До 50 % фосфата кальция содержат панцири раков. В морях и океанах фосфор концентрируется

организмами (главным образом планктонными), которые после отмирания опускаются на дно бассейнов. Часть фосфора из отмершей органики возвращается в придонную воду, а из нее — обратно в биогеохимический круговорот атомов [24].

В агроценозах показатель замкнутости круговорота фосфора резко падает: с 1980 по 1990 г. он снизился с 80 до 39 %.

Глобальные круговороты элементов в биосфере подразделяются на множество мелких круговоротов. Цикличность охватывает 98—99 % биогенных элементов (рис. 6.10).

План лекции

1. Раскрыть содержание понятий «миграция» и «концентрирование» химических элементов, объяснить их закономерности.

2. Описать механическую, физико-химическую, биогенную и техногенную миграцию химических элементов.

3. Объяснить механизм планетарного биогеохимического круговорота атомов.

Контрольные вопросы-задания

1. Что такое «миграция» химических элементов?
2. Чем определяются закономерности миграции химических элементов в биосфере?
3. Какие типы миграции химических элементов Вам известны?
4. Что такое «геохимический барьер», его параметры и чем он определяется?
5. Где в ландшафте может образовываться геохимический барьер?
6. Какие виды геохимических барьеров существуют?
7. Что такое «градиент» геохимического барьера?
8. Дайте определение контрастности геохимического барьера.
9. Дайте объяснение механической миграции элементов.
10. В каком состоянии может осуществляться техногенная миграция химических элементов?
11. При каких условиях происходит механическая миграция элементов?
12. Чем определяется механическая миграция в водной среде?
13. К чему приводит диспергирование минеральных частиц?
14. Что характеризует интенсивность механического стока?
15. Что такое «химическая денудация»?
16. Объясните причины конвективной миграции элементов в океане.
17. Чем преимущественно обусловлен механизм океанических течений?
18. Какие уровни следует выделять в атмосфере при переносе вещества?
19. Дайте определение физико-химической миграции химических элементов.
20. Какие ионы определяют геохимическую обстановку вод?
21. Каким общим свойством определяется геохимическое поведение элементов?
22. Дайте определение потенциала ионизации элементов и объясните его смысл.
23. Что такое «изоморфизм» элементов?
24. Сформулируйте основное правило изоморфизма химических элементов.
25. От чего зависит катионо- и анионогенность химических элементов?

26. Дайте определение «ионному потенциалу».
27. Что собой представляют «свободные» радикалы?
28. Дайте определение процессу диффузии веществ.
29. Какие воды известны в породах?
30. Для чего используется коэффициент водной миграции элементов и чему он равен?
31. Для чего выделяют ряды миграции элементов?
32. О чем можно судить по величине E_h вод?
33. Что такое «растворенное органическое вещество», где и как оно образуется в биосфере?
34. По какой реакции растения взаимодействуют с атмосферой и солнечным светом и как это влияет на ее состав?
35. Чем определяется биогенная миграция химических элементов?
36. Дайте определение биофильности элементов?
37. Что такое коэффициент биологического поглощения?
38. По каким условиям подразделяется миграция химических элементов в биосфере?
39. Дайте определение биогеохимической активности и объясните ее смысл.
40. Что является аккумулятором солнечной энергии в биосфере?
41. В каких условиях происходит передача накопленной энергии от сульфидов в биосферу? Назовите формы передачи этой энергии.
42. Чем определяется поведение химических элементов в почвах, корах выветривания, литосфере в целом?
43. Охарактеризуйте миграцию элементов в корах выветривания кислого и карбонатного классов.
44. Дайте понятие циклических элементов.
45. Дайте определение техногенезу.
46. Объясните смысл понятия «техногенная» миграция.
47. Что такое «технофильность» элементов?
48. В чем заключаются различия локальной, региональной и планетарной миграции химических элементов?
49. Перечислите основные источники круговорота атомов в биосфере.
50. Чем различаются круговорот воды и биогеохимический круговорот атомов?

Глава 7

Козволюция биосферы и регулируемой техносферы

7.1. История биосфероохранных разработок

7.2. Современное восприятие биосферы
как сложной системы

7.3. Естественная эволюция биосферы

7.4. Биосфероохранные технологии
будущего

7.5. Роль горнопромышленного
комплекса в регулируемой
коэволюции биосферы Земли

7.6. Самоорганизация природных
геохимических ландшафтов

План лекции

Контрольные вопросы-
задания

Мудрость состоит в том, чтобы... прислушиваясь к природе, поступать с ней сообразно.

Гераклит

7.1

История биосфероохранных разработок

Основы рационального взаимодействия с биосферой закладывались еще в античный период [17]. Марк Порций Катон (234—149 гг. до нашей эры) в книге «Земледелие» привел классификацию пахотных почв Древнего Рима и рассмотрел возможности улучшения их состояния (путем внесения органических удобрений и посева бобовых культур). Были предприняты также попытки улучшить прилегающий к городам ландшафт с помощью складирования различных отходов. Например, в Древнем Риме твердыми отбросами укрепляли (с утрамбовкой мусора) берега Тибра. В результате здесь появился холм Коллина-ди-Теста (Холм глиняных горшков), который порос в настоящее время деревьями и кустарниками.

Первые письменные законодательные акты по охране биосферы (в современном понимании этой оболочки) в России датируются X—XII вв. Так, уже в «Русской правде» Ярослава Мудрого ограничивалась добыча зверей и птиц. В XIV—XVII вв. по южной границе Русского государства учреждались «засеки» — заповедные леса военного назначения. В «Книге, глаголемой Большой чертеж» (начало XVII в.) уже было дано описание географических условий Русского государства.

К этому времени в стране стали учитывать смытые почвы, овраги, разбитые пески и рекомендовались первые разрозненные мероприятия по борьбе с почвенной эрозией. Примерно в это же время на севере Италии с целью защиты земель от наводнения осуществляли целенаправленное регулирование стока рек.

Общегосударственные мероприятия по охране биосферы были предусмотрены и указами Петра I. Они включали охрану лесов по берегам рек в 20—50-верстной полосе, охрану чистоты воды в Неве и некоторых других реках, каналах и гаванях. Русским географическим обществом в 1845 г. публиковались статьи, в которых поднимались вопросы биосфероохранного плана.

В XIX веке два крупнейших североамериканских геолога Д. Дана и Д. Ле-Конт пришли к выводу о необходимости особого подхода к изучению этапа истории Земли, характеризующегося появлением и развитием человеческого общества и получившего название **антропогенной эры**. В дальнейших исследованиях американский географ Г. Марш установил, что деятельность человека по отношению к органическому миру обнаруживает стремление изменить первоначальное равновесие между различными формами животной и растительной жизни, размножая одни и уменьшая (или даже совершенно истребляя) другие. Ученый особо выделял огромный преобразующий биосферу эффект процесса антропогенного облесения, влияющий на изменение исходных ландшафтов.

А.И. Воейков в работах 90-х годов рассмотрел ряд способов целенаправленного использования природных ландшафтов и приемов по их преобразованию. К главному он относил необходимость сохранения экологических функций леса, так как облесение территории ведет к резкому уменьшению атмосферных осадков. Он также стремился к широкому внедрению лесомелиорации в засушливых районах России, к использованию на орошаемых полях в качестве удобрений плодородных илистых речных наносов. Однако серьезной ошибкой этого ученого был необоснованный призыв к максимальному использованию стока рек Амударьи и Сырдарьи, реализация которого привела впоследствии к гибели Аральского моря.

В конце XIX в. на пахотных угодьях России, особенно в черноземной полосе, угрожающий размах приобрели плоскостная и овражная эрозии, а в засушливых районах — ускоренная дефляция. Реакцией на сильную засуху и черные бури, проявившиеся в России в 1891 г., стала разработка В.В. Докучаевым комплекса почвоохранных мер.

Важнейшие положения концепции взаимодействия человека с биосферой в планетарном масштабе были разработаны в первой половине XX века. Ее авторами были крупнейший ученый современности В.И. Вернадский, его ученик А.Е. Ферсман и другие последователи.

В 1912 г. в журнале «Природа» А.Е. Ферсман впервые обращается к проблеме геохимического воздействия человека на природные равновесия. Горы пустой породы вблизи шахт, долины, засыпанные шлаками, тысячи фабричных труб, выбрасывающих в атмосферу угольную кислоту, — все это, изученное им в промышленных районах Германии и Бельгии, дало импульс для развития нового научного направления в области исследования биосферы — геохимии техногенеза. Под техногенезом подразумевается совокупность химических и технических процессов, производимых деятельностью человека и приводящих к перераспределению химических масс земной коры. Техногенез есть результат геохимического воздействия промышленности на окружающую среду [56]. В работах 30-х годов А.Е. Ферсман указывал на огромную силу следующих процессов, преобразующих биосферу:

- накопление громадных масс промышленных отходов;
- рассеивание различных антропогенных продуктов (в первую очередь металлов);
- загрязнение воздуха сернистым ангидридом и углекислым газом;
- вынос биогенных элементов из почвы с урожаем;
- вспашка как фактор взаимодействия почвенного материала с газами атмосферы;
- влияние ирригации на геохимическое изменение грунтов.

А.Е. Ферсман подчеркивал, что хозяйственная и промышленная деятельность человека по масштабу и значению сделалась сравнимой с процессами самой природы.

Вопросы глобального изменения литосферы человеком подробно изучались и английским ученым Р. Шерлоком. Он охарактеризовал приведенные ниже процессы:

- антропогенную денудацию и аккумуляцию (возникающие при горных разработках);
- различные виды нарушения режима и истощения подземных вод;
- создание неизвестных в природе горных пород (кирпича, стекла, фарфора, шлака и т.п.);
- техногенное изменение деятельности рек, подпруживание озер и образование других видов водохранилищ;
- оседание местности при понижении горизонтов подземных вод или подработке территории;
- усиление или ослабление морской абразии.

Р. Шерлок указал на возможность антропогенного изменения климата планеты.

В 1967 г. А.В. Сидоренко в книге «Человек. Техника. Земля» указал, что в середине 60-х годов воздействие человека на биосферу стало чрезвычайно мощным. Извлекая из недр Земли колоссальные объемы руды, угля, воды, нефти и газа, проникая на большие глубины, интенсивно осваивая тундру, тайгу, пустыни, ледниковые области и горы, изменяя течение рек, создавая искусственные водоемы, осушая огромные заболоченные пространства, человек нарушает сложившиеся природные равновесия, что в ряде случаев приводит к необратимым последствиям. Этот ученый внес принцип дифференциации в изучение биосферы. Хорошо зная процессы, происходящие в аридных областях и районах Крайнего Севера, он установил высокую степень их уязвимости при антропогенной нагрузке.

В современных условиях еще нельзя говорить о сколь-нибудь удовлетворительном управлении биосферой, учитывая быстрое ухудшение ее состояния во всем мире (табл. 7.1).

Таблица 7.1

Соотношение антропогенных и природных компонентов биосферы

| Биосферный компонент и его характеристика | Производство, изменение, выброс или размер использования человеком | |
|---|---|--|
| | в абсолютных числах | от природного количества |
| 1 | 2 | 3 |
| <i>Атмосфера</i> | | |
| Кислород (потребление) | $2 \cdot 10^{10}$ т/год | ~ в 1000 раз больше прихода ($3 \cdot 10^7$ т/год). От 12 до 23 вы- рабатываемого биосферой |
| Озон (разрушение) | — | К 2000 г. — до 8—16, по ряду других источников — не более 4 |
| Углекислый газ (увеличение) | $7,0 \cdot 10^{10}$ т/год | С XIX в. — на 18, всего на 25 |
| Азот (увеличение) | — | На 110 |
| Сернистый ангидрид | $1,5 \cdot 10^8$ т/год | 75 |
| Оксид азота | $5,0 \cdot 10^7$ т/год | 7,1 |
| Другие соединения азота | $1,5 \cdot 10^7$ т/год | 1,0 |
| Оксид углерода | $3,0 \cdot 10^6$ т/год | 100 |
| Взвешенные в воздухе вещества (аэрозоли) | $(960—2615) \cdot 10^{10}$ т/год | 100 |
| <i>Гидросфера</i> | | |
| Безвозвратное водопотребление | — | 9 |
| Безвозвратный сток с суши в океан | 430—570 км ³ /год | — |
| Загрязнение нефтью | $21 \cdot 10^6$ т/год | В 3560 раз |
| Загрязнение тяжелыми металлами | — | В среднем с XIX в. в 10—15 раз |
| <i>Литосфера</i> | | |
| Горная порода (извлечение из недр) | 10^{11} т/год | Более 300 от объема твердых веществ, вовлекаемых в био- тический круговорот суши |
| Скорость разрушения поч- венного покрова (ускорение) | — | От 4—6 до 12 000 раз |
| Рост площади пустынь за исторический период | 10 065 тыс. км ² | 6,7 |
| <i>Растения</i> | | |
| Сведено лесов мира (изменение лесистости) | с 75 до 26—27 % | Около 70 |
| Под угрозой исчезновения | $(25—30) \cdot 10^3$ видов | 10—15 |

| 1 | 2 | 3 |
|---|-----------------------------------|---|
| | <i>Животные</i> | |
| Истреблено | 226—400 видов | 0,02—0,04 |
| Добывается рыбы и морепродуктов | Около $60 \cdot 10^6$ т | 70 от прироста |
| | <i>Биота в целом</i> | |
| Генетическое разнообразие живого вещества (снижение) | Более чем в 100 раз | 90 |
| Биомасса (снижение с 1850 г.) | — | 7—25 |
| Предстоящее снижение до 2000 г. (по органич. углероду) | $510 \cdot 10^9$ т | 27—28 |
| Продуктивность на суше | — | 20 |
| Продуктивность в океане | — | 30 |
| | <i>Энергетическое загрязнение</i> | |
| Прямое производство энергии ($\sim 10^{10}$ т условного топлива) | $8 \cdot 10^{12}$ т/год | $\sim 0,02$ от энергии Солнца, приходящей к поверхности Земли, до 25 от энергии фотосинтеза |
| Антропогенное запыление | До $60 \cdot 10^{12}$ Вт | Больше энергии фотосинтеза |
| Выжигание растительности | $3 \cdot 10^{12}$ Вт | — |
| Ирригация и испарение с поверхности водохранилищ | $150 \cdot 10^{12}$ Вт | — |

Например, до сих пор отсутствует однозначная оценка опасности влияния выбросов различных загрязнителей на свойства атмосферы, на изменение направленности протекания процессов взаимодействия и разрушения основных жизнеобеспечивающих газообразных компонентов, в том числе — на объемы потребления и образования кислорода и т. д. А пока имеющаяся концепция охраны природы лишь несколько ослабляет процесс общей деградации биосферы.

