



Г. И. Березин, Т. А. Адамович,  
С. Ю. Огородникова, А. В. Албегова

# ОСНОВЫ ХИМИИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

*Учебное пособие*



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт химии и экологии  
Кафедра экологии и природопользования

Г. И. БЕРЕЗИН, Т. А. АДАМОВИЧ, С. Ю. ОГОРОДНИКОВА,  
А. В. АЛБЕГОВА

# **ОСНОВЫ ХИМИИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Учебное пособие

Киров  
2018

УДК 504.054(07)  
О-753

Рекомендовано к изданию методическим  
советом института химии и экологии  
ВятГУ

Допущено редакционно-издательской комиссией методического совета ВятГУ в качестве учебного пособия для студентов специальности 04.05.01 «Фундаментальная и прикладная химия», направления подготовки 44.03.05 «Педагогическое образование»; 05.03.06 «Экология и природопользование»; 35.03.01 «Лесное дело»

Рецензенты:

д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории  
биотехнологии растений и микроорганизмов

Зонального научно-исследовательского института  
сельского хозяйства Северо-Востока Н. В. Рудницкого

А. А. Широких;

канд. биол. наук, доцент кафедры фундаментальной химии  
и методики обучения химии

Е. В. Товстик

О-753 Основы химии окружающей среды: учебное пособие / Г. И. Березин, Т. А. Адамович, С. Ю. Огородникова, А. В. Албегова. – Киров: ВятГУ, 2018. – 207 с.

УДК 504.054(07)

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 04.05.01 Фундаментальная и прикладная химия, направления подготовки 44.03.05 Педагогическое образование; направления подготовки 05.03.06 Экология и природопользование; направления подготовки 35.03.01 Лесное дело, изучающих дисциплину «Химия окружающей среды».

© ВятГУ, 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. ХИМИЯ БИОСФЕРЫ .....	7
1.1. Типы вещества в биосфере .....	7
1.2. Функции живого вещества .....	9
1.3. Модели биосферы и её границы .....	12
1.4. Взаимосвязь круговоротов вещества и энергии в биосфере .....	17
1.5. Химические элементы в биосфере .....	23
1.6. Физико-химические процессы в живых организмах .....	25
2. ХИМИЯ АТМОСФЕРЫ .....	35
2.1. Состав и строение атмосферы .....	35
2.2. Химические реакции в атмосфере .....	40
2.3. Экологические проблемы химии атмосферы .....	43
2.4. Защитные функции атмосферы .....	72
3. ХИМИЯ ГИДРОСФЕРЫ .....	76
3.1. Свойства воды и гипотезы её происхождения .....	76
3.2. Классификация и состав природных вод .....	80
3.3. Водные ресурсы .....	90
3.4. Загрязнение воды. Способы очистки воды .....	107
4. ХИМИЯ ЛИТОСФЕРЫ .....	118
4.1. Литосфера. Строение Земли, геосферы, объём, масса.....	118
4.2. Ресурсы Земли .....	124
4.3. Характеристики почв .....	127
4.4. Антропогенное воздействие на почвы .....	131
5. МИГРАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ. БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ .....	146
5.1. Типы миграции .....	146
5.2. Глобальные биогеохимические циклы .....	153
5.3. Круговорот воды в природе .....	158
5.4. Круговороты биогенных элементов .....	162
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	191
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	194

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время экология представляет собой сложный интегрированный комплекс наук. Специалисты экологии и химики должны иметь достаточно ясное понимание аспектов взаимоотношения современного общества и окружающей среды, особенности функционирования биосферы в условиях все усиливающегося техногенного давления, методов анализа природных сред и объектов, контроля качества окружающей среды и места химии в экологической науке.

Главными особенностями современных экологических проблем является их комплексность (они охватывают всю систему взаимосвязанных геосфер Земли) и глобальность. Для современной экологии характерно как изучение существующих процессов в окружающей среде, так и поиск новых путей решения стоящих перед человечеством проблем. Экология как наука, охватывающая круг явлений в биосфере, тесно связана с вопросами биологии, химии, химической технологии, сельского хозяйства и др.

Химические процессы являются фундаментом, как для жизни, так и для существования биосферы в целом, соответственно для описания и управления динамическим равновесием в биосфере необходимо знание химических механизмов взаимодействия между отдельными подсистемами. Эта область экологии оформилась в отдельную научную дисциплину – химию окружающей среды или химическую экологию, под которой понимается наука о химических взаимодействиях между живыми организмами и неживой природой. В задачи химии окружающей среды входят вопросы о степени влияния отдельных видов антропогенных воздействий на биосферу и предсказания возможных экологических последствий химических загрязнений.

Существует также и другой аспект взаимоотношения химии и экологии, который изучает качественный и количественный состав антропогенных загрязнений биосферы в результате производственной и сельскохозяйственной деятельности человека и различные механизмы их транс-

формации в окружающей среде. В решении этих проблем доминирующим является химический аспект, который больше входит в компетенцию специалистов в области химии, чем биологии. Эта область знаний получила название экологической химии, под которой понимается наука об антропогенных химических загрязнениях и о механизмах их превращений в биосфере. Основная задача экологической химии – максимальное уменьшение уровня нагрузки антропогенных воздействий за счёт разработки новых или модификации существующих технологических процессов, разработки способов эффективной очистки отходов производств, разработки способов прогнозирования и регуляции уровня химического загрязнения в объектах окружающей среды. Сюда же можно отнести: рекомендации по разработке новых препаратов, употребляемых в сельском хозяйстве и бытовой химии; рекомендации по профилактике других процессов, приводящих к загрязнению окружающей среды; решение вопросов, связанных с порчей пищевых продуктов, деструкцией конструкционных материалов и др.

Помимо этого в блоке наук об окружающей среде существует ещё несколько химических дисциплин:

- Токсикологическая химия – химия ядовитых веществ, занимающаяся, главным образом, вопросами их взаимодействия с живыми тканями и организмами.
- Аналитическая химия окружающей среды – приложение аналитической химии для обнаружения различных веществ в окружающей среде.

Для решения проблем охраны окружающей среды необходимы исследования того, как ведут себя в ней, к каким последствиям приводят новые виды химических соединений, попадающих в круговорот веществ в биосфере в результате человеческой деятельности, то есть требуется качественно новый подход к оценке взаимодействия человека с окружающей средой и его влиянию на скорость и направление антропогенных и природных факторов. Наряду с констатацией происходящих в природе



часто негативных изменений нужно переходить к прогнозированию и управлению качеством среды обитания.

Условно связь химических, экологических и биологических наук изображена на рисунке (рис. 1).



Рис. 1. Связь химических, биологических и экологических наук

Таким образом, химия окружающей среды (Environmental Chemistry), – это наука, которая занимается изучением источников, реакций, поведения химических веществ в водной, почвенной, воздушной окружающей среде и действии на них техносферы. С одной стороны она – часть химии, такая же, как органическая химия, физическая химия или биохимия, с другой стороны – она изучает окружающую человека среду.

# 1. ХИМИЯ БИОСФЕРЫ

Французский учёный-естествоиспытатель Жан Батист Ламарк в начале XIX в. (1802 г.) впервые предложил по сути дела концепцию биосферы, ещё не введя даже самого термина. Он отметил планетарную роль жизни в формировании земной коры, как в настоящее время, так и в прошлые этапы истории планеты

Термин «биосфера» был предложен австрийским геологом и палеонтологом Эдуардом Зюссом в 1875 г. Глобальная экосистема, объединяющая все живые сообщества планеты в их взаимосвязи и взаимообусловленности друг с другом и с абиотическими факторами, есть биосфера – «область жизни» – пространство на поверхности Земли в котором обитают живые организмы.

Целостное учение о биосфере создал биогеохимик и философ В. И. Вернадский в 1926 г. В своём труде «Биосфера». Вернадский подчёркивал, что биосфера не просто пространство, в котором обитают живые организмы. Состав биосферы определяется деятельностью живых организмов и представляет собой результат их совокупной биохимической активности в настоящем и прошлом. Существует и другое, более широкое определение: Биосфера как область распространения жизни на космическом теле. При том, что существование жизни на других космических объектах, помимо Земли пока неизвестно.

## 1.1 Типы вещества в биосфере

Типы вещества в биосфере:

1. **Живое вещество** – вся совокупность тел живых организмов, населяющих Землю, физико-химически едина, вне зависимости от их систематической принадлежности. Масса живого вещества сравнительно мала и оценивается величиной  $2,4 - 3,6 \cdot 10^{12}$  т (в сухом весе) и составляет менее одной миллионной части всей биосферы (около  $3 \cdot 10^{18}$  т), которая, в свою



очередь, представляет собой менее одной тысячной массы Земли. Но это одна «из самых могущественных геохимических сил нашей планеты», поскольку живые организмы не просто населяют земную кору, а преобразуют облик Земли.

**2. Биогенное вещество** – вещество, создаваемое и перерабатываемое живым организмом. На протяжении органической эволюции живые организмы тысячекратно пропустили через свои органы, ткани, клетки, кровь большую часть атмосферы, весь объём мирового океана, огромную массу минеральных веществ. Эту геологическую роль живого вещества можно представить себе по месторождениям угля, нефти, карбонатных пород и т. д.

**3. Косное вещество** – вещества, образующиеся без участия живых организмов.

**4. Биокосное вещество** – вещество, которое создается одновременно живыми организмами и косными процессами, представляя динамически равновесные системы тех и других. Таковы почва, ил, кора выветривания и т. д. Организмы в них играют ведущую роль.

**5. Вещество, находящееся в радиоактивном распаде.** Это радиоактивные изотопы различных элементов, таких как  $\text{Th}^{232}$ ,  $\text{U}^{238}$ ,  $\text{C}^{14}$  и т.д.

**6. Рассеянные атомы,** подразумеваются атомы рассеянных элементов таких как Au, Co, Hg, Ti и т.д.

**7. Вещество космического происхождения.** Метеориты, космическая пыль непрерывно поступающие на Землю из космического пространства.

Основными недостатками данной классификации веществ являются пересечения между категориями некоторых веществ. Например, вещество космического происхождения является одновременно косным, а элементы находящиеся в радиоактивном распаде, как правило, являются рассеянными элементами.

## **1.2 Функции живого вещества**

### **1. Энергетическая функция**

Суть данной функции живого вещества это поглощение солнечной энергии при фотосинтезе и химической энергии при разложении эне́ргонасыщенных веществ, передача энергии по пищевым цепям.

В результате осуществляется связь биосферно-планетарных явлений с космическим излучением, преимущественно с солнечной радиацией. За счёт накопленной солнечной энергии протекают все жизненные явления на Земле. Недаром Вернадский назвал зелёные хлорофильные организмы главным механизмом биосферы.

Поглощённая энергия распределяется внутри экосистемы между живыми организмами в виде пищи. Частично энергия рассеивается в виде тепла, а частично накапливается в отмершем органическом веществе и переходит в ископаемое состояние. Таким путём образовались залежи торфа, каменного угля, нефти и других горючих полезных ископаемых.

### **2. Деструктивная функция**

Эта функция состоит в разложении, минерализации мертвого органического вещества, химическом разложении горных пород, вовлечении образовавшихся минералов в биотический круговорот, т.е. обуславливает превращение живого вещества в косное. В результате образуются также биогенное и биокосное вещество биосферы.

Особо следует сказать о химическом разложении горных пород. «Мы не имеем на Земле более могучего дробителя материи, чем живое вещество», – писал Вернадский. Пионеры жизни на скалах – бактерии, синезеленые водоросли, грибы и лишайники – оказывают на горные породы сильнейшее химическое воздействие растворами целого комплекса кислот – угольной, азотной, серной и разнообразных органических. Разлагая с их помощью те или иные минералы, организмы избирательно извлекают и включают в биотический круговорот важнейшие питательные элементы – кальций, калий, натрий, фосфор, кремний, микроэлементы.

### 3. Концентрационная функция

Так называется избирательное накопление в ходе жизнедеятельности определённых видов веществ для построения тела организма или удаляемых из него при метаболизме. В результате концентрационной функции живые организмы извлекают и накапливают биогенные элементы окружающей среды. В составе живого вещества преобладают атомы лёгких элементов: водорода, углерода, азота, кислорода, натрия, магния, кремния, серы, хлора, калия, кальция. Концентрация этих элементов в теле живых организмов в сотни и тысячи раз выше, чем во внешней среде. Этим объясняется неоднородность химического состава биосферы и ее существенное отличие от состава неживого вещества планеты. Наряду с концентрационной функцией живого организма вещества выделяется противоположная ей по результатам – **рассеивающая**. Она проявляется через трофическую и транспортную деятельность организмов. Например, рассеивание вещества при выделении организмами экскрементов, гибели организмов, при разного рода перемещениях в пространстве, смене покровов. Железо гемоглобина крови рассеивается, например, через кровососущих насекомых.

### 4. Средообразующая функция

Преобразование физико-химических параметров среды (литосферы, гидросферы, атмосферы) в результате процессов жизнедеятельности в условиях, благоприятных для существования организмов. Эта функция является совместным результатом рассмотренных выше функций живого вещества: энергетическая функция обеспечивает энергией все звенья биологического круговорота; деструктивная и концентрационная способствуют извлечению из природной среды и накоплению рассеянных, но жизненно важных для живых организмов элементов. Очень важно отметить, что в результате средообразующей функции в географической оболочке произошли следующие важнейшие события: был преобразован газовый состав первичной атмосферы, изменился химический состав вод первичного океана, образовалась толща осадочных пород в литосфере, на поверхности

суши возник плодородный почвенный покров. «Организм имеет дело со средой, к которой не только он приспособлен, но которая приспособлена к нему», – так характеризовал Вернадский средообразующую функцию живого вещества.

Рассмотренные четыре функции живого вещества являются главными, определяющими функциями. Можно выделить ещё некоторые функции живого вещества, например:

- **газовая функция** обуславливает миграцию газов и их превращения, обеспечивает газовый состав биосферы. Преобладающая масса газов на Земле имеет биогенное происхождение. В процессе функционирования живого вещества создаются основные газы: азот, кислород, углекислый газ, сероводород, метан и др. Хорошо видно, что газовая функция является совокупностью двух основополагающих функций – деструктивной и средообразующей;

- **окислительно-восстановительная функция** заключается в химическом превращении главным образом тех веществ, которые содержат атомы с переменной степенью окисления (соединения железа, марганца, азота и др.). При этом на поверхности Земли преобладают биогенные процессы окисления и восстановления. Обычно окислительная функция живого вещества в биосфере проявляется в превращении бактериями и некоторыми грибами относительно бедных кислородом соединений в почве, коре выветривания и гидросфере в более богатые кислородом соединения. Восстановительная функция осуществляется при образовании сульфатов непосредственно или через биогенный сероводород, производимый различными бактериями. И здесь мы видим, что данная функция является одним из проявлений средообразующей функции живого вещества;

- **транспортная функция** – перенос вещества против силы тяжести и в горизонтальном направлении. Ещё со времён Ньютона известно, что перемещение потоков вещества на нашей планете определяется силой земного тяготения. Неживое вещество само по себе перемещается по наклон-

ной плоскости исключительно сверху вниз. Только в этом направлении движутся реки, ледники, лавины, осыпи.

### 1.3 Модели биосферы и её границы

#### Модели биосферы

В 1991–1994 гг. была попытка создания искусственной модели биосферы – Бисфера-2 (рис. 2). Лаборатория представляет собой сеть герметичных зданий общей площадью около 1,5 га из лёгких материалов, разделённых на несколько независимых экосистем и покрытых стеклянным куполом, пропускающим около 50% солнечного света.

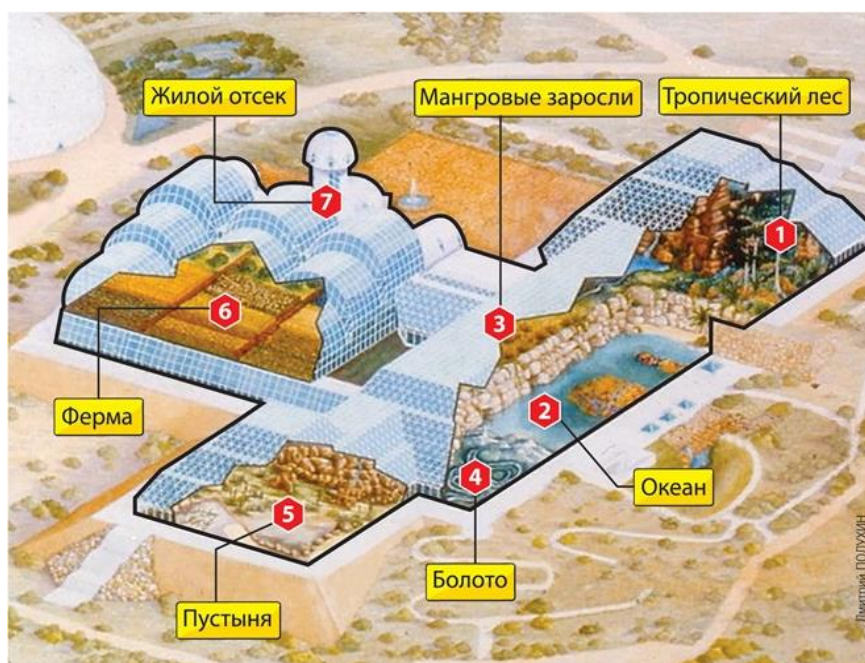


Рис. 2. Схема «Биосферы-2»

Внутреннее пространство разделено на 7 блоков, среди которых — тропический лес, миниатюрный океан с необычным химическим составом, пустыня, саванна и мангровый эстуарий. Внутреннее давление регулировалось таким образом, чтобы оно соответствовало наружному — это сводит к минимуму утечки воздуха. Восемь человек (четыре женщины и четверо мужчин) пробыли в «Биосфере-2» около двух лет, поддерживая связь с внешним миром только через компьютер. Вместе с ними туда же были

доставлены 3000 видов растений и животных. Данный проект полностью провалился, так как не получилось создать полностью автономную жизне-способную модель биосферы из-за недопонимания всей сложности и масштабов взаимодействия живых организмов между собой и средой обитания оригинальной биосферы.

### Границы биосферы

В масштабе планеты биосфера – часть геологической оболочки Земли, включающая верхнюю часть литосферы, всю гидросферу и нижнюю часть атмосферы – тропосферу, в которых существует жизнь (рис. 3).

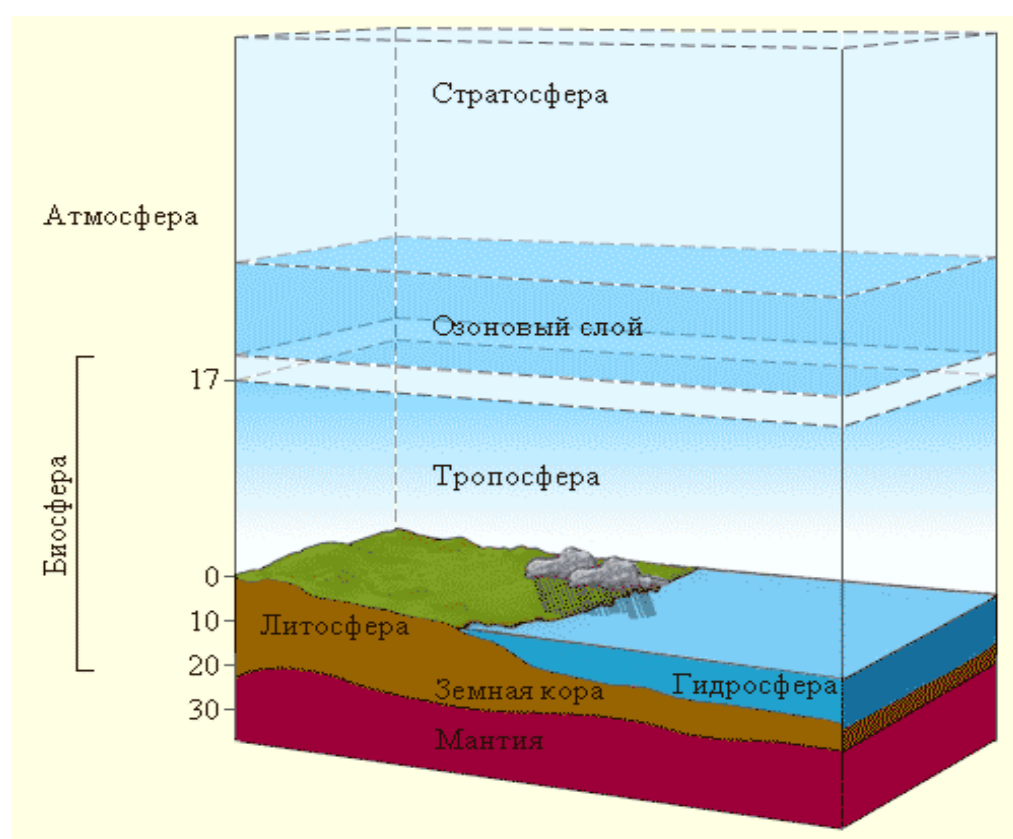


Рис. 3. Структура биосферы

Более точные границы биосферы не просто обозначить и сегодня. Для их выявления используют сведения о сфере распространения живых организмов.

**Аэриобиосфера.** Верхняя граница в атмосфере: 15–20 км. Она определяется озоновым слоем, задерживающим коротковолновое ультрафиолетовое излучение, губительное для живых организмов. Субстратом для

жизни в атмосфере микроорганизмов (аэробиев) служат водные пары – атмосферная влага, источником энергии – солнечная энергия и аэрозоли. Считается, что в биосферу входит нижний слой атмосферы – тропосфера, которая простирается до высоты 8–10 км в полярных широтах и до 16–18 км в тропиках.

**Геобиосфера.** Нижняя граница в литосфере: 3,5–7,5 км. Она определяется температурой перехода воды в пар и температурой денатурации белков, однако в основном распространение живых организмов ограничивается вглубь несколькими метрами.

Геобиосферу населяют геобиоты, субстратом, а отчасти и средой жизни, для которых служит земная твердь. Геобиосфера состоит из области жизни на поверхности суши – террабиосферы (с террабиотами), разделяемой на фитосферу (от поверхности земли до верхушек деревьев) и педосферу (почвы и подпочвы; иногда сюда включают всю кору выветривания) и жизнь в глубинах Земли – литобиосферу (с литобиотами, живущими в порах горных пород, главным образом в подземных водах). На больших высотах в горах, где уже невозможна жизнь высших растений, расположена высотная часть террабиосферы – эоловая зона (с эолобиотами). Литобиосфера распадается на слой, где возможна жизнь аэробов – гипотеррабиосферу, и слой, где возможно лишь обитание анаэробов – теллуриобиосферу. Жизнь в неактивной форме может проникать глубже – в гипобиосферу. Метабиосфера – все биогенные и биокосные породы. Глубже расположена абиосфера.

В глубинах литосферы есть 2 теоретических уровня распространения жизни – изотерма 100 °С, ниже которой вода при нормальном атмосферном давлении кипит, и изотерма 460 °С, где при любом давлении вода превращается в пар, то есть в жидком состоянии быть не может.

**Гидробиосфера.** Гидробиосфера – весь глобальный слой воды (без подземных вод), населённый гидробиотами – разделяется на слой континентальных вод – аквабиосферу (с аквабиотами) и область морей и океа-



нов – маринобиосферу (с маринобионтами). По уровню освещённости в ней выделяют 3 слоя – относительно ярко освещённую фотосферу, всегда очень сумеречную дисфотосферу (до 1 % солнечной инсоляции) и слой абсолютной темноты – афотосферу.

Рассмотрим, какие физико-химические условия определяют существование живых организмов.

Во-первых, это достаточное количество углекислого газа и кислорода. В Гималаях распространение зелёной растительности ограничено высотой 6200 м, где парциальное давление углекислого газа вдвое ниже, чем на уровне моря. Выше 6 км встречаются единичные виды пауков и насекомых.

Во-вторых, существование живых организмов обеспечивает достаточное количество воды, поддерживающее нормальный ход метаболических ферментативных процессов. Отличительной особенностью живого является его обводненность. Содержание воды в тканях всех живых организмов примерно в 5 раз больше, чем во всех реках планеты. Половина воды, содержащейся в корнях растений, обновляется в течение нескольких минут. Круговорот воды на суше в значительной степени определяется транспирацией растений. На поверхности Земли нет таких участков, где жизнь ограничена водой. Даже в пустынях Африки под слоем сухого песка встречаются жуки-чернотелки, они обходятся без атмосферной и почвенной влаги, получая метаболическую воду (образуется при окислении различных органических веществ) только с остатками растений.

В-третьих, для живых организмов необходим благоприятный термический режим, исключающий слишком высокие температуры (происходит свёртывание белков), либо слишком низкие температуры, прекращающие работу ферментов. Чемпионами по выживанию являются прокариоты, которые выдерживают в состоянии анабиоза экстремальные температуры. Некоторые из них живут на снегу, в лужицах пресной воды на льдинах, в скальных породах Антарктиды. Другие прокариоты обитают в горячих источниках при температуре до 98 °С, а в подземных водах – и при 100 °С.

В прибрежных водах Антарктиды живут прокариоты, отделённые от внешнего мира слоем льда 420 м. Укрывающий их ледяной панцирь существует не менее 120 тыс. лет. Известны бактерии, которые переносят двадцатичасовое пребывание при температуре  $-252^{\circ}\text{C}$ . Двухсотградусный мороз они способны выдерживать в течение многих месяцев. В подводных гейзерах Восточно-Тихоокеанского хребта обитают термофильные бактерии, способные размножаться при температуре  $250^{\circ}\text{C}$ , причём они сохраняют жизнеспособность при повышении температуры ещё на  $100^{\circ}\text{C}$ . Итак, температурная амплитуда существования прокариот –  $600^{\circ}\text{C}$ .

Диапазон давления, при котором возможна жизнь, изменяется от 8000 атм. (выживают дрожжи) до 0,001 атм. (семена и споры).

Океан заселен полностью. Углекислый газ океанических вод усваивается автотрофными растениями в ходе фотосинтеза. Создаваемое ими органическое вещество обеспечивает существование всех морских организмов, даже на глубинах более 10 км живут многоклеточные организмы – «морские огурцы» – голотурии, класс иглокожих.

Распространение жизни вглубь донных осадков ограничивается десятиными долями метров, максимально – единицами метров.

В. И. Вернадский предполагал, что вся осадочная оболочка Земли заселена бактериями, но его предположение не подтвердилось. Нижняя граница биосферы на континентах ограничена температурой и концентрацией солей подземных вод. В Западной Сибири активная и разнообразная анаэробная микрофлора была найдена на глубине более 3000 м. Если содержание солей в подземных водах составляет более 270 г/л, то бактерии отсутствуют и на меньших глубинах (до глубины 500 м – в Ангари-Ленском бассейне, 1200 м – в Волго-Камском).

Ионизирующие излучения являются мощным фактором разрушения живых организмов. Есть микроорганизмы, концентрирующие уран и процветающие в природных зонах с повышенным радиоактивным фоном и районах радиоактивного заражения. Некоторые их представители

живут даже в ядерных реакторах, где доза ионизирующего облучения составляет 2–3 млн рад.

В определённых интервалах черносланцевых толщ практически отсутствуют остатки фауны и флоры, кроме отмерших микроорганизмов, биомасса которых составляет до 10–20% веса пород (баженовская свита рубежа юры и мела в Западной Сибири). Нельзя исключать, что аномальное концентрирование урана микроорганизмами в определённые геологические эпохи преследовало цель утилизировать энергию радиоактивного распада при отсутствии других её источников.

Иногда под биосферой понимается зона существования не только живых организмов, но и продуктов их жизнедеятельности. В этом случае границы биосферы становятся недостаточно определёнными: молекулы кислорода, создаваемого автотрофными организмами, достигают верхних пределов атмосферы, которые оценить можно только приближённо. Продукт жизнедеятельности тех же растений – органический углерод может перемещаться благодаря вертикальным тектоническим движениям от земной поверхности на значительные глубины, которые трудно определить точно. В. И. Вернадский определял «былые биосферы» как оболочку Земли, когда-либо подвергавшуюся воздействию жизни. Он писал, что земная кора захватывает в пределах нескольких десятков километров ряд геологических оболочек, которые когда-то были на поверхности Земли биосферами.

#### **1.4 Взаимосвязь круговоротов вещества и энергии в биосфере**

Так как все доступные для живых организмов химические соединения в биосфере ограничены, то истощаемость пригодных для усвоения химических веществ часто тормозит развитие тех или иных групп организмов в локальных участках суши или океана. Поэтому единственный способ придать конечному свойству бесконечного состоит в том, чтобы заставить его вращаться по замкнутой кривой. Следовательно, устойчивость биосфе-

ры поддерживается благодаря круговороту веществ и потокам энергии. Имеются два основных круговорота веществ: большой (рис. 4) – геологический и малый – биогеохимический.



Рис. 4. Взаимосвязь потоков энергии и вещества в геологическом круговороте

Кристаллические горные породы (магматические) под воздействием биологических, физических и химических факторов преобразуются в осадочные породы. Песок и глина – типичные осадки, продукты преобразования глубинных пород. Однако формирование осадков происходит не только за счёт разрушения уже существующих пород, но также и путём синтеза биогенных минералов – скелетов микроорганизмов – из природных ресурсов – вод океана, морей и озер. Рыхлые водянистые осадки по мере их изоляции на дне водоёмов новыми порциями осадочного материала, погружения на глубину, попадания в новые термодинамические условия (более высокие температуры и давление) теряют воду, отвердевают, преобразуясь при этом в осадочные горные породы.

В дальнейшем эти породы погружаются в ещё более глубокие горизонты, где и протекают процессы их глубинного преобразования к новым температурным и барическим условиям, – происходят процессы метаморфизма.

Под воздействием потоков эндогенной энергии глубинные породы переплавляются, образуя магму – источник новых магматических пород. После поднятия этих пород на поверхность Земли, под действием процессов выветривания и переноса снова происходит их трансформация в новые осадочные породы.

Таким образом, большой круговорот обусловлен взаимодействием солнечной (экзогенной) энергии с глубинной (эндогенной) энергией Земли. Он перераспределяет вещества между биосферой и более глубокими горизонтами нашей планеты.

В целом циркуляцию вещества между геосферами Земли можно описать следующей универсальной схемой (рис. 5).

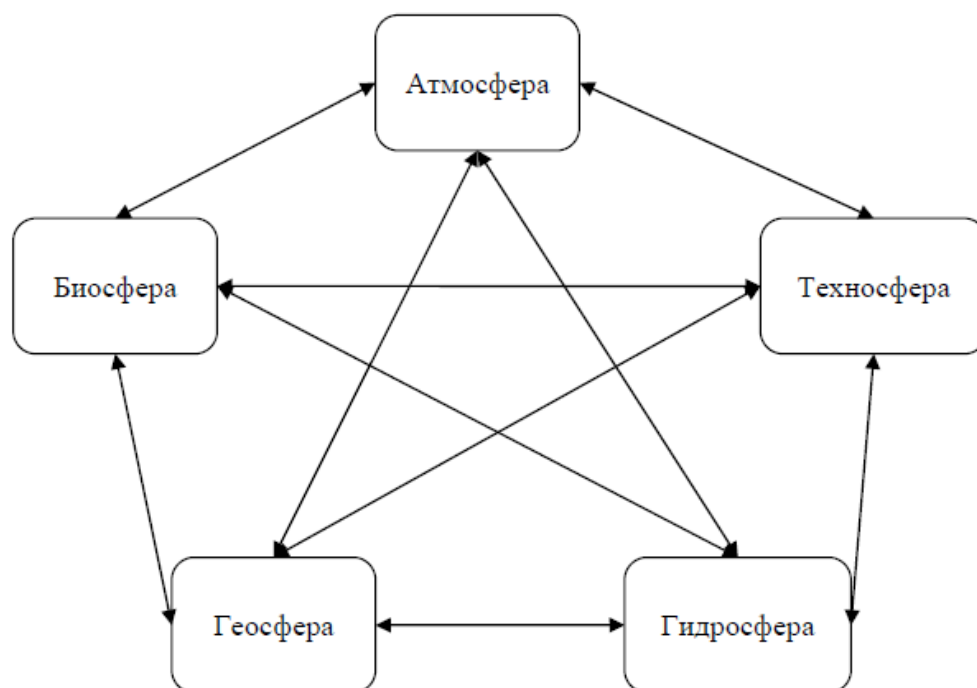
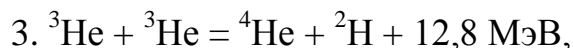
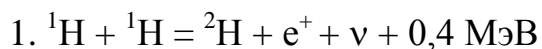


Рис. 5. Универсальная схема описания циркуляции веществ между резервуарами Земли

**Энергия в биосфере.** Биосфера является открытой термодинамической системой, поэтому её существование возможно при постоянном поступлении энергии Солнца.

Значительная доля энергии, образовавшейся внутри Солнца за счёт сгорания водорода, излучается через фотосферу в межпланетное пространство.

Реакции термоядерного синтеза происходящие в ядре Солнца:



где:  $e^+$  – позитрон,

$\nu$  – нейтрино,

$\gamma$  – гамма-квант

Полная излучаемая мощность Солнца достигает колоссальных значений  $4 \cdot 10^{26}$  Вт, поток излучения его с поверхности  $6 \cdot 10^3$  Вт/см<sup>2</sup>. Земля получает лишь  $2 \cdot 10^{-9}$  доли от общего излучения Солнца, и этого количества достаточно, чтобы оказывать решающее влияние на климат, жизнь и другие процессы, протекающие на планете.

Из всего количества энергии получаемой Землей от Солнца, 33% отражается облаками и поверхностью суши, а также пылью в верхних слоях атмосферы. Эта часть составляет альбедо Земли, 67% энергии поглощается атмосферой и земной поверхностью (континентами и Мировым океаном) и после ряда превращений уходит в космическое пространство (рис. 6).