7.2

Современное восприятие биосферы как сложной системы

Сегодня и в дальнейшем не следует ожидать плавного, устойчивого пути развития человечества и биосферы, так как благодаря имеющемуся росту народонаселения Земли возрастает и общая неустойчивость их взаимодействия.

Проблема эволюционных кризисов носит общечеловеческий характер.

Эволюционные кризисы и нестабильность угрожают не только России, но и всему миру. Перед лицом глобальных опасностей (падение астероидов, экологическая катастрофа, разгул терроризма, ядерный катаклизм) наша планета превращается в единое взаимосвязанное целое.

Эволюционные кризисы в определенной мере неизбежны [43]. Ибо режимы с обострением (например, сверхбыстрое развитие, когда определенные характерные величины неограниченно возрастают за конечное время) ведут к нестабильности, неустойчивости и угрозе вероятностного распада сложной структуры вблизи возникающего момента обострения.

Имеющийся рост народонаселения нашей планеты во многом определяет характер современной стадии взаимодействия человечества с биосферой: ускорение мировых процессов, возрастающую нестабильность и множество возможных глобальных катастроф.

Изучение этих проблем возможно на базе *синергетической* методологии [37, 43, 58], в основе которой лежит представление о широком спектре путей эволюции сложных систем (к которым относится и биосфера). Это означает неоднозначность будущего, существования моментов неустойчивости, связанных с выбором путей дальнейшего развития, и особую роль человека в нелинейных ситуациях разветвления путей и выбора желаемого, благоприятного пути развития.

Важно осознать, что у современной биосферы (как у сложной открытой и нелинейной системы) имеется не один, единственный, а несколько альтернативных путей эволюции. *Пути эволюции* определяются спектрами структур-аттракторов взаимодействия человека с биосферой. Причем изменения человеческого общества приводят к перестройке возможных путей в будущее.

Необходимо понять различные тенденции эволюции, а также неоднозначность прохода в будущее. Перспективы состояния сложных биосферных систем предсказуемы: существуют спектры потенциальных форм будущей организации, поле возможных путей в будущее. Направлений эволюции

может быть много, но количество их не бесконечно. Спектр структур-аттракторов не является сплошным.

Будущие формы биосферной организации открыты в виде всера предопределенных возможностей. Но все же проходы в будущее неоднозначны и узки, хотя существуют определенные «коридоры» эволюции. Отсюда появляется принципиальная возможность решения задачи *управляемой эволюции* биосферы, т.е. оберегаемого и самоподдерживающегося развития. Встает также задача и выбора гармоничного пути в будущее.

Природное равновесие между сообществами животных и растений и средой их обитания является довольно неустойчивым, так как может нарушаться под влиянием климатических, геоморфологических и геологических условий, с одной стороны, и под воздействием эволюционных изменений органической жизни и миграции видов — с другой.

Устойчивость биосферы зависит от многих факторов (рис. 7.1), суть которых заключается в следующем:

- Биосфера привлекает внешние источники энергии (солнечную и земных недр) для упорядочения своей организации, эффективного использования вещества и свободной энергии, не вызывая самозагрязнения. Постоянное применение определенного количества энергии и ее рассеивание в виде тепла обусловили исходный, эволюционно сложившийся баланс биосферы. В этом смысле в биосфере осуществляется принцип «энергетической проводимости», согласно которому поток энергии, проходя через трофические уровни биоценоза, постоянно гасится.
- Биосфера использует вещества в основном в форме круговоротов (см. разд. 6.6). Природные биогеохимические циклы элементов отработаны эволюционно и в отсутствие техногенной составляющей не приводят к накоплению вредных отходов.
- В биосфере существует огромное количество видов и биологических сообществ. Конкурентные отношения видов способствуют установлению между ними равновесия. При этом (до появления человека) отсутствуют доминирующие виды с чрезмерной численностью. Видовое

разнообразие — это фактор повышения устойчивости биосферы к влиянию.

- Практически все закономерности, присущие живому веществу, имеют адаптивное значение. Биосистемы вынуждены приспосабливаться к непрерывно изменяющимся условиям жизни.

- Саморегуляция зависит от совокупности абиотических и биотических факторов. Каждая популяция, взаимодействуя с природой как целостная система, вырабатывает свои формы поведения, способные смягчить последствия кризиса для популяции в



Рис. 7.1. Факторы устойчивости биосферы

целом. Биологическая система развивается согласно *правилу популяционного максимума*: численность естественных популяций ограничена объемом пищевых ресурсов и условиями размножения, а также периодом ускорения роста популяции.

Рассматривая процессы взаимодействия, к примеру устойчивость биосферы против техногенных воздействий (рис. 7.2), необходимо учитывать то, что важнейшим фактором развития биосферы является состояние горных пород, образующих литогенную основу ландшафтов, в том числе и почв.

Еще одним фактором, определяющим устойчивость биосферы, является *движение воздушных масс*. С этой точки зрения наиболее благоприятны районы биосферы с *муссонным климатом*, где обеспечиваются оптимальные условия рассеивания выбрасываемых загрязнений. Наименее благоприятны районы с *континентальным климатом*, для которых характерны господство антициклонов и температурные инверсии. Спокойное состояние воздушных масс в сочетании с температурными инверсиями, типичными для межгорных впадин,

приводит к снижению активности циркуляции атмосферы и способствует накоплению в воздухе вредных компонентов выбросов.

За миллионы лет эволюции растительного и животного мира под воздействием солнечной радиации на Земле образовалась сложная саморегулирующаяся система взаимодействия различных компонентов биосферы.

Индустриальное воздействие на биосферу вызывает ответную ее реакцию, энергия которой зависит от степени вмешательства человека в естественно протекающие природные процессы.

Живые организмы материально и энергетически связаны с неорганической средой других сфер. Например, растения существуют только за счет поступления в них энергии, углекислого газа, воды, кислорода и минеральных солей. Возврат биогенных элементов (в течение жизни и смерти организмов) образует круговорот одновременно в органической и неорганической средах. До вмешательства в биосферу промышленных или сельскохозяйственных технологий круговорот атомов осуществлялся гармонично, подчиняясь единым энергетическим законам, управляясь совместным действием биологических и геохимических факторов.

Выбросы в атмосферу активных газов-загрязнителей (хлора, фтора и их соединений, двуокиси серы, окиси углерода, углеводородов и др.) из природных источников при активном участии солнечной радиации, растительности суши и фитопланктона Мирового океана тысячелетиями не приводили к нарушению содержания в атмосфере важных для жизнедеятельности биосферы газов — O_2 , O_3 в защитном слое и т. п. В этих условиях эпизодические выбросы опасных для окружающей среды газов (даже при крупных и катастрофических вулканических извержениях) разрушались в нижних и верхних слоях атмосферы и усваивались при биосферных процессах.

Процессы, возникающие под *техногенным* воздействием, отличаются от природных в качественном и количественном отношении. Качественные отличия заключаются в синтезе чуждых биосфере соединений (кирпича, фарфора, пластмасс, бензина, новых элементов, изотопов и др.). По характеру и

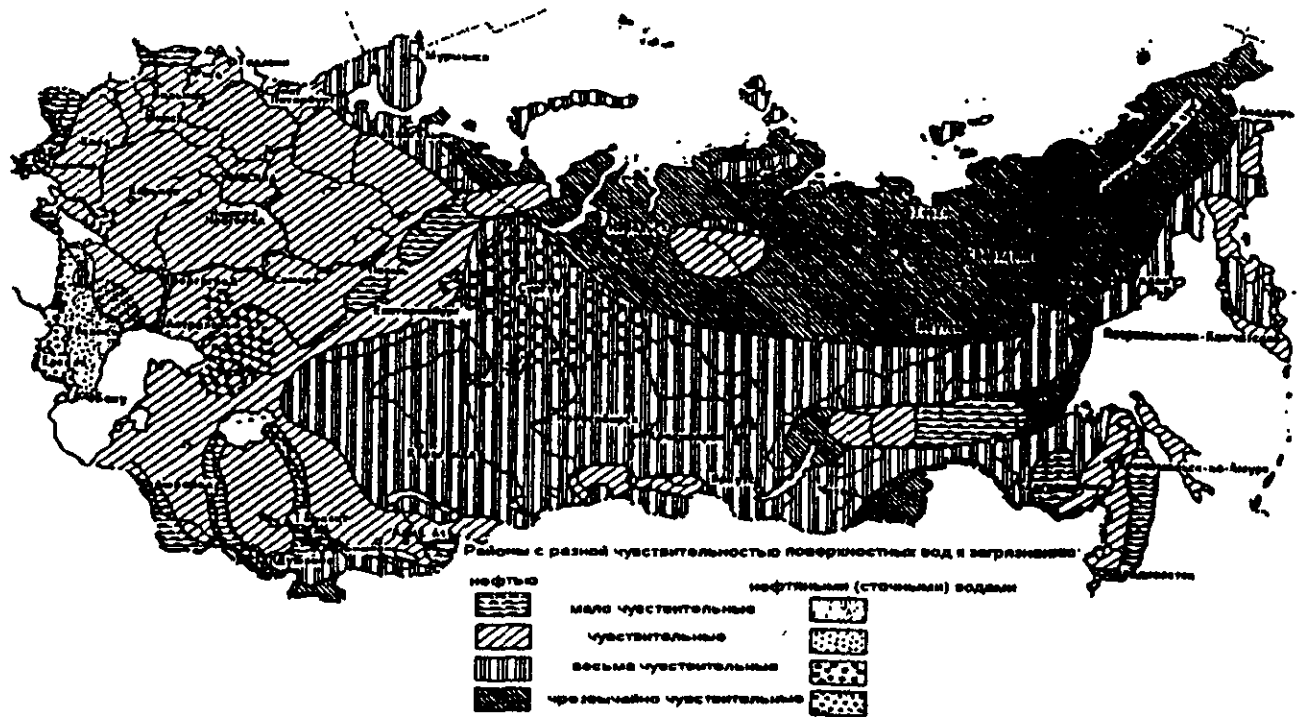


Рис. 7.2. Чувствительность поверхностных вод к загрязнению нефтью и нефтяными сточными водами (по В. Батояну)

направленности антропогенные воздействия могут не соответствовать природным условиям территории (возникновение местных техногенных землетрясений, вызванных добычей нефти, строительством искусственных водоемов, ведением крупных массовых взрывов в ранее несейсмической зоне и т.д.) [1]. Количественные особенности заключаются в более значительной удельной скорости и интенсивности поступления элементов (для большинства источников).

Сегодня из-за необратимого изменения экологического состояния на планете образовались критические очаги, в которых нарушено биогеохимическое и энергетическое равновесие между исходными компонентами биосферы. Сложившиеся на протяжении миллионов лет эволюции важные природные комплексы — биологически и химически чистые воздух и вода, лесные массивы, водоросли и планктон Мирового океана, животный мир — в регионах с развитой промышленностью (особенно горнодобывающей, металлургической, химической, ядерной) и соответственно с высокой плотностью населения оказались в значительной степени разрушенными.

7.3

Естественная эволюция биосферы

Согласно учению Чарльза Дарвина эволюция животного мира и растений определяется естественным отбором. Он устраняет одни генетические комбинации и способствует развитию других, более ценных с точки зрения выживания вида, т.е. эволюция в живой природе идет *по пути приспособляемости организмов* к среде обитания (к геохимическим условиям и определенным концентрациям химических элементов). В результате естественного отбора появляются формы, устойчивые к экстремальным факторам. Так, за период развития жизни на Земле микроорганизмы приспособились к самым разным геохимическим обстановкам. Они живут и в горячих источниках при температуре +85 °С, и в почвах с температурой около 0 °С, в сильнокислых (5—10 %-ный раствор H₂SO₄) и сильнощелочных (рН = 11—12) водах.

Объяснение эволюции живого вещества только лишь результатом естественного отбора встречает ряд трудностей. Так, например, растения, являющиеся по сравнению с животными более пассивными организмами, должны были бы развиваться сравнительно слабо. На самом же деле цветковые растения (наиболее молодые и высокоразвитые) насчитывают гораздо большее число видов, чем млекопитающие.