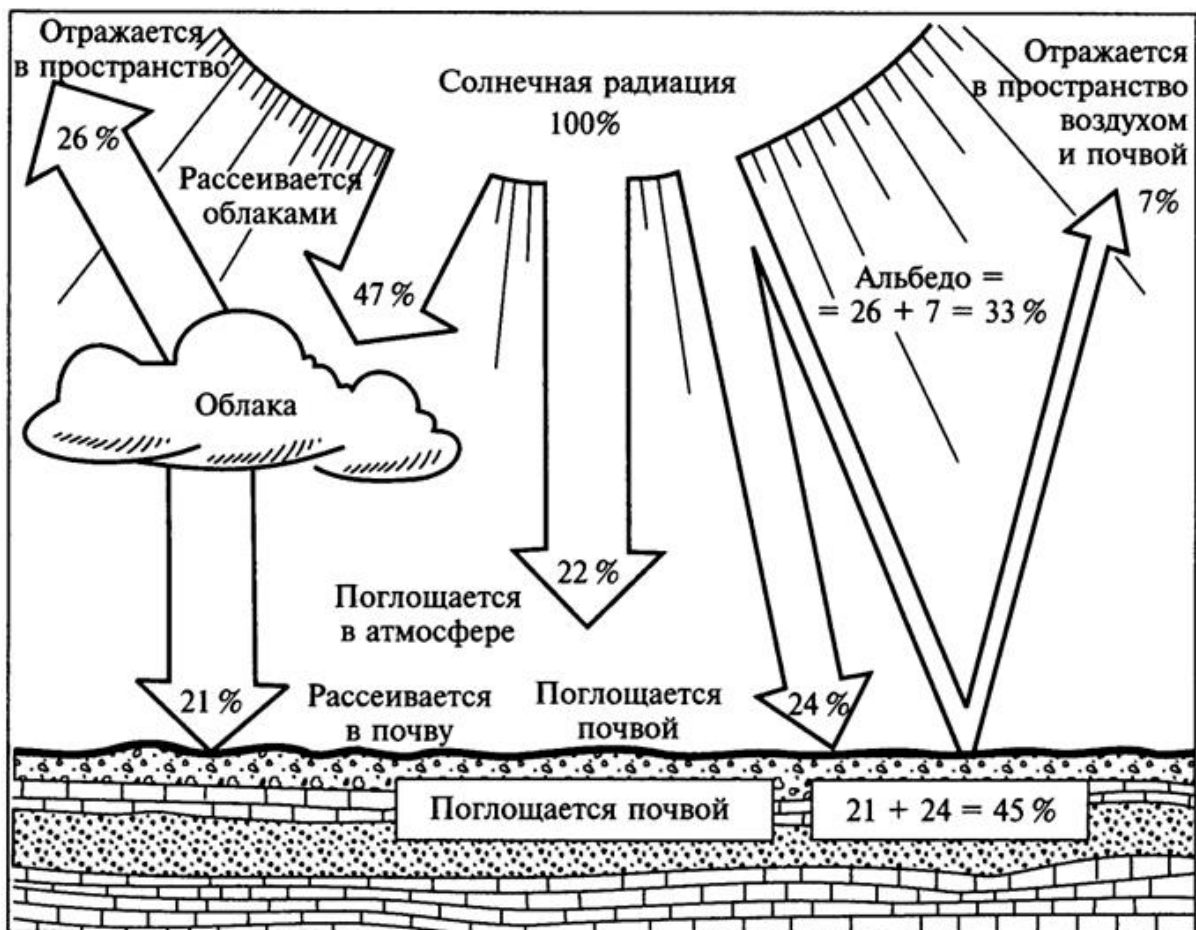


Рис. 6. Поступление и распределение солнечной энергии в пределах биосферы

В атмосфере нагревание происходит в основном от поверхности Земли, что приводит к образованию мощных конвективных потоков и общей циркуляции воздушных масс. Океанические течения, движимые преимущественно ветром, перераспределяют полученную солнечную энергию в горизонтальном направлении, что влияет на снабжение атмосферы теплом. Мировой океан и атмосфера представляют собой единую тепловую систему.

За счёт излучения и конвекции поддерживается весь энергетический баланс нашей планеты. Круговорот воды в биосфере также определяется поступлением солнечной энергии.

**Законы термодинамики в биосфере.** Все процессы поглощения или выделения энергии в биосфере происходят в соответствии с фундаментальными законами природы – законами термодинамики.



1. Первое начало термодинамики (Закон сохранения энергии). Энергия в природе может переходить из одной формы в другую, но никогда не создаётся вновь и не исчезает бесследно. Количество энергии остаётся постоянным.

2. Второе начало термодинамики. Не может быть ни одного процесса, связанного с превращением энергии, без потери некоторой ее части (физический принцип, накладывающий ограничение на направление процессов передачи тепла между телами. Применительно к биосфере этот закон иллюстрируют потери энергии при переходе с уровня на уровень в пищевых цепочках экосистем (рис. 7).

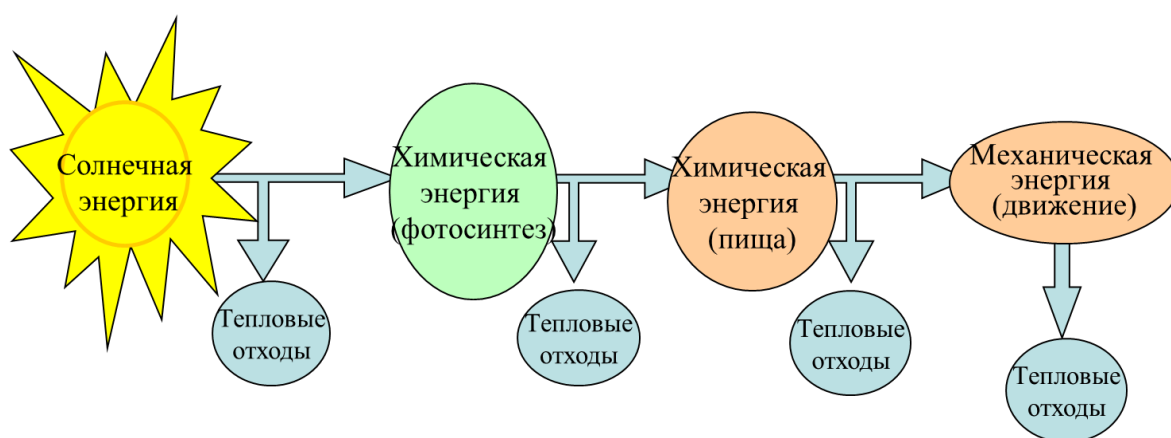


Рис. 7. Потери энергии при её преобразовании в экосистемах

3. Третье начало термодинамики. Третье начало термодинамики (теорема Нернста) – физический принцип, определяющий поведение энтропии термодинамической системы при приближении температуры к абсолютному нулю. Однако температуры при которых существует биосфера Земли значительно выше абсолютного нуля.

4. Нулевым (или общим) началом термодинамики иногда называют принцип, согласно которому замкнутая система независимо от начального состояния, в конце концов, приходит к состоянию термодинамического равновесия и самостоятельно выйти из него не может. При термодинамическом равновесии выполняются частные равновесия: механическое, химическое, термическое и др. Но т.к. биосфера Земли не является закрытой системой, а является диссипативной, то данный закон не соблюдается.

Диссипативная система (или диссипативная структура, от лат. dissipatio – «рассеиваю, разрушаю») – это открытая система, которая оперирует вдали от термодинамического равновесия. Иными словами, это устойчивое состояние, возникающее в неравновесной среде при условии диссипации (рассеивания) энергии, которая поступает извне.

## 1.5 Химические элементы в биосфере

Химические элементы являются кирпичиками мироздания. Все многообразие окружающей нас действительности (и мы сами) состоит из комбинаций атомов сравнительно небольшого числа химических элементов. Около 90 элементов существует в природе (остальные получены искусственно с помощью ядерных реакций). Организм человека содержит около 70 элементов. Всего лишь 8 элементов – кислород, кремний, алюминий, железо, кальций, натрий, калий и магний – составляют по массе 99% земной коры, причём половина приходится на кислород, а четверть – на кремний.

Поскольку все живое и окружающая живое среда состоят из атомов определённых элементов, совершенно ясно, что любое экологическое взаимоотношение только тогда будет глубоко раскрыто и понято, когда будут проанализированы атомно-молекулярные основы этого взаимоотношения. Циклические перемещения химических элементов в биосфере придают последней определённую стабильность и обуславливают ее специфические свойства. Поэтому рассмотрение вопросов превращения элементов в природе, роли, которую они играют для биосферы, ее живых и неживых компонентов является ключевым моментом для понимания основ той или иной экологической проблемы.

**Элементы биогенные и второстепенные.** Из химических элементов, встречающихся в природе в существенных количествах (а таких ~ 50), примерно половину составляют **биогенные элементы**. Они жизненно необходимы организмам.

Оставшаяся половина – **второстепенные** элементы, не представляющие какой-либо известной ценности для живой клетки. Сам термин «второстепенные элементы» не совсем удачен. В природе нет таких элементов, к которым можно бы было относиться пренебрежительно. «Второстепенность» здесь следует понимать как редкость, слабое распространение атомов некоторых элементов в составе живой природы.

В свою очередь, биогенные элементы делят на **макро-** и **микроэлементы**. Макроэлементы (у животных к ним обычно относят 11 элементов) включают две группы: основные (C, N, S, O, P, H), из которых строятся биомолекулы клетки – белки, нуклеиновые кислоты, липиды и углеводы, и другие. Для углерода, азота, кислорода и водорода используют также исторически сложившееся общее название **органогены** – т. е. элементы, порождающие органические вещества.

Роль микроэлементов в жизни человека для одних из них доказана, для других вероятна. Главный критерий, по которому отличают макро- от микроэлементов – потребность организма в элементе (выраженная в мг/кг массы или мг/сутки). Ежедневная потребность в макроэлементах составляет примерно 100 мг/сутки, тогда как в микроэлементах не превышает нескольких миллиграммов.

Макро- и микроэлементы имеют и другие различительные особенности. Так, содержание макроэлементов в организме находится на постоянном уровне и даже случайные существенные отклонения от этого уровня не вызывают серьёзных осложнений для жизни. Недостаток или избыток микроэлементов (даже незначительный) приводит к заболеваниям.

## 1.6 Физико-химические процессы в живых организмах

**Фотосинтез** – процесс образования органических веществ из углекислого газа и воды на свету при участии фотосинтетических пигментов (хлорофилл у растений, бактериохлорофилл и бактериородопсин у бактерий). В современной физиологии растений под фотосинтезом чаще понимается фотоавтотрофная функция – совокупность процессов поглощения, превращения и использования энергии квантов света в различных эндэргонических реакциях, в том числе превращения углекислого газа в органические вещества. На рисунке 8 приведена общая схема процесса фотосинтеза.

Этот процесс – лишь один из нескольких, описываемых общим уравнением:

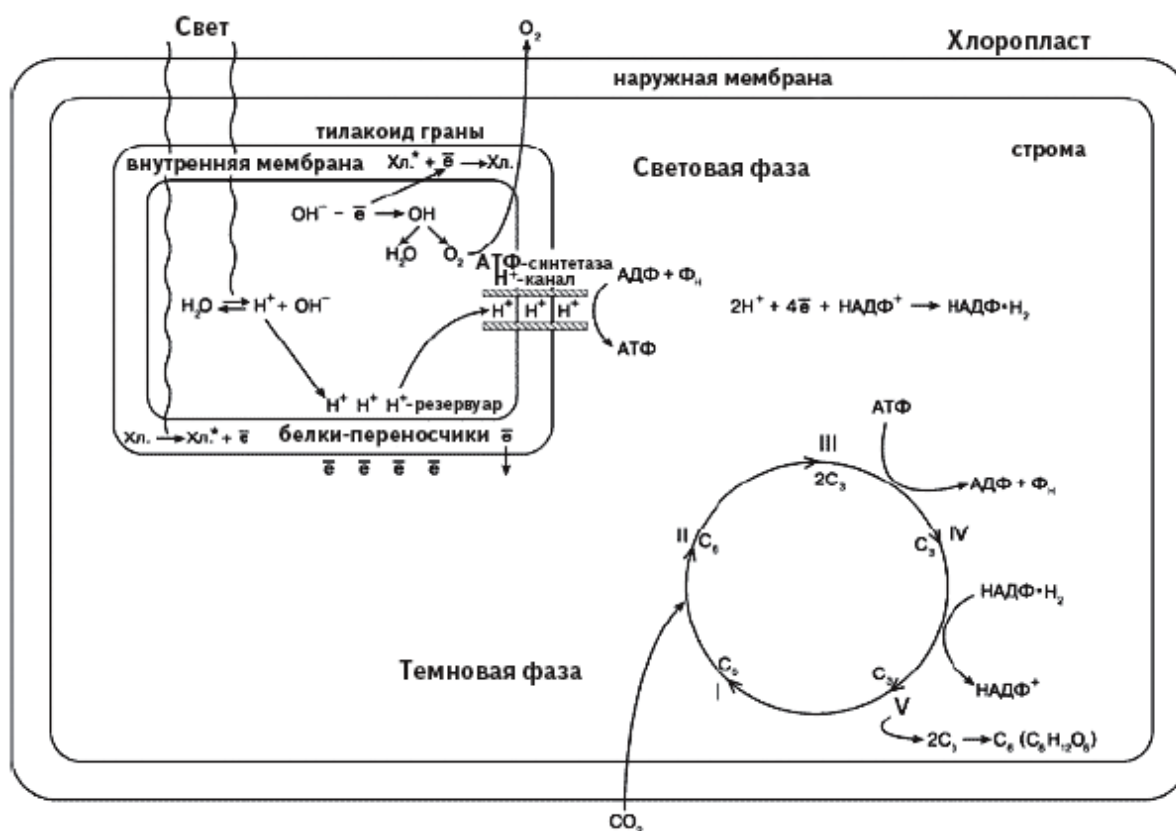
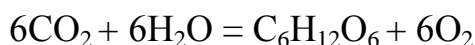


Рис. 8. Схема процесса фотосинтеза

В этой реакции донором водорода может служить вода (у цианобактерий и зелёных растений), сероводород (у фотосинтезирующих серобактерий) или различные органические соединения (у несерных пурпурных

бактерий). Реально фотосинтез – очень сложный процесс, причём у разных организмов на некоторых этапах этот процесс может идти несколькими взаимоисключающими путями. Возникновение сложных совокупностей сопряжённых реакций представляет собой результат эволюции на основе длительного действия естественного отбора.

Общий геохимический результат фотосинтеза – появление более окисленной области биосферы (атмосфера и большая часть воды, в которой растворен кислород), а также восстановленной ее области (тела организмов и продукты их разложения в подстилке, почве и донных отложениях). Часть остатков подвергается захоронению, образуя диспергированный органический углерод или горючие ископаемые. Кислород также уходит из биосферы, окисляя при выветривании первичные горные породы.

Количественное соотношение органического (восстановленного) и неорганического (окисленного) углерода, несомненно, связано с историей Земли. При этом восстановленная часть живого или мёртвого вещества биосферы постоянно окисляется атмосферным кислородом. Образуется углекислый газ, который может быть вновь использован в фотосинтезе, а энергия тратится на двигательную активность, рост и размножение. Из этого обратимого цикла некоторая часть углерода уходит, образуя горючие ископаемые. Именно наличие этой части процесса человечество обязано своей цивилизацией.

Эффективность фотосинтеза в планетарном масштабе невелика, в разных географических зонах различна. Связано это с наклоном земного шара в  $23,5^\circ$  к плоскости эклиптики. В результате возникает значительный градиент приходящего солнечного излучения между полюсами и экватором, обладающий сезонной изменчивостью. В результате фотосинтеза на Земле ежегодно синтезируются 140–160 млрд т органического вещества. Количество энергии, ежегодно потребляемой при фотосинтезе ( $3 \cdot 10^{21}$  Дж), больше всей энергии, используемой человечеством ( $3 \cdot 10^{20}$  Дж).

Фотосинтез является единственным биологическим процессом, идущим с увеличением свободной энергии системы, все остальные процессы осуществляются за счёт потенциальной энергии, запасаемой в процессе фотосинтеза.

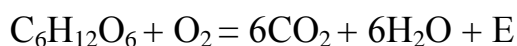
Количество солнечной радиации, приходящей на верхнюю границу атмосферы, является функцией широты. Распределение приходящей солнечной радиации зависит от свойств облачного покрова, содержания пыли в атмосфере, а также от суточных и сезонных изменений различных физических величин.

В процессе фотосинтеза используется лишь энергия видимой части спектрального состава солнечного излучения (380–710 нм), составляющая примерно 41 %. Её называют фотосинтетически активной радиацией (ФАР). Разные виды растений и растительных сообществ существенно различаются по величинам эффективности фотосинтеза (КПД, %), которую рассчитывают в процентах как отношение величины прироста сухой биомассы в единицу времени на единице пространства к величине, поглощённой ФАР, однако установлено, что средняя величина КПД фотосинтеза для естественной растительности на Земле низка и оценивается примерно в 0,2 %.

**Дыхание** – биохимический процесс полного окисления органических веществ, в процессе которого образуются углекислый газ и вода. Дыхание свойственно животным, растениям и микроорганизмам. По своей сути дыхание является обратным биохимическим процессом для фотосинтеза.

В процессе дыхания происходит аэробное окисление органических веществ с высвобождением энергии, которая используется живыми организмами.

Дыхание обеспечивает клетку энергией и активными метаболитами, необходимыми для биосинтеза. Общее химическое уравнение процесса дыхания можно представить в форме:



Реакции кислородного расщепления протекают в митохондриях.

**Хемосинтез** – процесс образования организмами разных компонентов клеток благодаря энергии, получаемой при окислении неорганических соединений. Хемосинтез был открыт русским микробиологом Н. С. Виноградским (1856–1953). Он обнаружил микроорганизмы, способные окислять аммиак до солей азотистой, затем азотной кислоты с выделением энергии. Энергия выделяется при окислении и используется для синтеза органических веществ из  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$  и минеральных соединений почвы.

Косвенно хемосинтез связан с фотосинтезом. Свободный кислород, используемый при хемосинтезе, является продуктом фотосинтеза. Различными микроорганизмами осуществляются различные реакции хемосинтеза.

**Нитрифицирующие бактерии** окисляют образующиеся при гниении органических остатков аммиак до нитрита, а затем до нитрата.

Аммонийоокисляющие бактерии окисляют аммоний до нитрита:



Нитритоокисляющие бактерии осуществляют вторую фазу нитрификации и окисляют нитриты до нитратов:



Нитрифицирующие бактерии относятся к самой распространенной группе хемолитотрофных микроорганизмов в природе, что связано с наличием восстановленных форм азота в различных экосистемах. Наиболее широко распространены аммонийоокисляющие бактерии, так как могут использовать дополнительные источники энергии окисления  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}$ , а возможно и  $\text{NO}_2$  – как акцептор электронов.

Нитрифицирующие бактерии развиваются в почвах, рыхлых горных породах, термальных источниках, в морской и пресной воде, в илах.

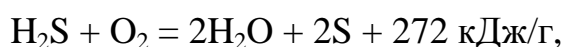
Нитрифицирующие бактерии послужили фактором образования залежей селитры. Они участвуют в процессах выветривания горных пород и каменных сооружений. Огромную роль играют в процессе почвообразования. Процесс нитрификации происходит в почве в огромных масштабах



и служит для растений источником нитратов. Жизнедеятельность бактерий представляет собой один из важнейших факторов плодородия почв. Также благодаря научным работам 1980-х годов по-другому оценивают геохимическую роль нитрифицирующих бактерий в превращении газов в природе.

В практических целях использовать нитрифицирующие бактерии пытаются для очистки сточных вод, в технологиях обогащения полезных ископаемых – для извлечения марганца и добычи угля.

**Сероредуцирующие бактерии.** Бесцветные серобактерии окисляют сероводород до серы:



Выделяющаяся в результате свободная сера накапливается в бактериальных клетках в виде множества крупинок. При недостатке сероводорода бесцветные серобактерии производят дальнейшее окисление находящейся в них свободной серы до серной кислоты:



Способность к росту за счет восстановления элементной серы свойственна представителям различных физиологических групп бактерий, которые при всей неоднородности разделяются на две большие категории – мезофильные эубактерии и экстремально термофильные архебактерии. Для первых источником серы служит биогенный сероводород, например, в таких биоценозах, как бактериальные маты озера Севаш. Много серобактерий обитает в Чёрном море, в котором глубже 200 м вода насыщена сероводородом.

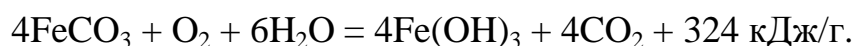
Серобактерии, образуя серную кислоту, способствуют постепенному разрушению и выветриванию горных пород, разрушению каменных и металлических сооружений; выщелачивают руды и серные месторождения.

Экстремально термофильные архебактерии развиваются в гидротермах, где сера имеет вулканическое происхождение.

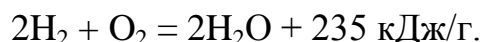
**Железобактерии.** Хемосинтезирующие бактерии, окисляющие соединения железа и марганца, обитают как в пресных, так и в морских во-

доёмах. Благодаря их жизнедеятельности на дне болот и морей образуется огромное количество отложенных руд железа и марганца.

Железобактерии окисляют соли железа:



**Водородные бактерии.** Водородные бактерии способны окислять молекулярный водород, постоянно образующийся при анаэробном (бескислородном) разложении различных органических остатков:



Значение хемосинтеза для биосферы. Хотя вклад хемосинтетиков в аккумуляцию энергии и синтез органических веществ на Земле невелик по сравнению с фотосинтетиками, они имеют огромное экологическое значение, участвуя в круговороте веществ в биосфере. Так в процессе их жизнедеятельности образовались залежи многих полезных ископаемых.

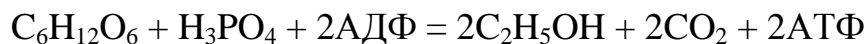
Хемосинтетики служат не только источником органического вещества на планете, то есть продуцентами, но также делают доступными для растений, и для других организмов целый ряд неорганических веществ.

**Брожение** – анаэробный ферментативный окислительно-восстановительный процесс превращения органических веществ, благодаря которому организмы получают энергию, необходимую для жизнедеятельности.

Брожение – это такой метаболический процесс, при котором регенерируется АТФ, а продукты расщепления органического субстрата могут служить одновременно и донорами, и акцепторами водорода. По выражению Луи Пастера, «брожение – это жизнь без кислорода». Большинство типов брожения осуществляют микроорганизмы – облигатные или факультативные анаэробы. Брожение не высвобождает всю имеющуюся в молекуле энергию, поэтому промежуточные продукты брожения могут использоваться в ходе клеточного дыхания.

*Типы брожения:*

1. **Спиртовое** – химическая реакция брожения, осуществляемая дрожжами, в результате которой одна молекула глюкозы преобразуется в 2 молекулы этанола и в 2 молекулы углекислого газа.

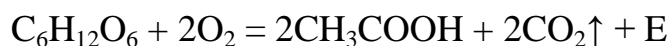


2. Уксуснокислое. **Уксуснокислое брожение** – биохимический процесс окисления углеводов и этилового спирта в аэробных условиях с участием кислорода воздуха до уксусной кислоты, осуществляемый уксуснокислыми бактериями.

Уксуснокислое брожение суммарно описывается следующими уравнениями. Первое уравнение – сбраживание этилового спирта до уксусной кислоты:



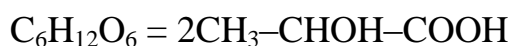
Второй вариант – сбраживание глюкозы до уксусной кислоты:



Осуществляют этот тип брожения бактерии родов *Gluconobacter* и *Acetobacter*, а также уксусный гриб *Mycoderma aceti*.

При уксуснокислом брожении реакция окисления этилового спирта протекает в две стадии: сначала образуется уксусный альдегид, который затем окисляется в уксусную кислоту. Данный тип брожения относят к неполному окислению, так как окисление спирта не идёт до углекислого газа.

3. **Молочнокислое брожение**. Молочнокислое брожение – процесс анаэробного окисления углеводов, конечным продуктом при котором выступает молочная кислота. Название получило по характерному продукту – молочной кислоте:



Для молочнокислых бактерий является основным путём катаболизма углеводов и основным источником энергии в виде АТФ. Также молочнокислое брожение происходит в тканях животных в отсутствие кислорода при больших нагрузках.

**4. Маслянокислое брожение.** Маслянокислое брожение – брожение, в ходе которого образуется масляная кислота  $C_3H_7COOH$ . При этом водород и двуокись углерода являются побочными продуктами. Маслянокислое брожение – результат деятельности анаэробных бактерий.

Таким образом, брожение может осуществляться у животных, растений и микроорганизмов. Для некоторых бактерий, микроскопических грибов и простейших процесс брожения является единственным источником энергии. Исходные субстраты в брожении: углеводы, органические кислоты, пуриновые и пиримидиновые основания. В зависимости от сбраживаемого субстрата и путей его метаболизма в результате брожения могут образовываться спирты (этанол и др.), карбоновые кислоты (молочная, масляная и др.), ацетон и другие органические соединения, углекислый газ, а в ряде случаев водород. Брожение играет важную роль в природе благодаря ему происходит анаэробное расщепление органических веществ, например целлюлозы.

**Гниение (аммонификация).** Органические вещества, попадающие в почву, содержат азот, который непригоден для питания растений. Чтобы быть усвоенными растениями, сложные органические азотсодержащие соединения должны быть превращены в более доступные и простые, т. е. минерализоваться. Процессы перехода сложных азотистых продуктов в соединения аммиака **называются аммонификацией** – процесс разложения азотсодержащих органических соединений (белков, аминокислот), в результате их ферментативного гидролиза под действием аммонифицирующих микроорганизмов с образованием токсичных для человека конечных продуктов – аммиака, сероводорода, а также первичных и вторичных аминов при неполной минерализации продуктов разложения:

- трупных ядов (например путресцин и кадаверин);
- ароматические соединения (например скатол, индол- образуются в результате дезаминирования и декарбоксилирования аминокислоты триптофана);

– гниение серосодержащих аминокислот (цистеина, цистина и метионина) приводит к выделению сероводорода, тиолов, диметилсульфоксида.

Разложение молекул белка начинается с их гидролиза:

Белок +  $\text{H}_2\text{O}$  → Пептоны +  $\text{H}_2\text{O}$  → Полипептиды +  $\text{H}_2\text{O}$  → Аминокислоты.

Конечный продукт распада белка – аминокислоты проникают в микробные клетки и используются как питательные вещества в процессе метаболизма.

В качестве побочных продуктов обмена веществ из клеток в окружающую среду выделяются различные вещества: органические кислоты, спирты и др.

Микроорганизмы, вызывающие гниение, чрезвычайно распространены в природе. Их много в воде, воздухе и особенно в почве, где процессы гниения протекают интенсивно. Особое значение имеют бактерии. Гнилостные бактерии постоянно обитают также в кишечнике человека и животных, вызывая энергичный процесс распада белковых веществ. Этому процессу благоприятствует щелочная реакция среды.

Среди гнилостных бактерий встречаются образующие споры и не образующие их аэробы и анаэробы. Многие из них мезофилы, но есть термофилы и психрофилы. Большинство гнилостных микроорганизмов чувствительно к кислотности среды и повышенному содержанию в ней поваренной соли. Многие бактерии могут сбраживать углеводы.

В разложении белков кроме бактерий принимают участие и другие микроорганизмы, например актиномицеты и различные грибы.

В результате гниения белков образуются муравьиная, уксусная, пропионовая, масляная, валериановая и другие кислоты, а также высокомолекулярные спирты. В аэробных условиях кислоты окисляются до  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , в анаэробных полное окисление жирных кислот невозможно и они накапливаются в среде. Некоторые из них разлагаются на  $\text{CO}_2$  и метан.

В белках кроме аминокислот содержатся диаминокислоты, распад которых приводит к образованию птомаинов (трупного яда). Так как в их состав входят ядовитые алкалоиды, птомаины могут вызвать отравление. Если же в белке имеются серосодержащие аминокислоты (например, цистин), при гниении сера выделяется в виде сероводорода или меркаптанов - веществ с отвратительным запахом.

Образующиеся при гниении белков аммиак, сероводород и фосфорная кислота используются микроорганизмами для синтеза белковых веществ своего тела. Процесс гниения может развиваться также в пищевых продуктах.

Гниение имеет большое значение в формировании плодородия почвы, благодаря ему происходит минерализация белков и других веществ погибших растений и животных, что играет важную роль в круговороте веществ в природе.

## 2. ХИМИЯ АТМОСФЕРЫ

### 2.1 Состав и строение атмосферы

Атмосфера – газовая оболочка Земли, связанная с ней силой тяжести и принимающая участие в её суточном и годовом вращении.

Объем атмосферы  $13,2 \cdot 10^{20} \text{ м}^3$ , масса атмосферы  $5,14 \cdot 10^{15} \text{ т}$  ( $10^{-6} \%$  от массы Земли). Примерно 90% массы атмосферы находится на высоте до 15 км.

В атмосфере различают несколько слоёв. Наиболее распространённое деление атмосферы на слои основано на изменении температуры с высотой.

По вертикальному разрезу атмосферу составляют следующие составляющие: тропосфера, стратосфера, мезосфера, термосфера, ионосфера. В таблице 1 представлены сведения, характеризующие температурные границы слоёв атмосферы.

Таблица 1

Характеристика изменения температуры в основных слоях,  
выделяемых в атмосфере

Слой атмосферы	Температура, °С		Температурный градиент, °С/км	Высота верхней и нижней границ слоя над уровнем моря, км
	нижняя граница слоя	верхняя граница слоя		
Тропосфера	15	–56	–6,45	0–11
Стратосфера	–56	–2	+1,38	11–50
Мезосфера	–2	–92	–2,56	50–85
Термосфера	–92	1200	+3,11	85–500

На рисунке 9 приведено строение и состав атмосферы, видно, что верхние слои атмосферы – ионосфера представлены в основном атомами и ионами.

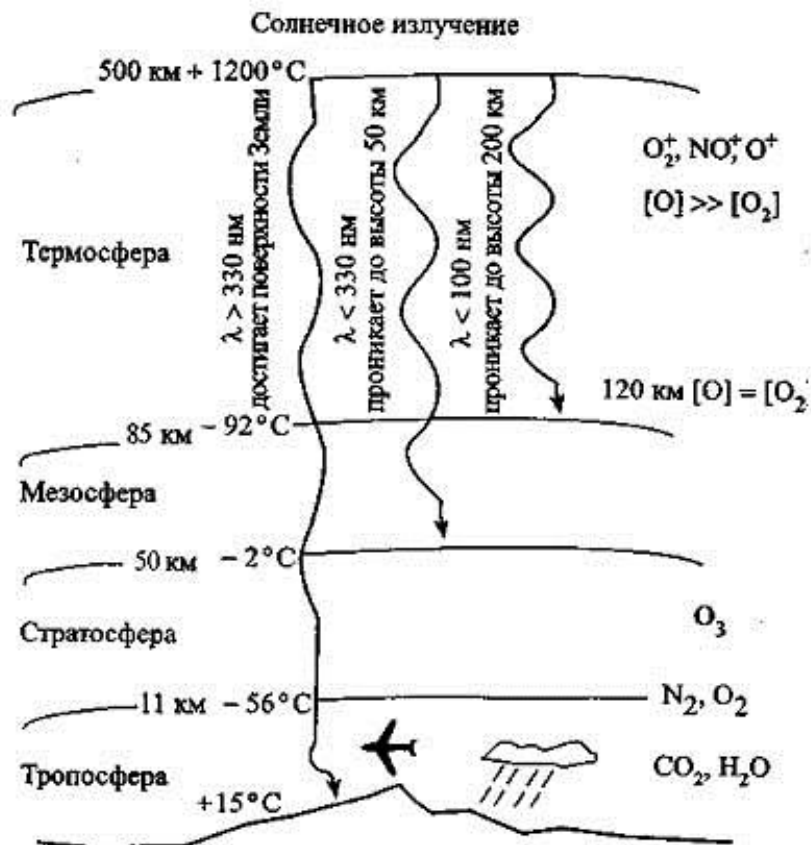


Рис. 9. Строение и состав атмосферы

*Тропосфера* – нижний слой атмосферы, его толщина 8–10 км в полярных областях и 16–18 км у экватора. На тропосферу приходится 80% всей массы атмосферы. В тропосфере образуются ветры, облака и происходят другие процессы, которые определяют погоду. Температура здесь снижается с высотой на  $6^{\circ}\text{C}$  на каждый километр. Верхняя граница тропосферы – слой тропопауза, температура в ней имеет минимальное значение  $-56^{\circ}\text{C}$ .

*Стратосфера* – расположена на расстоянии 20–50 км от поверхности Земли, подразделяется на 2 зоны: нижнюю, до высоты 25 км, и верхнюю с высоты 25 км до 50 км (область инверсии). В этой области температура начинает возрастать до  $-2^{\circ}\text{C}$ . Верхняя граница характеризуется наличием постоянной температуры и называется стратопаузой. На высоте 25 км находится озоновый слой, который задерживает вредную коротковолновую ультрафиолетовую радиацию Солнца (180–200 нм) и определяет верхний пре-



дел жизни в биосфере. Под влиянием этих лучей изменяются магнитные поля, распадаются молекулы, происходит ионизация газов. Эти процессы можно наблюдать в виде северных сияний, зарниц, различных свечений.

*Мезосфера* – её толщина около 30 км, достигает высоты 80 км. Температура в мезосфере понижается до  $-92\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Верхней границей является мезопауза.

На высоте 60 км начинается *ионосфера*, которая простирается на несколько сотен километров вверх, атомы этого слоя ионизированы. Благодаря наличию свободных электронов ионосфера способна отражать радиоволны, обеспечивая возможность дальней радиосвязи на нашей планете.

*Термосфера* – начинается в 80 км и простирается до 1000 км от поверхности Земли. Атомы и молекулы разгоняются до огромных скоростей и, сталкиваясь с заряженными солнечными частицами, разогреваются до очень высоких температур. Температура в этом слое достигает  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

*Экзосфера* – верхняя оболочка атмосферы, начинается с высоты 1000 км и простирается на огромные расстояния, постепенно переходя в межпланетное пространство. Экзосфера является областью диссипации атмосферных газов. Диссипация – процесс преодоления атомами и ионами поля притяжения Земли.