Недавно была установлена такая своеобразная направленность эволюции высших растений, как интенсификация смены органов в ходе индивидуального развития организма [24]. Так, у древних древовидных плаунов смене была подвержена только часть листьев. У более развитых в эволюционном отношении растений — папоротникообразных — опадают также только листья, но у них в единицу времени по отношению к массе всего тела сменяется большая часть, чем у лепидодендронов. У хвойных деревьев кроме хвои периодически сменяются кора и ветви. Наконец, многие травы, являясь однолетними, каждый год меняют до 90 % своего тела. Причем от представителей древних видов к более молодым возрастает зольность растений.

Согласно учению В.И. Вернадского преимущества в ходе эволюции получают те организмы, которые приобрели возможность усваивать новые формы энергии или способны использовать химическую энергию, запасенную другими организмами. Другими словами, в ходе биологической эволюции увеличивается КПД биосферы в целом. Следовательно, эволюция биосферы должна идти в направлении увеличения скорости обмена веществом между организмами и внутри их [24].

Устойчивость микроорганизмов к высоким концентрациям химических элементов может приобретать наследственный характер. В результате существует общая тенденция накопления рассеянных элементов простейшими организмами. Беспокойство вызывает и накопление различных микроэлементов в биосфере вследствие человеческой деятельности: содержание многих химических элементов в воздухе, воде, пище лишь в интервале жизни одного поколения людей увеличилось во много раз. Это является беспрецедентным случаем в истории развития биосферы. Поэтому при изучении влияния горнопромышленного комплекса на биосферу речь дол-

жна идти преимущественно об изменениях исходной геохимии среды.

Несоответствие между наличием и доступностью химических элементов в земной коре, с одной стороны, и потребностями живых организмов, с другой, породило проблему дефицита некоторых элементов в биосфере и привело к ограничению живого вещества на Земле. Единственным выходом из этого положения стало использование химических элементов по типу круговоротов. В настоящее время элементы земной коры подвержены глобальным и локальным круговоротам, причем кроме солнечной энергии и тепла недр движущей силой являются сами живые организмы (прежде всего создавая газовую оболочку определенного, в целом окислительного, состава).

7.4

Биосфероохранные технологии будущего

С развитием воздействия на биосферу происходит ее трансформация и переход в новое состояние. Техносфера — часть биосферы, преобразованная людьми с помощью прямого или косвенного воздействия технических средств в целях наилучшего соответствия социально-экономическим потребностям человечества. В будущем практически вся биосфера будет охвачена и преобразована техносферой, поэтому очень важен правильный выбор основы развития любых новых технологий.

Во многих задачах, связанных с устойчивым развитием человеческого общества и биосферы, ключевое значение имеет прогноз. Еще недавно ученые, подобно математику Лапласу, считали, что, обладая совершенной вычислительной техникой, можно неограниченно далеко заглянуть как в будущее, так и в прошлое. Нелинейная динамика показала, что это не так, что даже в сравнительно простых системах есть свои пределы предсказуемости, горизонт прогноза, заглянуть за который принципиально не удастся.

Оказалось, что есть области, где горизонт предсказуемости резко сокращен и пути развития связаны с большим рис-

ком (рис. 7.3). Такие области получили название «джокеры». Но наряду с областями джокеров (в них прогнозировать весьма трудно) существуют и «русла», где ход эволюционного процесса предопределен и сложные объекты могут быть описаны достаточно просто.

На поле эволюции биосферы важное значение имеют точки бифуркации, в которых происходит кардинальное изменение курса развития даже под влиянием чрезвычайно ничтожных возмущений. Это объясняется тем, что система накапливает в себе отклонения (ими могут быть и загрязнения токсичными элементами) до определенного предела, по достижении которого она переходит в весьма неустойчивое состояние. И достаточно малого отклонения, чтобы система перешла на новую, более устойчивую в данном состоянии позицию.

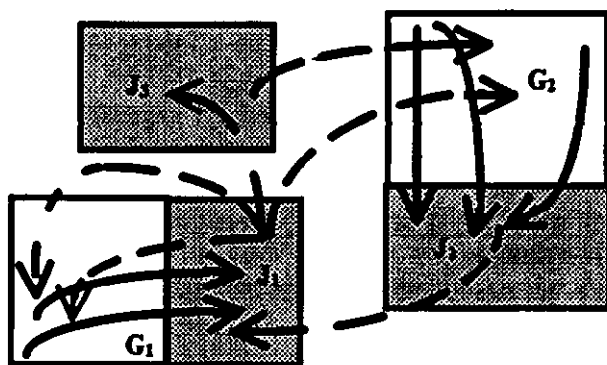


Рис. 7.3. Схема представления сложной динамики как комбинации русел (G_1, G_2) и джокеров (J_1, J_2, J_3):

Черные стрелки показывают детерминированное описание динамики, пунктирные стрелки — действие джокеров: когда траектория падает в область джокера (заштрихованную), она может с некоторой вероятностью направляться в некоторую точку русла или к другому джокеру

Данные теоретические построения имеют важное прикладное значение. Так, решение проблемы бытовых отходов имеет несколько основных путей реализации: захоронение, утилизацию и сжигание. И правильный выбор одного из них будет определять и дальнейшую экологическую ситуацию.

Уже созданы установки для переработки в различные нефтепродукты городского мусора и бумажных отходов. Для этого смоченные мусор и макулатуру в течение 20 мин обрабатывают окисью углерода и горячим паром при температуре 370 °С. В результате 90 % органического вещества превращаются в воду и близкий к нефти продукт. Из каждой тонны мусора по такой технологии можно получить примерно 160 л нефти. Сжигание отходов также эффективно для получения энергии. Мусор городских свалок по теплотворной способности (2,9 ккал/кг) близок к бурому углю. В США использование сжигаемых отходов даст экономию 54,7 млн. т угля или 29 млн. т нефти [26]. Но окончательно не решена проблема возникающих при этом токсичных соединений и прежде всего диоксинов.

С учетом концепции устойчивого развития цивилизации в решении проблемы отходов намечены следующие принципиальные пути. *Первый* — основан на глубокой переработке (разложении) отходов и включении их в природные или искусственные биогеохимические циклы. В настоящее время человек способствует синтезу огромного количества новых соединений, накапливаемых в виде отходов. Вследствие этого биосфера самостоятельно уже не способна осуществлять разложение и ассимиляцию этих веществ в природных биогеохимических циклах.

Проблема ассимиляции отходов в природных и искусственных биогеохимических циклах — дело будущего, а на современном этапе чаще всего рассматривается *второй* путь утилизации отходов: их дифференциация и безопасное захоронение в глубоких горизонтах литосферы.

В настоящее время в поглощающие горизонты удаляются уже сточные воды нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности, а также жидкие отходы повышенной токсичности. Ежегодно в недра Земли закачивается около 120 тыс. м³ рассолов и 1,8 млн. м³ засоленных сточных вод, образующихся при добыче соли. Только в России ежегодно в подземные хранилища закачивают 50—55 тыс. м³ жидких промышленных отходов предприятий химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, металлургической,

электронной, пищевой, ураноперерабатывающей, целлюлозно-бумажной и других отраслей народного хозяйства.

В настоящее время относительно безопасным считается подземное захоронение (рис. 7.4) жидких промышленных отходов в глубокие водоносные горизонты платформенных артезианских бассейнов [14]. Такие горизонты содержат, как правило, высокоминерализованные и не представляющие практической ценности подземные воды, а также имеют надежную природную изоляцию от поверхности Земли, поверхностных и пресных подземных вод верхней части литосферы (используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения). Исключительное внимание при этом должно уделяться поиску геодинамически устойчивых участков, имеющих надежные барьерные свойства, пригодные для использования в качестве долговременных хранилищ отходов.

В качестве негативных побочных последствий такой технологии возникают техногенные землетрясения. В США в зоне Роки-Маунтин в 1960 г. была пробурена скважина глубиной 4 км, которая должна была быть использована для сброса ядовитых отходов арсенала химической службы. Через месяц после начала закачки и впервые за 80 лет в прилегающем районе г. Денвер произошло землетрясение.

За последующие 5 лет, в течение которых в скважину было закачено около 625 млн. л токсичных стоков, зарегистрировали уже 1500 землетрясений [26].

Все же как один из безопасных для биосферы вариантов может быть принята технология подземного захоронения радионуклидов (см. рис. 7.4). За последние 30 лет на трех предприятиях ядерной отрасли России (Сибирский химический комбинат — г. Томск, Горно-химический комбинат — г. Красноярск и НИИ ядерных реакторов — г. Димитровград) в глубокозалегающие пласты-коллекторы, водоносные горизонты (характеризующиеся замедленным водообменом) было удалено примерно 46 млн. м³ отходов, содержащих 80 % радионуклидов — продуктов деления урана (или 2 млрд. Ки) [23]. Закачка каждой новой порции отходов сопровождается ростом температуры до 100 °С и более, что приводит к активному физико-химическому взаимодействию: отложению

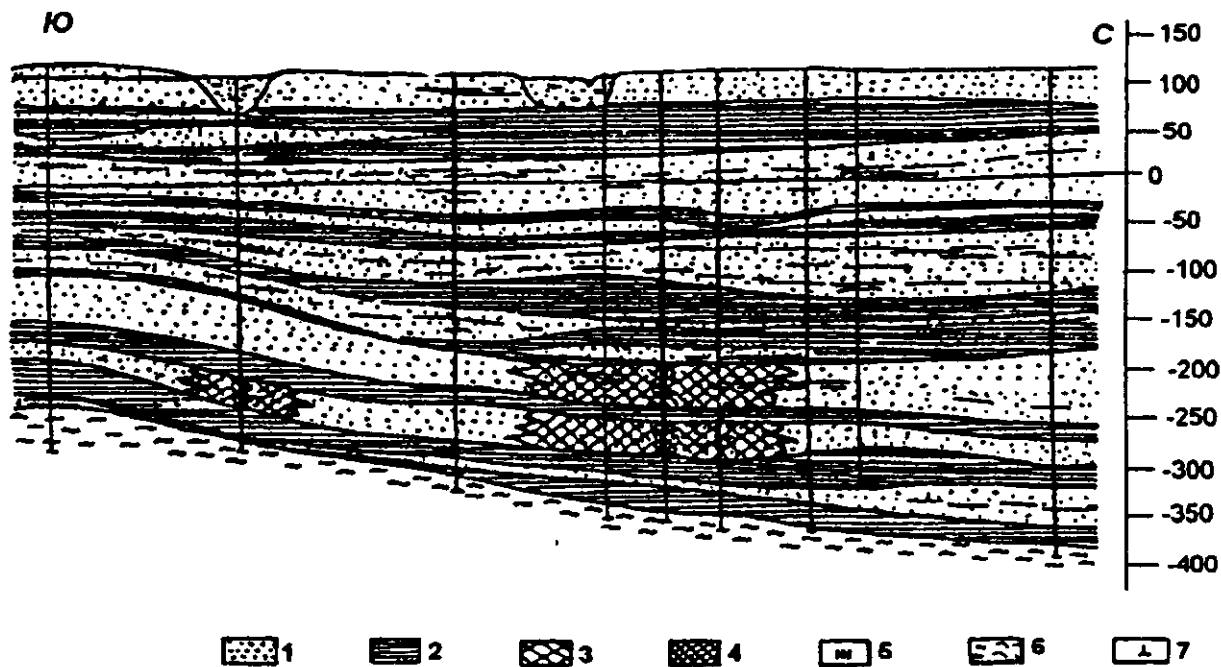


Рис. 7.4. Схематический разрез участка полигона захоронения РАО Сибирского химического комбината, г. Томск: *масштабы:* горизонтальный 1:50 000, вертикальный 1:5000; 1 — проницаемые песчано-глинистые породы; 2 — слабопроницаемые глинистые породы; 3 — область распространения отходов; 4 — участки максимальной концентрации радионуклидов; 5 — условные обозначения горизонтов; 6 — скальные породы палеозойского фундамента; 7 — скважины

новообразованных минералов, сорбции радионуклидов и преобразованию исходных минеральных фаз.

При этом учитывали, что в результате естественного радиоактивного распада содержание радионуклидов уменьшается за время, равное 10 периодам полураспада, в 1000 раз, 20 периодам полураспада, — в миллион раз. Применение данной технологии ограничивается областью мало- и среднеживущих радионуклидов, к тому же происходит загрязнение верхних слоев земной коры (литосферы).

Зачастую образуемые в атомной промышленности жидкие отходы подвергаются долговременному хранению в охлаждаемых емкостях различной конструкции и уровня надежности. Но с учетом того что любая твердая малорастворимая форма отходов намного безопаснее жидкой, длительное хранение радиоактивных отходов, и особенно высокоактивных, в пределах биосферы потенциально опасно, так как принципиально невозможно с необходимым уровнем надежности прогнозировать поведение конструкционных материалов, ресурс сооружений, изменение горно-геологических условий под воздействием радиации и других аггрессоров в течение тысяч лет, необходимых для обезвреживания высокоактивных радионуклидов.

В соответствии с нормами МАГАТЭ жидкие высокоактивные радиоактивные отходы (ВАО) должны переводиться в отверженную форму, которая в большей степени отвечает условиям их безопасного хранения и захоронения. Во всех странах (кроме России) в качестве консервирующей матрицы используется боросиликатное стекло. В России в 1986 г. начал функционировать первый завод по остекловыванию отходов в алумофосфатную матрицу [23].

Согласно применяемой технологии подготовленный раствор жидких ВАО смешивается с необходимым количеством фосфорной кислоты, упаривается в испарителе до концентрации солей 350—370 г/л и порциями подается в печь. Готовый расплав сливается в стальные канистры объемом 200 л, которые по три загружают в контейнеры из нержавеющей стали. Остеклованные ВАО (накопленные в России порядка 1974 м³ с суммарной активностью 246 млн. Ки) хранятся во

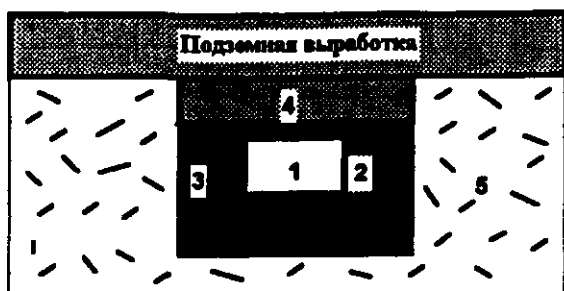


Рис. 7.5. Схема расположения остеклованных ВАО в подземной выработке: 1 — остеклованные ВАО; 2 — контейнеры из коррозионно-стойкого материала; 3 — буфер из малопроницаемой сорбционной минеральной смеси; 4 — бетонная пробка; 5 — вмещающие горные породы

временных хранилищах (имеющих принудительную вентиляцию) до последующего постоянного захоронения.

Но и этот метод имеет некоторые недостатки, обусловленные процессами преобразования стекол под воздействием радиоизлучения и повышенной температуры, а также их взаимодействием с геологической средой (особенно подземными водами) в период постоянного хранения. Поэтому необходимо использование нескольких защитных барьеров, каждый из которых способен самостоятельно обеспечить предохранение биосферы (рис. 7.5): консервирующую матрицу, коррозионно-стойкий контейнер, буфер из слабопроницаемого сорбционного материала, бетонную облицовку и непосредственно геологическую среду [23]. Необходимо учитывать имеющуюся селективную сорбцию радионуклидов различными минералами. Так, лейкоксен или гидроксиды железа способны хорошо сорбировать актиноиды, монтмориллонит — цезий, а хлорвермикулит — стронций.

Биосферошадящей технологией является только безвозвратный вывод радионуклидов из биосферы, реализация которого возможна следующим образом: ракетной космической канализацией, трансмутацией (преобразованием) актиноидов в стабильные (безвредные) продукты преимущественно в ускорителях и перемещение радиоактивных отходов в защитных контейнерах в глубинные слои литосферы.

Космическая канализация имеет серьезные трудности экономического и аварийного плана. Так, затраты на удаление в космос 1 т радиоактивных отходов составляют от 0,175 до 0,275 млрд. долл. USA. К тому же, по статистике, около 2 % ракет-носителей в настоящее время терпят аварии, что в случае распыления в атмосфере Земли высокоактивных радионуклидов приведет к глобальной катастрофе.

Трансмутация актиноидов (помимо необходимости создания системы мощных и энергоемких ускорителей) пока не дает гарантий действительно полного обезвреживания отходов и уверенности в том, что в процессе подобной переработки не возникнут новые, не менее опасные изотопы.

Принципиальные преимущества самозахоронения тепловыделяющих материалов в глубины литосферы заключаются в следующем:

1. Уровень тепловыделения ВАО, заключенных в защитные контейнеры-капсулы, а также динамика тепловыделения во времени определяются только физическими закономерностями и не зависят от внешних факторов, в связи с чем параметры саморазогревающейся системы могут быть определены с высокой точностью.

2. Ассимиляция радиоактивных отходов в глубинных слоях литосферы вследствие несопоставимости объемов интервента и массы Земли не нарушит естественных процессов.

3. Длительность возможной миграции радиоактивных отходов к дневной поверхности резко возрастает с глубиной, причем переход флюидов в жидкость под действием горного давления, тампонирования трещин водонерастворимыми соединениями, сорбции породами и т.д. практически исключает их вынос в течение сотен тысяч лет с глубины 10—15 км.

4. Автономное перемещение саморазогревающегося объекта под действием силы тяжести в глубинные слои Земли возможно в течение весьма короткого времени (порядка 3—7 лет), что обеспечивает надежность прогнозирования и мониторинга.

5. Осуществление старта саморазогревающейся системы с глубины 5—6 км позволяет существенно повысить безопасность операций захоронения, особенно при их выполнении в детально изученном локальном районе.

Для самозахоронения радиоактивных отходов производят следующие операции:

1) выбирают оптимальный (по горно-геологическим, гидрологическим, транспортным, экологическим, социальным и другим параметрам) локальный участок полигона подземного самозахоронения радиоактивных отходов;

2) проходят на выбранном участке опережающие скважины с целью экспериментального изучения свойств конкретных горных пород по предполагаемой трассе захоронения. Особое внимание уделяют однородности трассы перемещения отходов, а также минимальному газовыделению пород при плавлении и отсутствию опасных флюидов и водоносных горизонтов существенно выше каверны. Для этого производят геофизические исследования, чтобы выявить трубки или дайки (нежелательные образования) и получить иную информацию о строении глубинных слоев литосферы;

3) осуществляют проходку основной скважины на максимально возможную глубину (до 2,5—3 км) с применением типового бурильного оборудования;

4) производят расширение диаметра ствола скважины до максимально возможного (по экономическим, геотехнологическим, геологическим и другим условиям) размера, ее укрепление обсадными трубами и формирование в нижней части полости (каверны) с радиусом не менее 3—3,5 м или цилиндрической полости диаметром 1—1,5 м и длиной до 30 м;

5) заполняют пропорционально каверну шаровыми капсулами диаметром 120—140 мм (80—95 % диаметра ствола скважины), содержащими ВАО и выполненными из жаропрочного сплава.

После накопления десятков тысяч капсул происходит самопроизвольное осушение полости от подземных вод за счет тепловой энергии ВАО. Затем возникает нагрев и постепенное размягчение горных пород дна каверны. В результате конгломерат спекшихся между собой капсул с температурой

1300—1350 °С погружается в вязкую среду расплава со скоростью не менее 1—3 км/год (0,2—0,4 м/ч). Скважина и каверна используются для захоронения лишь единственной порции ВАО; после чего ее ствол заглушается, а оборудование используется в следующих полигонах захоронения.

В настоящее время при разработке большинства технологий учитывают несколько основных принципов:

- подбор процессов к сырью (принцип академика Э.В. Брицке);
- комплексное использование сырья (принцип академика А.Е. Ферсмана);
- использование отходов одних переделов в качестве сырья для других (принцип академика И.П. Бардина).

На наш взгляд, эти принципы необходимо дополнить еще одним, важным для устойчивой коэволюции человеческого общества и биосферы, — технологии должны быть не только экологически щадящими, но и *биосферулучшающими* (принцип проф. А.Е. Воробьева).

Современная цивилизация нашей планеты вплотную подошла к критической точке своей эволюции, когда она вынуждена решить для себя извечный гамлетовский вопрос «быть или не быть?». Одним из условий преодоления глобального экологического кризиса является восприятие концепции биосфероподдерживающих и улучшающих технологий во всех областях человеческой деятельности.

Фундаментальные исследования, проведенные в последние годы, дают возможность обосновать кардинально новые, по-настоящему экологически безвредные и даже — биосферулучшающие технологии производства продуктов потребления. Например, в Российской академии наук уже разработана технология чистого получения металлического кремния, согласно которой в процессе производства в атмосферу будет выбрасываться не углекислый газ (как в традиционных технологиях), а столь необходимый для существования всего живого на Земле кислород.

В течение длительного времени человечество получало технический кремний из жильного кварца, а в некоторых случаях — из низкокачественных кварцитов (включающих

значительное количество минеральных примесей и химических соединений) путем карботермического восстановления электродуговым способом.

В качестве восстановителя используют графит, нефтяной или каменноугольный кокс, древесный уголь или их смеси в определенных пропорциях. Такой способ производства позволяет получать только сильно загрязненный примесями низкосортный кремний. При этом наряду с потреблением значительного количества электроэнергии в атмосферу выбрасывается в огромных объемах углекислый газ.

Принципиально новый подход к восстановителю и энергоресурсам при производстве высокочистого кремния в корне меняет экологическую ситуацию. Для этого в экологически вредных технологиях была изменена стратегическая направленность. Например, начиная с глубокой древности, с момента зарождения металлургического производства, для получения металла из руды использовали углерод в виде древесного или коксующегося угля. При высокой температуре углерод захватывает кислород и тем самым восстанавливает металл, но при этом также происходит загрязнение атмосферы углекислым газом.

Изменить ситуацию можно, если использовать в качестве восстановителя не углерод, а монооксид кремния. Последний получается в результате перевода диоксида кремния в специальных установках в процессе карботермического восстановления. В дальнейшем реакция монооксида кремния с диоксидом или кварцем приводит к тому, что расплав элитного кремния обособляется от кислорода.

Первый в жидком виде удаляется из плавильной печи, а кислород поступает в атмосферу. Вместе с элитным кремнием при такой технологии получается монооксид углерода (угарный газ). Последний в условиях замкнутого цикла восстанавливается до чистого углерода, который вновь участвует в реакции с кремнеземом, а оставшиеся атомы кислорода, объединяясь в молекулу, также выделяются в атмосферу.

Другим примером биосфероулучшающей технологии служит разработанная для изолированного объекта система водо- и энергообеспечения (рис. 7.6). Холодная вода выкачивается с глубины 1000 м и подается в кондиционер, установленный на вершине горы.

Влага из насыщенного воздуха конденсируется на холодных трубах и собирается в резервуар. Охлажденный и обезвоженный воздух может использоваться для кондиционирования жилых помещений. Часть необходимой для закачивания глубинной воды энергии можно получить, пустив возвратный поток через турбину. Другая часть энергии обеспечивается работой ветряков. Извлеченная с глубины морская вода содержит много питательных веществ и может обогащать мелководную лагуну, в которой создается марикультурное хозяйство.

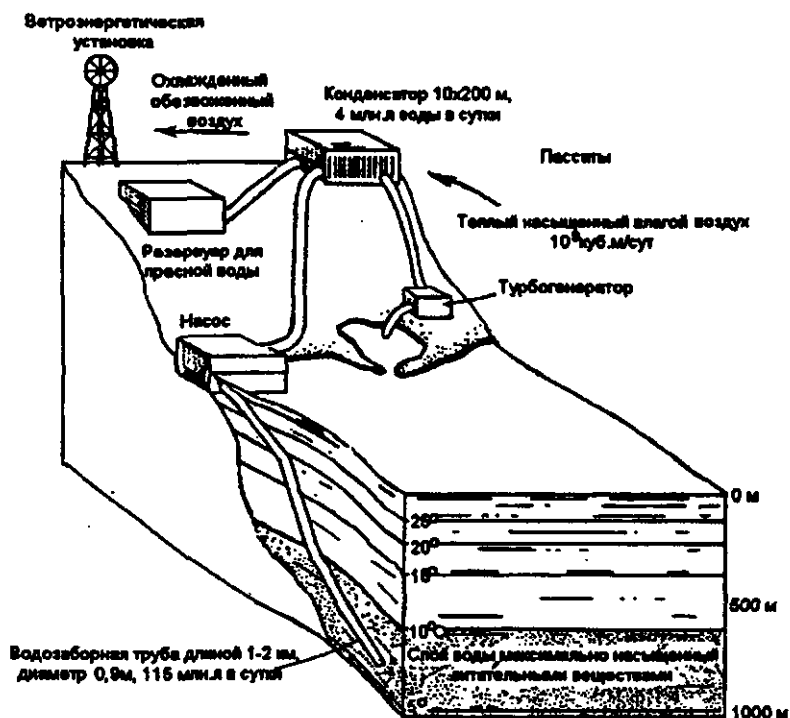


Рис. 7.6. Система извлечения воды из атмосферы

7.5

Роль горнопромышленного комплекса в регулируемой коэволюции биосферы Земли

В XXI век человечество входит с рядом нерешенных, но весьма актуальных задач. Одной из них является исследование и прогнозирование современной эволюции биосферы Земли, всестороннее изучение которой позволит выработать стратегию будущего устойчивого развития человечества. Анализ экологической ситуации, сложившейся в настоящее время на планете, показывает, что главной причиной надвигающегося кризиса является *технократическая концепция*, господствующая в отношениях между нашим обществом и биосферой. В ее основе лежит рассмотрение биосферы в основном как источника физических ресурсов (воздуха, воды, почв, минерального сырья, энергии), используемых для удовлетворения нужд человека, а также как сточную трубу для удаления возникающих различных отходов. В последнее время человечество пытается сместить акценты в своих взаимоотношениях с биосферой как со средой своего обитания.

Существующие концепции охраны биосферы не решают две основные проблемы, обрекающие человечество на безысходность: не предотвращают растущее загрязнение окружающей среды; не избавляют мир от угрозы деградации и истощения природных ресурсов.

Следуя имеющимся концепциям взаимодействия человека с биосферой, можно только отсрочить или замедлить, но не предотвратить кризис (вплоть до гибели) человеческой цивилизации от надвигающейся экологической и ресурсной катастрофы.