Состав атмосферы претерпевал серьёзные изменения в различные геологические эпохи. Образование современной атмосферы проходило в несколько этапов. Состав *первичной атмосферы* был представлен молекулами водорода и гелия, рассеянными в космическом пространстве. *Вторичная атмосфера* образовалась в результате активного вулканизма на первых этапах формирования Земли. Состав вторичной атмосферы был представлен газами: метан, аммиак, вода, водород. На восстановительную вторичную атмосферу воздействовали: коротковолновое УФ излучение, ионизирующее излучение Солнца (сейчас экранируется озоновым экраном), электрические разряды. В этих условиях мог идти активный химический синтез, при котором через промежуточные соединения образовывались аминокислоты, са-

хара, пуриновые и пиримидиновые основания – образовался «первичный бульон». По мере возрастающей потери водорода в космическое пространство создавалась *третичная атмосфера*, содержащая большие количества азота (из аммиака), углекислого газа (из вулканических газов и метана) и паров воды. Около 3,5 млрд лет назад появились хлорофиллоносные организмы (цианобактерии), способные осуществлять фотосинтез. Благодаря фотосинтезу произошло повышение содержания кислорода в атмосфере и формирование *четвертичной атмосферы*. Постепенно возникла современная атмосфера, к тому же кислород в стратосфере претерпел фотохимические реакции, приведшие к образованию озона.

В настоящее время состав атмосферы находится в состоянии динамического равновесия, поддерживаемого в результате действия живых организмов, геохимических явлений и хозяйственной деятельности человека.

Газовый состав современной атмосферы представлен постоянными и переменными компонентами (табл. 2). Объёмные концентрации постоянно содержащихся в атмосфере компонентов ( $N_2$ ,  $O_2$ , Ar, He, Xe, Kr,  $H_2$ ) остаются практически неизменными вплоть до высоты 100 км. Содержание переменных компонентов существенно меняется в зависимости от сезона, географического положения и высоты над уровнем моря. Антропогенное влияние на состав атмосферы ограничено в основном изменениями концентрации переменных компонентов.

Таблица 2

Состав атмосферы вблизи земной поверхности

Постоянные компоненты		Переменные компоненты	
компонент	концентрация, % (об.)	компонент	концентрация, % (об.)
$N_2$	78,11	$H_2O$	0–7
$O_2$	20,95	$CO_2$	0,01–0,1
Ar	0,93	$O_3$	$0-10^{-4}$
Ne	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$SO_2$	$0-10^{-4}$
He	$5,24 \cdot 10^{-4}$	$CH_4$	$1,6 \cdot 10^{-4}$
Kr	$1,14 \cdot 10^{-4}$	$NO_2$	$2 \cdot 10^{-6}$
Xe	$0,087 \cdot 10^{-4}$		
$H_2$	$0,5 \cdot 10^{-4}$		

Атмосфера является важнейшим компонентом окружающей природной среды, обеспечивающей жизнь на Земле. Экологическая роль атмосферы определяется её составом, высокой подвижностью, своеобразием физико-химических процессов. К наиболее важным функциям относятся следующие.

1. Обеспечение благоприятного режима дыхания растений и животных, питания растений. Первичная атмосфера не содержала свободного кислорода, около 3,5 млрд лет назад появились первые фототрофные организмы, способные к фотосинтезу. В результате процессов фотосинтеза произошло накопление кислорода в атмосфере. Около 600 млн лет назад, когда содержание кислорода составляло 1% от сегодняшнего уровня, была достигнута точка Пастера, и организмы перешли к открытому дыханию, как наиболее эффективному способу окисления. Сейчас годовое «производство»  $O_2$  составляет 100–150 млрд т, и все тратится на процессы дыхания, окисления горных пород и сжигания топлива.

2. Поддержание температурного баланса. Основная роль выполняется углекислым газом, парами воды, метаном и озоном. Молекулы этих веществ поглощают инфракрасное тепловое излучение Земли.

3. Поддержание благоприятного радиационного баланса. За счёт рассеивания, отражения и переизлучения в атмосфере до Земли доходит лишь видимое и радиоизлучение, безвредное для живых организмов.

4. Атмосфера также воспринимает газообразные продукты обмена веществ, переносит водяные пары, загрязняющие вещества, является транзитной средой.

5. В атмосфере образуются облака, осадки и другие метеорологические процессы.

6. Наземно-воздушная среда является средой жизни.

## 2.2 Химические реакции в атмосфере

Основным и практически неиссякаемым источником энергии на поверхности Земли является энергия солнечного излучения, которая постоянным потоком поступает из космоса. На Солнце происходят термоядерные реакции, которые сопровождаются выделением энергии. Солнце испускает энергию с разной длиной волны.

Диапазон солнечного излучения:

- <150 нм – зона ионизирующей радиации
- 150–400 нм – ультрафиолетовая радиация (УФ)
- 400–700 нм – видимый свет
- 700–1000 нм – инфракрасная радиация (ИК)
- >1000 нм – дальняя красная радиация

Коротковолновое излучение в ультрафиолетовой области спектра обладает высокой энергией, вызывающей химические реакции. При этом энергия фотона ( $E = h\nu$ ) должна быть достаточна для разрыва химической связи в молекуле и инициирования процесса. Кроме того, молекулы должны поглощать фотон, энергия которого должна превращаться в какую-либо иную форму.

Химические реакции в атмосфере можно разделить на 3 типа:

1. Реакции фотодиссоциации;
2. Реакции фотоионизации;
3. Реакции ионов в атмосфере: реакции обмена, реакции переноса заряда, реакции диссоциативной рекомбинации.

*Реакции фотодиссоциации* – реакции распада химических веществ, которые инициируются солнечным излучением.

Фотон света способен произвести химическое взаимодействие с молекулой или атомом только в случае, если он обладает достаточной энергией, при этом сами молекулы должны поглотить фотоны.

Реакция фотодиссоциации молекулярного кислорода протекает при поглощении молекулой кислорода квантов света с длиной волны 242 нм

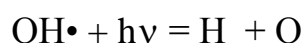
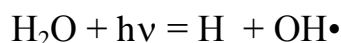
и менее (УФ лучи). Энергии, которую несут фотоны достаточно для разрыва двойной связи в молекуле кислорода (Есв. = 495 кДж/моль):



Молекулы  $\text{O}_2$  поглощают большую часть коротковолнового излучения с высокой энергией, прежде чем оно достигнет нижней части атмосферы. При этом образуется атомарный кислород. На высотах около 400 км диссоциировано 99% молекул кислорода, на долю молекул  $\text{O}_2$  приходится лишь 1%. На высоте 130 км содержание  $\text{O}_2$  и  $\text{O}$  одинаково. На меньших высотах содержание молекулярного кислорода больше такового атомарного.

Энергия диссоциации молекулы  $\text{N}_2$  очень велика, значит, разорвать тройную связь в молекуле могут только фотоны с чрезвычайно высокой энергией и очень малой длиной волны. Таких фотонов немного, да и молекула азота плохо поглощает фотоны, даже если их энергия окажется достаточной. Вследствие этого атомарного азота очень мало.

*Фотодиссоциация воды.* Концентрация паров воды значительна вблизи поверхности Земли, но быстро уменьшается с высотой. На высоте 30 км (стратосфера) составляет три молекулы на миллион молекул смеси. Однако, оказавшись в верхних слоях, вода подвергается фотодиссоциации:



$\text{OH}\cdot$  – обладает высокой реакционной способностью, играет роль детергента, т.е. легко превращает газы в растворимые вещества, которые легко удаляются из атмосферы с осадками. Гидроксидный радикал взаимодействует практически со всеми химическими соединениями в атмосфере, очищая её.

*Реакции фотоионизации* – реакции ионизации молекул под действием света. Фотон света сможет ионизировать молекулу только в том случае, если он обладает энергией достаточной для отщепления внешнего электрона.

При воздействии фотона молекула может поглотить его, не расщепляясь на атомы. При этом фотон выбивает из молекулы электрон самого

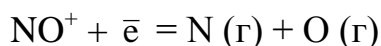
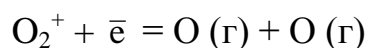
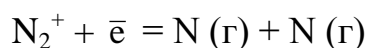
верхнего уровня, и образуется молекулярный ион. Таким же образом может подвергнуться ионизации и нейтральный атом.

Фотоны, вызывающие ионизацию, относятся к высокочастотной коротковолновой области в пределах ультрафиолета. Это излучение не доходит до поверхности Земли, его поглощают верхние слои атмосферы.

*Реакции ионов в атмосфере.*

Образующиеся молекулярные ионы обладают очень большой реакционной способностью, быстро реагируют с любыми другими частицами при столкновении, эти реакции также носят экзотермический характер.

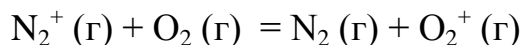
*Реакции диссоциативной рекомбинации* – реакции ионов с электронами с образованием нейтральных молекул, которые в разреженных условиях в верхних слоях атмосферы диссоциируют:



Атомарный азот в верхних слоях атмосферы образуется исключительно в результате такой реакции.

*Реакции переноса заряда* – реакции молекулярного иона с нейтральной частицей, которые сопровождаются переносом энергии.

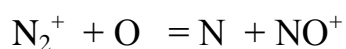
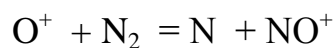
Когда молекулярный ион сталкивается с какой-либо нейтральной частицей, между ними может произойти перенос электрона:



Это возможно, если  $E_1(\text{O}_2) < E_2(\text{N}_2)$ , то есть энергия ионизации молекулы, теряющей электрон, должна быть меньше энергии молекулы, приобретающей электрон (реакция должна быть экзотермическая).

Реакции переноса заряда играют большую роль во многих областях химии, особенно в биохимии. Реакции переноса заряда не сопровождаются разрывом химических связей, осуществляется только перенос электрона от одной частицы к другой.

*Реакции обмена* – реакции в ходе которых частицы обмениваются атомами:



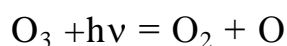
Эти реакции являются экзотермическими и протекают очень легко, при этом образуется молекулярный ион  $\text{NO}^+$  (г). Поскольку энергия ионизации NO самая низкая из всех частиц, находящихся в верхних слоях атмосферы, то  $\text{NO}^+$  не может ничем нейтрализоваться и этот ион является преобладающим в данной области.

## **2.3 Экологические проблемы химии атмосферы**

### **Разрушение озонового слоя**

Озон ( $\text{O}_3$ ) – аллотропная модификация кислорода. Общая масса озона в атмосфере оценивается примерно в 3,3 млрд т. Если собрать весь озон из атмосферы к поверхности Земли, то он мог бы покрыть ее слоем, толщина которого в среднем составила бы 2,9 мм.

Важной особенностью озона является его способность поглощать излучение:



Озон поглощает ультрафиолетовое излучение в тысячи раз лучше, чем кислород, и количества озона в стратосфере, где концентрация его достигает максимальных значений, в десятки и сотни раз превышающих среднее его содержание в тропосфере, достаточна для практически полного поглощения жёсткого ультрафиолетового излучения Солнца. Поэтому озон стратосферы выполняет защитную функцию, и уменьшение его количества в этой области атмосферы может представлять опасность для биоты, и, прежде всего, для человека.

Зона с максимальными значениями концентрации озона находится на высотах от 15 до 35 км. На больших высотах концентрация озона резко

снижается, и на высоте более 85 км озон практически отсутствует. Поэтому озон мезосферы хотя и поглощает ультрафиолетовое излучение, однако вносит лишь небольшой вклад в защиту биосферы от солнечного излучения в этой области спектра. Озон мезосферы играет важную роль в поддержании теплового баланса планеты и формировании нижнего слоя ионосферы.

Для характеристики содержания озона в атмосфере часто используются два принципиально разных подхода. В начальные периоды изучения озонового слоя планеты (в 20-х годах прошлого столетия) основным прибором для измерения содержания озона в атмосфере был спектрометр Добсона. Этот прибор позволял достаточно надёжно определять общее количество озона, находящегося в столбе воздуха над наблюдателем. Полученные значения суммарного объёма озона в столбе атмосферы единичной площади сечения приводили к нормальным условиям и определяли высоту, которая приходится в этом столбе атмосферы на весь озон. Слой озона высотой  $10^{-5}$  м принимается равным одной единице Добсона (е.Д.). Общее количества озона в атмосфере меняется от 120 до 760 е.Д. (наиболее часто – 200–400 е.Д.) при среднем для всего земного шара значении 290 е.Д. Весь озон, собранный из атмосферы к поверхности Земли, мог бы покрыть ее слоем, толщина которого в среднем составила бы 2,9 мм. Ошибочная трактовка данного способа выражения общего содержания озона в атмосфере привела к формированию в массовом сознании понятия озонового слоя, или тонкого озонового экрана, якобы существующего в атмосфере. В реальных условиях весь озон неравномерно распределён в слое воздуха от поверхности Земли практически до верхней границы мезосферы. Характер этого распределения связан с процессами образования и гибели озона. В общем виде высотный профиль концентраций озона приведён на рисунке 10.



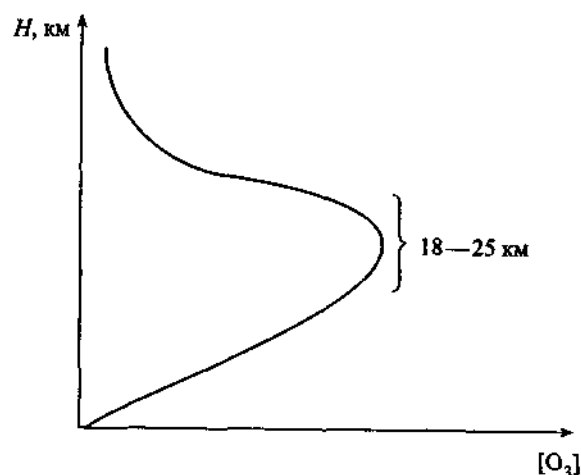


Рис. 10. Изменение концентрации озона в стратосфере по высоте

Общее содержание озона в атмосфере над конкретной территорией изменяется в достаточно широких пределах. Помимо фотохимических процессов значительный вклад в изменение содержания озона и его концентрации на различных высотах вносят процессы движения воздушных масс. В настоящее время выявлены общие закономерности ряда таких изменений, связанные со временем года и географической широтой местности. Так, в северном полушарии на широтах более  $30^\circ$  с.ш. общее содержание озона в атмосфере максимально в конце зимы — начале весны, а минимально осенью (сентябрь—октябрь). Наибольшие изменения характерны для высоких широт ( $70\text{--}80^\circ$  с.ш.), где среднее содержание озона может меняться от 450 е.Д. в марте до 280 е.Д. в сентябре. На широте  $40\text{--}43^\circ$  с.ш. изменения менее контрастны (от 370 е.Д. весной до 280 е.Д. осенью). На низких широтах (менее  $30^\circ$ ) с.ш. сезонные изменения практически отсутствуют (не превышают 20 е.Д.). В южном полушарии общая картина сезонных изменений такая же, хотя и менее выраженная.

В целом в атмосфере по характеру сезонных колебаний и высотному профилю концентраций озона принято выделять три зоны:

1) полярная зона — характеризуется наибольшими значениями среднегодового общего содержания (около 400 е.Д.) и концентраций озона, наибольшими сезонными колебаниями (около 50%); зона максимальной концентрации озона расположена наиболее близко к поверхности — на вы-

сотах 13–15 км, концентрация озона в этой зоне (содержание молекул озона в  $1 \text{ см}^3$ ) составляет  $(4-5) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ;

2) тропическая зона – среднегодовые значения общего содержания озона невелики и составляют примерно 265 е.Д., сезонные колебания не превышают 10–15%; зона максимальной концентрации озона находится на высотах 24–27 км, концентрация озона в этой зоне составляет  $(1-2) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ;

3) средние широты – занимают промежуточное положение, сезонные изменения составляют 30–40% от средних значений, зона максимальной концентрации озона находится на высотах 19–21 км, концентрация озона в этой зоне достигает  $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ .

Озон стратосферы вносит наибольший вклад в поглощение ультрафиолетовых лучей. На рисунке 11 приведены процессы распада и синтеза озона.

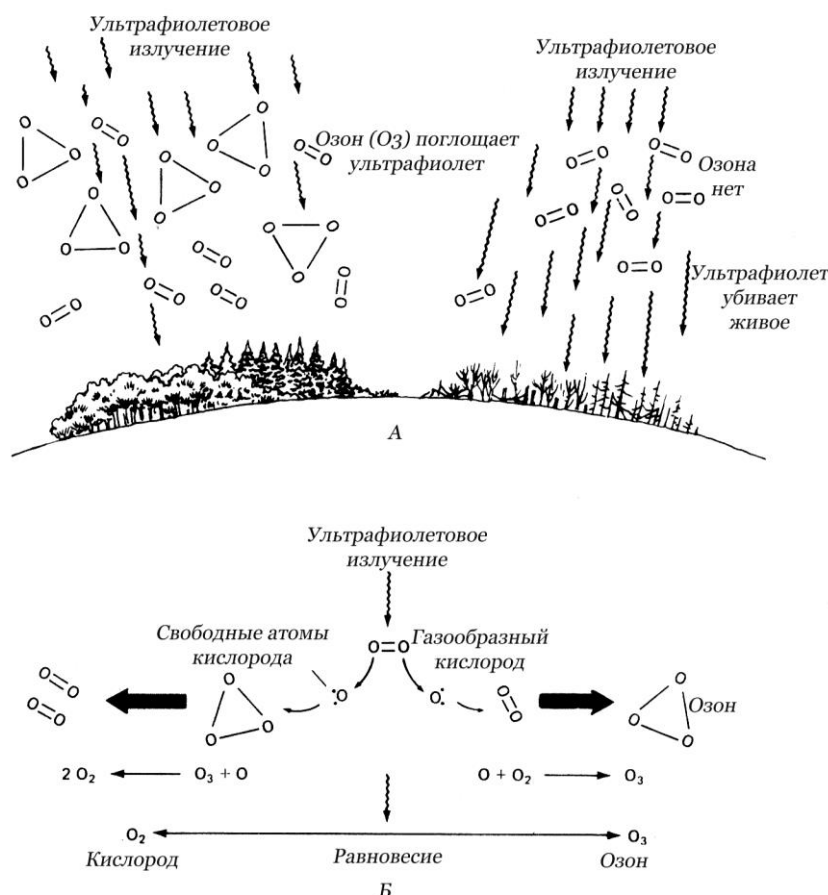
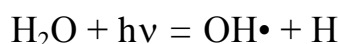


Рис. 11. Озоновый экран. А – Озон ( $\text{O}_3$ ) в стратосфере поглощает ультрафиолетовые (УФ) лучи солнца. Б – Озон формируется в стратосфере, когда под действием УФ-лучей молекулы кислорода распадаются на свободные атомы, которые могут присоединяться к другим его молекулам

### *Реакции, лежащие в основе разрушения озона*

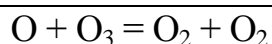
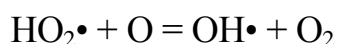
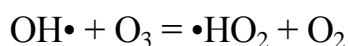
Значительный вклад в процесс разрушения озона вносят цепные процессы, протекающие с участием гидроксидных радикалов (водородный цикл), оксидов азота (азотный цикл), соединений хлора и брома (хлорный и бромный циклы).

*Водородный цикл.* При поглощении кванта света с длиной волны менее 240 нм молекулы воды могут распадаться с образованием гидроксидного радикала и атомарного водорода:

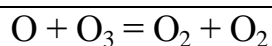
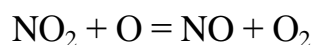
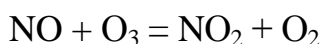


Гидроксидные радикалы образуются и при взаимодействии молекул воды или метана с возбуждённым атомом кислорода.

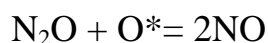
Образовавшийся в этих процессах гидроксидный радикал может вступить в реакцию с озоном. Продуктами этого взаимодействия являются гидропероксидный радикал и молекула кислорода. Гидропероксидный радикал при взаимодействии с атомарным кислородом в основном состоянии образует молекулу кислорода и гидроксидный радикал. Водородный цикл замыкается при этом разрушается озон:



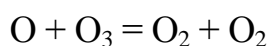
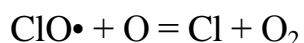
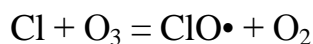
*Азотный цикл.* Оксид азота (II) при взаимодействии с озоном окисляется до оксида азота (IV), но при взаимодействии  $\text{NO}_2$  с атомарным кислородом в невозбужденном состоянии вновь образуется оксид азота (II). Азотный цикл замыкается, но при этом идут процессы разрушения озона:



Необходимо отметить, что опасность для озонового слоя представляют только образующиеся непосредственно в стратосфере оксиды азота – NO и NO<sub>2</sub>. Образующиеся в воздухе тропосферы оксиды азота, имеют малое время жизни и не успевают достигнуть стратосферы. Среди оксидов азота, образующихся на поверхности Земли, опасность для озонового слоя представляет лишь имеющий достаточно большое время жизни и поэтому способный преодолеть глобальный инверсионный барьер и достичь зоны максимальной концентрации озона оксид азота (I) – N<sub>2</sub>O. Этот газ, образующийся в процессах денитрификации в почве, при взаимодействии с возбуждённым атомом кислорода превращается в оксид азота (II), инициирующий азотный цикл гибели озона:

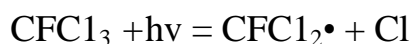


*Хлорный цикл.* Атом хлора при взаимодействии с молекулой озона образует радикал оксида хлора и молекулу кислорода. Оксид хлора способен взаимодействовать с атомарным кислородом, находящимся в возбужденном состоянии, с образованием атомарного хлора и молекулы кислорода. Хлорный цикл замыкается, происходит разрушение озона:



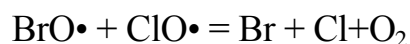
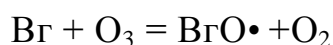
Атомарный хлор появляется в стратосфере при фотохимическом разложении ряда хлорфторуглеводородов, которые благодаря малой химической активности и большому времени жизни успевают достигнуть зоны максимального содержания озона в стратосфере. Наибольшую опасность среди хлорфторуглеводородов представляют некоторые из производившихся до последнего времени в больших количествах фреонов (техническое название группы насыщенных алифатических галогенсодержащих углеводородов). Эти нетоксичные, пожаро-взрывобезопасные соединения, обладающие низкой реакционной способностью, широко использовались

в холодильной технике, при производстве пенопластов и каучука, в изготовлении различных бытовых товаров в аэрозольных упаковках. Попадая в стратосферу, эти соединения могут взаимодействовать с излучением с длиной волны менее 240 нм, при этом происходит образование атомарного хлора, как, например, в случае фреона Ф-П ( $\text{CFCl}_3$ ) и может начаться разрушение озонового слоя:



В настоящее время в соответствии с Монреальским протоколом: и рядом дополнительных международных протоколов, подписанных в последние годы, производство озоноопасных фреонов практически прекращено.

*Бромный цикл.* Атом брома подобно атому хлора способен при взаимодействии с озоном образовывать радикал оксида брома ( $\text{BrO}\bullet$ ) и молекулу кислорода. Однако в отличие от оксида хлора радикал  $\text{BrO}\bullet$  может вступить в реакцию с другой молекулой оксида брома или с оксидом хлора, при этом образуются два атома соответствующего галогена и молекула кислорода:



Во всех рассмотренных до этого циклах нарушения озонового слоя реакция с участием атомарного кислорода является наиболее, медленной, и её скорость лимитирует соответствующие циклы. В случае бромного цикла процесс значительно ускоряется, и бром потенциально наиболее опасен для озонового слоя. Однако влияние этого цикла на озоновый слой в настоящее время меньше, чем влияние других рассмотренных циклов. Это связано с меньшими концентрациями брома в стратосфере. Основными источниками брома в стратосфере являются бром содержащие органические соединения, используемые для тушения пожаров (галоны). Эти соединения, как и фреоны, устойчивы в тропосфере, имеют большое время жизни и, попадая в стратосферу, разлагаются под действием жёсткого ультрафиолетового излучения.

трафиолетового излучения. Образующийся при этом атом брома может вступить во взаимодействие с молекулой озона.

*«Озоновая дыра» над Антарктидой.* Понятие «озоновой дыры» связывают с уменьшением общего содержания озона во всех областях атмосферы над определённой территорией. Наиболее часто это явление ассоциируется с уменьшением общего количества озона над Антарктидой, где такой процесс, протекающий с разной интенсивностью, в последние десятилетия наблюдается практически ежегодно и где он был зафиксирован впервые.

Над Антарктидой явление «озоновой дыры» носит ярко выраженный сезонный характер и проявляется лишь в весенний период.

В соответствии с современными представлениями, причина образования «озоновой дыры» над Антарктидой является комплексной и связана как с совокупностью природных явлений (полярный вихрь), так и с антропогенным влиянием на состояние атмосферного воздуха.

Так, систематическое увеличение поступления хлорфторуглеводородов в атмосферу, наблюдавшееся во второй половине прошлого века, и специфика движения воздушных масс в стратосфере высоких широт привели к тому, что в период возникновения «озоновой дыры» концентрация озоноразрушающих веществ в воздухе над Антарктидой резко возрастала.

Устойчивый антициклон, так называемый полярный вихрь, или полярный вортекс, возникающий каждой зимой над Антарктидой, приводит к временному прекращению обмена воздухом с другими областями стратосферы и стоку озона в тропосферу. Поступление озона, образующегося в тропической или среднеширотной зонах стратосферы, в этот период прекращается. Однако возникающий дефицит озона в условиях полярной ночи не представляет опасности для биоты.

Температура воздуха внутри вихря резко снижается до  $-70$  или  $-80$  °C. В стратосфере появляются устойчивые аэрозольные образования – «серебристые» облака, состоящие из кристаллов льда и капель переохлаждённой жидкости. В состав этих аэрозолей входят димеры оксида хлора  $(\text{ClO})_2$ , хло-

ристый нитрозил ( $\text{ClONO}_2$ ) и другие соединения азота ( $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HNO}_2$ ). В зимний период эти соединения, связанные с аэрозолями, не взаимодействуют с озоном. Весной циркумполярный вихрь распадается, и при повышении температуры на поверхности кристаллов льда начинают протекать гетерогенные химические процессы.

Таким образом, с наступлением весны в стратосфере над Антарктидой появляется ряд озоноразрушающих веществ, и начинаются цепные процессы разрушения озона на фоне природного дефицита озона, содержание которого не успевает восстановиться после окончания полярной ночи и разрушения вортেকса.

Протекание химических реакций вызывает разрушение озона над Антарктидой в весенний период и приводит к образованию «озоновой дыры». В дальнейшем кристаллики льда растают, гетерогенные процессы прекратятся, озоноразрушающие вещества израсходуются, благодаря динамическим процессам стратосферной циркуляции в полярную область поступит озон из других областей атмосферы, и «дыра» постепенно, в течение одного-двух месяцев закроется.

*Международные соглашения, направленные на сохранение озонового слоя.* Рост производства галогенпроизводных органических соединений привёл к увеличению их концентрации в атмосфере. За период с 1970 по 1980 гг. относительная концентрация озоноразрушающих соединений таких как фреон-11 и фреон-12 возросла в стратосфере в 4 и 3 раза соответственно. Выявлена тенденция уменьшения количества озона в стратосфере. Ежегодное уменьшение содержания озона в стратосфере в зимний период с 1969 по 1986 гг. составляло примерно 0,3% при суммарных 6% за 18 лет.

Серьёзное беспокойство в мире вызывали сообщения об уменьшении содержания озона над Антарктидой. Поскольку основной причиной этого явления считались хлорфторуглеводороды, мировое сообщество предприняло объединённые усилия, направленные на уменьшение производства и выброса в атмосферу озоноразрушающих веществ.

Первым международным актом, ограничивающим производство фреонов и других озоноразрушающих веществ стал Монреальский протокол. Он был подписан тридцатью странами в 1987 г и вступил в силу 1 января 1989 г.

Основными положениями Монреальского протокола были определены следующие действия, которые обязались предпринять подписавшие его страны:

1) производство фреонов 11, 12, 113, 114, 115

- заморозить на уровне 1986 г. начиная с 1992 г.;
- сократить до 80% от уровня 1986 г. начиная с 1993 г.;
- сократить до 50% от уровня 1986 г. начиная с 1998 г.;

2) производство талонов (бромированных галогеналканов для тушения пожаров) ограничить на уровне 1986 г.

В 1989 г. Совет министров Европейского сообщества объявил, что производство фреонов будет полностью прекращено к 2000 г. США сделали аналогичное заявление. Годом позже страны, подписавшие Монреальский протокол (их стало более 60), одобрили эту политику.

В 1990 г. Монреальский протокол был вновь пересмотрен. Страны, его подписавшие, взяли на себя следующие обязательства:

1) производство фреонов

- сократить до 50% начиная с 1995 г.;
- сократить до 15% начиная с 1997 г.;
- прекратить полностью к 2000 г.;

2) производство тетрахлорметана (четырёххлористого углерода, используемого в качестве растворителя)

- сократить до 15% начиная с 1995 г.;
- прекратить полностью к 2000 г.;

3) производство талонов прекратить к 2000 г. (за исключением соединений, для которых не известны альтернативные заменители);



4) производство 1,1,1-трихлорэтана (используемого в качестве растворителя)

- сократить до 70% начиная с 1995 г.;
- сократить до 30% начиная с 1997 г.;
- прекратить полностью к 2005 г.

Необходимо отметить, что Монреальский протокол, являющийся первым примером коллективного мирового сотрудничества в решении глобальных проблем, в настоящее время успешно выполняется.

### **Смог**

Смог – комплексное загрязнение атмосферы, обусловленное застоем масс воздуха в крупных городах.

Смог возникает при определённых условиях: большом количестве пыли и газов в воздухе и длительном существовании антициклонных условий (отсутствие ветра и осадков), когда загрязнители скапливаются в приземном слое атмосферы.

Смог вызывает удушье, приступы астмы, аллергические реакции, раздражение глаз, повреждение растительности.

Термин смог (smog) произошёл от английских слов smoke – дым и fog – туман. Термин смог был впервые употреблён применительно к смеси дыма и тумана, образующейся над Лондоном в периоды длительного антициклона.

Смог усиливается при определённых погодных условиях, особенно – при *температурной инверсии*. Обычно на высоте температура воздуха ниже. В этом случае тёплый воздух поднимается от земли, унося с собой загрязняющие вещества и рассеивая их на высоте (рис. 12, А). При температурной инверсии слой холодного воздуха над землёй перекрыт тёплым. Это происходит, когда холодный воздух «подтекает» под тёплый. В результате восходящее движение воздуха, уносящее загрязняющие вещества, блокируется, и они накапливаются над землёй (рис. 8, Б). Рельеф местности может усиливать эффект температурной инверсии, например в Мехико

и Лос-Анджелесе, где окружающие горы препятствуют горизонтальному оттоку загрязнителей.

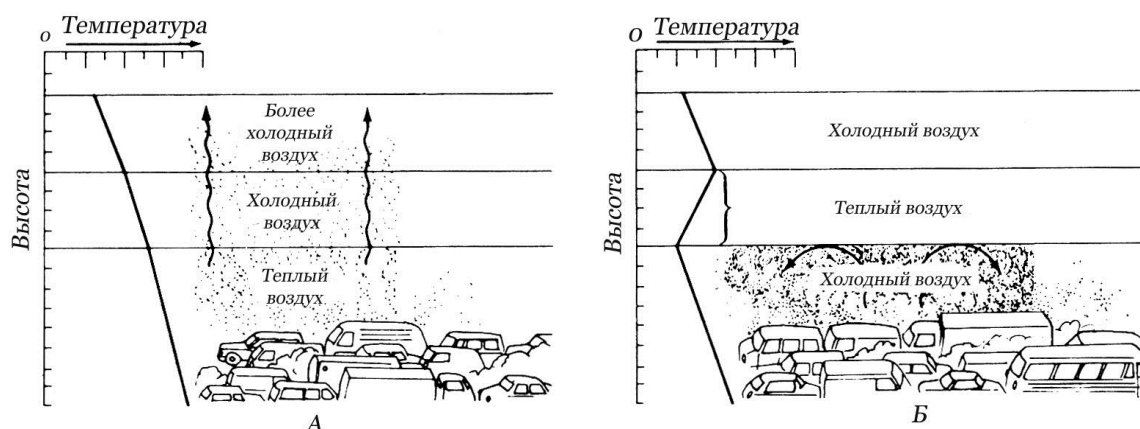


Рис. 12. Температурные инверсии могут привести к высоким концентрациям загрязняющих веществ

А. Обычно температура приземных слоёв воздуха выше, чем над ними. Тёплый воздух поднимается, унося загрязняющие вещества вверх, где они рассеиваются.

Б. Температурная инверсия – это ситуация, когда слой тёплого воздуха перекрывает более холодный приземный. Таким образом, восходящие потоки воздуха блокируются, и загрязняющие вещества накапливаются как сигаретный дым в закрытой комнате

Выделяют 3 типа смога:

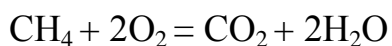
1. Влажный смог (классический смог), смог Лондонского типа
2. Сухой смог (фотохимический смог), смог Лос-Анджелесского типа
3. Ледяной смог, смог Аляскинского типа

*Ледяной смог.* Возникает при очень низких температурах в антициклоне. В этом случае даже небольшие выбросы загрязняющих веществ приводят к возникновению густого тумана, состоящего из мельчайших кристалликов льда и, например, серной кислоты.

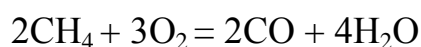
*Классический Лондонский смог.* Классический смог характерен для мест с повышенной влажностью воздуха и частыми туманами, обычно он образуется в зимний отопительный сезон (при сжигании большого числа серосодержащего топлива).

Главными токсичными веществами классического (Лондонского) смога являются первичные загрязнители CO, оксиды серы, твёрдые частицы, которые образуются при сжигании топлив.

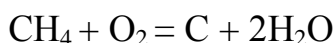
Топливо обычно состоит из углеводородов при обычных условиях идет полное сгорание с образованием углекислого газа (CO<sub>2</sub>):



Этот процесс не является опасным, т.к. продукты реакции не являются токсичными. Однако в случае недостатка кислорода идут процессы с образованием более токсичного угарного газа (CO):



Если кислорода ещё меньше, то образуется сажа:



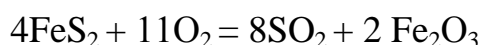
При низких температурах и небольшом количестве кислорода идёт реакция пиролиза.

*Пиролиз* – разложение органических соединений при высокой температуре (несколько сотен градусов) без доступа воздуха.

При пиролизе происходит расщепление связей C–C, дегидрогенизация, полимеризация, изомеризация, конденсация. При пиролизе образуются полициклические ароматические углеводороды. Наиболее опасен бензапирен, вызывающий рак.

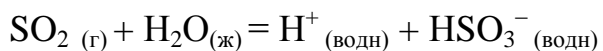
Таким образом, несмотря на то, что сжигание топлива первоначально кажется безвредным, оно может привести к образованию ряда загрязняющих соединений углерода.

Кроме того, загрязнение воздуха могут вызывать вещества, входящие в состав топлива. Наиболее распространённой примесью в ископаемом топливе является сера, частично представленная в виде пирита FeS<sub>2</sub>. В некоторых углях может содержаться до 6% серы, которая превращается при сжигании в сернистый газ (SO<sub>2</sub>):



Таким образом, составляющие Лондонского тумана являются первичными загрязнителями, которые образуются прямым путем при сжигании топлива.

Однако присутствие  $\text{SO}_2$  и воды в воздухе приводит к растворению, сернистого газа в воде, которая конденсируется вокруг частиц дыма:



Следы металлов загрязнителей (железа, марганца) катализируют переход растворённого  $\text{SO}_2$  в серную кислоту:



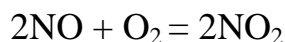
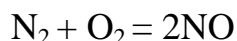
Серная кислота обладает большим сродством к воде, поэтому образовавшаяся капелька дополнительно адсорбирует воду. Капельки постепенно растут, и туман сгущается, достигая очень низких значений pH. Считается, что главными действующими компонентами смога является сернистый газ в сочетании с аэрозолем серной кислоты. При вдыхании такой смеси сернистый газ достигает лёгочных альвеол и, являясь сильным раздражителем дыхательных путей вызывает воспалительные процессы и рост заболеваний со смертельным исходом.

Лондонский смог 1952 г., который начался 5 декабря и продолжался 3–4 суток погубил более 4 тыс. человек. Специалисты определили, что в этом смоге содержалось несколько сотен тонн дыма и сернистого газа.

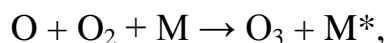
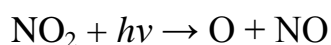
26 октября 1948 г. г. Донору (США) окутал густой туман. Эта была такая густая смесь тумана с дымом и копотью, что из неё началось выпадение сажи. Сажа покрыла слоем дома, тротуары и мостовые. Двое суток видимость была очень плохой, жители с трудом находили дорогу домой. Врачей начали осаждают кашляющие и задыхающиеся пациенты, которые жаловались на нехватку воздуха для дыхания, насморк, резь в глазах и боль в горле, тошноту. В течение следующих четырёх суток, пока сильный дождь не смыл этот опасный покров, заболело 5910 человек из 14 тыс. жителей города, 20 человек умерло.

*Фотохимический смог Лос-Анджелесского типа.* Переход в XX веке к топливам, получаемым из нефти, привёл к возникновению совершенно нового вида загрязнения атмосферы, связанного с более высокой летучестью жидких топлив. Автотранспорт как важнейший потребитель жидкого топлива стал основным источником современного загрязнения воздуха. Однако загрязнители, которые действительно вызывают проблемы, сами по себе не выбрасываются автотранспортом. Они образуются в результате реакций первичных загрязнителей, таких как NO, с несгоревшим топливом, поступающим непосредственно из автомобилей. Химические реакции, приводящие к образованию вторичных загрязнителей, протекают наиболее эффективно при солнечном свете, поэтому возникающее загрязнение воздуха называется фотохимическим смогом.

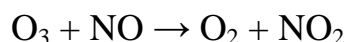
В цилиндрах двигателей при высоких температурах и давлениях образуются оксиды азота (NO и NO<sub>2</sub>, вместе обозначаемые как NO<sub>x</sub>):



Оксид азота (IV) NO<sub>2</sub> фотохимически активен и вызывает образование фотохимического смога, реакции в котором и производят действующие загрязняющие вещества (вторичные загрязнители).

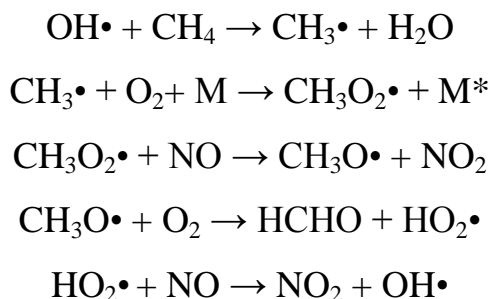


где M – молекулы газов, которые поглощают избыток энергии, образующейся при реакции, тем самым происходит стабилизация молекулы озона).



Реакции в фотохимическом смоге приводят к образованию озона – главного индикатора фотохимического смога. Озон не выбрасывается в составе отходящих газов автомобилей, он образуется в ходе фотохимических реакций первичных загрязнителей с компонентами атмосферного воздуха и является вторичным загрязнителем.

Как правило, озон не разрушается в ходе последней описанной реакции, а накапливается, поскольку присутствующие в смоге продукты неполного сгорания топлива (в качестве примера взят метан) и радикалы гидроксила направляют реакцию по пути



приводящему к дальнейшему росту концентрации  $\text{NO}_2$  (следовательно, к продолжению фотохимических процессов) и образованию альдегидов, которые в ходе дальнейших реакций могут превращаться в другие раздражающие глаза вещества, например, в пероксиацетилнитрат (ПАН) –  $\text{CH}_3\text{COO}_2\text{NO}_2$ . Озон, и оксид азота (IV) затрудняют дыхание, озон и альдегиды раздражают слизистые оболочки, вызывают головную боль. Состав фотохимического смога приведён в таблице 3.

Таблица 3

Концентрация загрязнителей в фотохимическом смоге

Загрязнитель	Концентрация, млн <sup>-1</sup> (ppm)	Загрязнитель	Концентрация, млн <sup>-1</sup> (ppm)
$\text{NO}_x$	0,2	$\text{C}_2\text{H}_4$	0,5
$\text{NH}_3$	0,02	высшие олефины	0,25
CO	40	$\text{C}_2\text{H}_2$	0,25
$\text{O}_3$	0,5	альдегиды	0,6
$\text{CH}_4$	2	$\text{SO}_2$	0,2

Сравнительная характеристика смогов Лондона и Лос-Анджелеса, типичных случаев первичного и вторичного загрязнения воздуха представлена в таблице 4.

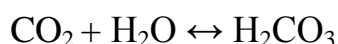
Таблица 4

## Сравнение смогов Лос-Анджелеса и Лондона

Характеристика	Лос-Анджелес	Лондон
Температура воздуха	От 24 до 32 °С	От –1 до 4 °С
Относительная влажность	<70 %	85 %
Скорость ветра	<3 м с <sup>-1</sup>	Безветрие
Видимость	0,8–16 км	<30 м
Месяцы наиболее частого появления	Август–сентябрь	Декабрь–январь
Основные топлива	Бензин	Уголь и бензин
Источники загрязнения	Передвижные	Стационарные
Основные составляющие	О <sub>3</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , CO, органические вещества	Частички вещества, CO, соединения S
Тип химической реакции	Окислительная	Восстановительная
Время максимального сгущения	Полдень	Раннее утро
Основные воздействия на здоровье	Временное раздражение глаз	Раздражение бронхов
Повреждающиеся материалы	Резина	Железо, бетон

**Кислотные дожди**

Кислотные дожди – атмосферные осадки, имеющие рН ниже 5 из-за повышенного содержания в воздухе промышленных выбросов, главным образом SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, HCl и др. Сама по себе дождевая вода, образующаяся при конденсации водяного пара должна иметь нейтральную реакцию (рН = 7). Однако в воздухе присутствует углекислый газ, который растворяясь в водных каплях, образует угольную кислоту:



Поэтому условия равновесия углекислого газа с влагой атмосферы определяют значение рН дождевой воды, которое составляет 5,6 для концентрации CO<sub>2</sub> в атмосферном воздухе 0,035% и является естественным показателем чистой воды.

Если рН осадков меньше 5, то осадки считаются кислыми. Они характерны для районов земного шара с высокой концентрацией промыш-

ленности. В основном, веществами, определяющими кислотные свойства осадков, являются серная и азотная кислоты.

10 апреля 1974 г. в шотландском городе Питлохри выпал дождь с  $pH = 2,4$ , такой  $pH$  имеет столовый уксус.

Причиной образования кислотных осадков является антропогенная деятельность, а именно загрязнение атмосферы продуктами сгорания топлива, отходами промышленного производства, применение минеральных удобрений и пестицидов, автотранспорт определяют большие потоки первичных кислых примесей, которые вносят существенный вклад в кислотность атмосферы.

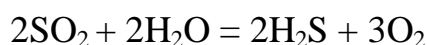
#### *Пути поступления кислотообразующих соединений в атмосферу*

Естественными поставщиками сернистого газа ( $SO_2$ ) в атмосферу служат вулканы, а также процессы сжигания угля и других серосодержащих топлив, окисления сероводорода ( $H_2S$ ) при разложении органики. Суммарное количество  $SO_2$ , ежегодно поступающее в атмосферу из естественных источников, составляет в среднем 10–12 млн т.

Концентрация  $SO_2$  в воздухе в значительной мере определяется характером местности, плотностью населения и уровнем урбанизации. В чистом воздухе сельской местности содержание  $SO_2$  достигает нескольких десятков  $мкг/м^3$ . В воздухе над океаном оно составляет 0–4  $мкг/м^3$ , а в воздухе промышленных центров концентрации  $SO_2$  могут быть в сотни раз выше, отмечены значения 30 ПДК в г. Норильске (поставщик – предприятия Норильск-никель).

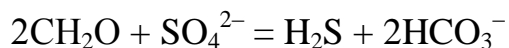
Большое количество сернистого газа образуется при работе теплоэлектростанций, котельных и других предприятий, использующих в качестве топлива мазут и уголь.

Присутствующий в вулканических газах сероводород образуется в паровой фазе при высоких температурах вулканической деятельности из сернистого газа:





Образование сероводорода, меркаптанов может происходить в анаэробных условиях, когда отдельные виды микроорганизмов восстанавливают сульфат-ионы, входящие в состав донных отложений, в реакциях брожения:

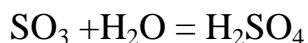
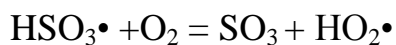
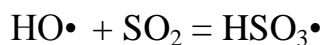


Предприятия нефтепереработки и газовой промышленности в технологических процессах выбрасывают в тропосферу миллионы тонн сероводорода, меркаптанов, сероуглерода ( $\text{CS}_2$ ) и других серосодержащих веществ.

Основным природным источником поступления оксидов азота в атмосферу является деятельность живых организмов в почве, а также химические процессы протекающие в условиях грозы. Оксиды азота антропогенного происхождения образуются в основном в результате сгорания топлива в ходе высокотемпературных реакций атмосферного азота и кислорода.

*Механизмы образования кислотных дождей.* Скорость окисления  $\text{SO}_2$  кислородом воздуха при обычных температурах атмосферы очень мала, поэтому образование оксида серы (VI)  $\text{SO}_3$  из  $\text{SO}_2$  инициируют радикалы гидроксила, концентрация которых в атмосфере достаточно велика  $5 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^6$  частиц в  $1 \text{ см}^3$ .

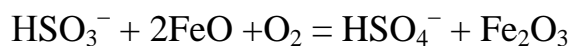
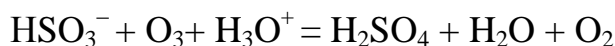
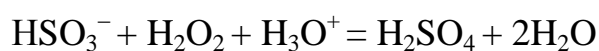
Процессы, приводящие к образованию  $\text{H}_2\text{SO}_4$  в газовой фазе, представлены следующими реакциями:



Молекулы серной кислоты, появляющиеся по этому механизму в газовой фазе, в дальнейшем абсорбируются каплями воды с образованием слабокислого раствора, который выпадает в виде кислотного дождя либо нейтрализуется аммиаком или другими основными веществами и выпадает на поверхность Земли в виде соответствующих солей.

Другой механизм образования серной кислоты в атмосфере связан с окислением  $\text{SO}_2$ , абсорбированного облачными каплями и находящегося в виде ионов сернистой кислоты:  $\text{SO}_3^{2-}$  и  $\text{HSO}_3^{2-}$ . Окислителем являются пероксид водорода и озон. Некоторые исследователи считают, что в присутствии света  $\text{SO}_2$  окисляется при наличии оксидов некоторых металлов (алюминия, кальция, железа). По-видимому, данный тип окисления связан с присутствием катализатора (соединения металлов) и достигает высокого уровня только в загрязненном воздухе.

Реакции, лежащие в основе образования серной кислоты в каплях воды:



Заслуживают внимания процессы адсорбции  $\text{SO}_2$  на атмосферных частицах с последующим превращением в сульфат. Превращение в сульфат протекает быстро на щелочной пыли, не идёт на нейтральной или кислой пыли, если вещество не проявляет каталитических свойств за счёт присутствия в ней аэрозолей солей металлов. Особую роль играет влажность, увеличение которой способствует большей степени превращения в сульфат.

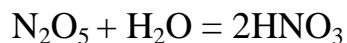
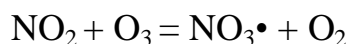
Рассмотренные механизмы окисления и пути вывода  $\text{SO}_2$  исходят из продолжительности пребывания его в атмосфере (2–74 дня), и при этом полагается равноценность вклада каждого механизма в итоговый результат образования кислотных дождей.

Основные количества азотной кислоты в атмосфере образуются в результате взаимодействия радикала гидроксила с оксидом азота (IV)  $\text{NO}_2$ :



Данная реакция идёт в условиях светового дня, что обусловлено нахождением  $\text{OH}\cdot$  в атмосфере только в дневное время. Поэтому данный процесс называется «дневным» механизмом образования азотной кислоты.

Альтернативным этому является «ночной» механизм получения азотной кислоты. В его основе лежит взаимодействие  $\text{NO}_2$  с озоном с образованием радикала  $\text{NO}_3^\bullet$ :



Образующийся в ходе реакций радикал  $\text{NO}_3^\bullet$  неустойчив и быстро разлагается под действием солнечной радиации, поэтому данный механизм в дневное время не работает.

Образовавшиеся кислоты выводятся из атмосферы дождями примерно через 7 суток.

*Влияние кислотных осадков на природные объекты, здания, памятники и технику.* Кислотные дожди наносят существенный урон объектам биосферы. Это касается в равной степени водных объектов, состояния почв, растительного и животного мира (рис. 13).

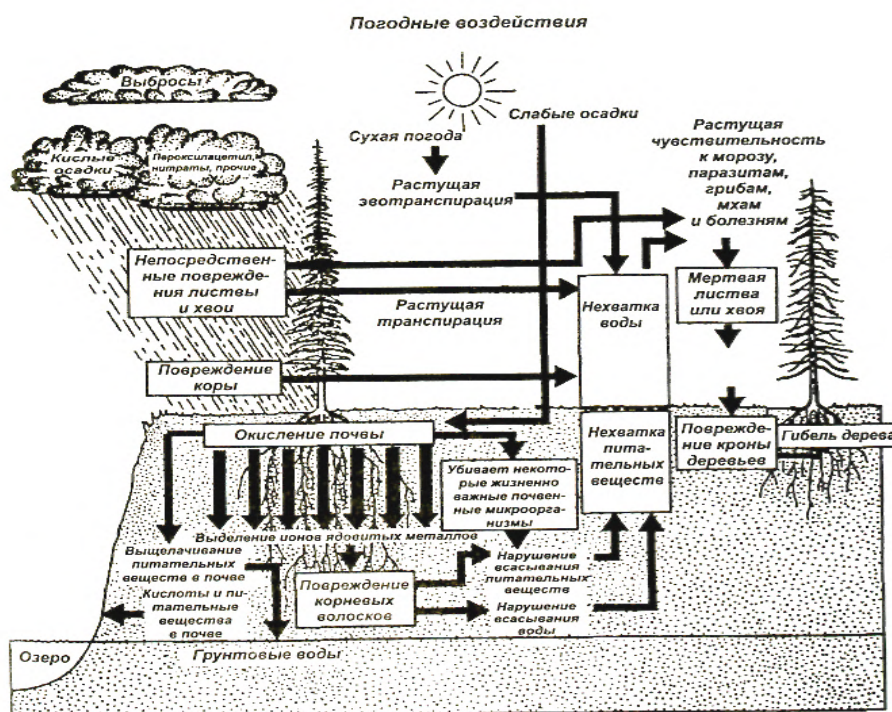


Рис. 13. Вредное воздействие кислотных осадков на почву и растительность

*Влияние на водные объекты.* Вода любого пресноводного водоёма чаще всего имеет щелочную реакцию – (рН от 6,5 до 8,0), так как всегда содержит катионы щелочных и щелочноземельных металлов. Они вымываются водными потоками из почвы и подстилающих горных пород, а также образуются при разложении органических остатков. Этот состав воды благоприятен для жизнедеятельности всех обитателей рек и озёр от бактерий и водорослей до рыб.

При систематическом выпадении кислых осадков вода первое время сохраняет слабощелочную реакцию благодаря своим естественным буферным свойствам. Однако постепенно пресноводные водоёмы начинают понемногу подкисляться, что сразу же сказывается на условиях обитания всех населяющих эти воды биологических объектов – растениях, бактериях, водорослях, рыбах, земноводных и т. п. Так, при значениях рН от 6 до 5,5 быстро сокращается численность и видовое разнообразие живых существ, при снижении рН до 4,5 происходит массовая гибель рыбы и теряется способность их к размножению.

При этих же значениях рН бурно развиваются кислотолюбивые мхи, грибы и нитчатые водоросли, которые заглушают всю остальную водную растительность. Нарушенное кальциевое равновесие у одних рыб затрудняет перенос ионов через жаберные мембраны, у других приводит к потере способности образовывать икру. При снижении рН ниже 4,5 рыбы в озере уже не остаётся, наблюдается гибель лягушек, насекомых. Из силикатов и донных осадков выщелачиваются алюминий и другие металлы, которые сами по себе более опасны для окружающей биоты, чем наблюдающаяся высокая кислотность.

*Физиологическое действие кислотных дождей на растения.* Вредному воздействию кислых дождей в сильной степени подвержена растительность. В Швеции в 70-х годах прошлого столетия продуктивность лесов неуклонно падала из-за кислых осадков (примерно на 1 % в год). Присутствующие в составе кислых дождей сульфит-ионы ( $\text{SO}_3^{2-}$ ) разрушают в значительной мере клеточные мембраны, что вызывает сбои и нарушение

деятельности ряда ферментов, обеспечивающих нормальные условия существования растений. Это приводит к отмиранию целых участков листьев из-за нарушения процессов фотосинтеза.

Действие кислотных дождей ярче всего проявляется в угнетении и уменьшении видового разнообразия у низших растений по сравнению с высшими. Повреждения растений кислотными дождями приведены на цветной вкладке.

*Кислотные дожди и почва.* Негативное влияние кислотных дождей ощущают не только пресные воды и растения, но и почвы. В них при повышении кислотности ускоряется вымывание питательных веществ – выщелачивание биогенных элементов.

Ионы водорода легко вытесняют их ионы с частиц почвы и гумуса (рис. 14 А, Б).

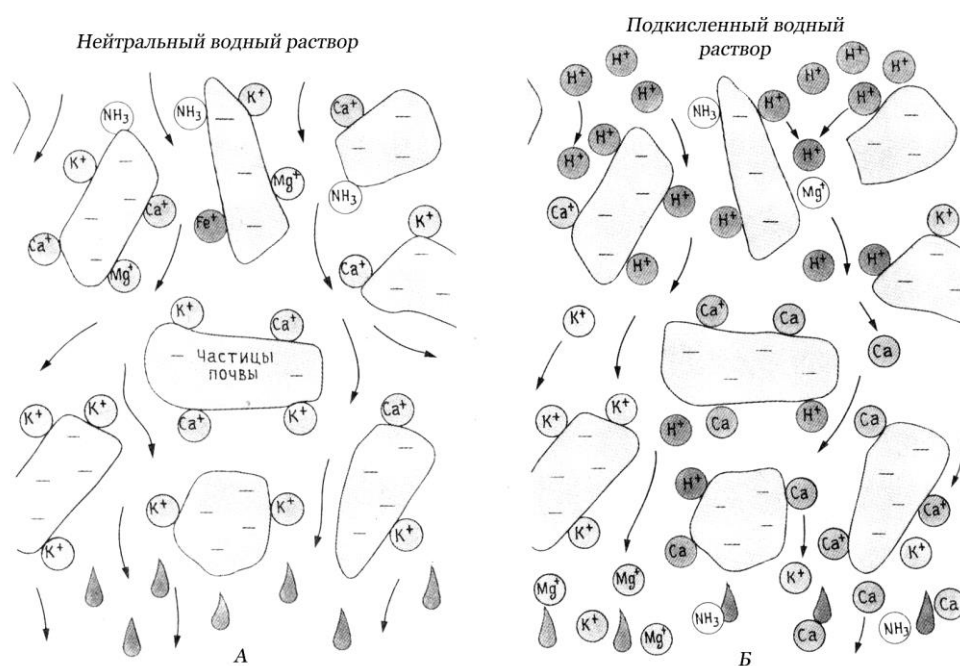


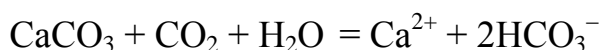
Рис. 14. Кислотные осадки вымывают биогены из почвы

*А.* Частички гумуса и глины обычно заряжены отрицательно и удерживают такие положительные биогенные ионы, как  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Ca^{2+}$ . Сила притяжения достаточно велика, чтобы удерживать ионы, несмотря на просачивание воды.

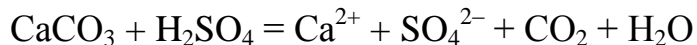
*Б.* Просачивающаяся кислота уносит биогенные ионы, так как их вытесняет  $H^+$

При повышении кислотности почв гибнут полезные микроорганизмы, в том числе азотфиксирующие: среднее число клубеньков на корнях бобовых при уменьшении pH почвенного раствора с 6,0 до 3,2 снижается почти втрое. Особенно сильное отрицательное влияние понижения pH почв наблюдается вблизи крупных промышленных центров, которое проявляется в усыхании и гибели деревьев и травяного покрова на большой территории.

Воздействие кислотных дождей на строения и технику. Осадки, формирующиеся в дождевых облаках и находящиеся в контакте с атмосферой, содержащей значительное количество углекислого газа, обладают слабокислой реакцией и разрушающе действуют на строения с известковой кладкой:



Этот эффект значительно усиливается при подкислении влаги дождевых облаков кислыми тазами антропогенного происхождения при абсорбции водяными парами. Сернокислотные осадки необратимо разрушают строения на основе известняка:

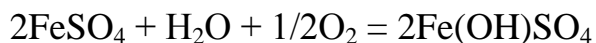


Наиболее ярко и наглядно это иллюстрируется состоянием таких исторических памятников и сооружений, как Акрополь в Афинах, Колизей в Риме, Кельнский собор и др., которые разрушаются под действием кислотных дождей.

Подобное разрушающее действие атмосферных осадков с низкими значениями pH сказывается на прочностных свойствах бетона, стёкол, сложных силикатов, из которых выщелачивается алюминий, входящий в состав решётки алюмосиликатного каркаса.

Ещё более разрушительное воздействие оказывают кислотные дожди на изделия и механизмы из металла. Жидкая плёнка на поверхности металла, содержащая кислоты, является средой, в которой осуществляются процессы коррозии металла. Так, на поверхности изделий из железа при взаимодействии с влагой, содержащей серную кислоту, образуется корка гигроскопичного

сульфата закисного железа ( $\text{FeSO}_4$ ), который на воздухе окисляется с образованием ржавчины:



Памятники, выполненные из бронзы, покрываются так называемой патиной, представляющей собой пористую корку из карбонатов, сульфатов, иногда из хлоридов, пропитанную водой и адсорбирующую кислые газы. Образующаяся кислота продолжает свою разрушительную работу и разъедает металл, переводя его в раствор в виде ионов. Следствием этого является нарушение целостности изделия.

Разрушающее действие кислотных дождей проявляется и в ухудшении свойств многих органических материалов – кожи, бумаги, резины, тканей, ряда пластических масс. Изделия из этих веществ становятся хрупкими, теряют свою эластичность, форму.

### **Парниковый эффект**

Парниковый эффект – эффект разогрева приземного слоя воздуха, вызванный тем, что атмосфера поглощает тепловое излучение земной поверхности, в которое превращается большая часть достигшей Земли световой энергии Солнца.

Известно, как нагревается изнутри автомобиль, когда он стоит на солнце с закрытыми окнами. Причина в том, что солнечный свет (световая энергия) проникает через окна и поглощается сиденьями и другими предметами в салоне. При этом световая энергия переходит в тепловую, предметы нагреваются и выделяют тепло. В отличие от света – тепло не проникает сквозь стекла наружу, т. е. улавливается внутри автомобиля. За счёт этого повышается температура. То же самое происходит в парниках, откуда и произошёл термин парниковый эффект.

Аналогично нагревается атмосфера Земли: свет сквозь неё проникает, а тепловое излучение поглощается парниковыми газами ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$  и др.). Чем выше концентрация этих газов, тем чувствительнее такой парниковый эффект.

*Улавливание тепла парниковыми газами.* Световая энергия проникает сквозь атмосферу, поглощается поверхностью земли, преобразуется в её тепловую энергию и выделяется в виде тепла (инфракрасного излучения). Компоненты атмосферы, молекулы которых содержат 3 и более атомов в своём составе –  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$  и др., интенсивно поглощают тепловое излучение (излучение в инфракрасном диапазоне), на которое приходится максимальное количество энергии, излучаемой Землёй. При этом они нагреваются и в свою очередь нагревают атмосферу в целом. Значит, чем больше в атмосфере парниковых газов, тем больше инфракрасных лучей будет поглощено, тем теплее она станет.

Парниковый эффект обеспечивает достаточно комфортные условия существования на нашей планете. Благодаря наличию парниковых газов средняя температура Земли (нижней границы тропосферы) составляет  $+15^\circ\text{C}$ . При отсутствии парниковых газов температура на планете была бы  $-18^\circ\text{C}$ . В таких условиях существование биосферы было бы невозможно. В таблице 5 приведены сведения о вкладе атмосферных газов в парниковый эффект.

*Таблица 5*

Вклад атмосферных газов в парниковый эффект

№ п/п	Компоненты атмосферного воздуха		Увеличение температуры, $^\circ\text{C}$
	название	формула	
1	Пары воды	$\text{H}_2\text{O}$	20,6
2	Углекислый газ	$\text{CO}_2$	7,2
3	Озон	$\text{O}_3$	2,4
4	Оксиды азота	$\text{N}_x\text{O}_y$	1,4
5	Метан	$\text{CH}_4$	0,8
6	Другие газы		0,8
Итого			33,2

*Увеличение парникового эффекта в ходе хозяйственной деятельности*

Основная причина возрастания парникового эффекта – использование традиционных энергоносителей в промышленности и автомобилистами. К менее очевидным причинам можно отнести вырубку лесов, переработку



отходов, и добычу угля. Значительно способствуют увеличению парникового эффекта хлорфторуглеводороды, углекислый газ ( $\text{CO}_2$ ), метан ( $\text{CH}_4$ ), оксиды азота и др. газы. Однако наибольшую роль в этом процессе играет всё же углекислый газ, поскольку у него относительно длинный жизненный цикл в атмосфере и во всех странах его объёмы непрерывно возрастают.

Каждый год сжигается около 2 млрд т ископаемого топлива, значит, в атмосферу попадает почти 5,5 млрд т углекислого газа. Ещё приблизительно 1,7 млрд т его поступает туда же за счёт сведения и выжигания тропических лесов и окисления органического вещества почвы (гумуса).

В результате концентрация углекислого газа в атмосфере, составлявшая в начале XX в. около 0,029%, к настоящему времени достигла 0,035%, т. е. выросла на 20%. Чем дальше, тем быстрее это увеличение, так как растущее население планеты сжигает все больше топлива и вырубает все больше лесов.

Увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере, особенно интенсивное в последние 200 лет, приводит к росту эффективности поглощения теплового излучения. В результате этого температура Земли может возрастать.

К повышению температуры может привести и увеличение концентрации в тропосфере таких газов, как  $\text{O}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , фреонов. Эти газы, способные улавливать инфракрасное излучение и частично перекрывать «окна прозрачности» атмосферы, как и диоксид углерода, называют парниковыми газами.

Если допустить сохранение существующих тенденций, к 2050 г. концентрация углекислого газа в атмосфере удвоится. В свою очередь компьютерные модели различных климатических параметров показывают, что это повлечет за собой повсеместное потепление на 1,5–4,5 °C. Вероятно, оно будет более выражено в полярных районах (до 10 °C) и менее – в экваториальных (1–2 °C).

На первый взгляд оно кажется умеренным. Однако рост температуры на 4,5–5,5 °С выше её пиков, достигающих 38 °С, может оказаться катастрофическим. Более того, такое потепление вызовет таяние горных ледников и полярных льдов, достаточное для поднятия уровня мирового океана на 1,5 м. Это приведёт к затоплению и гораздо большей подверженности обширных прибрежных зон влиянию штормов, т. е. заставит людей покинуть обжитые места и мигрировать в глубь суши.

Влияние глобального потепления на осадки и сельское хозяйство, вероятно, окажется ещё более сильным. Различная температура на полюсах и экваторе – основная движущая сила циркуляции атмосферы. Более сильное потепление на полюсах приведёт к её ослаблению. Это изменит картину циркуляции атмосферы, а значит, и распределение осадков. В некоторых районах их количество, вероятно, увеличится, в других уменьшится.

### **Радиоактивность атмосферы**

Радиоактивность атмосферы обусловлена присутствием в атмосфере радиоактивных газов и аэрозолей, попадающих в неё в результате процессов, происходящих в природе, и деятельности человека. Соответственно различают естественную и искусственную радиоактивность. Естественные радиоактивные газы являются изотопами радона:  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{219}\text{Rn}$ , и образуются вследствие радиоактивного распада  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и  $^{235}\text{U}$ . Они поступают в атмосферу с почвенным воздухом при обмене его с атмосферным или путём диффузии. При радиоактивном распаде изотопов Rn образуются аэрозольные продукты их распада, т.к. возникающие при этом химические элементы относятся к металлам и не летучи при обычных условиях (Po, Bi и др.). При этом  $^{222}\text{Rn}$  (период полураспада  $T_{1/2} = 3,8$  сут.) распространяется в пределах тропосферы, а его долгоживущие продукты распада  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Bi}$ ,  $^{210}\text{Po}$  обнаружены в стратосфере. Содержание  $^{222}\text{Rn}$  в воздухе над океанами на 2 порядка ниже, чем над материками, а концентрация над земной поверхностью уменьшается примерно вдвое на каждый км высоты.  $^{220}\text{Rn}$  и  $^{219}\text{Rn}$  вследствие малого значения  $T_{1/2}$  (54 сек и 3,9 сек) присут-

ствуют только у земной поверхности. Продукт распада  $^{220}\text{Rn}$ – $^{212}\text{Pb}$  с  $T_{1/2} = 10,6$  ч обнаруживается в нижней тропосфере. В воздухе над океанами  $^{220}\text{Rn}$ ,  $^{210}\text{Rn}$  и их продукты распада практически отсутствуют.

Основная масса естественных радиоактивных изотопов ( $^7\text{Be}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{33}\text{P}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ ), возникающих при взаимодействии космического излучения с ядрами атомов химических элементов, входящих в состав воздуха, образуется в стратосфере, где и отмечаются наибольшие их концентрации.

Искусственные радиоактивные аэрозоли образуются при ядерных взрывах. Через несколько десятков сек после взрыва они содержат около 100 различных радиоактивных изотопов; наиболее токсичными из них считаются  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{131}\text{I}$ . Высота заброса в атмосферу радиоактивных аэрозолей зависит от мощности и высоты ядерного взрыва, а характер их распространения – от размеров частиц и от высоты заброса их в атмосферу. Наиболее крупные частицы (сотни мкм и выше) быстро выпадают из атмосферы, распространяясь всего на сотни км от места взрыва (локальные выпадения). Однако в случае взрывов мощных ядерных бомб (эквивалентных десяткам мегатонн тринитротолуола) они попадают в стратосферу и, прежде чем выпадут на поверхность Земли, могут пройти в атмосфере тысячи км. Мелкие аэрозоли (размером не более нескольких мкм), попавшие при взрыве в верхнюю тропосферу, обычно распространяются вдоль зонального пояса широт с запада на восток, а заброшенные в стратосферу выпадают на поверхность Земли в пределах всего полушария, а в некоторых случаях – в обоих полушариях, поэтому выпадения этих аэрозолей называются глобальными.

Основной механизм очищения атмосферы от радиоактивных аэрозолей – выпадение осадков. Среднее время пребывания радиоактивного аэрозоля в нижней тропосфере (до момента его выпадения на земную поверхность) порядка нескольких сут., а в верхней тропосфере 20–40 сут. Радиоактивные аэрозоли, попавшие в нижние слои стратосферы, имеют порядка года и выше. Величина растёт с увеличением высоты заброса в стратосферу. Обычно

большая часть радиоактивных продуктов деления остаётся в пределах того полушария, где проведён взрыв ядерной бомбы.

Концентрация продуктов деления в тропосфере растёт с высотой. Особенно большой рост отмечается при переходе через тропопаузу. В стратосфере максимум концентрации продуктов деления по измерениям до осени 1961 отмечался на высоте 19–23 км (примерно на той же высоте, что и слой максимальной концентрации нерадиоактивного аэрозоля). Радиоактивное загрязнение атмосферы от предприятий атомной промышленности имеет чаще всего локальный характер; однако  $^{85}\text{Kr}$  распределён по всей тропосфере.

## **2.4 Защитные функции атмосферы**

Земная жизнь уязвима для космических лучей и нуждается в постоянной и надёжной от них защите. Атмосфера осуществляет и защитные функции.

Пройти через атмосферу могут лишь крупные метеориты с исходной массой в десятки и сотни тонн – явление, как известно, чрезвычайное. Метеориты помельче – не редкость. Ежедневно в небо над Москвой, например, вонзается до 200 метеоритов, нацело сгорающих в атмосфере.

От Солнца поступает на Землю энергия, а следовательно, и сама возможность жизни. Но жизненную дозу солнечной энергии «отмеряет» атмосфера. Не будь её, днём Солнце раскаляло бы земную поверхность до  $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а ночью до  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  выстуживал бы её ледяной космос; 200-градусный перепад суточных температур намного превышает возможности к выживанию большинства живых организмов.