Несмотря на тенденцию к ограничению вредного воздействия на биосферу (проявляющейся в увеличении степени очистки сбросов и выбросов, сокращении несанкционированных источников загрязнения и т.д.), кардинального улучшения имеющейся (негативной) экологической ситуации пока не предвидится. Это объясняется энтропийными процессами естественного рассеивания сконцентрированного человеком

вещества, зачастую полученного в не соответствующих природе формах и количествах (например, несмотря на четко выраженную в целом окислительную обстановку земной поверхности, многие металлы переводятся в восстановленное состояние и используются в рафинированном виде и т.п.). И если человечество наконец полностью решит проблему загрязнения биосферы на стадии производства необходимых для его жизнедеятельности продуктов, то такая же острая проблема пока все еще неизбежна при их потреблении. Поэтому необходима принципиально новая стратегия коэволюции человечества и биосферы.

При ее разработке необходимо исходить из возможностей основного механизма перераспределения элементов на земной поверхности — природного биогеохимического круговорота атомов и его соотношения с *техногенной нагрузкой*. За 3,5 млрд. лет эволюции нашей планеты равновесие системы, связывающей воедино земную кору, гидросферу, атмосферу и биосферу, поддерживалось главным образом обменом веществ и энергии: солнечной радиацией, действием сил тяжести (гравитации), геологических сил, химической и биогенной энергией.

В настоящее время в связи со значительными техногенными выбросами равновесие уже существенно нарушено. Только за счет сжигания угля в энергетических установках в окружающую среду поступает ртути в 8700 раз, мышьяка в 125, урана в 60, кадмия в 40, бериллия и циркония в 10, олова и ванадия в 4 раза больше, чем их вовлекается в естественный биогеохимический круговорот Земли.

Основным направлением разработанной авторами в МГУ стратегии коэволюции [7—9, 39, 40] служит количественный и качественный учет элементов и соединений, поступающих в биогеохимический круговорот атомов, и создание оптимальных их соотношений. Зная величины природных (естественных) круговоротов и объемы поступления (в результате антропогенной деятельности) различных элементов, можно спрогнозировать количество и формы вещества, необходимые для полноценного осуществления современного круго-

ворота. Другими словами, нужно изменить возникший в антропогенную эру дисбаланс элементов в круговоротах биосферы. И если мы не можем полностью предотвратить имеющееся рассеяние вещества, то на современном уровне развития человечество уже способно к целенаправленному включению в круговорот дополнительных объемов необходимых элементов.

Целесообразно пересмотреть задачи и возможности горнопромышленного комплекса, традиционно рассматривающегося лишь в качестве источника минерального сырья для последующего производства продуктов жизнеобеспечения человечества. Поэтому в настоящее время в соответствии с имеющимися особенностями применяемых технологий горнопромышленный комплекс является источником значительного загрязнения окружающей среды.

Существенное отличие горнопромышленного комплекса от других отраслей промышленного и сельскохозяйственного производства заключается в том, что он имеет возможность извлечения из литосферы в принципе всех химических элементов, необходимых как для протекания оптимального круговорота атомов, так и для обеспечения жизнедеятельности всей биосферы. Следовательно, только недра предоставляют возможность пользоваться особым ресурсом, обеспечивающим возможность существования на Земле жизни [14, 25, 55]. Данный георесурс воплощен в способности недр выполнять природоорганизующую функцию, в результате чего устанавливается в биосфере необходимый для жизни баланс различных условий. Этот баланс складывается под влиянием особого для каждой территории сочетания биогеохимического круговорота атомов с объемами и видами извлекаемых на дневную поверхность горных пород.

При составлении оптимального баланса элементов в биогеохимических круговоротах Земли (природных и техногенных) необходимо учитывать ландшафтно-геохимические особенности территорий, обуславливающих различную величину вовлекаемых в оборот веществ [6, 13, 33, 34]. Разные зоны земной поверхности обладают неодинаковой биологической продуктивностью и, следовательно, характеризуются различной работой по преобразованию биосферы. Согласно про-

дуктивности меняется и содержание ведущих элементов во всех средах. Так, изучение зональности концентрации CO_2 в биосфере показало уменьшение ее содержаний в областях, расположенных ближе к экватору, и увеличение — в умеренных и высоких широтах.

При расчете скорректированного круговорота атомов в биосфере также целесообразно предварительно ранжировать и химические элементы. Например, емкость и скорость биогеохимического круговорота атомов во многом определяются содержанием в ландшафте, гидро- и атмосфере дефицитных и избыточных элементов. *Дефицитными* называются элементы (O, N, P, K, Ca, Mg, Mo и другие), добавление подвижных форм которых в биосферу ускоряет биогеохимический круговорот атомов и повышает его емкость, а *избыточными* — элементы (Cl, S, Na, Cu, Ni, Fe, F и др.), удаление которых приводит к аналогичным результатам.

Весьма важным представляется и форма нахождения элементов или определенных соединений, обуславливающих величину их подвижности. В большинстве случаев недостает именно подвижных форм, в то время как общее (валовое) содержание элемента в биосфере может быть достаточно велико. Поэтому корректировка круговорота должна идти по двум направлениям: добавление извне в ландшафт, гидро- или атмосферу недостающих элементов и повышение подвижности их инертных форм и соединений.

Подобный дифференцированный подход к геохимическому ранжированию различных территорий в сочетании с рассчитанными объемами биогеохимического круговорота атомов, формами вступающих в взаимодействие и реакции элементов и получающихся продуктов позволяет осуществить теоретическое обоснование корректировки современных круговоротов. В настоящее время при регулировании современного биогеохимического круговорота атомов можно ограничиться только корректированием объемов ведущих химических элементов атмосферы (прежде всего кислорода), которые определяют поведение всех других элементов.

Помимо оптимального соотношения реагирующих элементов важным регулирующим фактором осуществления глобального биогеохимического круговорота атомов является

величина необходимой для этого энергии. В настоящее время на Земле сложился определенный тепловой баланс (табл. 7.2), равный нулю как алгебраическая сумма в течение длительного времени (рис. 7.7) [42].

Таблица 7.2

Планетарный тепловой баланс

| Составляющие теплового баланса Земли | МДж/м ² | ккал/м ² |
|---|--------------------|---------------------|
| Солнечная радиация у верхней границы тропосферы | 41900 | 1000 |
| Отражение (при альбедо 33 %) | 3740 | 83 |
| Усваивание тропосферой | 6980 | 167 |
| Поглощение воздухом тропосферы | 3460 | 59 |
| Поглощение земной поверхностью | 4520 | 108 |
| Излучение эффективное | 1500 | 36 |
| Радиационный отток тепла | 3010 | 72 |
| Затраты на испарение вод | 2510 | 60 |
| Теплообмен турбулентный | 501 | 12 |
| Излучение Земли длинноволновое (тепловое) | 6980 | 167 |

Поток солнечной радиации (Земля за 1 мин получает от Солнца $2,4 \cdot 10^{18}$ кал лучистой энергии) и тепло земных недр (вклад последних составляет 31 ккал/см² в год) обусловили параметры исходного (естественного) круговорота: например, солнечная энергия, затраченная на испарение воды, заряжает ее энергией, которая после конденсации паров и выпадения осадков на земную поверхность реализуется в кинетической энергии рек и ручьев.

Интенсивность солнечного излучения на поверхности Земли зависит от широты местности и расстояния прохождения лучей в атмосфере (табл. 7.3). Полная энергия включает прямую составляющую и рассеянную. Во многом их величина зависит от длины волны излучения. Например, значительная часть энергии в ультрафиолетовом диапазоне спектра поглощается в верхней атмосфере при фотохимических процессах, в результате которых образуется озон. При уменьшении длины волны излучения быстро усиливается молекулярное, или рэлеевское, рассеяние.

Согласно закону Рэлея, рассеяние обратно пропорционально четвертой степени длины волны.

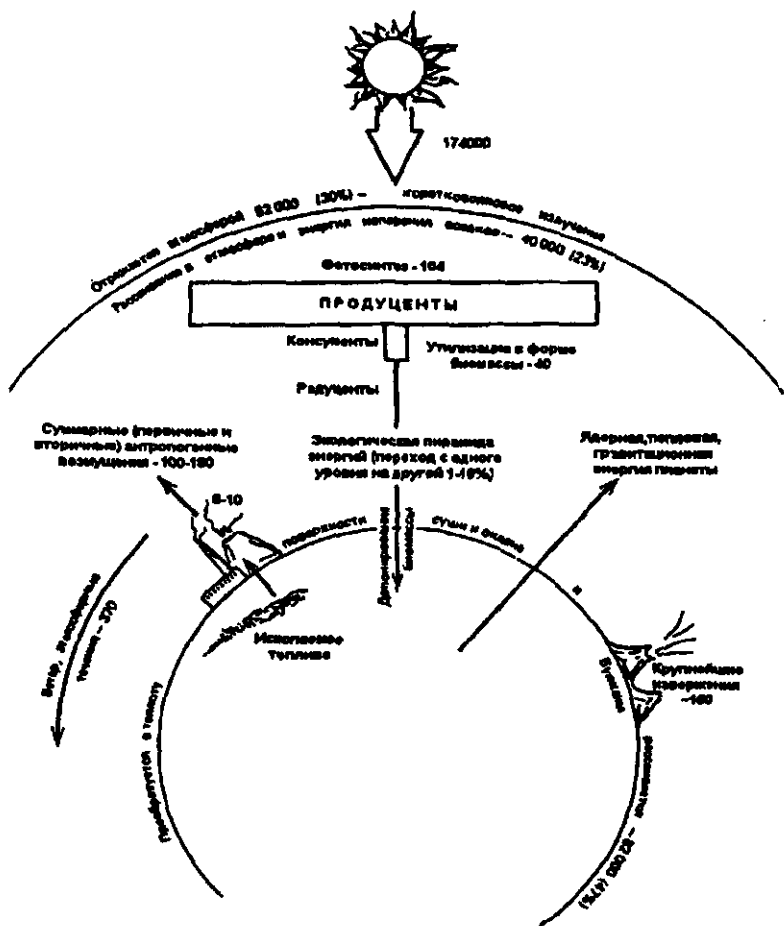


Рис. 7.7. Общий энергетический баланс Земли (ватты $\cdot 10^{12}$ тепловой энергии)

Это означает, что излучение с длиной волны 400 нм, соответствующей голубым лучам, будет рассеиваться в 10 раз сильнее, чем излучение с большей длиной волны — 700 нм, соответствующей красным лучам. Этот закон выполняется только в том случае, если частицы, на которых происходит рассеяние, малы по сравнению с длиной волны света. Если размер частиц сопоставим или больше длины волны, то рассеяние от длины волны света зависит уже в меньшей мере.

Таблица 7.3

Значения инсоляции на различных широтах

| Место | Широта, градус | Инсоляция, кВт·ч/м ² | | |
|----------------|-------------------|---------------------------------|-----------|---------------|
| | | наибольшая за день | | среднегодовая |
| | | лето | зима | |
| Экватор | 0 | 6,5 (7,5) | 5,8 (6,8) | 2200 (2300) |
| Тропики | 23,5 | 7,1 (8,8) | 3,4 (4,2) | 1900 (2300) |
| Средние широты | 45 | 7,2 (8,5) | 1,2 (1,7) | 1500 (1900) |
| | 52 | 7,0 (8,0) | 0,5 (0,8) | 1400 (1700) |
| Полярный круг | 66,5 | 6,5 (7,0) | 0 (0) | 1200 (1400) |

Примечание. В скобках указана инсоляция с учетом рассеянной составляющей.

На величину интенсивности также влияют облачность и загрязненность атмосферы.

Следовательно, изменение климата прямо или косвенно обусловлено деятельностью человека. Рост народонаселения, экономический прогресс, землепользование, обновление технологий, производство и потребление энергии и топлива приводят к выбросу тепла в биосферу, а также изменяют концентрацию и распределение парниковых газов и аэрозолей в атмосфере. Эти перемены приводят к изменению интенсивности поглощения или отражения солнечной радиации: вследствие ряда причин и загрязнения атмосферы данные суммарной энергии на квадратный метр уменьшаются в 1,5—2 раза.

Для установления оптимальных энергетических соотношений целесообразно использование закона *снижения энергетической эффективности природопользования*, утверждающего, что с ходом исторического времени при получении из природных систем полезной продукции на ее единицу в среднем затрачивается все больше энергии. Так, расход энергии на одного человека (ккал/сут) в каменном веке был порядка 4 тыс., в аграрном обществе — 12 тыс., в индустриальную эпоху — 70 тыс., а в развитых странах настоящего времени — 230—250 тыс., т.е. в 58—62 раза больше, чем у наших далеких предков (рис. 7.8).

В результате в настоящее время выделение промышленного тепла составляет около 0,01 % от солнечного тепла. Из расчетов Международной комиссии по климатическим из-

менениям, при сохранении существующих тенденций использования ископаемого топлива температура земной поверхности повысится на 2°C , а при одновременной вырубке лесов средняя температура атмосферы планеты к 2100 г. поднимется на 6°C .

В будущем энергообеспечение человеческого общества предполагается обеспечить за счет использования термоядерной энергии (но существуют проекты получения энергии и из глубокого вакуума космоса). В этом случае будет снижена острота проблемы ресурсообеспечения, так как тогда в качестве минерального сырья могут быть использованы горные породы с кларковым содержанием полезного компонента или морская вода. Однако при этом ожидается углубление экологического кризиса, так как смена технологии и методов ведет к усилению экологической нагрузки на биосферу (разд. 1.2).