На верхнюю границу атмосферы постоянно обрушивается мощный поток солнечных и иных космических излучений широкого диапазона волн и энергий: гамма-излучение, рентгеновские, ультрафиолетовые лучи, видимый свет, инфракрасное излучение и т. п. Если бы все они достигли земной

поверхности, то мгновенно убийственная их энергия испепелила бы все живое. Этого не случается, и на Земле существует жизнь благодаря атмосфере.

Для всего разнообразия излучений атмосфера оставляет лишь два «окна прозрачности», сквозь которые проникают некоторые радиоволны, а также свет с частью ультрафиолетовых и инфракрасных лучей. Главную роль в этом играют ионосфера и озоновый экран на высоте 20–55 км. Хотя озон крайне разрежен, именно здесь большая часть энергии ультрафиолетовых лучей расходуется на разрушение молекул кислорода. Прошедшие через озоновый фильтр, они ещё опасны для некоторых микроорганизмов, в том числе болезнетворных, и полезны для человека.

Климат и погода. Атмосфера регулирует важнейшие параметры климата – влажность, температуру, давление.

Скопление капель влаги или кристаллов льда, т. е. образование облаков, возможно лишь при наличии в воздухе ядер конденсации – твёрдых частиц диаметром в сотые доли микрометра, или, проще говоря, тончайшей пыли. В абсолютно «стерильной» атмосфере дождь невозможен.

Вертикальные и горизонтальные перемещения тёплых и холодных, сухих и увлажнённых масс воздуха, местное распределение температур и осадков, т. е. формирование погоды, осуществляется за счёт различий атмосферного давления и возникновения ветров.

Велика роль атмосферы в круговороте веществ. Циклы кислорода, углерода, азота, воды обязательно проходят атмосферную стадию. Воздушный бассейн выступает в роли гигантского резервуара, где все эти вещества накапливаются и, главное, распределяются по земному шару. Тем самым осуществляется регуляция скорости и интенсивности круговорота веществ в природе.

Атмосфера – часть наземно-воздушной среды жизни. Для большинства обитателей суши, и человека в их числе, важны физические свойства атмосферы.

Атмосферное давление у поверхности Земли (около  $9,8 \cdot 10^4$  Па) называют нормальным. Это норма существования наземных организмов, которую мы, как любую норму, не замечаем, хотя на человека при этом действует 10–12 т воздуха. Для нас ощутимы лишь отклонения от нее: при понижении давления на высоте около 5 тыс. м появляются признаки «горной болезни» (головокружение, тошнота, слабость); при погружении в воду на глубину 10 м давление оказывает заметное влияние на человеческий организм (боль в барабанных перепонках, затрудненное дыхание и т. п.). В абсолютном вакууме гибель наступает мгновенно.

Прозрачность, т. е. проницаемость, атмосферы для солнечных излучений – видимых, ультрафиолетовых, инфракрасных – исключительно важна для живых организмов. Количество и качество света определяют интенсивность фотосинтеза – единственного природного процесса фиксации солнечной энергии на Земле. Повышение уровня ультрафиолетового облучения может привести к ожогам и другим болезненным явлениям, понижение создаёт условия для массового размножения болезнетворных организмов. Современные изменения прозрачности атмосферы в значительной мере определяются антропогенными влияниями, что уже привело к возникновению ряда серьёзных проблем.

Весьма существенно для биосферы состояние газового баланса. Свыше 3/4 воздуха составляет азот, названный Лавуазье «безжизненным». Он входит в первооснову носителей жизни – белков и нуклеиновых кислот. Правда, в их синтезе атмосферный азот непосредственного участия не принимает, но является гигантским резервуаром первичного «сырья» как для деятельности азотфиксирующих микроорганизмов и водорослей, так и для промышленности азотных удобрений. Масштабы и особенно темпы роста промышленной фиксации азота уже вносят некоторые коррективы в представление о неисчерпаемости его запасов в атмосфере.

Сказанное в ещё большей мере приложимо к кислороду, составляющему четвертую часть всех атомов живого вещества. Без кислорода невоз-

можно дыхание и, следовательно, энергетика многоклеточных животных. Вместе с тем кислород – это продукт жизнедеятельности, выделяемый фотосинтезирующими организмами. Накопление в ходе взаимной эволюции атмосферы и биосферы всего 1% кислорода создало условия для бурного развития современных форм жизни. При этом образовался озоновый экран – защита от космических лучей высоких энергий. Сокращение кислорода в атмосфере повлекло бы за собой замедление процессов жизнедеятельности. Утеря кислорода вызвала бы неизбежную замену аэробных форм жизни анаэробными.

Углекислого газа в атмосфере Земли содержится всего 0,03%. Но сегодня это предмет большого внимания и немалых тревог. При увеличении доли углекислого газа всего до 0,1% животные испытывают затруднения в дыхании, свыше 4% – в воздухе означает аварийную ситуацию. Даже совсем ничтожные (на тысячные доли процента) изменения содержания углекислого газа в атмосфере меняют ее проницаемость для отражённых от земной поверхности тепловых лучей.

Таким образом, атмосфера играет важную роль в биосфере. Жизнь на Земле без атмосферы невозможна.

### 3. ХИМИЯ ГИДРОСФЕРЫ

#### 3.1 Свойства воды и гипотезы её происхождения

Вода ( $H_2O$ ) – одно из самых распространённых на Земле химических соединений. Природные воды образуют океаны, моря, ледники, реки, озера, в виде паров присутствуют в атмосфере, проникают в почву и горные породы. Вода в биосфере – важнейшее составляющее живого вещества, без которого жизнь не возможна. Живые организмы в среднем на 2/3 состоят из воды. Вода – простейшее и устойчивое соединение водорода с кислородом: 11,19 % водорода и 88,81 % кислорода (по массе).

Известны три изотопа водорода  $^1H$  – протий,  $^2H$  – дейтерий и  $^3H$  – тритий и три изотопа кислорода  $^{16}O$ ,  $^{17}O$ ,  $^{18}O$ . Природная вода на 99,73 % состоит из  $^1H$  и  $^{16}O$ , является лёгкой водой. На дне океанов обнаружена и тяжёлая вода, состоящая из  $^2H$  и  $^3H$  (165 г на тонну). Организмы в такой воде не живут. При испарении в пар переходит лёгкая вода, неиспарившаяся вода обогащается более тяжёлой водой с изотопами  $^{17}O$  и  $^{18}O$  [1, 2]. Лёгкую и тяжёлую воду иногда называют «живой» и «мёртвой» водой, соответственно.

#### **Аномальные свойства воды**

Вода – самое удивительное вещество на нашей планете, она характеризуется рядом аномальных свойств, играющих важную роль в поддержании жизни на Земле.

*Аномальный вид температурной зависимости плотности воды.* Наибольшую плотность вода имеет при 4 °C (1 г/см<sup>3</sup>), при 0 °C плотность льда 916,8 кг/м<sup>3</sup>, а плотность воды – 999,968 кг/м<sup>3</sup>. Такая зависимость плотности воды от температуры позволяет сохраниться в холодные периоды всей водной биосфере. При температурах до 4°C плотность льда становится меньше плотности воды и лед всплывает. При дальнейшем охлаждении происходит перемешивание более плотной холодной воды и менее плотной теплой до тех пор пока вся вода не достигнет 4 °C. Поверхностный слой становится легче глубинных слоев, и перемешивание воды прекращается,



что приводит к образованию на поверхности воды льда, служащего тепловым барьером, защищающим гидросферу от переохлаждения.

*Аномально высокая теплоёмкость воды.* Удельная теплоёмкость воды выше, чем у всех твёрдых и жидких веществ за исключением жидкого аммиака и водорода. Благодаря высокой теплоёмкости воды океанов сглаживают колебания температуры, и перепад температур от экватора до полюса в Мировом океане не превышает 30 °С.

*Аномально высокая энтальпия испарения.* Высокое значение удельной энтальпии испарения приводит к тому, что большая часть солнечной энергии, достигающей Земли, расходуется на испарение воды, препятствуя перегреву её поверхности. При конденсации паров воды в атмосфере происходит выделение этой энергии, которая может переходить в кинетическую энергию компонентов атмосферы, вызывая ураганные ветры.

*Аномально высокое поверхностное натяжение воды* приводит к появлению ряби и волн на водной поверхности уже при слабом ветре. В результате этого резко возрастает площадь водной поверхности и интенсифицируются процессы теплообмена между атмосферой и гидросферой. С высоким поверхностным натяжением воды связаны и капиллярные силы, благодаря действию которых вода способна подниматься на высоту до 10–12 м от уровня грунтовых вод.

*Аномально высокое значение диэлектрической проницаемости.* Высокая диэлектрическая проницаемость определяет самую большую растворяющую способность воды по отношению к веществам с полярной и ионной структурой. Благодаря тому, что молекулы воды – диполи она взаимодействует почти со всеми веществами. Как только кристалл вещества попадает в воду, молекулы воды так энергично с ним взаимодействуют, что ионы кристалла отрываются от кристаллической решётки и переходят в воду. Именно поэтому все природные воды – растворы. Даже самые чистые атмосферные осадки над Антарктидой содержат до 5 мг/л растворён-

ных соей. Содержание солей в дождевой воде с интенсивной вулканической деятельностью достигает 100 мг/л.

### *Гипотезы происхождения воды на Земле*

Существует несколько гипотез происхождения воды на Земле.

1. Первая гипотеза исходит из «горячего» происхождения Земли. Считается, что некогда Земля была расплавленным огненным шаром, который, излучая тепло в пространство, постепенно остывал. Появилась первородная кора, возникли химические соединения элементов и среди них соединение водорода с кислородом, или, проще говоря, вода. Пространство вокруг Земли все более заполнялось газами, которые непрерывно извергались из трещин остывающей коры. По мере охлаждения пары образовывали облачный покров, плотно окутавший нашу планету. Когда температура в газовой оболочке упала настолько, что влага, содержащаяся в облаках, превратилась в воду, пролились первые дожди. Тысячелетие за тысячелетием низвергались дожди. Они-то и стали тем источником воды, которая постепенно заполнила океанические впадины и образовала Мировой океан.

2. Вторая гипотеза исходит из «холодного» происхождения Земли с её последующим разогревом. Разогрев стал причиной вулканической деятельности. Извергаемая вулканами лава выносила на поверхность планеты пары воды. Часть паров, конденсируясь, заполняла океанические впадины, а часть образовала атмосферу. Как теперь подтверждено, главной ареной вулканической деятельности на первых стадиях эволюции Земли действительно являлось дно современных океанов. Согласно этой гипотезе вода содержалась уже в той первичной материи, из которой сложилась наша Земля. Подтверждением такой возможности является наличие воды в падающих на Землю метеоритах. В «небесных камнях» её до 0,5 %. На первый взгляд мизерное количество.

3. Третья гипотеза также исходит из «холодного» происхождения Земли с последующим её разогревом. На какой-то стадии разогрева в мантии Земли на глубинах 50–70 км из ионов водорода и кислорода начал возни-

катель водяной пар. Однако высокая температура мантии не позволяла ему вступать в химические соединения с веществом мантии. Под действием гигантского давления пар выжимался в верхние слои мантии, а затем и в кору Земли. В коре более низкие температуры стимулировали химические реакции между минералами и водой, в результате разрыхления пород, образовались трещины и пустоты, которые немедленно заполнялись свободной водой. Под действием давления воды трещины раздавались, превращались в разломы, и вода через них устремлялась на поверхность. Так возникли первичные океаны.

4. Четвёртая гипотеза предполагает космическое происхождение воды. Дело в том, что на Землю из космоса непрерывно поступают заряженные частицы. И среди этих частиц изрядную долю составляют протоны – ядра атомов водорода. Пронизывая верхние слои атмосферы, протоны захватывают электроны и превращаются в атомы водорода, которые тут же вступают в реакцию соединения с кислородом атмосферы. Образуются молекулы воды. Расчёт показал, что космический источник способен дать почти 1,5 т воды в год, и эта вода в виде осадков достигает земной поверхности. Полторы тонны в год по глобальным меркам – ничтожное количество. Но следует иметь в виду, что образование космической воды началось одновременно с возникновением планеты, т. е. 5–7 млрд лет назад, да и во все ли эпохи Земля получала из космоса только полторы тонны в год? Не случалось ли в доисторические времена подлинных потопов от космических водяных дождей? Не заливала ли тогда вода нашу планету до самых вершин первозданных горных хребтов, а уж позднее частично ушла в недра Земли, и на поверхности остались лишь знакомые нам океаны? У этой гипотезы противников значительно больше, чем сторонников.

5. Гипотеза академика А. П. Виноградова исходит из того, что первоисточником воды на Земле являются глубинные воды, образующиеся за счёт дифференциации вещества внутри планеты, выделения и миграции из глубин легкоплавких и легколетучих компонентов, содержащих в своём со-

ставе молекулы  $H_2O$ . Современное изучение состава магмы, извергаемой вулканами из глубин, подтверждает, что последняя действительно содержит от 5 до 12 % воды.

По данным А. П. Виноградова, объем воды мантии Земли составляет 20 млрд  $км^3$ , или в 15 раз больше общего объема гидросферы. Если учесть, что наша планета первоначально представляла собой газообразное и жидкое тело, то указанного количества воды было достаточно для образования водной оболочки Земли.

За счёт определённых термодинамических условий и физико-химических процессов происходило образование молекул воды, которая, пробиваясь на поверхность, формировалась в Мировой океан. Испаряясь с поверхности океана, вода в виде облаков попадала в атмосферу, а затем, конденсируясь, выпадала в виде осадков на поверхность Земли, образуя таким образом общий круговорот. Так, по мнению учёных, формировалась земная гидросфера.

По мнению некоторых учёных, ежегодный прирост объема гидросферы за счёт выноса воды из мантии Земли составляет около 1  $км^3$ . Об этом свидетельствует систематический подъём уровня воды в океане.

## **3.2 Классификация и состав природных вод**

### **Классификация природных вод**

Природная вода – сложная дисперсная система, содержащая множество разнообразных минеральных и органических примесей.

Уже несколько столетий разрабатываются системы классификации природных вод и способы как можно более краткой характеристики качества воды (индекс качества воды). Выделено 625 и даже более классов, групп, типов и разновидностей вод. В словаре-справочнике Н. Ф. Реймерса (1990) рассматриваются следующие виды воды:

– *вода артезианская* – вода, залегающая между водоупорными слоями и образующая водонапорные подземные бассейны. При избыточном гидростатическом давлении она изливается на поверхность или фонтанирует;

– *вода очищенная* – вода, доведённая до содержания в ней количества примесей, не превышающего естественного фона или допустимой величины;

– *вода питьевая* – вода, в которой показатели бактериальных, органолептических свойств и степени токсичности химических веществ находятся в пределах норм питьевого водоснабжения;

– *вода промышленная* – вода, ресурсы и состав компонентов которой достаточны для извлечения этих компонентов в промышленных масштабах.

Промышленными являются воды, содержащие поваренную соль, соду и другие компоненты. Извлечение поваренной соли из рассолов подземных вод проводилось в России ещё в древние века в районах распространения пермских отложений (Кировская, Пермская области и др.); названия многих населённых пунктов – Соль-Вычегодск, Соликамск и др. – свидетельствуют о былом процветании соляного промысла в этих местах. В некоторых случаях подземные воды содержат в растворённом виде и другие вещества (бор, литий, никель, мышьяк, медь и др.), которые могут извлекаться из растворов. Наиболее изученными являются промышленные йодные и бромные воды. Характерная особенность йодо-бромных вод состоит в том, что они являются рассолами высокой концентрации.

– *вода техническая* – вода, кроме питьевой, минеральной и промышленной, пригодная для использования в народном хозяйстве. Под этим термином принято понимать воду, потребляемую промышленными предприятиями в качестве теплоносителя и охлаждающего агента, технологического компонента в производственных цехах и для вспомогательных нужд.

*Гидрохимическая классификация воды.* Большое значение для научной и хозяйственной классификации имеет химический состав природных вод, отличающийся огромным разнообразием. Вода гидросферы представ-

ляет собой природный раствор, в котором кроме воды присутствуют соли, газы и организмы. Вода – прекрасный растворитель.

По составу солей (классификация О. А. Алекина), природные воды подразделяются:

- по преобладающему аниону на три класса: гидрокарбонатные и карбонатные ( $\text{HCO}_3^-$ ;  $\text{CO}_3^{2-}$ ); сульфатные ( $\text{SO}_4^{2-}$ ); хлоридные ( $\text{Cl}^-$ );
- по преобладающему катиону каждый класс делится на три группы: кальциевые ( $\text{Ca}^{2+}$ ), магниевые ( $\text{Mg}^{2+}$ ), натрий-калиевые ( $\text{Na}^+$ - $\text{K}^+$ ).

Каждая группа в свою очередь подразделяется на четыре типа вод, определяемых соотношением между содержанием ионов в процентах в пересчёте на количество вещества эквивалента (рис. 15).

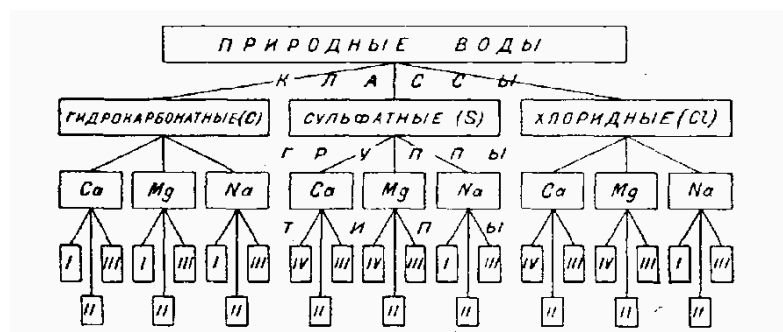


Рис. 15. Классификация природных вод по их химическому составу по О. А. Алекину

Воды I типа являются маломинерализованными. Воды II типа смешанные, к ним относятся воды большинства озер, рек и подземные воды с малой и умеренной минерализацией. Воды III типа метаморфизированные, включают часть сильноминерализованных природных вод, это воды морей, океанов, морских лиманов, реликтовых водоёмов. К IV типу относятся кислые – болотные, шахтные, вулканические или воды сильно загрязненные промышленными стоками.

### Состав природных вод

Формирование химического состава природных вод определяют в основном две группы факторов:

- прямые факторы, непосредственно воздействующие на воду (т. е. действие веществ, которые могут обогащать воду растворенными со-

единениями или, наоборот, выделять их из воды): состав горных пород, живые организмы, хозяйственная деятельность человека;

– косвенные факторы, определяющие условия, в которых протекает взаимодействие веществ с водой: климат, рельеф, гидрологический режим, растительность, гидрогеологические и гидродинамические условия и пр.

В таблице 6 приведён перечень факторов, оказывающих влияние на формирование химического состава природных вод.

Таблица 6

Факторы формирования химического состава природных вод

Факторы формирования и результаты их воздействия	Виды природных вод		
	Атмосферные осадки (дождь, снег, иней, град)	Поверхностные воды суши (реки, ручьи, озера, болота)	Подземные воды
1	2	3	4
Прямые факторы формирования	почвы, породы, растения, соли солончаков, соли с поверхности льда, деятельность человека, космическая пыль, разряд атмосферного электричества (оксиды азота), вулканические газы, пыль	атмосферные осадки, почвы, породы, растения, подземные воды, сточные воды (промышленные, сельскохозяйственные, хозяйственно-бытовые)	поверхностные воды, почвы, породы, физико-химические процессы (растворение–осаждение, сорбция–десорбция и др.)
Результаты воздействия прямых факторов на состав воды	переход в растворимое состояние солей: поступление в атмосферу и образование в ней твёрдых и жидких аэрозолей и газов	поступление химических веществ в различных формах: взвешенные, коллоидные, растворённые (ионы, комплексные соединения, недиссоциированные соединения)	поступление химических веществ в растворённой форме, осаждение в результате физико-химических процессов
Косвенные факторы формирования	климат	климат, рельеф, растительность, водный режим	климат, рельеф, геологические условия, глубина залегания, температура и давление

1	2	3	4
Результат воздействия косвенных факторов на состав воды	обогащение атмосферных осадков химическими веществами в различных концентрациях в зависимости от климатических условий и интенсивности антропогенного воздействия в регионе	дифференциация поступления химических веществ в поверхностные воды в пространстве (географическая, климатическая зональность) и во времени (гидрохимический режим)	изменение химического состава воды по концентрации (минерализация) и соотношению компонентов (относительный состав)

По характеру своего воздействия факторы, определяющие формирование химического состава природных вод, можно разделить на группы:

- физико-географические (рельеф, климат, выветривание, ледный покров);
- геологические (состав горных пород, тектоническое строение, гидрогеологические условия);
- физико-химические (химические свойства элементов, кислотно-щелочные и окислительно-восстановительные условия, смешение вод и катионный обмен);
- биологические (деятельность растений и живых организмов);
- антропогенные (все факторы, связанные с деятельностью человека).

#### *Химический состав вод по источникам.*

В океанической воде обнаружены практически все элементы, но содержание их весьма различно. В океане резко преобладают хлор и натрий. В Мировом океане концентрация растворённых веществ в среднем в 175 раз превышает таковую в реках и озерах. В речных и озёрных водах преобладают гидрокарбонаты кальция и магния в этом главное отличие морской воды от речной. Состав речной и озёрной воды зависит главным образом от типа почвы и горных пород, через которые она проходит, а также от типа источника питания в виде поверхностного стока или грунтовых вод: обычно в грунтовой воде содержание растворённых веществ больше, чем в водах поверхностного стока (Михайлов, Добровольский, 1991; Тарасова и др., 2007).



Средний ионный состав океанской и пресной воды дан в таблице 7, состав озёрных и речных вод – в таблицах 8 и 9.

Таблица 7

Средний ионный состав морской и пресной воды, %

Растворенные вещества	Океан	Пресные воды
$\text{CO}_3^{2-}$	0,41	35,15
$\text{SO}_4^{2-}$	7,68	12,14
$\text{Cl}^-$	55,04	5,68
$\text{NO}_3^-$	–	0,90
$\text{Ca}^{2+}$	1,15	20,39
$\text{Mg}^{2+}$	3,69	3,41
$\text{Na}^+$	30,62	5,79
$\text{K}^+$	1,10	2,12
$(\text{Fe}, \text{Al})_2\text{O}_3$	–	2,75
$\text{SiO}_2$	–	11,67
$\text{Sr}^{2+}, \text{H}_3\text{BO}_3, \text{Br}^-$	0,31	–

Таблица 8

Средний состав озерных вод, %

Главные компоненты (концентрации $> 1 \text{ мг л}^{-1}$ )		Микрокомпоненты (концентрации $< 1 \text{ мг л}^{-1}$ )		Следовые вещества (мкг л <sup>-1</sup> )
$\text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^-$	64	$\text{NO}_3^-$	73	Cu
$\text{Mg}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$	17	$\text{HPO}_4^{2-}$	16	Co
$\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$	16	$\text{HSiO}_3^-$	10	Mo
$\text{K}^+$	3			Mn
$\text{H}^+ + \text{F}^-$	$< 1$			Zn
$\text{Fe}^{2+}$	$< 1$			B
$\text{NH}_4^{2+}$	$< 1$			V

Таблица 9

## Средний состав речных вод (мг/л)

Континент	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Сумма
Северная Америка	21,0	5,0	9,0	1,4	68,0	20,0	8,0	1,0	0,16	9,0	142
Южная Америка	7,2	1,5	4,0	2,0	31,0	4,8	4,9	0,7	1,4	11,9	69
Европа	31,1	5,6	5,4	1,7	95,0	24,0	6,9	3,7	0,8	7,5	182
Азия	18,4	5,6	5,5	3,8	79,0	8,4	8,7	0,7	0,01	11,7	142
Африка	12,5	3,8	11,0	0,0	43,0	13,5	12,1	0,8	1,3	23,2	121
Австралия	3,9	2,7	2,9	1,4	31,6	2,6	10,0	0,05	0,3	3,9	59
Весь мир	15,0	4,1	6,3	2,3	58,4	11,2	7,8	1,0	0,67	13,1	120

*Минерализация воды*

В гидрохимии под минерализацией воды понимают сумму всех найденных при анализе минеральных веществ. В океанологии вместо минерализации употребляется термин солёность.

Минерализация является важным критерием для определения пригодности воды для питья. Оптимальной считается вода с содержанием сухого остатка 300–500 мг/л. Физиологически полноценной признана питьевая вода с содержанием сухого остатка от 100 до 1000 мг/л.

Общая минерализация – суммарное содержание растворённых минеральных веществ в воде, определяется как сумма сухих солей (сухой остаток) после выпаривания и выражается в мг/л, г/л, г/кг, мг/дм<sup>3</sup> (1 дм<sup>3</sup> = 1 литру, л), или в тысячных долях – промилле (S‰).

Согласно стандарту, для питьевой воды она не должна быть более 1 г/л (СанПиН 2.1.4.1074-01). Однако не во всех случаях удаётся обеспечить население водой такой невысокой минерализации. В некоторых районах пьют воду более минерализованную без какого-либо вреда для здоровья.

В зависимости от степени минерализованности выделяют следующие категории природных вод (табл. 10).

## Классификация вод по минерализации

Категория вод	Минерализация, г/дм <sup>3</sup>
Ультрапресные	<0,2
Пресные	0,2–0,5
Воды с относительно повышенной минерализацией	0,5–1,0
Солоноватые	1,0–3,0
Соленые	3–10
Воды повышенной солености	10–35
Рассолы	>35

Минеральные воды – это воды, добытые или вынесенные на поверхность из земных недр и содержащие солей более 1 г/л.

К минеральным водам относятся питьевые, промышленные и термальные воды. На рисунке 16 приведена классификация минеральных вод.

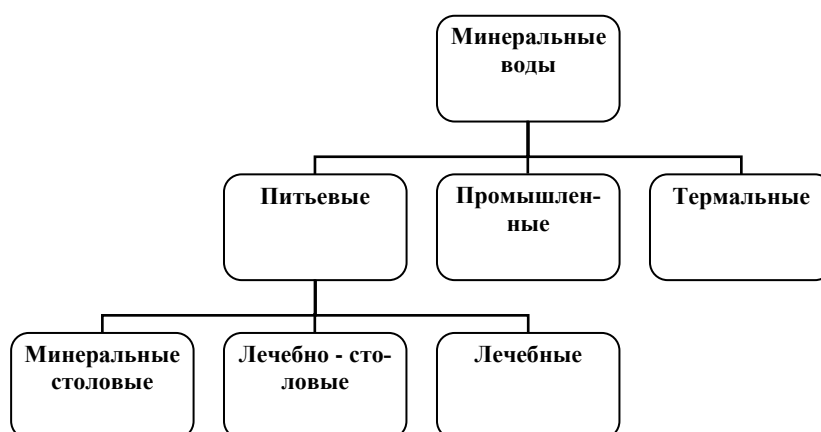


Рис. 16. Классификация минеральных вод

Согласно ГОСТ 13273-88 питьевые воды подразделяет на группы от I до XXXI. К питьевой (пресной, столовой) воде относятся воды с минерализацией менее 1 г/л.

Питьевые минеральные воды в зависимости от степени минерализации и интенсивности воздействия на организм разделяют на:

- минеральные столовые с минерализацией 1–2 г/л;
- лечебно-столовые с минерализацией 2–8 г/л (исключением являются Ессентуки № 4 с минерализацией 8–10 г/л);
- лечебные воды с минерализацией 8–12 г/л, редко выше.

Минеральные столовые воды безопасны для употребления, и могут широко использоваться в быту.

Лечебно-столовые воды, наиболее широко распространенный тип минеральной воды. Лечебные свойства таких вод проявляются только при их правильном использовании. Самолечение с помощью такой воды может привести к значительному нарушению солевого баланса в вашем организме, а также к резкому обострению имеющихся хронических заболеваний.

В России лечебными минеральными водами называются природные воды, которые содержат в повышенных концентрациях те или другие минеральные (реже органические) компоненты и газы и (или) обладают какими-нибудь физическими свойствами (радиоактивность, реакция среды и др.), благодаря чему эти воды оказывают на организм человека лечебное действие в той или иной степени, которое отличается от действия «пресной» воды. Применение лечебных минеральных вод без согласования с врачом может представлять опасность для здоровья.

Минерализация подземных вод изменяется с глубиной, чем глубже расположен водоносный горизонт, тем минерализация воды выше. С глубиной закономерно меняется и солевой состав подземных вод от гидрокарбонатно-кальциевого (преобладание ионов  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ), до хлоридно-натриевого и сульфатно-натриевого. Например, на территории Кировской области воды древних каменноугольных и девонских отложений на глубинах 80–160 метров представлены рассолами с минерализацией до 300 г/л.

*Жёсткость воды* – является одной из важных характеристик природных вод, во многом определяющих возможности их использования человеком.

Жёсткость – свойство воды, обусловленное содержанием в ней ионов кальция и магния.

Различают разные виды жёсткости воды:

– общая жёсткость – равна сумме концентраций находящихся в воде катионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ ;

– карбонатная жёсткость – обусловлена присутствием в воде гидрокарбонатов кальция и магния;

– некарбонатная жёсткость – определяется как разность значений общей и карбонатной жёсткости и обусловлена наличием в воде солей сильных кислот кальция и магния (хлоридов, сульфатов, нитратов и т. д.);

– устранимая жёсткость – представляет собой часть карбонатной жёсткости, которая удаляется при кипячении воды;

– неустраиваемая жёсткость – определяется как разность значений общей и устранимой жёсткости.

По величине общей жёсткости природные воды принято делить на ряд групп (табл. 11).

*Таблица 11*

Классификация природных вод по величине жёсткости

Жёсткость, моль/м <sup>3</sup>	Группа воды
< 1,5	Очень мягкая
1,3–3,0	Мягкая
3,0–5,4	Средней жесткости
5,4–10,7	Жесткая
> 10,7	Очень жесткая

Применение жёстких вод оказывается весьма неэкономичным в целом ряде производств и процессов. Будучи слабым проводником тепла, накипь сильно снижает теплопроводность котла и вызывает непроизводительный расход топлива. Слой накипи даже в 1 мм вызывает перерасход топлива до 5 %.

Жёсткость воды, согласно введённому в настоящее время стандарту, выражается в миллимолях количества вещества эквивалента  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ , содержащихся в 1 л воды. Один ммоль/л жёсткости соответствует 20,04 мг  $\text{Ca}^{2+}$ /л или 12,16 мг  $\text{Mg}^{2+}$ /л. Если в воде содержатся соли кальция и магния, то жёсткость выражается суммой ммоль количества вещества эквивалентов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  в 1 л воды.

В Кировской области превышения гигиенических нормативов по общей жёсткости воды подземных источников водоснабжения отмечен

в Верхошижемском, Вятскополянском, Санчурском, Слободском, Советском и Уржумском районах.

### 3.3 Водные ресурсы

#### Мировые запасы воды

Общий объем (единовременный запас) водных ресурсов планеты Земля составляет около 1,4 млрд км<sup>3</sup>. Однако 98 % (1,38 млрд км<sup>3</sup>) – этого объема составляют солёные воды Мирового океана, и только 35 млн км<sup>3</sup> – 2,5 % составляют пресные воды, из них технически доступны для использования – всего 0,3 % (табл. 12).

Таблица 12

Мировые запасы воды

Вид природных вод	Объем, км <sup>3</sup>	%, мировых запасов воды	%, мировых запасов пресных вод
Мировой океан	1 338 000 000	96,5	—
Подземные воды	23 400 000	1,7	—
Пресные подземные воды	10 530 000	0,76	30,1
Почвенная влага	165 000	0,001	0,05
Ледники и постоянный снежный покров	24 064 100	1,74	68,7
Воды в пресных озерах	91 000	0,007	0,26
Воды в солёных озерах	85 400	0,006	—
Воды в руслах рек	2 120	0,0002	0,006
Биологическая вода	1 120	0,0001	0,003
Вода в атмосфере	12 900	0,001	0,04
Общие запасы воды	1 385 984 610	100	—
Запасы пресной воды	35 029 210	2,53	100

#### Ресурсы гидросферы

Водные ресурсы – пригодные для использования в национальной экономике запасы вод суши, Мирового океана, подземных вод, запасы

почвенной влаги, льдов, снежного покрова, и их энергия механическая и тепловая.

Водные ресурсы – поверхностные и подземные воды, которые находятся в водных объектах и используются или могут быть использованы.

Водные ресурсы характеризуются вековыми запасами и возобновляемыми ресурсами.

К *вековым естественным запасам* ( $\text{м}^3$ ,  $\text{км}^3$ ) пресных вод суши относят воды, единовременно находящиеся в озерах, реках, ледниках, а также в водоносных слоях горных пород (подземные воды).

К *возобновляемым водным ресурсам* ( $\text{м}^3/\text{с}$ ,  $\text{м}^3/\text{год}$ ,  $\text{км}^3/\text{год}$ ) относят те воды, которые ежегодно возобновляются в процессе круговорота воды на Земле, водообмена между сушей и океаном. Испаряющаяся под действием солнечной энергии с поверхности Мирового океана вода поступает в атмосферу и возвращается в виде атмосферных осадков. Часть испарившейся воды воздушными течениями переносится на сушу и, выпадая в виде осадков, является основным источником формирования вод суши – рек, озер, подземных вод, ледников. Часть атмосферных осадков вновь возвращается в океан через реки. Океан служит гигантским естественным испарителем и поставщиком пресной воды на сушу. Принимая речной сток, океан возобновляется количественно и восстанавливается качественно.

По *объёму, происхождению и местонахождению* водные ресурсы принято разделять на местные, региональные и глобальные, а по *принадлежности* – на национальные, межгосударственные и всеобщие.

Источниками водных ресурсов являются водные объекты

В данном пособии более подробно будут рассмотрены водные ресурсы, встречающиеся в Кировской области.

### **Поверхностные воды**

Поверхностные воды – воды, постоянно или временно находящиеся в поверхностных водных объектах.

Поверхностные воды постоянно или временно находятся

в поверхностных водных объектах. Объектами поверхностных вод являются: моря, озёра, реки, болота и другие водотоки и водоёмы.

Поверхностные воды (реки, озера, водохранилища) занимают 12,4% территории России. При этом они распространены неравномерно: на освоенные районы европейской части страны, где сосредоточено более 70% населения и производственного потенциала, приходится не более 10% водных ресурсов. В маловодные годы дефицит воды наблюдается в районах интенсивной хозяйственной деятельности в бассейнах рек Дона, Урала, Кубани, Иртыша, а также на западном побережье Каспийского моря.

### *Водоёмы*

Водоём – постоянное или временное скопление стоячей или со сниженным стоком воды в естественных или искусственных впадинах (озера, водохранилища, пруды и т. д.).

Озеро – компонент гидросферы, представляющий собой естественно возникший водоём, заполненный в пределах озёрной чаши (озёрного ложа) водой и не имеющий непосредственного соединения с морем (океаном).

### **Классификация озёр**

#### 1. По происхождению:

- тектонические: образуются путём заполнения трещин в земной коре (оз. Байкал);
- ледниковые: образуются тающим ледником (Арберзее);
- речные, или старицы;
- приморские: лагуны и лиманы (Венецианская, расположенная в северной части Адриатического моря);
- провальные: карстовые, термокарстовые (оз. Чваниха, Кировская область);
- завально-запрудные: образуются при обрушении части горы (оз. Рица в Абхазии);
- горные: расположены в горных котловинах;



- кратерные: расположены в кратерах потухших вулканов и трубок взрыва (в Европе подобные озера находятся в области Айфель (Германия));

- искусственные (водохранилища, пруды). Создание таких озер может быть самоцелью, например, для создания водохранилищ различного назначения. Нередко это создание связано с проведением более или менее значительных земляных работ. Но в ряде случаев такие озера возникают как побочное следствие таких работ, например в выработанных карьерах.

## 2. По положению (применительно к планете Земля):

- на наземные (их воды принимают активное участие в кругообороте воды в природе);

- подземные (их воды если и принимают участие в кругообороте, то лишь косвенно).

## 3. По водному балансу:

- сточные (имеют сток, преимущественно в виде реки);
- бессточные (не имеют поверхностного стока или подземного отвода воды в соседние водосборы; расход воды происходит за счёт испарения).

По типу минерализации:

- пресные;
- ультрапресные;
- минеральные (солёные);
- солоноватые;
- солёные;

## 4. По химическому составу воды:

- карбонатные (содовые);
- сульфатные (горько-солёные);
- хлоридные (солёные).

В России свыше двух млн озёр. Больше всего озёр в Карелии, в Вилуйской котловине и на Западно-Сибирской равнине. Самые крупные озёра – Байкал, Ладожское, Онежское, Таймыр, Чудское. Байкал – самое глубокое озеро в мире (максимальная глубина – 1637 м).

Озеро Байкал – самое глубокое, самое большое и самое чистое озеро мира. Вода удивительно прозрачна. Это объясняется тем, что вода слабо минерализована и близка к дистиллированной в результате деятельности обитающих в ней живых существ. Кроме того, вода сильно насыщена кислородом. Озеро Байкал расположено в центре Азиатского материка. Объем водной массы –  $23000 \text{ км}^3$  (1/5 мировых запасов). Возраст: около 25 млн лет. Длина озера – 636 км. Ширина: максимальная 81 км, минимальная 27 км. Длина береговой линии – около 2000 км. Глубина: максимальная 1637 м, средняя 730 м. Площадь –  $31500 \text{ км}^2$  (8-е место в мире). Высота над уровнем моря – 456 м. Количество островов – 30. В Байкал впадает 336 постоянных рек и ручьёв, а вытекает лишь одна Ангара. Самый крупный приток – р. Селенга. Площадь водосборного бассейна –  $588000 \text{ км}^2$ . Самые большие заливы: Баргузинский ( $725 \text{ км}^2$ ), Чивыркуйский ( $270 \text{ км}^2$ ), Провал ( $197 \text{ км}^2$ ). Температура воды в открытом озере летом: наивысшая  $16^\circ\text{C}$ , самая низкая  $4,2^\circ\text{C}$ . Температура воды на мелководье у побережья: наивысшая в августе  $23^\circ\text{C}$ , самая низкая  $18^\circ\text{C}$ . Самая тёплая вода в заливах: Мухор (Малое море), Чивыркуйский залив, Посольский сор. Период пассажирской навигации: с июня по сентябрь. В озере Байкал обитает 1550 видов и разновидностей животных и 1085 видов растительных организмов. На Байкале часто происходят землетрясения. Их количество доходит до двух тысяч раз в год. Большинство из них отмечают только сейсмографы, более сильные толчки в 5–6 баллов случаются раз в 10–12 лет, сила же толчков в 7–9 баллов наблюдается один раз в 20–23 года. Самые существенные землетрясения за последние 200 лет приходятся на 1862 (силы толчков доходили до 10 баллов) и 1959 годы.

#### *Озера Кировской области*

На водосборе р. Вятки насчитывается 4137 озер, в бассейне р. Лузы – 242 озера.

Самыми многочисленными в Кировской области являются озера-старицы: оз. Казанское (Вятскополянский р.-н.), оз. Усталец (Лузский р.-н.),

оз. Осиновое (Кирово-Чепецкий р.-н.). Физико-географические условия области и ее геологическое строение определяют, кроме старичных озер, наличие карстовых, термокарстовых, метеоритных и суффозионных озер.

К озерам карстового происхождения относятся: Орловское (Кирово-Чепецкий р.-н.), Быковщинское (Советский р.-н.), Шайтан (Уржумский р.-н.). К термокарстовым можно отнести оз. Кротовское и Итанское в Свечинском р.-не. К озерам метеоритного происхождения предположительно относятся оз. Падун, находящееся в Верхнекамском районе.

Водохранилище – искусственный водоем объемом свыше млн м<sup>3</sup>, образованный, как правило, в долине реки водоподпорными сооружениями для накопления и хранения воды в целях ее использования в народном хозяйстве.

Водохранилища делятся на 2 типа: Озёрные и речные.

Для водохранилищ озёрного типа (например, Рыбинского) характерно формирование водных масс, существенно отличающихся по своим физическим свойствам от свойств вод притоков. Течения в этих водохранилищах связаны больше всего с ветрами.

Водохранилища речного (руслового) типа (например, Дубоссарское) имеют вытянутую форму, течения в них, обычно, стоковые; водная масса по своим характеристикам близка к речным водам.

Основными параметрами водохранилища являются объем, площадь зеркала и амплитуда колебания уровней воды в условиях его эксплуатации.

Создание водохранилищ существенно изменяет ландшафт речных долин, а регулирование ими стока преобразует естественный гидрологический режим реки в пределах подпора. Изменения гидрологического режима, вызываемые созданием водохранилищ, происходят также и в нижнем бьефе гидроузлов, иногда на протяжении десятков и даже сотен километров. Особое значение имеет уменьшение половодий, в результате чего ухудшаются условия нереста рыб и произрастания трав на пойменных лугах. Уменьшение скорости течения вызывает выпадение наносов и заиле-

ние водохранилищ; изменяется температурный и ледовый режим, в нижнем бьефе образуется не замерзающая всю зиму полынья.

На водохранилищах высота ветровых волн больше, чем на реках (до 3 м и более). Гидробиологический режим водохранилищ существенно отличается от режима рек: биомасса в водохранилище образуется интенсивнее, меняется видовой состав флоры и фауны.

Вся история человечества связана с созданием искусственных водоемов, первые водохранилища были ещё в Древнем Египте.

Сейчас в мире насчитывается более 30 тыс. водохранилищ с суммарным полным объёмом около 6 тыс. км<sup>3</sup>. При этом полезный объем оценивается почти в 3,5 тыс. км<sup>3</sup>, что близко к 10 % среднегодового стока всех рек мира. Общая площадь зеркала водохранилищ мира составляет 600–620 тыс. км<sup>2</sup>, а без учёта подпруженных озер (в числе которых Байкал) – 360–380 тыс. км<sup>2</sup>.

Если исключить водную поверхность рек и пойменных озер, существовавших до создания гидроузлов, то получается, что водохранилищами затоплено на Земле 330–350 тыс. км<sup>2</sup>, или 0,2 % территории суши.

По объёму и по площади зеркала самое крупное водохранилище мира – Виктория на р. Виктория-Нил в Африке. Самое глубокое водохранилище – Байкальское (до 1620 м) Иркутской ГЭС. Глубина других намного меньше. Наиболее глубокие водохранилища (200–300 м) образованы высокими плотинами в горных ущельях, в том числе плотиной Нурекской ГЭС (на высоте 300 м).

В России около 1200 водохранилищ. Их суммарный объем свыше 900 км<sup>3</sup>, а полезный около 450 км<sup>3</sup>. Площадь их водного зеркала превышает 100 тыс км<sup>2</sup>, в т. ч. без учёта подпруженных озер – 60 тыс км<sup>2</sup>. Самое крупное по объёму водохранилище России – Братское водохранилище на р. Ангаре.

## **Водохранилища в Кировской области**

Природные особенности Вятской земли, обилие ручьёв и речек с густой сетью логов, оврагов, балок были благоприятны для создания небольших искусственных водоёмов. Крупнейшими водохранилищами в области являются: Белохолуницкое – полным проектным объемом 51,0 млн м<sup>3</sup>; Омутнинское – 32,5; Большое Кирсинское – 18,0; Чернохолуницкое – 12,0 (2010 г.), 8,52 млн м<sup>3</sup> (2011); Созимское – 11,3.

Пруд – искусственный водоем объемом до 1 млн м<sup>3</sup> для хранения воды с целью водоснабжения, орошения, разведения рыбы (прудовое рыбное хозяйство) и водоплавающей птицы, а также для санитарных и спортивных потребностей.

Болота относятся к водоёмам, в которых содержится воды в связанном состоянии до 90–92%.

Болото – это сложная, развивающаяся, на высших стадиях саморегулирующаяся экосистема, характеризующаяся постоянным или периодическим избыточным увлажнением, влаголюбивой растительностью и комплексом специфических болотных почв, где при избытке влаги в анаэробных (бескислородных) условиях происходит накопление органического вещества, торфообразование, оглеение. При этом степень образования органического вещества растениями во много раз превышает степень их разложения, что отличает болотные экосистемы от всех остальных экосистем.

Велика биосферная роль болот, они очень важны для сохранения природного равновесия. Они являются естественным хранилищем чистой пресной воды, поддерживают полноводность рек и высокий уровень грунтовых вод, предотвращая обсыхание земной поверхности.

Болота могут остановить пожары, часто возникающие во время засухи. Кроме того, болотная растительность поглощает из воздуха углекислый газ и вырабатывают кислород в несколько раз активнее, чем это делают леса или луга, являясь при этом местом обитания и источником жизни для огромного количества животных и птиц.

Кроме того, болота служат и гигантскими фильтрами очистки загрязненных грунтовых и атмосферных вод. Благодаря огромной испаряющей способности в естественном состоянии и крайне низким альбедо (величина, характеризующая отражательную способность поверхности) в осушенном и освоенном состоянии болота в значительной степени влияют на климатический режим как отдельных территорий, так и биосферы в целом. По мнению некоторых учёных особенно велика роль болот в регулировании газового режима атмосферы, поскольку до одной трети всей углекислоты на планете законсервировано в торфах.

К середине XX века многие водно-болотные угодья пострадали от вмешательства человека, что не замедлило сказаться на экологическом состоянии планеты. В связи с этим в 1971 г. в городе Рамсар (Иран) была подписана международная Конвенция о водно-болотных угодьях, призванная сохранять и защищать заболоченные территории (Рамсарская конвенция).

Россия, на территории которой находятся 35 отвечающих условиям подписанного документа водно-болотных угодий, является участницей Рамсарской конвенции. Торфяные болота – важнейшая для России категория водно-болотных угодий: вместе с заболоченными и торфяными землями они занимают более 1/5 территории страны.

### **Типы болот**

1. Низинные болота обычно имеют небольшие размеры и встречаются на территории области более или менее равномерно – в депрессиях и понижениях водоразделов, на террасах и в поймах рек. В зависимости от характера растительности среди них выделяют болота травяные, моховые и лесные.

2. Гипновые болота характеризуются преобладающим развитием в наземном покрове гипновых мхов, чаще вместе с осоками и кустарниками – ивами, ольхой серой и др.

3. Лесные низинные болота обычно представлены еловыми, сосновыми, сосново-еловыми и березово-сосновыми болотами. Из кустарников на

них обычны ива, ольха, рябина, крушина, черёмуха, смородина чёрная, калина обыкновенная. Все типы низинных болот имеют, как правило, ровный или слегка вогнутый рельеф. Слой торфа колеблется от 2 до 3–4 м. Вместе с переходными низинные болота составляют более 70% всего болотного фонда области.

4. Переходные болота имеют ряд признаков болот низинных и верховых. На них ещё растут некоторые травы, характерные для низинных болот, но полностью исчезают тростники, хвощи, рогоз, стрелолист, калужница. Переходные болота чаще всего образуются на месте низинных, являясь как бы второй фазой из развития. Однако переходное болото может развиваться и на суше.

5. Верховые болота формируются из переходных, сменяющих низинные, либо возникают при заболачивании суши. Вторым путём для них более характерен. Основным торфообразователем здесь – мхи-сфагнумы.

В Кировской области встречаются все типы болот: верховые, низинные, переходные, смешанные. Тип болота определяется по совокупности основных характеристик: режима водного питания, состава растительности, строения торфяной залежи и др. Преобладают низинные болота, что обусловлено характером коренных пород, среди которых встречаются богатые известью. Торфяников чисто переходного типа, полностью состоящих из переходного торфа, в области очень мало. Крупные торфяные массивы большей частью состоят из участков всех типов: верхового, переходного, низинного.

### **Водотоки**

Водоток – водный объект, характеризующийся постоянным или временным движением воды в русле в направлении общего уклона (река, ручей и т. д.).

Река – природный водный поток, текущий в выработанном им углублении – постоянном естественном русле и питающийся за счёт поверхностного и подземного стока с его бассейна. Реки, непосред-

ственно впадающие в океаны, моря, озера или теряющиеся в песках и болотах, называются главными; впадающие в главные реки – притоками. Главная река со всеми ее притоками образует речную систему, характеризующуюся густотой.

Поверхность суши, с которой речная система собирает свои воды, называется водосбором, или водосборной площадью. Водосборная площадь вместе с верхними слоями земной коры, включающая в себя данную речную систему и отделённая от других речных систем водоразделами, называется речным бассейном.

Возобновляемые водные ресурсы оцениваются *объёмом годового стока* рек. Благодаря круговороту ежегодно реки сбрасывают в Мировой океан около 40–41 тыс. км<sup>3</sup>. Скорость возобновления и определяет доступность человечеству водных ресурсов. Воды рек обновляются примерно за 10–12 суток. Ежегодный объём стока Российских рек составляет в среднем 4 262 км<sup>3</sup>. По объёму речного стока Россия занимает второе место в мире после Бразилии (10 тыс. км<sup>3</sup>). К сожалению, большая часть речного стока в России, приходится на малопродуктивные и малозаселённые северные территории.

*Речной сток* является суммарным *поверхностным и подземным* стоком. Вода стекает по поверхности земли обычно не сплошным слоем, а в виде отдельных тонких струй или ручейков, которые сливаются вместе, доходят до русел сначала временных водотоков, а потом образуют постоянные потоки, несущие свои воды в сформировавшемся русле. Сток, происходящий по поверхности земли, называется *поверхностным* или *склоновым* стоком. Сток, происходящий по русловой сети водосбора, называется *русловым* или *речным* стоком.

Поверхностный сток рек подвержен резким сезонным колебаниям, снижающим возможности его хозяйственного освоения. В районах с сезонным характером атмосферного увлажнения отношение расходов воды в руслах рек в сухой и влажный периоды года могут достигать 1:100 и даже



1:1000. В таких районах при освоении поверхностного стока необходимо сооружать водохранилища сезонного или даже многолетнего регулирования.

### **Классификация рек**

1. В зависимости от рельефа местности, в пределах которой текут реки, они разделяются на:

– горные как правило, отличаются большими уклонами, бурным течением, текут в узких долинах; преобладают процессы размыва.

– равнинные, для них характерно наличие извилин русла, или меандр, образующихся в результате русловых процессов.

На многих реках перемежаются участки горного и равнинного характера.

2. По величине:

– большие реки – преимущественно равнинные; имеют бассейн площадью более 50 тыс. км<sup>2</sup>;

– средние реки имеют бассейн, располагающийся в одной гидрографической зоне; их площадь от 2 тыс. до 50 тыс. км<sup>2</sup>;

– малые реки имеют бассейн в одной гидрографической зоне; их площадь не более 2 тыс. км<sup>2</sup>.

### **Реки России**

На территории России существует порядка 2,5 млн рек. Большее количество этих рек – относительно не большие и их длина обычно не более 100 км.

Водные ресурсы бассейнов крупнейших рек России (годовой сток рек) представлены в таблице 13.

*Таблица 13*

**Ресурсы речного стока по речным бассейнам Российских рек**

Речной бассейн	Площадь бассейна, тыс. км <sup>2</sup>	Среднее многолетнее значение водных ресурсов, км <sup>3</sup> /год	Водные ресурсы 2010 г., км <sup>3</sup> /год	Отклонение от среднего многолетнего значения, %
1	2	3	4	5
Северная Двина	357	101,0	97,4	–3,6

1	2	3	4	5
Волга	1360	238,0	234,0	–1,7
Дон	422	25,5	18,3	–28,2
Кубань	57,9	13,9	13,8	–0,7
Терек	43,2	10,5	12,0	14,3
Обь	2990	405,0	366,0	–9,6
Енисей	2580	635,0	683,0	7,6
Лена	2490	537,0	549,0	2,2
Колыма	647	131,0	152,0	16,0
Амур	1855	378,0	432,0	14,3

Большинство рек на территории России относится к бассейну Северного Ледовитого океана, занимающему более 50 % территории страны. Среди рек северного бассейна Лена – самая длинная река России (4400 км); Енисей – самая полноводная (среднемноголетний объем годового стока 635 км<sup>3</sup>); Обь – самая крупная по площади водосбора (2990 тыс. км<sup>2</sup>). Основная река бассейна Тихого океана – Амур с притоками Зея, Бурея и Уссури. На бессточный бассейн Каспийского моря приходится около 25 % территории страны. Самая длинная (3530 км) и многоводная река этого бассейна – Волга, которая является также крупнейшей рекой Европы. Среди рек бассейна Атлантического океана наиболее значительны Западная Двина, Нева, Днепр, Дон, Кубань. Самая полноводная из них Нева, питающаяся водами Ладожского озера (объем годового стока – 75 км<sup>3</sup>).

**Ручей** – небольшой водоток, обычно шириной от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров. Обычно длина ручья не превышает несколько километров, а глубина редко превышает 1,5 м. Скорость ручьев, как правило, достаточно велика (несколько метров в секунду). Ручьи образуются от стока дождевых, талых вод или при выходе на поверхность подземных вод. Ручьи чаще всего впадают в реки или озера. В картографии термин «ручей» применяется к естественным водотокам длиной до 10 км (постоянным, либо временным).

## **Подземные воды**

Подземные воды – воды, находящиеся в толще горных пород верхней части земной коры в жидком, твёрдом и газообразном состоянии.

Подземные воды рассматриваются как полезное ископаемое. В отличие от других видов полезных ископаемых, запасы подземных вод возобновимы в процессе эксплуатации.

По расчётам в верхней пятикилометровой толще земной коры на континентах содержится  $84,4 \cdot 10^6$  км<sup>3</sup> воды. Из них  $60 \cdot 10^6$  км<sup>3</sup> составляет свободная (гравитационная) вода, способная передвигаться под влиянием силы тяжести.

## **Образование подземных вод**

При просачивании (инфильтрации) в грунт дождевой и талой вод, а также при фильтрации из поверхностных водоёмов образуются инфильтрационные подземные воды. Именно они формируют зону пресных вод и их месторождения используются в водоснабжении. Залегая на небольшой глубине, они подвержены наибольшему загрязнению.

Подземная вода, образующаяся при конденсации паров воды из воздуха в горных породах, называется конденсационной.

Подземные воды магматического происхождения называются ювенильными (от лат. «ювеналис» – девственный). Ювенильные воды, поступая в земную кору, смешиваются с водами иного происхождения, содержащимися в ней. Косвенным показателем ювенильных вод является повышенное содержание углекислого газа, гелия и водорода в составе подземных вод.

## *Классификация подземных вод*

### **1. По степени минерализации:**

- пресные: до 1 г/л;
- солоноватые: 1–10 г/л;
- солёные: от 10 до 35–50 г/л; и
- рассолы: более 35–50 г/л.

## 2. По температуре:

- переохлаждённые: ниже  $0^{\circ}\text{C}$ ;
- холодные:  $0\text{--}20^{\circ}\text{C}$ ;
- термальные: выше  $20^{\circ}\text{C}$ .

## 3. По условиям залегания:

- почвенные воды;
- верховодка;
- грунтовые;
- межпластовые.

### **Состав пресных подземных вод**

Несмотря на малую минерализацию, до 1,5 г/л, пресные подземные воды представляют собой сложную многокомпонентную систему, включающую целый комплекс неорганических и органических соединений, газов и живого вещества (Посохов, 1966).

Неорганические вещества. В зависимости от концентрации неорганических веществ в подземных водах выделяют макрокомпоненты (десятки и сотни мг/л) и микрокомпоненты (менее 1 мг/л). Макрокомпоненты определяют химический тип воды и, как следствие, ее основные потребительские свойства. В первую очередь, к ним следует отнести  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Cl}^{-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{HCO}_3^{-}$ . Концентрации и возможность накопления в подземных водах макрокомпонентов определяются геолого-гидрогеологическими условиями данного района и во многом зависят от минерального состава водовмещающих пород. К микрокомпонентам можно отнести все другие элементы.

Органические вещества. Пресные подземные воды всегда содержат то или иное количество органического вещества. В естественных условиях их содержание, как правило, уменьшается с глубиной. Состав органических веществ довольно сложен и может быть представлен всеми классами органических соединений. Наиболее распространены высокомолекулярные кис-

лоты (например, гуминовые кислоты и фульвокислоты). Они постоянно присутствуют в грунтовых водах в количестве от одного до нескольких мг/л. В последние годы в подземных водах обнаружен целый ряд аминокислот, являющихся структурными элементами белков. Кроме того, в пресных подземных водах нефтегазоносных провинций, как правило, присутствуют нафтеновые кислоты и различные углеводородные соединения.

Микроорганизмы. Из микроорганизмов наибольшее значение в пресных подземных водах имеют бактерии, также встречаются микроскопические водоросли, простейшие и вирусы. Различают аэробные и анаэробные бактерии. Первым для развития требуется кислород, вторые существуют при его отсутствии, восстанавливая сульфаты, нитраты и другие кислородсодержащие вещества. В пресных подземных водах зоны активного водообмена развиваются гнилостные, сапрофитные, денитрифицирующие и клетчатковые бактерии.

Газы. Основными газами, растворёнными в пресных подземных водах, являются кислород, азот, углекислый газ и сероводород. В незначительных количествах встречаются и все остальные газы. По генетическим признакам выделяют газы воздушного происхождения ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ), биохимические ( $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $N_2$ ) и газы ядерных превращений (He, Rn). Наиболее негативное влияние на потребительские свойства воды оказывает наличие в ней сероводорода.

На формирование химического состава пресных подземных вод, имеющих современные, обычно не слишком удалённые области питания, влияют многие природные факторы, основным из которых является физико-химическое взаимодействие воды с вмещающими породами различного состава и структуры при движении воды от областей питания к участкам разгрузки или погружения водоносного горизонта. Большое влияние также оказывает состав воды, поступающей в водоносный горизонт из различных источников питания: за счёт просачивания атмосферных осадков, разгрузки глубокозалегающих подземных вод, перетекания

из других водоносных горизонтов через слабопроницаемые слои и литологические окна, привлечения речного стока, оросительных вод и др.

Ресурсный потенциал подземных вод на территории Российской Федерации составляет почти  $400 \text{ км}^3/\text{год}$ .

Общее количество запасов подземных вод, пригодных для использования (питьевого и хозяйственно-бытового, производственно-технического водоснабжения, орошения земель и обводнения пастбищ), составляет около  $34 \text{ км}^3$  в год.

Обеспеченность территории Российской Федерации запасами подземных вод, которые могут использоваться для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, также неравномерна.

Выходы подземных вод на дневную поверхность образуют родники.

Родник (источник, ключ) – естественный выход подземных вод на земную поверхность на суше или под водой (подводный источник).

По характеру их выхода из породы различают родники:

- нисходящие – образуются при разгрузке грунтовых или межпластовых слабонапорных вод;
- восходящие – образуются при разгрузке грунтовых или межпластовых напорных вод.

Вода восходящих родников часто имеет повышенную минерализацию, так как путь её, как правило, длиннее, чем у родников, питающихся безнапорными водами и выход их из пород более бурный, чем у последних.

### **Родники Кировской области**

На территории Кировской области восходящие родники чаще всего можно встретить в южной части Вятского вала, где в силу геологического строения условия для их появления лучше, чем за его пределами. Ярким примером может служить район Нижнеивкинского курорта. На территории области имеется и довольно редко встречающийся тип родника – сифонный. Это выход напорных вод, действующий периодически. Для излива

воды такого источника требуются обильные осадки, которые должны заполнить систему подземных пустот и создать определённое давление. Такой родник находится на дне карстового оз. Шайтан в Лебяжском районе.

В настоящее время вода родников в черте г. Кирова по своему качеству не отвечает требованиям питьевого источника.

### **3.4 Загрязнение воды. Способы очистки воды**

В результате водопользования происходит загрязнение поверхностных и подземных вод.

Загрязнение воды – изменения химического и физического состояния или биологических характеристик воды, ограничивающие дальнейшее ее употребление.

Типы загрязнения поверхностных и подземных вод:

- механическое – повышение содержания механических примесей, свойственное в основном поверхностным видам загрязнений;
- химическое – наличие в воде органических и неорганических веществ токсического и нетоксического действия;
- бактериальное и биологическое – наличие в воде разнообразных патогенных микроорганизмов, грибов и мелких водорослей;
- радиоактивное – присутствие радиоактивных веществ в поверхностных или подземных водах;
- тепловое – выпуск в водоёмы подогретых вод тепловых и атомных электростанций.

Большое количество загрязнённых вод поступает со сточными водами.

Сточные воды – воды, использованные на производственные и бытовые нужды и получившие при этом дополнительные примеси (загрязнения), изменившие их первоначальный состав или физические свойства.

Сбрасываемые в природные водоёмы стоки принято подразделять на следующие виды: загрязнённые (в том числе: без очистки и недостаточно очищенные), нормативно чистые (без очистки), и нормативно – очищенные.

В зависимости от происхождения, вида и качественной характеристики примесей сточные воды подразделяют на три основные категории:

- бытовые (хозяйственно-фекальные);
- производственные (промышленные);
- дождевые (атмосферные).

Чёткая классификация промышленных стоков затруднена из-за разнообразия загрязнений в них. Различают две основные группы сточных вод:

1. Сточные воды, содержащие органические вещества. Сточные воды нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов, предприятий органического синтеза и синтетического каучука, коксохимических, газосланцевых и др. Они содержат нефть и нефтепродукты, нафтеновые кислоты, углеводороды, спирты, альдегиды, кетоны, поверхностно-активные вещества, фенолы, смолы, аммиак, меркаптаны, сероводород и др.

2. Сточные воды, содержащие неорганические примеси. Сточные воды содовых, сернокислотных, азотнотуковых заводов, обогатительных фабрик свинцовых, цинковых, никелевых руд, шахт, рудников, катализаторных фабрик, металлургических предприятий, гальванических производств и др. Они содержат кислоты, щелочи, соли, сернистые соединения, ионы тяжёлых металлов, взвешенные минеральные вещества и др.

Количество загрязнённых сточных вод, сбрасываемых в озера, реки и моря, во всем мире достигает 250–300 км<sup>3</sup> в год. Объем сточных вод, сброшенных в поверхностные водные объекты России в 2010 г., 47 км<sup>3</sup>. Свыше 72 % сточных вод, подлежащих очистке (13,8 км<sup>3</sup>), сбрасываются в водные объекты недостаточно очищенными, 17 % (3,4 км<sup>3</sup>) – загрязненными без очистки и только 11 процентов (2 км<sup>3</sup>) – очищенными до установленных нормативов.

Вместе со сточными водами в поверхностные водные объекты Российской Федерации ежегодно поступает около 11 млн т загрязняющих веществ.



Объем сброса загрязненных сточных вод предприятиями жилищно-коммунального хозяйства составляет свыше 60% общего объема сброса загрязненных сточных вод в Российской Федерации. Причинами этого являются значительный износ очистных сооружений, применение устаревших технологий очистки сточных вод, приём объектами жилищно-коммунального хозяйства загрязненных стоков промышленных предприятий.

Основными источниками загрязнения водных объектов являются предприятия, осуществляющие целлюлозно-бумажное, химическое, металлургическое производство, полиграфическую деятельность, производство кокса, нефтепродуктов, добычу металлических руд, а также предприятия угольной промышленности.

Наибольший вред окружающей водной среде наносит выпуск промышленных сточных вод, даже прошедших очистку. В таблице 14 приведены компоненты сточных вод для разных отраслей промышленности.

*Таблица 14*

Загрязнение вод различными отраслями промышленности

Отрасль промышленности	Преобладающий вид загрязняющих компонентов
Нефтегазодобыча, нефтепереработка	Нефтепродукты, СПАВ, фенолы, аммонийные соли, сульфиды
Целлюлозно-бумажный комплекс, лесная промышленность	Сульфаты, органические вещества, лигнины, смолистые и жирные вещества, азот
Машиностроение, металлообработка, металлургия	Тяжёлые металлы, взвешенные вещества, фториды, цианиды, аммонийный азот, нефтепродукты, фенолы, смолы
Химическая промышленность	Фенолы, нефтепродукты, СПАВ, ароматические углеводороды, неорганика
Горнодобывающая, угольная	Флотореагенты, неорганика, фенолы, взвешенные вещества
Легкая, текстильная, пищевая	СПАВ, нефтепродукты, органические красители, другие органические вещества

Высокую степень воздействия на водные объекты оказывает рассредоточенный (диффузный) сток с сельскохозяйственных и селитебных территорий, площадей, занятых отвалами и отходами промышленного производства, а также трансграничные загрязнения.

### **Методы очистки воды**

Выделяют два основных пути очистки сточных вод: разбавление и очистка от загрязнений. Разбавление представляет собой такую меру, которая не ликвидирует воздействия сточных вод, а лишь ослабляет его на локальном участке водоёма. Основной путь – очистка сточных вод от загрязнений.

Очистка сточных вод – это разрушение или удаление из них загрязняющих веществ, обеззараживание и удаление патогенных организмов.

Сооружения для очистки сточных вод располагают таким образом, что вода проходит их последовательно, одно за другим. В сооружениях для механической очистки сначала выделяются наиболее тяжёлые и наиболее крупные взвеси, а затем основные массы нерастворённых загрязнений; в последующих сооружениях для биологической очистки удаляются оставшиеся тонкие суспензии и коллоидальные и растворённые органические загрязнения, после чего производится обеззараживание сточных вод (дезинфекция). Образующийся на всех стадиях очистки осадок или избыточная биомасса поступает на сооружения по обработке осадка. Очищенные сточные воды могут направляться в оборотные системы водоснабжения промышленных предприятий, на сельскохозяйственные нужды или сбрасываться в водоём. Обработанный осадок может утилизироваться, уничтожаться или складироваться.

Методы очистки производственных и бытовых вод можно подразделить на следующие группы: механические, физико-химические, химические, биологические и термические (Инженерная экология, 2002; 2003).

По своей сути эти методы могут быть рекуперационными и деструктивными. Первые предусматривают извлечение из сточных вод ценных

веществ и последующую их переработку, а вторые – разрушение загрязняющих веществ путём их окисления или восстановления, в результате чего образуются газы или осадки.

*Методов механической очистки* достаточно только при промышленном оборотном водоснабжении некоторых производств. В большинстве случаев она лишь подготавливает сточные воды к обработке другими методами. При этом загрязнённые воды осветляются на 30–60%. Механическая очистка применяется для выделения из сточных вод нерастворённых минеральных и органических примесей. Включает стадии процеживания, отстаивания, фильтрования и центрифугирования.

Для очистки сточных вод от крупных механических примесей во избежание засорения труб, каналов и насосов гидросистемы применяют решётки и сита с различными размерами ячеек в зависимости от характера загрязнения. Решётки бывают подвижными и неподвижными; очистку их от крупных частиц проводят с помощью граблей.

Отстойники и песколовки (рис. 3 на цветной вкладке) предназначены для предварительной очистки сточных вод от минеральных и органических твёрдых загрязнений со сравнительно большими размерами частиц (0,2–0,25 мм). Скорость движения воды в отстойнике невелика (0,3 м/с). Недостатками отстойников являются сравнительно низкая эффективность, невысокая скорость удаления частиц, большие размеры: отстойники занимают много места, к тому же на их изготовление идёт значительное количество материалов (металла, бетона).

*Физико-химические методы* очистки используются для удаления из сточных вод тонкодисперсных взвешенных частиц, растворимых газов, минеральных и органических веществ и включают: коагуляцию, флокуляцию, электрокоагуляцию, флотацию, адсорбцию, ионный обмен, экстракцию, электрохимические методы (электродиализ).

Процесс укрупнения мелких частиц (1–100 мкм) с последующим удалением их под действием силы тяжести называют коагуляцией. Если же

удельный вес этих частиц ниже удельного веса воды (эмульгированные частицы масел, жира и т. д.), то процесс называют флокуляцией. По аналогии с отстойником и нефтеловушкой в коагуляторах и флокуляторах удаление вредных примесей происходит соответственно из нижней или верхней части аппарата. При коагуляции в воду добавляют коагулянты (соли алюминия, железа или их смеси), которые образуют хлопья гидроксидов металлов, осаждающие частицы под действием силы тяжести. Флокулянтами служат крахмал, декстрин, эфир, диоксид кремния.

Флотацию применяют для удаления частиц, которые плохо отстаиваются, а также для удаления растворённых веществ, в том числе поверхностно-активных, отходов нефтепереработки, производства искусственного волокна и целлюлозно-бумажного производства и т. д. Флотацию называют пенным концентрированием. Размер удаляемых частиц составляет 0,2–1,5 мм. В качестве пенообразователей в воду добавляют сосновое масло, креозол, фенолы. Они способствуют прилипанию частиц к пузырькам пены, которая затем выводится из аппарата. Флотация имеет высокую степень очистки (95–98%).