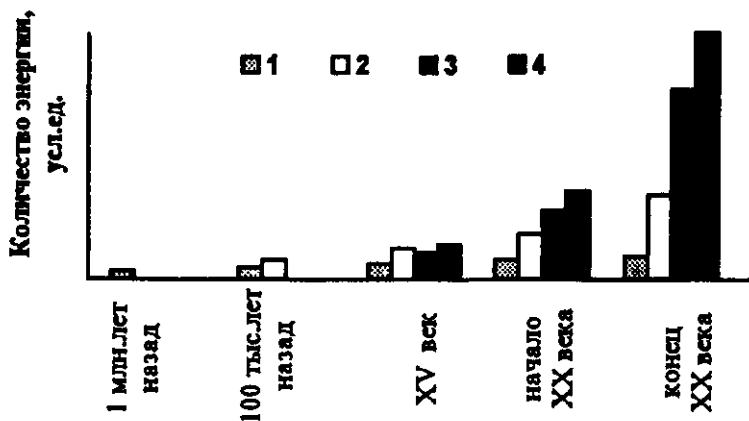


Рис. 7.8. Среднее потребление энергии за год на различных этапах развития человеческого общества:

1 — пища; 2 — домашние работы и услуги (включая торговлю, обучение и т.п.); 3 — промышленность и сельское хозяйство; 4 — транспорт

Он будет связан с перегревом атмосферы и поверхности Земли в результате выделения энергии в термоядерных реакторах и других источниках. Подсчитано, что в случае превышения тепла 10 % от солнечной энергии (которая поглощается сушей, океанами и нижними слоями атмосферы) средняя температура поверхности нашей планеты повысится на 7°C ,

что приведет к массовому таянию ледников Арктики и Антарктиды и затоплению равнин, наиболее удобных для проживания человека [26].

В корректировании температуры биосферы важное значение имеют теплопроводность различных ее составляющих и конвекция тепла. Так, поскольку средняя температура океана превышает среднюю температуру граничащего с ним воздуха, перенос тепла направлен от океана к атмосфере (рис. 7.9). Из 100 единиц радиации, поступающих в атмосферу, 16 единиц поглощается в стратосфере и тропосфере водяным паром, аэрозолями и молекулами самого воздуха и 6 единиц отражается в космос. Примерно 23 единицы взаимодействуют с облаками: 20 из них рассеивается или отражается в космос, а 3 поглощается облаками. На поверхности Земли примерно 4 единицы отражается и 51 единица поглощается. 30 единиц уходят в виде отраженной коротковолновой радиации, что соответствует альбедо Земли, которое суммирует радиацию, отраженную от облаков, воды и суши. 70 единиц уходят в виде длинноволнового излучения от поверхности Земли (6), из атмосферы (38) и от облаков (26).

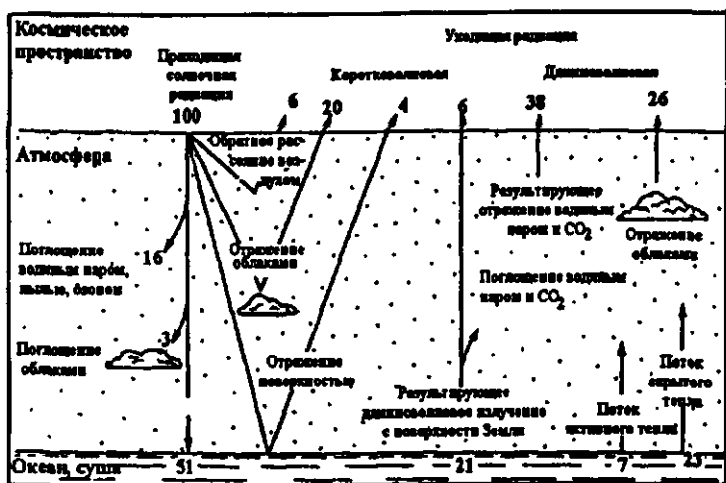


Рис. 7.9. Составляющие теплового баланса Земли.

Цифры представляют часть из 100 единиц приходящей радиации (эквивалентно примерно $0,5 \text{ кал/см}^2\text{-мин}$)

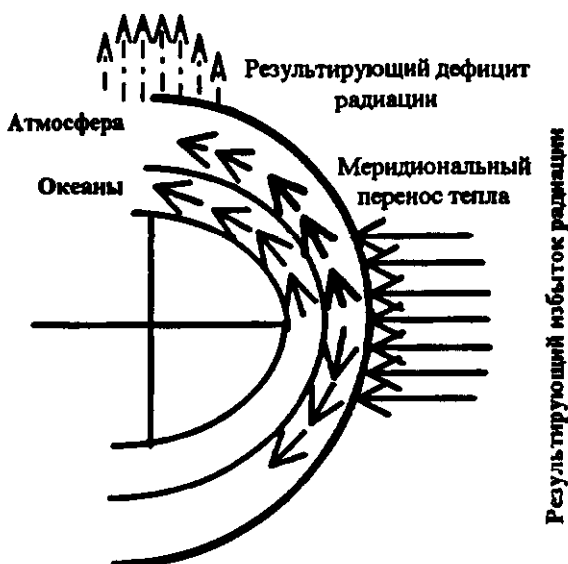


Рис. 7.10. Появление избытка тепла в зоне от 40° широты до экватора и его потери в зоне 40° широты до полюсов вызывается меридиональным переносом тепла атмосферой и океанами из низких в высокие широты

Чтобы испарить 1 см^3 морской воды, нужно затратить 600 калорий тепла. За 1 год с поверхности океана испаряется слой воды толщиной около 1,1 м. Отсюда легко определить потерю тепла. Например, для испарения метрового слоя воды расходуется 600 ккал/см^2 тепла.

Практический интерес имеет и распределение тепла в различных сферах. Из-за сферичности Земли излучение, поступающее на верхнюю границу атмосферы, концентрируется в зоне экватора, а ближе к полюсам оно рассредоточивается и уменьшается (рис. 7.10). Вследствие наклона оси вращения Земли на $23,5^\circ$ к плоскости орбиты движения нашей планеты вокруг Солнца картину усложняют сезонные изменения в поступлении солнечного излучения на одни и те же широты. В результате примерно с 21 марта по 22 сентября (от момента весеннего до момента осеннего равноденствия) северное полушарие получает больше солнечной радиации, чем южное, а в последующие 6 месяцев ситуация становится обратной.

Несмотря на то что в тропических широтах Земли поглощается значительно большее количество приходящего излучения по сравнению с полярными широтами, суммарные потери излучения мало меняются с широтой. Благодаря этому низкие широты характеризуются избытком приходящей тепловой энергии, а высокие широты — ее дефицитом: океаны и атмосфера должны переносить тепло из тропиков к полярным районам (рис. 7.11).

Перенос энергии по направлению к полюсам осуществляется глобальной системой атмосферных ветров и океанических течений, представляющих ответную реакцию на неравномерное попадание тепла. Перенос энергии по планете

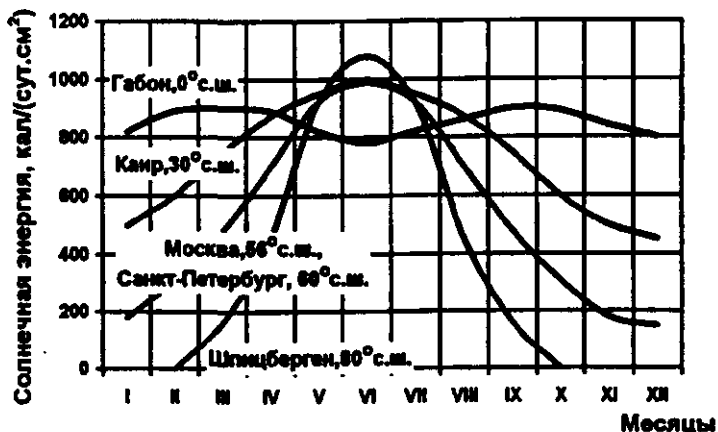


Рис. 7.11. Годовое распределение приходящей солнечной радиации в зависимости от широты местности

осуществляется в трех формах: одной океанической и двух атмосферных. В океане — это течения, переносящие тепло в активном виде (холодные течения, существующие как на поверхности, так и у дна океана, а теплые — только на поверхности, движущиеся от экватора к полюсам). В атмосфере же происходит перенос как скрытого тепла в виде водяного пара, так и активного тепла в виде теплых воздушных масс.

При конденсации водяного пара и возникновении дождя высвобождается примерно 540 калорий тепла на 1 г воды.

Развитие *парникового эффекта* также является серьезной нерешенной проблемой. Во-первых, исходя из ежегодного прироста CO_2 (равного примерно $20 \cdot 10^{18}$ г) среднее ее содержание в атмосфере в ближайшее время достигнет 0,2 %. Во-вторых, на величину парникового эффекта влияет концентрация разнообразных газов (метана, бензопирена, формальдегида, сероуглерода, хлор-фтор-углерода, оксидов азота).

Главной причиной возникновения парникового эффекта считается рост в атмосфере содержания некоторых малых газовых составляющих:

- с прямым парниковым эффектом — углекислого газа (CO_2), закиси азота (N_2O), метана (CH_4);
- с косвенным парниковым эффектом — окиси углерода (CO), оксидов азота (NO_x), хлор-фтор-углеродов (ХФУ), летучих неметановых органических соединений (ЛНОС), галонов и тропосферного озона (например, галондозамещенные углеводороды, содержащие хлор);
- (CFC_2 и HCFC_2) и бром, вызывают разрушение озона.

Углекислый газ — важнейший парниковый газ. Существующий в настоящее время рост концентрации CO_2 объясняется антропогенной деятельностью, в основном сжиганием топлива, изменениями в землепользовании (преобразование лугопастбищных угодий, пахотные земли и др.) и в меньшей мере — наращиванием производства цемента. Средняя скорость роста концентрации CO_2 — 0,4 % в год.

Метан — другой парниковый газ, концентрация которого в атмосфере растет в результате антропогенной деятельности (сельское хозяйство, удаление и утилизация отходов, добыча и использование топлив). Среднее глобальное значение концентрации метана возросло на 6 % за 1984—1994 гг. Около 60—80 % существующих выбросов метана имеют антропогенную природу. Потенциал глобального потепления (ПГП), представляющий собой кумулятивный радиоактивный форсинг, выраженный в эквиваленте CO_2 , за столетний период для метана равен 24,5.

Захись азота (N_2O) — активный парниковый газ, время существования которого в атмосфере около 120 лет, ПГП за столетний период — 320. Естественными эмиттерами N_2O являются почва, моря и океаны. Основные антропогенные источники — сельское хозяйство, сжигаемая биомасса и индустриальные процессы (например, производство азотной кислоты). Современные текущие антропогенные выбросы N_2O составляют от 3 до 8 Тг/год.

Галоидозамещенные углеводороды и другие галоидосодержащие вещества, являющиеся активными парниковыми газами, представляют собой соединения, содержащие фтор, хлор, бром и йод.

Все эти парниковые газы прозрачны для коротковолновой солнечной радиации, но поглощают длинноволновую радиацию и способны повлиять на глобальный климат планеты. Так, удвоение содержания CO_2 в воздухе вызвало бы повышение средней температуры земной поверхности на $4^\circ C$, в связи с этим возникли бы серьезные изменения климатического режима и растительных процессов [3]. Глобальное потепление, вызванное парниковым эффектом, уже началось — сегодня средняя температура на планете на $0,6^\circ C$ выше, чем 100 лет назад [38].

При регулировании парникового эффекта необходимо учитывать различный вклад солнечного спектра: примерно 48 % солнечной радиации приходится на видимую часть спектра (0,38—0,76 мкм), 45 % — на инфракрасные лучи (более 0,76 мкм) и 7 % — на ультрафиолетовое излучение (менее 0,38 мкм). Результирующие изменения климата могут иметь далеко идущие последствия в результате подъема уровня Мирового океана (из-за таяния льдов), перераспределения осадков и более неустойчивой погоды. Тогда возможно:

- увеличение числа штормов и ураганов;
- затопление низколежащих земель;
- сокращение запасов пресной воды и образование новых пустынь;
- перемещение, высыхание и эрозия плодородных почв в одних регионах планеты и чрезмерное переувлажнение и заболачивание — в других;

- сокращение разнообразия представителей биосферы.

Имеющееся в настоящее время техногенное повышение температуры атмосферы может, однако, послужить дополнительным источником энергии для скорректированного круговорота элементов. Одновременно будет решена и проблема нивелирования техногенного теплового загрязнения биосферы, составляющего около $142,8 \cdot 10^{15}$ кДж в год. Установлено, что величина получения и использования энергии минеральных носителей (удваивающаяся каждые 15 лет) не должна превышать 1% от общей мощности солнечной энергии, поступающей на Землю. Сейчас земная цивилизация производит энергии примерно 10 млрд. кВт с ежегодным приростом в пределах 3%. Следовательно, в существующих условиях тепловой барьер может быть достигнут всего за 75 лет.

Для решения этих вопросов при целенаправленном регулировании круговорота атомов необходимо исходить из принципиальной возможности перевода части энергии из состояния ее теплового рассеяния в окружающем пространстве в аккумулирующее (нерассеивающее) состояние, например в энергию химических реакций (что может быть достигнуто в результате образования техногенных месторождений сульфидных руд, углеводородного сырья и т.д.) [51, 52].