Адсорбция – это прилипание частиц, находящихся в очищаемой среде, к твёрдым веществам – сорбентам. В качестве сорбентов применяют активированные угли, синтетические сорбенты, некоторые отходы производства (золу, шлаки, опилки). Процесс происходит в адсорбционных установках при перемешивании адсорбента с водой, при фильтровании ее через слой адсорбента или в кипящем слое. Адсорбцию применяют для глубокой очистки сточных вод от фенолов, пестицидов, ароматических соединений, красителей и т. д. Этот метод имеет ряд преимуществ, в том числе высокую степень очистки (80–95%), возможность улавливания токсичных веществ при невысокой их концентрации, очистки сточных вод, содержащих несколько вредных веществ.

Ионный обмен применяют для очистки сточных вод от металлов и соединений мышьяка, фосфора, цианидов и радиоактивных веществ,

а также для обессоливания и подготовки воды для нужд энергетики. Ионный обмен – процесс взаимодействия раствора с твёрдой фазой, обладающей способностью обменивать ионы, содержащиеся в ней, на другие ионы, присутствующие в растворе. В качестве твёрдой фазы (ионитов) применяют алюмосиликаты, фторapatит, силикогели, гидроксиды алюминия, хрома и т. д. Преимуществами процесса являются возможность рекуперировать ценные вещества из загрязнений, высокая степень очистки, удаление высокотоксичных веществ, в том числе супсрэкотоксикантов. Это метод дорогой, он требует чёткой организации процесса и решения проблемы регенерации ионитов.

Экстракцию применяют при относительно высокой концентрации вредных веществ (фенолов, масел, органических кислот, ионов металлов); концентрация должна составлять не менее 3–4 г/л. При меньшей концентрации экономически выгоднее применять адсорбцию. Процесс экстракции состоит из трёх стадий: интенсивного смешивания сточной воды с экстрагентом (органическим растворителем), разделения чистой воды и загрязнений, регенерации загрязнений. Этот метод применяют тогда, когда стоимость удаляемых веществ (например, ценных металлов) компенсирует затраты на проведение процесса.

Обратный осмос – это процесс фильтрования растворов через полупроницаемые мембраны; происходит на молекулярном уровне и требует значительных затрат, но обеспечивает глубокую очистку от высокотоксичных вредных веществ.

Электрохимические методы включают в себя анодное окисление, катодное восстановление, электрокоагуляцию, электрофлокуляцию и электродиализ. Как видно из названий, эти процессы происходят при пропускании через сточную воду электрического тока. Недостаток методов – большой расход электроэнергии. Электрохимическими методами извлекают цианиды, роданиды, амины, спирты, сульфиды, меркаптаны. Электро-

диализ применяют для опреснения солёных вод с использованием ионизированных веществ.

С помощью *химических методов очистки* наиболее часто удаляют ионы тяжёлых металлов. К основным видам относят нейтрализацию, окисление, озонирование.

Нейтрализацию проводят в сточных водах, содержащих кислоты или щелочи, таким образом, чтобы показатель pH имел значение от 6,5 до 8,5. Нейтрализовать сточные воды можно смешиванием одних вод с другими (кислые – с щелочными), добавлением необходимых реагентов, фильтрованием, прокачкой кислых вод через нейтральные материалы, пропусканием через щелочные воды кислых газов.

Окисление сточных вод проводят хлором, перекисью водорода, кислородом воздуха, диоксидом марганца, озоном.

Восстановление применяют для удаления из сточных вод соединений ртути, хрома, мышьяка, для чего в воду вводят сульфит железа, гидросульфит натрия, гидразин, сероводород или алюминиевую пудру.

Удаление ионов тяжёлых металлов проводят реагентным методом. Ртуть, хром, кадмий, цинк, свинец, медь, никель удаляют с помощью гидроксидов кальция и натрия, карбонатов и сульфидов натрия, феррохромного шлака и т. п.

*Биологические методы очистки сточных вод* основаны на способности некоторых микроорганизмов использовать вредные (чаще всего органические) вещества для своего питания в процессе жизнедеятельности. Контактируя с этими вредными веществами, микробы частично разрушают их, превращая в воду, диоксид углерода, нитрит- и сульфат-ионы и др. Вид используемых микроорганизмов – активный ил либо биопленки. Биохимическая очистка сточных вод может осуществляться в природных условиях (поля орошения, биологические пруды) или в искусственных сооружениях (аэротенках (рис. 4 на цветной вкладке), биофильтрах).

Аэробную (с потреблением микробами кислорода) и анаэробную (без потребления кислорода) очистку осуществляют в метантенках, где происходит сбраживание с выделением спиртов, кислот, ацетона, углекислого газа, водорода, метана.

При использовании биохимических методов очистки сточных вод возникают проблемы сохранения активного ила (он не выдерживает низкой температуры), удаления и рационального использования продуктов процесса (в том числе взрывоопасных метана и водорода), необходимости доочистки твёрдых осадков.

Способ биологической очистки возможен, если содержащиеся в стоках воды органические и минеральные вещества способны окислиться в результате биохимических процессов и если условия среды, т. е. наличие растворённого кислорода, pH, температура, концентрация в воде вредных веществ не превышают предельно допустимые величины, при которых не нарушается жизнедеятельность микроорганизмов. Биологическая очистка интенсивно происходит в интервале pH от 6,5 до 8,2. Температура бытовых сточных вод обычно колеблется в пределах 10–15 °С. Сточные воды содержат определённое количество биогенных элементов (азот, фосфор, калий, железо), которые необходимы для питания бактерий.

Процесс биологической очистки сточных вод происходит в аэротенках. Жидкость в аэротенке очищается активным илом, который представляет собой сложный биоценоз различных организмов.

Активный ил имеет вид хлопьев бурого цвета; при отстаивании жидкости, взятой из аэротенка, он выпадает в осадок. Под микроскопом видно, что хлопья активного ила состоят в основном из бактериальных клеток. На поверхности хлопьев, между ними или, реже, внутри них обычно находятся разнообразные простейшие и даже многоклеточные — нематоды (черви) и коловратки.

По способу питания микробы делятся на гетеротрофов (используют готовые органические вещества) и автотрофов (питаются только одним минеральным продуктом – нитрификаторы и серобактерии).

В биоценозах активного ила практически отсутствуют организмы с автотрофным типом питания, (виды способные фотосинтезом создавать органические вещества). Это объясняется недостатком света в толще активного ила, поэтому водоросли встречаются в виде обрастаний на стенках сооружений на границе активного ила и воздуха, в первичных отстойниках в связи с высокой концентрацией растворённых органических веществ могут существовать немногие виды (вольвоксовые, сине-зеленые водоросли).

Активному илу свойственен гетеротрофный тип питания – поглощение готовых органических веществ.

В очистных сооружениях бактерии играют главную роль в очистке фекальных вод (хозяйственно-бытовых вод) – они расщепляют органические вещества, превращая их в безвредные растворимые неорганические соединения, микроорганизмы – лучшие санитары Земли. Кроме того, переводя их в вещество своего тела, бактерии делают его доступным организмам, неспособным к усвоению растворённых веществ, т. е. бактерии образуют первое пищевое звено на очистных сооружениях. Бактериальная клетка обладает наиболее универсальным набором ферментов (ферменты (энзимы), подобны катализаторам, ускоряют реакцию, но не входят в состав конечных продуктов), способных охватить множество разнообразных реакций, каждый фермент действует на строго определённый субстрат (продукт, вещество).

Бактерии отличаются чрезвычайным лабильным обменом. Они в большей степени, чем другие микро- и макроорганизмы, способны приспособливаться к неблагоприятным окружающим условиям. При поступлении на очистные сооружения сточных вод, содержащих токсичные вещества, единственными обитателями сооружения часто остаются бактерии. Они не только более устойчивы к действию ядовитых веществ, но



и легче других живых организмов адаптируются к использованию новых источников питания.

Общая оценка степени очистки сточных вод по процессам следующая: механические методы – 50–70%, физико-химические – 90–95%, химические – 80–90%, биохимические – 85–95%.

## 4. ХИМИЯ ЛИТОСФЕРЫ

### 4.1 Литосфера. Строение Земли, геосферы, объём, масса

Земля имеет массу  $6 \cdot 10^{21}$  т и состоит из 88 различных химических элементов. Несмотря на все изменения, наблюдаемые в самых разных масштабах времени и пространства, земля в целом остаётся удивительно постоянной. Крупные составные части земного шара, такие, как ядро, мантия, кора, океаны, атмосфера и биосфера должны рассматриваться как сложная, взаимодействующая система. В ней циклично происходит передача вещества от одного резервуара к другому. Об их объёмах можно получить представление из таблицы 15, а о химическом составе можно судить по данным, приведённым в таблице 16.

Таблица 15

Относительные размеры резервуаров Земли

Резервуар Земли	Масса
Мантия	$4 \cdot 10^{21}$ т
Ядро	$1,9 \cdot 10^{21}$ т
Кора	$24 \cdot 10^{18}$ т
Гидросфера	$2,4 \cdot 10^{18}$ т
Атмосфера	$5 \cdot 10^{15}$ т

Таблица 16

10 самых распространенных химических элементов (% по массе)

Вселенная	Земля	Земная кора	Океан	Атмосфера	Биосфера
H – 77	Fe – 35	O – 46,6	O – 85,8	N – 75,5	O – 53
He – 21	O – 29	Si – 29,5	H – 11	O – 23,2	C – 39
O – 0,8	Si – 14	Al – 8,2	Cl – 1,94	Ar – 1,3	H – 6,6
C – 0,3	Mg – 14	Fe – 5,0	Na – 1,05	C – $9,3 \cdot 10^{-3}$	N – 0,5
Ne – 0,2	S – 2,9	Ca – 3,6	Mg – 0,13	Ne – $1,3 \cdot 10^{-3}$	Ca – 0,4
Fe – 0,1	Ni – 2,4	Na – 2,8	S – 0,09	Kr – $0,45 \cdot 10^{-3}$	K – 0,2
Si – 0,07	Ca – 2,1	K – 2,6	Ca – 0,041	He – $72 \cdot 10^{-6}$	Si – 0,1
N – 0,06	Al – 1,8	Mg – 2,1	K – 0,039	Xe – $40 \cdot 10^{-6}$	P – 0,1
Mg – 0,06	Na – 0,3	Ti – 0,57	Br – 0,007	H – $23 \cdot 10^{-6}$	Mg – 0,1
S – 0,04	P – 0,2	H – 0,22	C – 0,003	S – $70 \cdot 10^{-9}$	S – 0,07

В. М. Гольдшмидт разделил элементы на 4 группы:

1. *Сидерофилы* – восстанавливаются железом;
2. *Литофилы* – не восстанавливаются железом и склонны к образованию окислов;
3. *Халькофилы* – элементы не восстанавливающиеся железом и образуют сульфиды;
4. *Атмофилы* – элементы, улетучившиеся в атмосферу.

Элементы, занимающие минимумы на кривой атомных объемов, дают сплавы с железом, в ходе дифференциации они образовали земное ядро (сидерофильные элементы). Ионы сидерофилов (11 элементов) имеют оболочку из 8–18 электронов. Редокс потенциал их равен или выше, чем у железа. Fe, Co, Ni, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, Mo, W, Re, Au, Ge, Sn составляют большую часть полиметаллических руд. Они тесно перемежаются с элементами, обнаруживая повышенное сродство к сере, мышьяку, а также фосфору, углероду и азоту.

Элементы, занимающие максимумы на кривой и расположенные на ее нисходящих частях, обладают сродством к кислороду (54 элемента), они образовали земную кору и верхнюю мантию (литофильные элементы). Образуют ионы с 8-электронной оболочкой. Li, Na, K, Rb, Cs, Be, Mg, Ca, Sr, Ba, V, Al, Sc, Y, Редкоземельные элементы, Si, Ti, Zr, Hf, Th, P, V, Nb, Ta, Cr, U, F, Cl, Br, I, Mn входят в состав силикатных, алюмосиликатных горных пород, образуют сульфатные, карбонатные, фосфатные, боратные и галогенидные минералы.

Элементы, занимающие восходящие части кривой, обладают сродством к сере, селену, теллуру (19 элементов), они сосредоточились в нижней мантии (халькофильные элементы). Имеют оболочку из 18 электронов. Cu, Ag, Zn, Cd, Hg, Ga, In, Tl, Bp, As, Sb, Bi, S, Se, Te образуют многочисленную группу сульфидных и теллуридных минералов. Они могут встречаться в самородном состоянии.

Инертные газы (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn) относятся к атмофильной группе. Их атомы (кроме He) имеют 8-электронную оболочкой.

В настоящее время выделяют еще и *биофилы*. Биофильные элементы – это так называемые элементы жизни. Они делятся на макробиогенные (H, C, N, O, Cl, Br, S, P, Na, K, Mg, Ca) и микробиогенные (V, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, B, Si, Mo, F).

Современная биогеохимическая классификация элементов приведена в таблице 17.

Таблица 17

Биогеохимическая классификация элементов

Литофильные	Li, Be, B, O, F, Na, Mg, Al, Si, Cl, K, Ca, Sc, Mn, V, Ge, Br, Rb, Sr, Y, Mo, I, Cs, Ba, La, Ln, Ac, Th, U.
Халькофильные	S, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Se, Mo, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sb, Te, Hg, Tl, Pb, Bi.
Сидерофильные	C, P, Fe, Co, Ni, Ge, Mo, Ru, Rh, Pb, Sn, Ta, Re, Os, Ir, Pt, Au.
Атмофильные	H, C, N, O, He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn.
Биофильные	H, C, N, O, P, S, Na, Mg, K, Ca, V, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Mo, Cl, Br, I, F, Si.

Горные породы выветриваются с образованием осадка, который потом заборанивается. При погружении на глубину породы испытывают метаморфизм и/или плавление. Позже они деформируются и перемещаются в горных цепях вверх, чтобы снова подвергнуться выветриванию и совершить новый цикл (рис. 16).

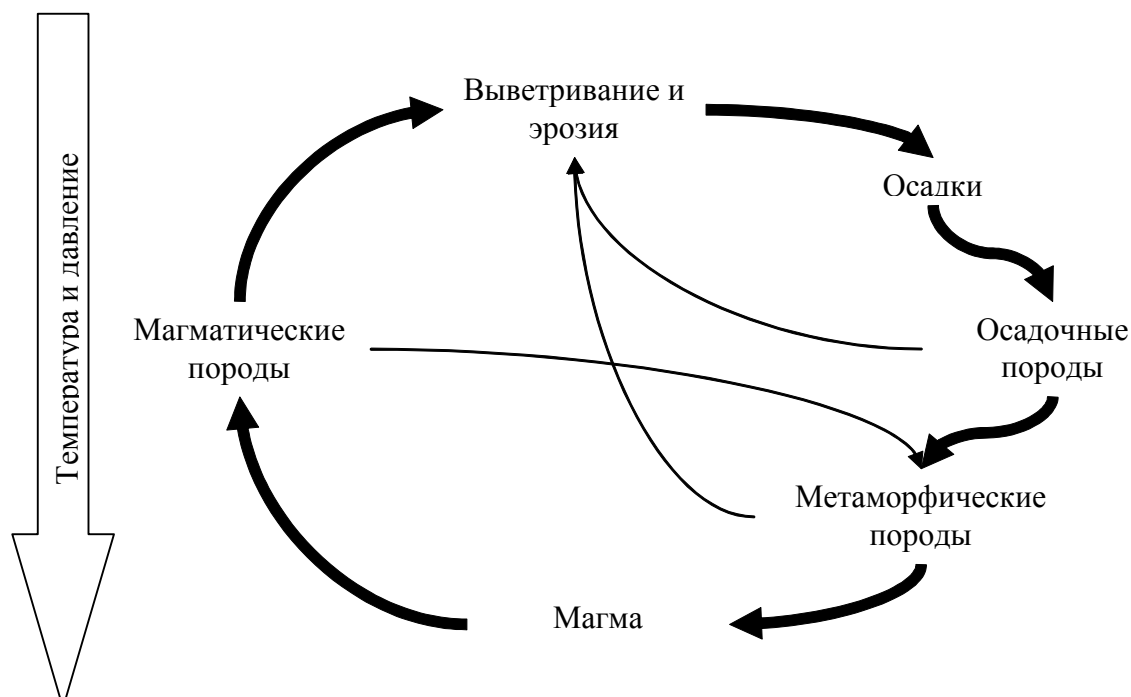


Рис. 16. Геологический цикл

В центре Земли находится металлическое ядро, состоящее из железа и никеля; ядро окружено мантией плотных горных пород, богатых магнием и железом.

**Ядро и мантия.** Вместе они составляют более 99,6% общей массы Земли. Земля резко разделяется на две части – богатую железом (ядро) и силикатную (мантия и кора). Температура ядра оценивается в 4–5 тыс. °С, давление – на этих глубинах 1,5–3,5 млн атм. Ядро Земли состоит из сплавов железа, находящихся в твёрдом состоянии в центральной и в жидком состоянии в остальной части ядра. Турбулентные течения жидкости и генерируют магнитное поле Земли.

Огромная силикатная оболочка разогревается за счёт распада радиоактивных изотопов. Подвод тепла возбуждает мощные конвективные течения в верхних слоях оболочки, сложенных пластичными породами. Крупномасштабные движения в мантии принимают вид течений плотного, твердого и пластичного вещества. Кора (и океаническая, и континентальная) лежит на плитах толщиной примерно 100 км. Новые плиты образуются в зонах срединно-океанических хребтов и охлаждаются по мере их движе-

ния в направлении от хребтов к океаническим желобам. В океанических желобах плиты погружаются и тонут в мантии. По мере погружения плотной плиты холодное вещество увлекается вниз, образуя нисходящую ветвь конвективной ячейки. Естественно, должны существовать и горизонтальные возвратные течения, переносящие вещество из областей океанических желобов к срединно-океаническим хребтам, и восходящие движения разогретого вещества, которые компенсируют нисходящие движения в области океанических желобов. В конвективных ячейках холодные опускающиеся участки жидкости отделены друг от друга расстоянием, примерно равным удвоенной глубине конвектирующего слоя. Считается, что глубина конвектирующего слоя Земли составляет примерно 700 км.

**Земная кора.** Составляет 0,375% земной массы. Она построена в основном из минералов, образующих горные породы. Химические элементы распределены в земной коре неравномерно, иногда скапливаясь в рудные месторождения. Земная кора с верхней частью мантии называется *литосферой*, лежащей на астеносфере.

**Океаническая кора** состоит из минералов, богатых кальцием, магнием, железом, алюминием и кремнием, составляющих базальты. Океаническая кора в среднем имеет толщину около 6 км (от 5 до 8 км) и она на порядок моложе континентальной. Кора этого типа создаётся и вновь уничтожается на пути от срединно-океанических хребтов к зонам субдукции, где она погружается обратно в мантию. Срединно-океанический хребет представляет собой границу между двумя жёсткими плитами. В том месте, где проходит хребет, плиты медленно раздвигаются, и поступает нижележащая порода. Таким путём на гребнях срединно-океанических хребтов (общая протяжённость 59000 км) ежегодно образуется несколько квадратных километров новой океанической коры. Гребень хребта лежит на глубине в среднем 2,5 км, а по обе стороны от него дно океана погружается на глубину 5–6 км.

**Континентальная кора** составляет более половины массы коры в целом или 0,29% массы всей Земли. Мощность континентальной коры

находится в интервале от 10 до 70 км. Она содержит меньше железа, кальция и магния, нежели океаническая кора, но сравнительно больше кремния, алюминия, натрия и калия, т. е. более лёгких элементов. Континенты плавают в астеносфере. Континентальная кора покрывает около 45% поверхности Земли. В гидросфере больше воды, чем могут вместить углубления, образованные плотной океанической корой, поэтому края континентов погружены в воду (континентальный шельф и континентальный склон). Континентальная кора древнее океанической (возраст самой древней океанической коры не превышает 200 млн лет). Она подвержена постоянным тектоническим движениям, эрозии, вулканизму, осадконакоплению, проходя собственный цикл развития, сопровождающийся её разрушением и новым созиданием. Ежегодно около  $10^{10}$  т твёрдого и растворённого вещества, образовавшегося при эрозии земной поверхности, удаляется реками, ветром и ледниками.

Выделяют два основных типа пород: **изверженные** или **вулканические** горные породы, образованные магмой, формирующейся в глубоких частях земной коры или в верхней мантии; **осадочные** горные породы, образующиеся при уплотнении материала, получающегося при эрозии континентальных пород и отлагающегося в депрессиях на континентах или на шельфе. Со временем слои этих отложений погружаются на все большую глубину, подвергаясь действию высоких давлений и температур. Образуются **метаморфические** горные породы. Расплавляясь, они формируют магму вновь. Можно делить породы как недеформированные (осадочные и вулканические) и деформированные (осадочные, магматические, метаморфические). Основная масса континентальной коры сложена именно породами второй группы.

В тех случаях, когда дивергенция плит континентальной литосферы заканчивается после растяжения на несколько десятков километров, зоны ослабленной континентальной коры остаются в виде рифтовых зон на континентах. Примерами могут служить: долина Рейна, Байкальская зона,

рифтовые долины Восточной Африки, Рио-Гранде на юго-западе США (молодые активные рифты), рифт Осло (280 млн лет), рифт Кеванаван в центре США (1 млрд лет), рифты Атапуско и Батерст на северо-западе Канады (>2 млрд лет).

Элементы, входящие в состав континентальной коры: О – 45,2%, Si – 27,2%, Al – 8%, Са – 5,1%, Mg – 2,8%, Na – 2,3%, К – 1,7%, Ti – 0,9%.

## 4.2 Ресурсы Земли

Природные химические соединения элементов земной коры называются минералами. Из них состоят многочисленные типы горных пород. Основными группами горных пород являются магматические, осадочные и метаморфические.

Человек практически не воздействует на литосферу, хотя верхние горизонты земной коры подвергаются сильной трансформации в результате эксплуатации месторождений полезных ископаемых.

Природные ресурсы – это тела и силы природы, которые используются человеком для поддержания своего существования. К ним относятся солнечный свет, вода, воздух, почва, растения, животные, полезные ископаемые и все остальное, что не создано человеком, но без чего он не может существовать ни как живое существо, ни как производитель.

Природные ресурсы классифицируют в соответствии со следующими признаками:

- по их использованию – на производственные (сельскохозяйственные и промышленные), здравоохранительные (рекреационные), эстетические, научные и др.;
- по принадлежности к тем или иным компонентам природы – на земельные, водные, минеральные, животного или растительного мира и др.;
- по заменимости – на заменимые (например, топливно-минеральные энергетические ресурсы можно заменить ветровой, солнеч-



ной энергией) и незаменимые (кислород воздуха для дыхания или пресную воду для питья заменить нечем);

– по истощаемости – на истощаемые и неисчерпаемые.

Приведенные выше признаки позволяют представить несколько классификаций природных ресурсов, каждая из которых имеет свои достоинства и недостатки. Большой интерес для науки и практики представляет деление природных ресурсов по признаку истощаемости.

Неисчерпаемые (неистощимые) ресурсы – количественно неиссякаемая часть природных ресурсов (солнечная энергия, морские приливы, текущая вода, атмосфера, хотя при значительных загрязнениях она может переходить в категорию истощаемых).

Истощаемые – ресурсы, количество которых неуклонно уменьшается по мере их добычи или изъятия из природной среды. Они в свою очередь делятся на возобновимые (растительность, животный мир, вода, воздух, почва) и невозобновимые (минеральные). Они могут быть истощены как потому, что не восполняются в результате природных процессов (медь, железо, алюминий и др.), так и потому, что их запасы восполняются медленнее, чем происходит их потребление (нефть, уголь, горючие сланцы). Поэтому в будущем человечеству потребуются поиск средств и методов более эффективного использования невозобновимых ресурсов, в том числе методов переработки вторичного сырья. В настоящее время используются почти все элементы периодической системы Д. И. Менделеева.

Степень применения и переработки многочисленных видов минерального сырья определяет прогресс и благосостояние общества. Основными сырьевыми ресурсами служат металлы, вода, минеральное и органическое сырье. Темпы эксплуатации земных недр ускоряются из года в год. За последние 100 лет ежегодное потребление угля, железа, марганца и никеля увеличилось в 50–60 раз, вольфрама, алюминия, молибдена и калия в 200–1000 раз.

Количественной характеристикой скорости истощения запасов сырья предложено считать «**индекс использования резервов**» (ИИР), который представляет процент расходования данного вида сырья в год. Чем выше ИИР, тем, очевидно, больше скорость расходования сырья, то есть:

$$\text{ИИР} = (\text{объём годовой добычи сырья} / \text{резерв данного сырья}) \times 100\%.$$

Выделяют следующие характеристики природных ресурсов:

– **запасы** – общий предполагаемый объем залежей ресурса в недрах Земли.

– **резервы** – объемы данного ресурса, которые могут быть эффективно извлечены средствами современной технологии.

По скорости истощения выделяют 2 группы ресурсов:

– ресурсы с высокой скоростью истощения ( $\text{ИИР} \geq 1,7\%$ ). В эту группу относятся: цветные и благородные металлы (золото, ртуть, олово, серебро, цинк, свинец, вольфрам, уран, медь).

– ресурсы с низкой скоростью истощения ( $\text{ИИР} \leq 1,7\%$ ). Сюда можно отнести: алюминий, молибден, марганец, кобальт, никель, титан, железо, хром, калий, а также фосфор и каменный уголь.

Современная эпоха характеризуется все возрастающим потреблением минерально-сырьевых ресурсов. Поэтому возникает проблема более рационального использования минеральных ресурсов, которую можно решить следующими методами:

- 1) создание новых высокоэффективных способов геологической разведки полезных ископаемых, ресурсосберегающих методов добычи;
- 2) комплексное использование минерального сырья;
- 3) сокращение потерь сырья на всех этапах освоения и использования запасов недр, особенно на стадиях обогащения и переработки сырья;
- 4) создание новых веществ, органический синтез минерального сырья.

### 4.3 Характеристики почв

Почва – это поверхностный слой земной коры, который образуется и развивается в результате взаимодействия растительности, животных, микроорганизмов, горных пород и является самостоятельным природным образованием. Важнейшим свойством почвы является плодородие – способность обеспечивать рост и развитие растений. Почва является гигантской экологической системой, оказывающей, наряду с Мировым океаном, решающее влияние на всю биосферу. Она активно участвует в круговороте веществ и энергии в природе, поддерживает газовый состав атмосферы Земли. Посредством почвы – важнейшего компонента биоценозов – осуществляются экологические связи живых организмов с литосферой, гидросферой и атмосферой.

Основателем научного почвоведения является выдающийся русский учёный В.В. Докучаев (1846–1903), который раскрыл сущность почвообразовательного процесса. К факторам почвообразования относятся материнские (почвообразующие) породы, растительные и животные организмы, климат, рельеф, время, вода (почвенная и грунтовая) и хозяйственная деятельность человека. Развитие почвы неразрывно связано с материнской породой (гранит, известняк, песок, лёссовидные суглинки и др.). Образование рыхлой почвенной массы связано как с процессами химического выветривания, так и с биологическими – образованием специфических органических веществ (гумуса или перегноя) под воздействием растений.

В состав почвы входят четыре важных структурных компонента: минеральная основа (обычно 50–60% общего состава почвы), органическое вещество (до 10%), воздух (15–25%) и вода (25–35%). Структура почвы определяется относительным содержанием в ней песка, ила и глины. Химизм почв частично определяется минеральным скелетом, частично – и органическим веществом. Большая часть минеральных компонентов представлена в почве кристаллическими структурами. Преобладающими почвенными минералами являются силикаты.

Большую роль в удержании воды и питательных веществ играет особенно многочисленная и важная группа глинистых минералов, большинство из которых образуют в воде коллоидную суспензию. Каждый кристалл глинистого минерала содержит слои силиката, объединённые со слоями гидроксида алюминия, обладающими постоянным отрицательным зарядом, который нейтрализуется катионами, адсорбированными из почвенного раствора. Благодаря этому катионы не выщелачиваются из почвы и могут обмениваться на другие катионы из почвенного раствора и растительных тканей. Эта катионообменная способность служит одним из важных индикаторов плодородия почвы.

Органическое вещество почвы образуется при разложении мёртвых организмов, их частей, экскретов и фекалий. Конечным продуктом разложения является гумус, находящийся в коллоидном состоянии, подобно глине, и обладающий большой поверхностью частиц с высокой катионообменной способностью. Одновременно с образованием гумуса жизненно важные элементы переходят из органических соединений в неорганические, например азот в ионы аммония, фосфор в ортофосфат-ионы, сера в сульфат-ионы. Этот процесс называется минерализацией. Углерод высвобождается в виде  $\text{CO}_2$  в процессе дыхания.

Почвенный воздух, так же как почвенная вода, находится в порах между частицами почвы. Пористость (объем пор) возрастает в ряду от глин к суглинкам и пескам. Между почвой и атмосферой происходит свободный газообмен, и в результате этого воздух обеих сред имеет сходный состав, но в воздухе почвы из-за дыхания населяющих её организмов несколько меньше кислорода и больше диоксида углерода.

Почвенные частицы удерживают вокруг себя некоторое количество воды, которая подразделяется на три типа:

1) гравитационная вода, способная свободно просачиваться вниз сквозь почву, что ведёт к выщелачиванию, то есть вымыванию из почвы различных минеральных веществ;

2) гигроскопическая вода, адсорбирующаяся вокруг отдельных коллоидных частиц за счёт водородных связей и являющаяся наименее доступной для корней растений. Наибольшее содержание ее в глинистых почвах;

3) капиллярная вода, удерживаемая вокруг почвенных частиц силами поверхностного натяжения и способная подниматься по узким порам и каналам от уровня грунтовых вод и являющаяся основным источником воды для растений (в отличие от гигроскопической она легко испаряется).

Почвы по внешним признакам резко отличаются от горных пород, вследствие протекающих в них физико-химических процессов. Они включают такие показатели, как цвет (чернозёмы, бурозёмы, серые лесные, каштановые и др.), структура (зернистая, комковатая, столбчатая и пр.), новообразования (в степях – карбонаты кальция, в полупустынях – скопление гипса). Толщина почвенного слоя в умеренных районах на равнинах не превышает 1,5–2,0 м, в горных – менее метра.

В почвенном профиле, где преобладают движения почвенных растворов сверху вниз, чаще всего выделяют три главных горизонта:

- перегнойно-аккумулятивный (гумусовый) горизонт;
- элювиальный, или горизонт вымывания, характеризующийся преимущественно выносом веществ;
- иллювиальный горизонт, куда из вышележащих горизонтов вымываются вещества (легкорастворимые соли, карбонаты, коллоиды, гипс и др.).

Ниже располагается материнская (почвообразующая) порода. Типы почв характеризуются определенным строением почвенного профиля, однотипным направлением почвообразования, интенсивностью процесса почвообразования, свойств и гранулометрического состава. На территории России выделено около 100 типов почв. Среди них можно выделить несколько основных типов:

- *арктические и тундровые почвы*, мощность покрова которых составляет не более 40 см. Эти почвы характеризуются переувлажнением и развитием анаэробных микробиологических процессов, распростране-

ны на северных окраинах Евразии и Северной Америки, островах Северного Ледовитого океана;

- *подзолистые почвы*, в формировании их преобладающее значение имеет подзолообразовательный процесс в условиях умеренного влажного климата под хвойными лесами Евразии и Северной Америки;

- *чернозёмы* распространены в пределах лесостепной и степной зон Евразии, формируются в условиях засушливого климата и нарастающей континентальности, характеризуются большим количеством гумуса ( $> 10\%$ ) и являются наиболее плодородным типом почв;

- *каштановые почвы* характеризуются незначительным содержанием гумуса ( $< 4\%$ ), формируются в засушливых и экстраконтинентальных условиях сухих степей, широко используются в земледелии, так как обладают плодородием и содержат достаточное количество элементов питания;

- *серо-бурые почвы* и *серозёмы* типичны для равнинных внутриконтинентальных пустынь умеренного пояса, субтропических пустынь умеренного пояса, субтропических пустынь Азии и Северной Америки, развиваются в условиях сухого континентального климата и отличаются высокой засоленностью и малым содержанием гумуса (до  $1,0\text{--}1,5\%$ ), низким плодородием и пригодны к земледелию только в условиях орошения;

- *краснозёмы* и *желтозёмы* формируются в условиях субтропического климата под влажными субтропическими лесами, распространены в Юго-Восточной Азии, на побережье Чёрного и Каспийского морей, этот тип почвы при сельскохозяйственном использовании требует внесения минеральных удобрений и защиты почвы от эрозии;

- *гидроморфные почвы* формируются под воздействием атмосферной влаги поверхностных и грунтовых вод, распространены в лесной, степной и пустынной зонах. К ним относятся болотистые и засоленные почвы.

Основными химическими и физическими свойствами, характеризующими плодородие почв являются:

- 1) содержание и состав гумуса, его запасы, мощность гумусового слоя;

- 2) содержание доступных элементов питания;
- 3) показатели физических свойств почвы – плотность, агрегированность, полевая влагоемкость, водопроницаемость, аэрация;
- 4) морфологическое строение профиля почв – мощность пахотного горизонта и в целом гумусового профиля;
- 5) физико-химические свойства почв – реакция почвы, ёмкость поглощения, состав обменных катионов, степень насыщенности основаниями, уровень токсических веществ – подвижных форм алюминия и марганца, показатели солевого режима. Химическое загрязнение почв приводит к деградации почвенно-растительного покрова и снижению почвенного плодородия.

#### **4.4 Антропогенное воздействие на почвы**

**Механическое воздействие на почву** – пахота, перемещение почвы, уплотнение, уничтожение.

Степень распаханности почв на разных материках колеблется в больших пределах: в Западной Европе – 30,8% от всей площади, в Азии – 20,2%, в Африке, Северной и Южной Америке – 14,4%, в Австралии и Океании – 4,1%. При этом способы распашки не всегда избираются оптимальные. Например, при освоении целинных земель в СССР широко производилась отвальная распашка полупустынных светло-каштановых почв, что привело к разрушению структуры и ветровой эрозии почв.

Перемещение почвы осуществляется при всех видах строительства, хотя не всегда почва предварительно снимается, чтобы освободить место для возведения объекта строительства. Перемещались и складировались тысячи и сотни тысяч тонн почвы при закладке карьеров для разработки полезных ископаемых открытым способом.

Уплотнение почвы деятельностью человека наиболее широко распространено от прокладки множества троп и грунтовых дорог человеком и транспортными средствами. Процесс этот связан не только со строительством населённых пунктов, промышленных объектов и сельскохозяй-

ственным использованием территории, – он связан также с ростом туризма и рекреации. Установлено, что сильное уплотнение почв пашни происходит при использовании тяжёлых тракторов, которые, как каток, оставляют после себя уплотнённую землю, лишённую возможности газового обмена, нормального впитывания влаги, и, следовательно, плодородие таких повреждённых почв сильно снижается.