Таким образом, помимо решения проблемы глобального загрязнения стратегия коррекции природного биогеохимического круговорота атомов позволит также уменьшить величину парникового эффекта, существование которого при осуществлении традиционной концепции взаимодействия человечества с биосферой все еще неизбежно.

Подобное комплексирование глобальных источников энергии (солнечной, радиоактивного распада и техногенной) позволит изменить скорость естественного круговорота элементов, вплоть до ее соответствия скорости техногенного поступления веществ в биосферу. И если горнопромышленный комплекс традиционно рассматривался только как источник получения сырья для удовлетворения потребностей человечества в разнообразных продуктах, имеющий к тому же негативную функцию существенного загрязнения биосферы различными отходами, то в современных условиях он должен выполнять и функцию поставщика необходимых

элементов, их форм и объемов, для регулирования планетарного круговорота атомов. Это — межгосударственная проблема, решение ее находится в области выдачи и реализации соответствующих квот: например, в обязательном извлечении из недр определенных, необходимых для коррекции круговорота пород или снижении платы предприятиям за загрязнение биосферы при одновременной добыче пород, способствующих осуществлению гармоничного круговорота.

7.6

Самоорганизация природных геохимических ландшафтов

При реализации концепции биосферополучающих технологий важно отойти от имеющейся в настоящее время ментальности «покорения» биосферы. Природу целесообразно не покорять, а находиться с ней в эволюционной гармонии. И здесь особое значение приобретают теоретические разработки в области самоорганизации систем.

Суша мира представляет собой разнообразную мозаику физических ландшафтов, образующих твердую поверхностную оболочку Земли.

Сами ландшафты (физические и геохимические) образуются вследствие взаимопроникновения и взаимодействия всех основных сфер: лито-, гидро-, атмо- и биосферы. Основные зональные типы геохимических ландшафтов сформировались и функционируют в зависимости от величины и соотношения радиационного и водного балансов, а также от состава преобразуемых (подстилаемых) пород.

Величины и соотношение энергетического баланса и влагообеспеченности определяют важнейшую функцию ландшафтной оболочки — преобразование солнечной энергии в органическое вещество в процессе фотосинтеза. Состояние ландшафта и его антропогенная трансформация связаны с его биологической продуктивностью. Изменения гидроклиматического режима Земли и отдельных ее частей ведут к коренным преобразованиям ландшафтной сферы, а изменения

ландшафтов могут обеспечить и серьезные изменения гидроклимата.

Геохимический ландшафт — это сложная, открытая, динамическая, резко неравновесная, но упорядоченная, стационарная, самоорганизующаяся система земной поверхности со многими положительными и отрицательными обратными связями, которые обуславливают его геохимическую когерентность. В настоящее время в геохимический ландшафт включают подсистемы климата, рельефа, биосферы, поверхностных и грунтовых вод, локализованные на границе земной коры и атмосферы в поле силы тяжести.

Внешние источники энергии геохимических ландшафтов — солнечная энергия и тектонические движения, а ведущим фактором взаимодействия подсистем является биогеохимический круговорот атомов.

В эволюции биосферы значительное место занимает *самоорганизация* геохимических ландшафтов, обеспечивающая рассеяние или концентрацию химических элементов. Как и во многих других системах, самоорганизация геохимического ландшафта находит выражение в его целостности (эмергентности), нелинейности соотношений, относительной самостоятельности — способности сохранять определяющие особенности при изменении внешних условий (в первую очередь макроклимата). Процессы самоорганизации обуславливают устойчивость ландшафта, постоянство его структуры и функций.

В общем случае самоорганизация тем больше, чем устойчивее ландшафт, т. е. чем больше нужно приложить усилий, чтобы вывести его из стационарного состояния, нарушить обратные связи.

С этих позиций велика самоорганизация в лесных ландшафтах влажных тропиков с их мощными обратными связями и мала в тундре, пустыне, природа которых «легко ранима» и трудно восстанавливается при нарушениях. Это позволяет ввести понятие о степени самоорганизации геохимического ландшафта и рассмотреть пути его количественной оценки.

Главным *механизмом самоорганизации* природных ландшафтов и биосферы в целом служит биогеохимический круговорот атомов. Чем больше в ландшафте живого вещества, чем энергичнее процессы разложения органических соединений, тем больше свободной химической энергии в него поступает, энергичнее почвообразование, выветривание и другие процессы, тем прочнее связи между компонентами ландшафта, обуславливающие его целостность, и поэтому тем выше степень его самоорганизации.

Для количественной характеристики степени самоорганизации природного ландшафта было предложено использовать общую массу живого вещества (биомассу) B и его ежегодную продукцию Π [29]. Несомненно, при росте биомассы увеличивается и самоорганизация, однако прямой зависимости здесь нет.

Например, в тундрах и степях биомасса часто одинакова, хотя степень самоорганизации резко различна. Поэтому одна величина биомассы еще не полностью характеризует степень самоорганизации. Как правило, самоорганизация тем выше, чем выше ежегодная продукция живого вещества Π .

Например, во влажных тропиках Π достигает 300 ц/га, в тайге 100 ц/га, что хорошо коррелируется с большей самоорганизацией во влажных тропиках. Однако, с другой стороны, в южной тайге самоорганизация и устойчивость выше, чем в луговой степи, хотя величины Π близки.

Поэтому один параметр Π также не характеризует полностью степень самоорганизации и ее количественная оценка, очевидно, должна включать эти оба параметра. Поэтому для оценки C было предложено использовать произведение биомассы на ежегодную продукцию — $B \times \Pi$ [35].

Самоорганизация ландшафтов зависит от климата, геологического строения и рельефа местности. Эти природные факторы определяют термодинамические условия миграции химических элементов, кибернетические характеристики процессов, геохимию природных вод и другие особенности. При этом почти каждому фактору, усиливающему самоорганизацию, противопоставит его противоположность, ослабляющая величину C (табл. 7.4).

Источником поступления в ландшафт биологически важных элементов могут служить горные породы, атмосферные осадки, продукты вулканизма, поверхностный и грунтовый сток. Так, большинство гумидных ландшафтов с характерным для них кислым выщелачиванием почв — влажные тропики и таежные ландшафты, сформировались на бескарбонатных породах.

В этом месте растения и животные обычно находятся на «голодном минеральном пайке», и именно поэтому поступление извне в ландшафт дефицитных элементов приводит к резкому росту *П* и *Б* — важнейших составляющих самоорганизации.

Особенно резко выражен дефицит элементов в районах распространения кварцевых песков — в полесских ландшафтах умеренного пояса, падангах тропиков, где дефицит кальция и других элементов находит выражение и в малой биомассе растительности, и в бедности животного мира. Любое включение в круговорот недостающих элементов приводит к «взрыву» биологической продуктивности, увеличению валового разнообразия, т.е. к росту самоорганизации.

Таблица 7.4

Влияние связей на биогеохимический круговорот атомов

| Увеличивают С | Ослабляют С |
|--|--|
| Рост <i>Б</i> и <i>П</i> , видового разнообразия | Уменьшение <i>Б</i> и <i>П</i> , видового разнообразия |
| Усиление процессов разложения органических веществ, увеличение интенсивности круговорота | Ослабление процессов разложения органических веществ, незамкнутость круговорота |
| Поступление в ландшафт извне биологически важных элементов | Удаление из ландшафта биологически важных элементов, их переход в недоступные для организмов формы |

Особенно это наглядно при формировании гумидных ландшафтов на карбонатных породах: и в тропиках, и в умеренном поясе энергичная миграция, а также аккумуляция типоморфного элемента — кальция производит подлинную «геохимическую революцию». В истории многих стран такие пло-

дородные ландшафты осваивались в первую очередь: леса вырубались, увеличивалось население, возникали города, развивалась культура. Видоизменялся облик местности: антропогенный ландшафт кальциевого класса (на карбонатных породах) в лесной зоне умеренного пояса носит открытый характер и по сравнению с окружающей кислой тайгой производит впечатление далекого юга.

В Европейской России — это ижорские ландшафты Силурийского плато южнее г. Санкт-Петербург, район г. Каргополь в Архангельской области, ландшафты на пермских красноцветах в Приуралье и многие другие. Здесь проявляется ландшафтно-геохимический закон [35]: кислое выщелачивание почв уменьшает самоорганизацию, а поступление в ландшафт кальция и других биологически важных элементов ее увеличивает (табл. 7.5).

Таблица 7.5

Характеристика факторов самоорганизации ландшафтов

| Увеличивают С | Ослабляют С |
|---|---|
| <i>Кибернетические и термодинамические факторы</i> | |
| Рост отрицательных обратных связей, неравновесности линейных соотношений, уменьшение энтропии | Рост положительных обратных связей, уменьшение неравновесности, нелинейности, рост энтропии |
| <i>Влияние геохимических особенностей вод</i> | |
| Усиление окислительных процессов | Усиление восстановительных процессов |
| Нейтральная и слабощелочная среда | Сильнокислая или сильнощелочная среда |
| <i>Климатические изменения</i> | |
| Теплая гумидизация | Аридизация, холодная гумидизация |
| <i>Геологические изменения</i> | |
| Тектонические опускания, ослабление эрозии в условиях сохранения окислительной среды в водах | Тектонические поднятия, усиленные эрозии |
| Однообразие горных пород и тектоник | Разнообразие пород, сложная тектоника и стратиграфия |

В процессе самоорганизации биосферы весьма важно наличие обратных связей. Пример существования *положительной обратной связи* можно привести по отношению к убегающему парниковому эффекту, вызываемому повышенной концентрацией в атмосфере CO_2 .

При повышении антропогенных выбросов в биосферу этого газа вследствие поглощения им инфракрасного излучения Земли повышается температура приземного слоя атмосферы. Это приводит к уменьшению растворимости углекислого газа в океане, в результате его часть переходит в атмосферу, что способствует дальнейшему увеличению температуры воздуха, следовательно, возникает убегающий парниковый эффект.

Пример саморегулирования представляет собой система Мирового океана. Реки ежегодно вносят в океан 1,5 млн. т карбоната кальция, а солевой состав океанической воды существенно не меняется.

Это обусловлено тем, что организмы используют карбонаты для построения своих скелетов, после отмирания которых они осаждаются на дно. Таким образом, в течение многих миллионов лет обеспечивается стабилизация состава океанических вод.

План лекции

1. На основе истории биосфероохранных разработок раскрыть имеющиеся пути коэволюции человечества и биосферы.
2. Описать возможные биосфероохранные технологии.
3. Показать роль горнопромышленного комплекса в регулируемой коэволюции.
4. Объяснить процесс самоорганизации природных геохимических ландшафтов.

Контрольные вопросы-задания

1. Дайте определение устойчивости систем.
2. Чем отличаются природные и техногенные процессы в биосфере?

3. Чем характеризуется охрана биосферы?
4. Дайте определение эволюции биосферы.
5. Что такое «открытые системы»?
6. Какие виды реакции биосферы на технологическое влияние известны?
7. Какие закономерности биогеохимической эволюции известны?
8. В чем заключается технократическая концепция взаимодействия человечества с окружающей средой?
9. Раскройте основной недостаток традиционной концепции охраны биосферы.
10. Дайте определение понятию «самоорганизация».
11. В чем отличие физического от геохимического ландшафта?
12. От чего зависит самоорганизация геохимических ландшафтов?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Человечество, используя опыт предшествующих поколений и возможности имеющегося разума, в течение десятков, а возможно, и сотен тысяч лет коренным образом трансформирует исходную, сложившуюся за гораздо больший промежуток времени биосферу.

Первоначально под влиянием человеческого общества происходили такие изменения в биосфере, как исчерпание ресурсов живой природы (и прежде всего — крупных млекопитающих).

По мере увеличения численности человеческого общества и усиления разумной его деятельности (но направленной большей частью на удовлетворение собственных потребностей) этот процесс углублялся, и имеющееся сокращение численности и видов животных, а также растительности в дальнейшем усилилось исчерпанием минеральных ресурсов (металлов, горючих ископаемых, почв и т. д.), т. е. возникло исчерпание уже всех природных ресурсов.

В связи с последующим развитием человеческой цивилизации по технократической концепции взаимодействия с природой этот негативный процесс включил в себя еще и разнообразное (химическое, радиационное, тепловое, шумовое и др.) загрязнение биосферы.

В настоящее время происходит дальнейшее интенсивное преобразование исходной (природной) биосферы, ее последовательный переход в техносферу. В любом случае этот переход состоится. Возможные варианты такого перехода

закрываются только в контролируемом или неконтролируемом процессе. И если человеческое общество, используя возможности разума для удовлетворения своих нужд, не целенаправленно преобразовывало биосферу (в целом негативно), то тем более оно должно задействовать имеющиеся знания для создания оптимальной коэволюции с биосферой на основе ее устойчивого развития (другими словами, создать условия для контролируемой эволюции). В дальнейшем, после построения регулируемой техносферы предполагается ее целенаправленный переход в ноосферу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алборов И.Д., Галки В.И., Воробьев А.Е. и др.* Экология промышленного производства. — Владикавказ: РУХС, 1996. — 343 с.
2. *Алексеевко А.А.* Экологическая геохимия. — Краснодар: КГТУ, 1997. — 120 с.
3. *Будыко М.И.* Эволюция биосферы. — Л.: Гидрометиздат, 1984.
4. *Будыко М.И., Ротко А.Б., Яшин А.Л.* История атмосферы. — Л.: Гидрометиздат, 1985. — 208 с.
5. *Вернадский В.И.* Биосфера. — М.: Мысль, 1967.
6. *Воробьев А.Е.* Проблема самоорганизации современной биосферы и геохимия горнопромышленных ландшафтов // Сб.: Актуальные проблемы современного естествознания. — Калуга, 1997. — С. 44—45.
7. *Воробьев А.Е.* Роль горнопромышленного комплекса в эволюции биосферы Земли // Вестник МАНЭБ. — Владикавказ, 1998, № 10. — С. 10—15.
8. *Воробьев А.Е.* Человек и биосфера. Основы взаимодействия, эволюции и самоорганизации / Под ред. чл.-корр. РАН Л.А. Пучкова. — М.: МГУ, 1998. — 216 с.
9. *Воробьев А.Е., Галки В.И.* Взаимодействие горнопромышленного комплекса и биосферы // Вестник МАНЭБ. — Владикавказ, 1998, № 10. — С. 64—68.
10. *Воробьев А.Е., Галки В.И., Лобанов Д.П.* Приоритетные пути развития горнодобывающего и перерабатывающего комплекса Северо-Кавказского региона / Под ред. акад. К.Н. Трубецкого. — Владикавказ, 1998. — 362 с.
11. *Воробьев А.Е., Чекушкин А.В.* Радиационная безопасность урановорудных горнопромышленных районов // Горный вестник. — 1998. — № 2. — С. 61—65.
12. *Геохимия ландшафтов России и радиогеоэкология* // В кн.: Современные изменения в литосфере под влиянием природных и антропогенных факторов / А.И. Перельман, С.М. Кравченко, А.Е. Воробьев и др.; Под ред. акад. В.И. Осипова. — М.: Недра, 1996. — С. 194—216.
13. *Галки В.И., Воробьев А.Е., Козырев Е.Н. и др.* Влияние технологий добычи на экосистемы РСО-Алания // Экологические исследования. Сборник хозяйственных НИОКР. — Владикавказ: Ирстон, 1998.
14. *Горная энциклопедия.* Т 1. — М.: Советская энциклопедия, 1984.
15. *Горные науки освоение и сохранение недр Земли* / Под ред. акад. К.Н. Трубецкого. — М.: АГН, 1998. — 478 с.
16. *Голубев В.С., Шаповалов Н.С.* Человек в биосфере. — М.: Варяг, 1995. — 127 с.

17. *Горшков С.П.* Эколого-географические основы охраны природы. — М.: МГУ, 1992. — 123 с.

18. *Домелла Х., Медоуз Д.Г.* За пределами роста. Доклад ученых Римскому клубу. — М.: Прогресс, 1994.

19. *Зайденварг В.Е., Айрун А.Т.* Влияние газопылеобразных отходов добычи полезных ископаемых на состав и свойства биосферы и на климат планеты. — М.: ЦНИЭИуголь, 1993. — 274 с.

20. *Иванов П.В.* Биогеохимия внутрипочвенного выветривания. — М.: Наука, 1993.

21. *Котлов Ф.В.* Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека. — М.: Недра, 1978. — 260 с.

22. *Круговорот* вещества в природе и его изменение хозяйственной деятельностью человека. — М., 1980.

23. *Лавров Н.П., Омеляненко Б.П., Юдичев С.В. и др.* Задачи минералогических исследований в связи с проблемой захоронения радиоактивных отходов // Минералогические исследования в решении экологических проблем. — М.: РАН, 1998. — С. 5—37.

24. *Лаво А.В.* Следы былых биосфер. — М.: Знание, 1979. — 171 с.

25. *Науки о Земле: состояние, приоритетные направления развития* / Под ред. акад. В.А. Жарикова. — М.: ИПКОН РАН, 1996. — 113 с.

26. *Новиков Э.А.* Человек и биосфера. — Л.: Недра, 1976. — 156 с.

27. *Певзнер М.Е., Малышев А.А., Мельков А.Д. и др.* Горное дело и охрана окружающей среды. — М.: МГУ, 1997. — 298 с.

28. *Перельман А.И.* Биокосные системы Земли. — М.: Наука, 1977. — 170 с.

29. *Перельман А.И.* Геохимия. — М.: Высшая школа, 1989.

30. *Перельман А.И.* Геохимия ландшафта. — М.: Высшая школа, 1966. — 392 с.

31. *Перельман А.И., Воробьев А.Е. и др.* Геохимия ландшафтов России и радиогеоэкология / Известия РАН. Сер. Геоэкология (Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология). — М.: РАН, 1996, № 3 — С. 3—15.

32. *Перельман А.И., Воробьев А.Е. и др.* Геохимические ландшафты России и радиогеоэкология (методология, теория, практика) // Науки о Земле на пороге XXI века: новые идеи, подходы, решения. — М.: Новый мир, 1997. — 140 с.

33. *Перельман А.И., Воробьев А.Е.* Геохимия ландшафта и горная наука //Сб.: Горное производство и наука на рубеже веков. Вестник горно-металлургической секции (Отделение горных наук). — М.: АЕН, 1996. — С. 47—55.

34. *Перельман А.И., Воробьев А.Е. и др.* Систематика и картографирование геохимических ландшафтов при решении геоэкологических задач // Разведка и охрана недр. — 1998. — № 3. — С. 27—28.

35. *Перельман А.И., Воробьев А.Е.* Параметры самоорганизации природных геохимических ландшафтов // Известия РАН. Сер. География. — М.: РАН, 1996, № 5. — С. 7—20.

36. *Пиковский Ю.И.* Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. — М.: МГУ, 1993. — 207 с.

37. *Пригожин И.* От существующего к возникающему. — М.: Мир, 1984.

38. *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов.* — ВИНТИ, 1998, № 4.

39. *Пучков Л.А., Воробьев А.Е.* Влияние горнопромышленного комплекса на биосферу Земли // Горный журнал. — 1998. — № 6. — С. 3—6.

40. *Пучков Л.А., Воробьев А.Е.* Перспективы влияния горнопромышленного комплекса на эволюцию биосферы Земли // Горный информационно-аналитический бюллетень. — М.: МГТУ, 1998, № 3. — С. 5—10.

41. *Резанов И.А.* Великие катастрофы в истории Земли. — М.: Наука, 1980. — 175 с.

42. *Реймерс Н.Ф.* Природопользование. — М.: Мысль, 1990. — 638 с.

43. *Стергетика* / Под ред. В.Г. Буданова и О.П. Иванова. — М.: МГУ, 1998. — 256 с.

44. *Справочник по охране геологической среды.* — Ростов-на-Дону: Феникс, 1996. Т. 1. — 445 с.

45. *Судо М.М.* Основные концепции строения и развития Земли. — М.: Знание, 1974. — 93 с.

46. *Сытник К.М., Брайон А.В., Гордецкий А.В.* Биосфера, экология, охрана природы: Справочное пособие. — Киев, 1987. — 240 с.

47. *Техногенные минеральные образования в воздушной среде и методы их освоения.* — М.: МГТА, 1996.

48. *Трубецкой К.Н., Воробьев А.Е.* Классификация методов воспроизводства минерального сырья // Горный журнал. — 1998. — № 1. — С. 30—34.

49. *Трубецкой К.Н., Воробьев А.Е.* Основы ресурсовоспроизводящих технологий складирования и хранения некондиционного минерального сырья // Горный журнал. — 1995. — № 5. — С. 47—51.

50. *Трубецкой К.Н., Воробьев А.Е.* Развитие стратегии ресурсовоспроизводящих технологий в горнодобывающем комплексе // В кн.: Проблемы геотехнологии и недроведения. Т. 2. — Екатеринбург, ИГД УрО РАН. — С. 7—15.

51. *Трубецкой К.Н., Воробьев А.Е.* Способ создания в угольном пласте техногенного месторождения метана. Патент по заявке 97107317 РФ, 1998.

52. *Трубецкой К.Н., Воробьев А.Е.* Способ создания в угольном пласте техногенной залежи метана. Патент по заявке 97112707 РФ, 1998.

53. *Трубачкой К.Н., Воробьев А.Е., Бубнов В.К.* Способ создания техногенного месторождения. Патент по заявке 96107711 РФ, 1999.
54. *Трубачкой К.Н., Воробьев А.Е., Чекушова Т.В.* Способ создания техногенных месторождений. Патент 2065051 РФ, 1996.
55. *Трубачкой К.Н., Галеевко Ю.П.* Устойчивость биологических сообществ и экологическая безопасность технологий освоения земных недр // Горный вестник. — 1998. — № 5. — С. 3—9.
56. *Ферман А.Е.* Избранные труды. Т. 3, 1955. — 798 с.
57. *Хабаров В.В., Воробьев А.Е.* Теоретические основы развития горнодобывающих и перерабатывающих производств Кыргызстана / Под ред. акад. Н.П. Лаврова. — М.: Недра, 1993. — 316 с.
58. *Хакев Г.* Синергетика. — М.: Мир, 1981.
59. *Эдлинг Ф.О.* О возникновении жизни в морской воде // Природа. — 1992. — № 8. — С. 95—100.
60. *Blakemore R.P.* Biomineralization by magnetogenic bacteria // Metall-Microbe Interact. Symp. Cell Biol. Group. Soc. Gen. Microbiol. Apr., 1988. — Oxford etc., 1989. — P. 85—98.
61. *Perel'man A.I., Borisenko E.N., Vorob'ev A.E. and other.* The Geochemistry of Russian Landscapes and Environmental Radiogeology / Environmental Geoscience, N0, 1996, P. 44—52.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|------------------|---|
| ПРЕДИСЛОВИЕ..... | 5 |
|------------------|---|

| | |
|---------------|---|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 7 |
|---------------|---|

Глава 1

ОСНОВЫ ОБЩЕГО УЧЕНИЯ О БИОСФЕРЕ

| | |
|--|----|
| 1.1. Современное понятие биосферы..... | 11 |
| 1.2. Основные функции биосферы..... | 20 |
| План лекции..... | 34 |
| Контрольные вопросы-задания..... | 34 |

Глава 2

СТРУКТУРА БИОСФЕРЫ

| | |
|---|----|
| 2.1. Возникновение, эволюция и особенности планеты Земля..... | 37 |
| 2.2. Строение биосферы..... | 45 |
| План лекции..... | 82 |
| Контрольные вопросы-задания..... | 83 |

Глава 3

ЭЛЕМЕНТНЫЙ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ БИОСФЕРЫ

| | |
|---|-----|
| 3.1. Основные понятия и определения..... | 87 |
| 3.2. Анализ геохимии элементов..... | 95 |
| 3.3. Геохимия и распределение живого вещества в биосфере..... | 97 |
| План лекции..... | 117 |
| Контрольные вопросы-задания..... | 118 |

Глава 4

ИЗМЕНЕНИЕ БИОСФЕРЫ ЧЕЛОВЕКОМ

| | |
|--|-----|
| 4.1. Общие проблемы антропогенного преобразования биосферы..... | 121 |
| 4.2. Антропогенное преобразование и загрязнение атмосферы..... | 130 |
| 4.3. Общепромышленное преобразование и загрязнение гидросферы..... | 143 |
| 4.4. Индустриальное загрязнение и нарушение литосферы..... | 154 |
| 4.5. Биосферные проблемы сельскохозяйственного комплекса..... | 159 |
| 4.6. Проблемы радионуклидного загрязнения биосферы..... | 175 |
| План лекции..... | 187 |
| Контрольные вопросы-задания..... | 187 |

Глава 5

ИЗМЕНЕНИЕ БИОСФЕРЫ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ

| | |
|---|-----|
| 5.1. Общие сведения по преобразованию биосферы горной промышленностью | 191 |
| 5.2. Загрязнение и нарушение литосферы горнопромышленным комплексом | 198 |
| 5.3. Загрязнение и нарушение гидросферы горнопромышленным комплексом | 209 |
| 5.4. Загрязнение атмосферы горнопромышленным комплексом | 216 |
| План лекции | 224 |
| Контрольные вопросы-задания..... | 224 |

Глава 6

ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ МИГРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ВО ВНЕШНИХ ОБОЛОЧКАХ ЗЕМЛИ

| | |
|--|-----|
| 6.1. Общие сведения о миграции элементов | 227 |
| 6.2. Механическая миграция элемент..... | 232 |
| 6.3. Физико-химическая миграция | 238 |
| 6.4. Биогенная миграция..... | 243 |
| 6.5. Техногенная миграция | 257 |
| 6.6. Биогеохимический круговорот атомов..... | 261 |
| План лекции | 284 |
| Контрольные вопросы-задания..... | 284 |

Глава 7

КОЭВОЛЮЦИЯ БИОСФЕРЫ И РЕГУЛИРУЕМОЙ ТЕХНОСФЕРЫ

| | |
|---|------------|
| 7.1. История биосфероохранных разработок | 289 |
| 7.2. Современное восприятие биосферы как сложной системы | 294 |
| 7.3. Естественная эволюция биосферы | 300 |
| 7.4. Биосфероохранные технологии будущего | 302 |
| 7.5. Роль горнопромышленного комплекса в регулируемой коэволюции биосферы Земли | 314 |
| 7.6. Самоорганизация природных геохимических ландшафтов | 428 |
| План лекции | 333 |
| Контрольные вопросы-задания..... | 333 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 335 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 337 |