Уничтожение почв зачастую наблюдается при открытой разработке полезных ископаемых – как на месте создающегося карьера, так и на участках, отводимых под отвал, – если почва не была предварительно снята и складирована. Уничтожаются почвы при создании водохранилищ, когда оказываются затопленными обширные пойменные и пахотные земли. Так, при создании 14 крупных водохранилищ на Волге потери земель составили 3,5–4,8 млн га, а площадь потерянных земель из-за постоянного подтопления вблизи водохранилищ составляет 6–8 млн га. Уничтожается почва и при прокладке автодорог, трубопроводов и т. д. Так, в США дорожным бетоном покрыта площадь более 110 тыс. км – больше суммы площадей Швейцарии, Бельгии и Дании; в Канаде площадь магистральных дорог составляет более 120 тыс. км<sup>2</sup>, то есть около 1,3% площади страны. Сильно страдает почвенный покров от военных действий при современной технике.

**Агромелиоративное воздействие на почву** бывает прямым и косвенным.

Орошение почвы – искусственное увлажнение почвы путём подачи влаги из водного источника с целью повышения влагообеспеченности растений. За последние 200 лет орошаемая площадь Земли возросла в 25 раз, хотя орошаемое земледелие имеет историю продолжительностью значительно более 7 тысяч лет. Орошение применяется в 60 странах мира. Общая площадь орошаемых земель на планете превышает 270 млн га, из них более половины приходится на долю трёх стран: Китая (45% обрабатываемой площади орошают), Индии (21,1%) и США (16,5%). Основными и наиболее распространёнными способами орошения являются:



а) бороздковый способ (вода подаётся по тупым сквозным бороздам шириной 1–1,3 м, дешёв, но увлажняет неравномерно и возможно засоление в гребнях борозд);

б) затопление (затопляемые участки /чеки/ имеют площадь 0,2–1 га, бывает переувлажнение и повышение уровня нижележащих грунтовых вод, применяется при выращивании риса);

в) лиманное орошение (при небольших понижениях рельефа создаются дамбы высотой 0,5–2 м, перехватывающие естественный поверхностный сток);

г) «дикий напуск» (орошение из каналов при неровном рельефе и щебнистых почвах, требуется сильный водяной поток, увлажнение неравномерное);

д) дождевание (механизированные установки экономят воду, обеспечивают равномерную подачу воды и равномерное увлажнение, способ прогрессивный, но высокая стоимость);

е) подпочвенное орошение (вода подаётся снизу капиллярным способом из заложенных в почве труб, вода используется экономно, не образуется на почве корки, увлажнение равномерное).

Осушение земель имеет целью отвести избыточную влагу из пределов корнеобитаемого слоя для достижения благоприятных водно-тепловых условий произрастания растений и улучшения аэрации почв, чтобы добиться повышения плодородия почв. Осушению подвергаются переувлажнённые земли, леса и болота с целью вовлечения их в сельскохозяйственное производство. Основной приём осушения – понижение уровня грунтовых вод с помощью открытого или закрытого дренажа. Болота бывают верховые (лежат на водоразделах и играют важную роль как естественный регулятор стока рек, поэтому должны быть охраняемы и не подвергаться осушению), низинные и переходного типа. Крупнейшее болото – Западно-Сибирская низменность: при площади её 1,3 млн км<sup>2</sup> заболочено около 50%.

Косвенное снижение уровня грунтовых вод возникает как побочное явление при создании карьеров. Оно может захватить обширные

территории, особенно на равнинах, но обычно размер таких площадей зависит от литологического состава горных пород, характера их залегания, наклона слоёв и т. д.

Косвенное поднятие уровня грунтовых вод порождается сооружением водохранилищ или оросительных каналов без соответствующих дренажных мероприятий.

**Засоление и вторичное засоление почв.** Почва содержит обычно соли угольной кислоты:  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  и др. Натриевые и некоторые другие соли значительно ухудшают плодородие. В естественных условиях почвы засоляются через грунтовые воды, насыщенные солями. Грунтовые воды, расположенные на небольшой глубине, в жарких и засушливых районах поднимаются по почвенным капиллярам и испаряются. Тогда на поверхности почвы остаются все растворённые до этого в воде соли. Засоление почв при орошаемом земледелии наблюдается во всех странах Ближнего и Среднего Востока – от Афганистана до Марокко и Сенегала, а также в орошаемых районах Австралии, США и Мексики. Процессам деградации и снижения плодородия почв подверглись орошаемые земли и в аридных зонах России. Так, Поволжье засолено 350 тыс. га орошаемых земель, имеется 390 тыс. га земель с солонцовыми комплексами.

Вторичное засоление орошаемых почв особенно опасно для земледелия. Современные оросительные системы обычно строятся и функционируют без гидроизоляции. В результате, грунтовые воды, поднимаясь вверх (иногда со скоростью 0,5–2 м/год и более), подтопляют поверхность почвы и, при отсутствии хорошего естественного дренажа (свободного оттока грунтовых вод), вызывают заболачивание и засоление земель. Вторичное засоление почв распространено в Индии и других странах Азии. По данным ФАО, не менее 50% площади орошаемых земель мира значительно засолено, в том числе в России и странах СНГ.

**Химическое воздействие на почву.** На суше ежегодно разлагается 10–55 млрд т органического вещества, продукты распада переходят в поч-

ву, грунтовую воду и атмосферу. Процесс разложения, как известно, сопровождается выделением энергии. В каждом природном биоценозе поступление в почву основных химических элементов и микроэлементов происходит в виде свойственного данному биоценозу сочетания веществ и соединений в определённых количественных соотношениях.

Изменение химического состава почв отражается на химическом составе произрастающих на них растений, на составе поверхностных и грунтовых вод. В результате животные и человек, обитающие в данном районе, с пищей и водой получают избыток или недостаток тех или иных элементов. Возникают «эндемичные заболевания»: недостаток йода порождает эндемический зоб и кретинизм; одновременный недостаток йода, кобальта и меди вызывает зобную болезнь; при высоком содержании молибдена и недостатке меди – эндемическая подагра и др.

Потери сырья добывающей промышленности и побочные отходы обрабатывающей промышленности могут достигать 2–33%. Такими путями, а также через стадию промышленной продукции (с металлоломом, коррозией, распылением, истиранием, со сточными водами и т.д.) в почву попадают дополнительные количества железа, калия, магния, меди, цинка, олова, никеля, ртути, резко изменяя природное содержание этих элементов и соотношение различных компонентов. Изменение содержания этих элементов в почве оказывает влияние на обмен веществ, как в почве, так и у растений и животных. Например, промышленные воды с высоким содержанием магния вызывают закупорку пор, по которым воздух поступает к корням растений, последние гибнут и т. д.

Количество поступающих в почву чужеродных веществ очень велико, особенно близ крупных городов и промышленных центров. Так, в отдельных странах Центральной Европы за 30 лет металлические отходы в населённых пунктах возросли в 10 раз. К середине следующего века ожидается рост концентрации оксида железа в почве более чем в 2 раза, свинца – в 10 раз. За это же время неполное использование сырья, потери

и отходы производства могут увеличить концентрацию в почве ртути в 100 раз, урана – в 200 раз, мышьяка в 250 раз.

Также с химическими отходами производств и от автотранспорта в почву могут попадать канцерогенные вещества (бластомагенные) – такковы сажа, продукты осмоления, нефтепродукты и др.

**Изменение почвы через изменение растительного покрова.** Особенно сильно изменяются состав и строение почвы после вырубki лесов, когда в условиях новых теплового, светового и водного режимов резко возрастает вымывание из почвы многих питательных веществ и гумуса, в котором питательные вещества содержатся в недоступной для растений форме, однако в нормальном ходе почвообразования эти вещества быстро переводятся микробиологическими процессами, при участии аэробных и анаэробных бактерий, в доступную для растений форму. Намного усиливается также смыв почвы. Поскольку леса обладают высокой водорегулирующей способностью, сведение их приводит к резкому нарушению водного баланса и росту поверхностной составляющей стока. При этом нарушается естественный круговорот веществ в биоценозе, почва довольно быстро изменяется, в значительной степени утрачивая своё плодородие, и теряет способность быть основой для самовосстановления прежнего растительного покрова.

**Изменение почвы через изменение животного мира.** Уничтожение или хотя бы частичное сокращение, в результате хозяйственной деятельности человека, численности популяций землеройных животных, червей и полезных микроорганизмов отрицательно сказывается на плодородии почв.

Сокращение в степях и саваннах поголовья копытных травоядных животных, поедающих определённые группы растений, изменяет соотношение компонентов в фитомассе биоценоза, что отражается на составе поступающих в почву органических остатков и продуктов их минерализации. В результате происходит качественное изменение почвы.

Вообще влияние на почвы антропогенного изменения животного мира менее наглядно проявляется, чем влияние изменения растительного по-

крова. Оно может выразиться, например, в антропогенном нарушении способности почвы к естественному процессу самоочищения. Под воздействием огромного количества микроорганизмов, простейших многоклеточных и других организмов в почве происходит распад органического вещества на безвредные для человека и полезные для растений минеральные соли, углекислоту, воду. Процесс самоочищения почвы сопровождается образованием гумуса.

При антропогенном нарушении процесса самоочищения почвы могут возникнуть очаги патогенных микроорганизмов в почве – возбудителей инфекционных болезней. Таковы возбудители кишечных инфекций (брюшного тифа, паратифов, дизентерии, холеры), бруцеллёза, туляремии, чумы, коклюша и др. Возбудитель сибирской язвы – сибиреязвенная палочка, – попадая с мочой и испражнениями больных животных в почву, образует споры (плотную оболочку, обеспечивающую ему высокую устойчивость к неблагоприятным факторам среды) и в таком состоянии может сохраняться годами, особенно в каштановых и чернозёмных почвах, а затем животные, поедая корм, загрязнённый этой палочкой, заражаются сибирской язвой. Человек заражается этой болезнью через контакты с больными или павшими животными, через продукты или сырьё, полученные от больных животных, и при непосредственном соприкосновении с почвой. Опасность для человека представляет собой столбнячная палочка, заражение которой происходит через повреждённую кожу или слизистую. В почве может присутствовать спороносная палочка – возбудитель ботулизма – тяжёлого пищевого отравления; она может попасть на овощи, ягоды, фрукты, грибы и при анаэробных условиях из споры переходит в вегетативную форму, продуцирующую сильный яд, превосходящий многие другие.

Почвы могут быть заражены гельминтозами. Гельминты бывают двух видов:

– геогельминты (аскариды, власоглавы и др.), они одну стадию развития проходят в почве, где яйца созревают до инвазийной стадии;

– биогельминты (свиной и бычий цепни, или солитёры, и др.), дозревание яиц которых происходит в кишечнике домашних животных, личинки затем разносятся с кровью по телу и поселяются в мускулах, а человек, употребляя в пищу недостаточно термически обработанное мясо таких животных, может заразиться этими гельминтами.

#### **Изменение почвы при её сельскохозяйственном использовании.**

После снятия урожая с поля человеком отторгается громадное количество фитомассы, чем существенно нарушается природный круговорот веществ, а почва обедняется рядом важных компонентов – соединениями азота, фосфора, калия, кальция. Отсюда следует, что при существующем землепользовании теоретически через 100–150 лет почвы, характеризующиеся средним плодородием, могут быть полностью истощены. Возникает острая необходимость в восполнении отчуждаемых человеком веществ посредством регулярного внесения удобрений.

Общее количество вносимых в почвы удобрений по земному шару составляет около 60 млн т, то есть в среднем приходится почти 5 т/км<sup>2</sup> распаханых земель.

Из вносимых в почвы азотных удобрений около 40% смывается и сносится в реки, и у человека, использующего такую воду для питья, из-за накопления в организме нитратов нарушается дыхательная функция крови. Применение азотных удобрений может сопровождаться накоплением нитратов в кормовых культурах, тогда они по пищевой цепи могут передаваться в организм человека. При определённых погодных условиях (продолжительной засухе, прохладной погоде), а также воздействию ряда других факторов (применении гербицидов и др.) содержание нитратов в растениях может возрасти в несколько раз. Высоконитратная пастбищная трава способствует накоплению в молоке и тканях животных нитратов и нитритов. С повышением доз азотных удобрений возрастает концентрация нитратов в растениях (особенно в сахарной и кормовой свёкле – до 1,8%). Наибольшее количество азота из почвы поглощают технические

культуры – сахарная свёкла, масличные, конопля, лён (уносящие 100–200 кг азота с га), хлопчатник (45 кг/га); за ними идут зерновые – пшеница, кукуруза, овёс (30–35 кг/га).

В России наибольший вынос фосфора с урожаем из почв полей наблюдается в южных районах (более 21 кг/га) за счёт преобладания в посевах кукурузы и подсолнечника, далее к северу вынос фосфора постепенно сокращается и в северных областях снижается до 8 кг/га.

**Водная и ветровая эрозия почв.** Помимо громадных территорий, где человеком изменены состав, структура, химизм почв, растут площади земель, где почвы нарушены эрозией водной и ветровой (или дефляцией). За последнее столетие водной эрозии и дефляции подверглись на земном шаре почвы на площади 2 млрд. га или 27% сельскохозяйственных земель мира.

Природные факторы развития водной эрозии почв: крутизна склонов, коэффициент горизонтальной расчленённости территории, глубина местных базисов эрозии, интенсивность осадков и др. Эрозия почв может резко возрасти под действием антропогенных факторов: при сведении или нарушении естественного растительного покрова, распашке вдоль склонов, чрезмерном выпасе скота и др. Интенсивность эрозии сельскохозяйственных земель зависит от применяемой агротехники. Наиболее легко развивается эрозия почв под паром (смыв до 100%) и пропашными культурами (75–99%), меньше – под овсом, пшеницей и рожью (20–25%). Различают плоскостную эрозию, возникающую при плоскостном не русловом смыве почвы осадками, и овражную эрозию, когда дождевые струи, сливаясь в потоки, размывают почву и подстилающие породы с образованием промоин и оврагов. Развитие оврагов приносит сельскому хозяйству не только прямой вред, разрушая и снося плодородную почву, но и косвенный – снижая уровень грунтовых вод, истощая их, иссушая земли и порождая «эрозионную засуху». В степной зоне из-за эрозии земледелие теряет 30–35 млрд м воды. Об ущербе можно судить, если учесть, что в районах с неустойчивым увлажнением каждые 100 м<sup>3</sup> воды на 1 га дают прибавку уро-

жая в размере 1 ц зерна. На эродированных почвах урожай сокращается в 15–12 раз, из-за смыва азота, фосфора и калия; ухудшается качество зерна – изменяется его биохимический состав, уменьшается абсолютный вес; в 2–4 раза возрастает засорённость сорняками.

Дефляция значительно изменяет химизм почв: происходит потеря органических веществ, азота, фосфора и пр. При выдувании пылеватых частиц происходит опесчанивание и огрубление почв, ухудшается полезная микрофауна почв.

Нерегламентированный выпас скота на горных склонах вызывает интенсивные эрозионные процессы. В ряде стран, особенно в субтропических и тропических широтах, разрушению почвенного покрова в значительной степени способствовал выпас коз. Так, на о-в Св. Елены, ранее сплошь покрытый лесом преимущественно из эбенового дерева, в 1514 г. были высажены с корабля козы, а в 1835 г., когда туда привезли сосланного Наполеона, леса оказались полностью уничтоженными и эбеновое дерево исчезло совершенно. Подобно этому, человек, разводя или выпуская коз, вызывал с их помощью сведение растительного покрова, а затем и эрозию почв в Новой Зеландии, Новой Каледонии, на о-вах Г алапагос, Хуан-Фернандес и др. В иных случаях человек сначала вырубал лес, а затем разводимые им козы препятствовали восстановлению растительности, так как молодые побеги и травы выдёргивались ими с корнем, а обнажённая почва выбивалась острыми копытами животных и затем смывалась дождём и сдувалась ветром. Так протекал процесс разрушения почв в Греции, Турции, Сирии, Ливане и других странах. К разрушению почв в горных областях приводит и массовый выпас овец, что порождает скотосбой и последующее разрушение почв. Это имеет место в Татрах, на Карпатах, Стара Планина, на Кавказе, в Крыму, в ряде горных районов Средней Азии и т. д.

Значительные трудности в землепользовании возникают в районах Крайнего Севера и пустынях в связи с ранимостью почв. В тундре почвенный покров быстро разрушается под воздействием современной техники



(тракторов, вездеходов, тягачей и т. д.), причём восстановление его происходит очень медленно. Так, В тундровой зоне России за последние 25 лет в 2 раза сократились площади лишайниковых тундр, а процессы деградации оленьих пастбищ наблюдаются почти на 25% их площади. Если раньше основной причины этого явления был перевыпас оленей, то сейчас – с нерегламентированное движение транспорта и пожары. Таким образом, необходимо особенно бережно относиться к почве в зонах экстремальных условий её формирования.

## 5. ПРОБЛЕМА ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Загрязнение окружающей среды является глобальной экологической проблемой, серьезность которой увеличивается с каждым годом.

Загрязнение окружающей среды – привнесение в окружающую среду или возникновение в ней новых, обычно не характерных физических, химических или биологических агентов или превышение их естественного среднесуточного уровня в различных средах, приводящее к негативным воздействиям.

Загрязняющее вещество – загрязнитель (от англ. pollution – загрязнение) – вещество или смесь веществ, количество и (или) концентрация которых превышают установленные для химических веществ, в том числе радиоактивных, иных веществ нормативы и оказывают негативное воздействие на окружающую среду.

Поступающие в окружающую среду загрязнители мигрируют не только в пределах одной среды, но активно перемещаются между средами и поступают в живые организмы. На схеме приведены пути миграции загрязнителей в окружающей среде (рис. 17).

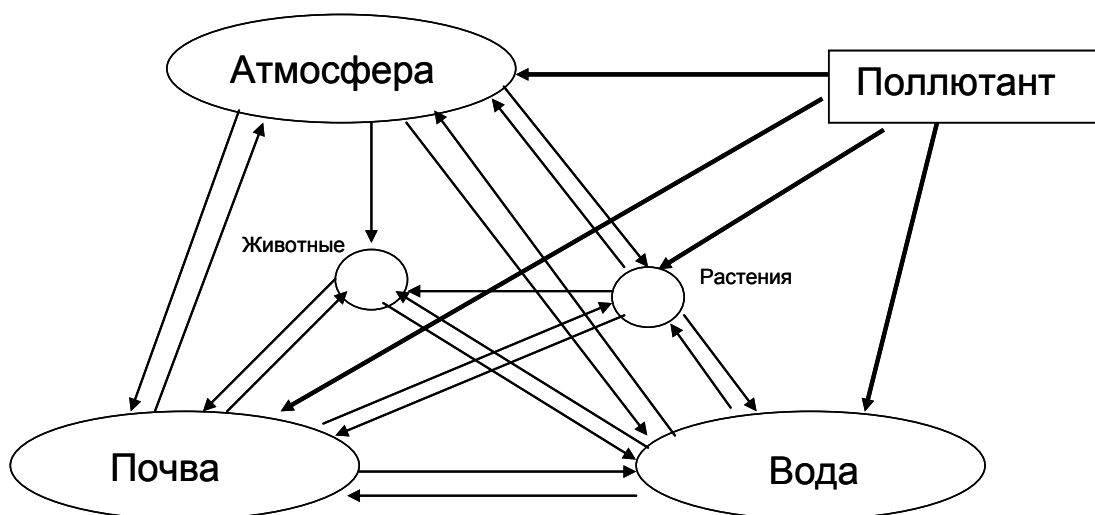


Рис. 17. Пути миграции загрязнителей в окружающей среде

В связи с большой ролью миграционных процессов в глобальном загрязнении биосферы токсикантами С. В. Петросяном предложено понятие «химические спутники Земли».

Химические спутники Земли – токсичные вещества, попадающие в атмосферу Земли и совершающие разнообразные маршруты до выпадения с дождем или снегом в разных регионах нашей планеты.

Химические спутники Земли дают очень важные вклады в суммарное загрязнение не только атмосферы, но также почв и природных вод (как поверхностных, так и подземных).

Загрязняющие вещества представляют серьезную опасность для функционирования живых систем, большинство поллютантов являются токсичными для живых организмов.

Токсикант – (от греч. *toxikon* – яд), ядовитое, вредное для здоровья вещество.

Экотоксикант – (от эко... и греч. *toxikon* – яд), вредное химическое вещество, загрязняющее окружающую среду и отравляющее находящиеся в ней организмы.

Основными источниками поступления экотоксикантов в окружающую среду являются:

- предприятия химической, металлургической, нефтедобывающей и других промышленных отраслей, недостаточно использующие методы безотходной технологии и средства очистки газообразных отходов и сточных вод от вредных примесей;
- автомобильный, воздушный, морской и другие виды транспорта, работающие на жидком, твердом и газообразном топливе;
- применение в сельском хозяйстве химических средств борьбы (пестициды) с вредителями растений и сорняками;
- теплоэлектроцентрали и другие крупные энергетические установки, выбрасывающие в атмосферу оксид углерода (II), оксид серы (IV), оксиды азота, тяжелые смолистые продукты.

Экотоксиканты в большинстве своем устойчивы (персистентны) к разложению в условиях окружающей среды, способны накапливаться в тканях живых организмов и передаваться по пищевой цепи.

Персистентность (от лат. *persistere* – упорствовать) – продолжительность сохранения ксенобиотиком биологической активности в окружающей среде или ее отдельных объектах: в почве, атмосфере, гидросфере, растениях, тканях и т. д. Характеризуется периодом полураспада вещества.

Особо опасными для биоты экотоксикантами являются суперэко-токсиканты.

Суперэкотоксиканты – вещества, которые в малых дозах способны оказывать выраженное индуцирующее (усиливающее) или ингибирующее (угнетающее) действие на ферменты.

К суперэкотоксикантам относят диоксины и дибензофураны, полихлорированные и полибромированные бифенилы, бензантрацены, нитрозамины, нафтиламины и другие органические вещества. Кроме того, к разряду суперэкотоксикантов часто относят радионуклиды, некоторые тяжёлые металлы (ртуть, кадмий) и металлоиды (мышьяк, селен), хлор- и фосфорорганические пестициды, являющиеся потенциальными мутагенами и канцерогенами (веществами, вызывающими соответственно мутации и онкологические заболевания).

Суперэкотоксиканты характеризуются чрезвычайной персистентностью и практическим отсутствием предела токсичности (сверхкумуляцией). В тех или иных концентрациях они присутствуют во всех средах, циркулируют в них и через компоненты окружающей среды проявляют своё действие на человека, вызывая мутагенный, канцерогенный эффекты, подавляя клеточный иммунитет, поражая внутренние органы и приводя к истощению организма.

Особую опасность для окружающей среды и живых организмов представляют синтетические вещества антропогенного происхождения, поступающие в природные среды в все возрастающем количестве.

Ксенобиотик – (греч. *xenos* – чужой и *bios* (*biotos*) – жизнь) – чужеродное для организмов соединение, вещество неэндогенного происхождения, действующее как токсин или фармакологически и эндокринологически активное. Ксенобиотики – условная категория для обозначения чужеродных для живых организмов химических веществ, естественно не входящих в биотический круговорот. Ксенобиотики подразделяются на биологические (например, вирусы, бактерии), химические (например, пестициды), физические (например, техногенная радиация).

Поллютанты представляют серьезную опасность для живых организмов, они могут поступать в организм разными путями, накапливаться и оказывать токсическое действие.

Биоконцентрирование – накопление химиката из окружающей среды без учета его поступления с пищей.

Биомагнификация – накопление химиката в тканях организмов за счет процессов питания.

Биоаккумуляция (в экологии) – накопление организмом химических веществ, поступающих из окружающей среды в концентрации большей, чем находится в окружающей среде. Под бионакоплением (или биоаккумуляцией) понимают суммарный эффект биоконцентрирования и биомагнификации.

Интенсивность биоаккумуляции характеризуется коэффициентом биологического накопления (отношение концентрации в организме к концентрации в среде).

Экологическая магнификация (биоумножение) – процесс увеличения концентрации химиката в организмах при переходе от низших трофических уровней данной экосистемы к высшим.

## 5. МИГРАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ. БИО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ

### 5.1 Типы миграции

Типы миграции: механическая, физико-химическая, биогенная, техногенная. Глобальные биогеохимические циклы: круговорот газообразных веществ с резервным фондом в атмосфере и гидросфере; осадочный цикл с резервным фондом в земной коре. Круговорот веществ с обменным фондом. Биотический круговорот.

**Миграция** – перемещение молекул и атомов в земной коре, движимое посредством целого ряда факторов различного происхождения и протекающее несколькими способами. Способность элемента к миграции определяется формой его нахождения в земной коре: горные породы и минералы, живое вещество, магма, рассеянная форма. Разнообразие миграции элементов характеризует число его минералов, генетических типов рудных месторождений и т.д. Участки земной коры, в которых на коротком расстоянии происходит резкое уменьшение интенсивности миграции химических элементов и, как следствие, их концентрация.

#### **Механическая миграция**

**Механическая миграция** или механогенез обусловлена работой рек, течений, ветра, ледников, вулканов, тектонических сил и других факторов.

Характерное влияние механической миграции – раздробление горных пород и минералов, ведущее к увеличению их дисперсности, растворимости, развитию сорбции и других поверхностных явлений. При диспергировании резко увеличивается суммарная поверхность частиц и их поверхностная энергия, растворимость минералов, происходит разложение многих минералов. При механической миграции тяжёлые минералы ведут себя как частицы более крупного размера. Механическое перемещение минералов зависит от их твёрдости и податливости к выветриванию, а дальность – ещё и от податливости к химическому выветриванию.

Механическая денудация – перемещение взвешенных частиц вещества водными потоками на поверхности суши. Интенсивность процесса зависит от климата, геологического строения и рельефа: она минимальна на гумидных лесных равнинах, где преобладает химическая денудация, а в аридных областях возрастает в сотни раз.

Эоловые процессы классифицируются по степени удаленности перемещения взвешенных в атмосфере частиц от поверхности Земли:

- локальный перенос, миграция на десятки и сотни километров;
- тропосферный перенос, на высотах до 12 км на сотни и тысячи км;
- стратосферный перенос, на высотах до 60 км частицы могут многократно обогнуть земной шар.

Песок, пыль, соли поступают в атмосферу преимущественно за счет развеяния слабо закрепленных песков, глинистых и лёссовых равнин, солончаков, с акваторий соленых озер или морей и т.д. Эти явления выражены резче на участках древней суши, где в течение десятков, сотен тысяч, миллионов лет происходила эоловая аккумуляция.

### **Физико-химическая миграция**

Самая простейшая форма физико-химической миграции – диффузия.

Диффузия – это процесс самопроизвольного и необратимого переноса вещества из одной части системы в другую, что возникает вследствие теплового движения частиц. Она протекает как в индивидуальном веществе, так и в смеси, и при любом агрегатном состоянии. Диффузия в горных породах обычно сопровождается взаимодействием вещества со средой. Из-за хаотического движения частиц диффузия переносит их из одного местоположения в другое. В системе, состоящей из 2-х и более веществ, образуются диффузионные потоки, стремящиеся выровнять концентрации и прийти к термодинамическому равновесию.

Диффузия в горных породах протекает в более сложной обстановке.

Все они содержат поры различных размеров и формы. Породы являются гетерогенными системами, вмещающими растворы и/или газы, которые с ней взаимодействуют. В природе вещества обычно диффузируют через серию неодинаковых пластов с различным коэффициентом диффузии. При этом на её прохождение могут повлиять пористость среды, её структура, влажность пород и их слоистость.

Смежный диффузии процесс – конвекция – миграция массовых потоков газа или жидкости, перемещение частиц происходит вместе с растворителем. Конвекция характерна как для верхней мантии, так и для земной коры.

Конвекция в пористой среде называется фильтрацией, которая протекает значительно быстрее диффузии и особенно характерна для верхней части земной коры – зоны активного водообмена, хотя может развиваться и в земных глубинах. Фильтрация энергичнее в складчатых поясах и слабее на платформах и щитах.

Другая форма миграции – сорбция. При этом процессе происходит поглощение газов или жидкостей твёрдыми или жидкими веществами из окружающего пространства поверхностью (адсорбция) или всем объёмом (абсорбция) тела. Поглощающие вещества называются адсорбентами (абсорбентами), а поглощаемые адсорбатами (абсорбатами).

### **Миграция газов**

Газы составляют сотые доли% массы земной коры и десятые доли% гидросферы, однако геохимическая роль газов не пропорциональна их массе: решающее значение имеет высокая подвижность газов, которые мигрируют интенсивнее, чем вещества в твердом и жидком состоянии. В земной коре выделяются газы воздушного, биохимического, химического и радиоактивного происхождения.



Миграция газов осуществляется путем фильтрации и диффузии. Основное значение имеет фильтрация, скорость которой определяется проницаемостью пород (трещиноватость, тектонические нарушения) и изменяется в сотни тысяч раз.

В оценке миграции газов необходимо рассмотрение такого важного показателя свойств газов как их растворимость. Большинство газов в стандартных условиях плохо растворяются в воде. С увеличением температуры растворимость большинства газов понижается, с увеличением давления – растет. Углеводороды лучше растворяются в нефти, чем в воде, миграция газов с нефтью имеет важное геохимическое значение: в местах повышения давления углеводороды растворяются в нефти, а в местах понижения – выделяется из нее. Однако, в связи с большим масштабом водной миграции с подземными водами мигрирует значительно больше углеводородов, чем с нефтью.

### **Водная миграция**

Вода – самая универсальная и самая важная среда миграции в земной коре. Водные растворы пронизывают верхнюю часть литосферы, вода – это «кровь» земной коры.

Природные воды часто взаимодействуют с различными горными породами, например крупные реки со сложным геологическим строением бассейна, многие подземные воды. Для вод с активной циркуляцией характерна интенсивность миграции, а для застойных вод – интенсивность накопления, т.к. представляет собой кларк концентрации элементов в минеральном остатке воды.

Электрохимические процессы возникают при любой миграции вод через горные породы, осадки, почвы. Системы, в которых протекают электрохимические процессы, именуются геоэлектрохимическими, а полюса поля, где концентрируются элементы – электрохимическими барьерами. В земной коре существуют локальные электрические поля – гальванические, фильтрационные, диффузионно-адсорбционные и др. Местами характерны

крайне низкие концентрации элементов в растворах, исключаяющие их осаждение на геохимических барьерах: безбарьерная миграция, дальняя миграция. Но при электрохимических явлениях в растворах возможны и значительные концентрации элементов.

### **Биогенная миграция**

Образование живого вещества и разложение органических веществ образуют единый биологический круговорот атомов, который в биосфере протекает повсеместно, хотя в разных формах и с разной интенсивностью. В ландшафте и верхних горизонтах моря в процессе фотосинтеза образуется живое вещество, здесь же происходит его минерализация. Часть органических веществ минерализуется не полностью и откладывается в илах. Закон биологического круговорота – один из основных законов геохимии, согласно которому в биосфере в ходе биологического круговорота атомы поглощаются живым веществом и заряжаются энергией, которую отдают в окружающую среду, покидая живое вещество. Главными носителями энергии являются природные воды.

Неминерализованные остатки органического вещества преобразуются в осадочные породы, в том числе залежи торфа, угля и других горючих ископаемых. Общая их масса во много раз больше массы живого вещества, а главное количество органического углерода заключено в виде небольших примесей гумусовых и углистых веществ, капель битумов и т.д. Главные превращения органические остатки претерпевают в почвах и илах в период энергичной работы микроорганизмов. В дальнейшем происходит более медленное их изменение под влиянием подземных вод и термokatалитическим путем при прогибании осадочных толщ и росте температуры или в результате радиолиза.

Геохимическое своеобразие биокосных систем определяется сочетанием биогенной, физико-химической и механической миграций. В биокосных системах литосферы происходит взаимодействие горных пород с природны-

ми водами в близких термодинамических условиях. Это определяет некоторые общие особенности физико-химической миграции, которая складывается из двух противоположных процессов: выветривания и цементации.

Миграция элементов при выветривании, в свою очередь, складывается из противоположных процессов: выщелачивание из пород и минералов водных и присоединение воздушных элементов. Для цементации наиболее характерны аккумуляция водных мигрантов на геохимических барьерах, уменьшение пористости и увеличение объемной массы пород. Выветривание и цементация – разные стороны единого процесса миграции: первый порождает второй.

### **Техногенная миграция**

В ноосфере происходит грандиозное перемещение атомов, их рассеяние и концентрация. Ей свойственны механическая, физико-химическая, биогенная миграция, но не они определяют ее своеобразие: главную роль играет техногенная миграция. Ноосфере характерно огромное ускорение миграции.

Существует две группы процессов техногенеза.

Первая группа процессов унаследована от биосферы, к ней относятся биологический круговорот, круговорот воды, рассеяние элементов при отработке месторождений, распыления вещества и многое другое.

Техногенная миграция второй группы находится в резком противоречии с природными условиями.

#### *Факторы миграции*

Факторы миграции подразделяются на внутренние и внешние. Внутренние факторы – это факторы, связанные только со свойствами атомов и их соединений, в их число входят:

- 1) свойства связи, включающие физические концентрации веществ;
- 2) химические свойства, степень реакционной способности атомов и соединений;

3) энергетические и кристаллизационно-химические свойства веществ;

4) гравитационный фактор, связанный с атомной массой;

5) радиоактивные свойства атомов.

Внешние факторы определяются состоянием окружающей среды, не зависят от индивидуальных свойств миграции веществ и включают следующие факторы:

1) космическая миграция, включающая гравитационную, лучистую, тепловую энергию, давление и электрические поля.

2) факторы миграции в расплавах, включающие условия гравитационного равновесия и диффузии.

3) факторы миграции в водных растворах, включающие условия миграции как при высоких температурах, так и при низких.

4) факторы миграции в газовых смесях и надкритических растворах.

5) факторы механической миграции.

6) факторы миграции в коллоидальной и монокристаллической среде.

7) факторы миграции в твердых телах.

8) факторы биохимической и промышленной миграции.

9) другие физико-химические факторы.

*Интенсивность миграции.*

А. И. Перельман предложил интенсивность миграции химических элементов определять, исходя из следующей формулы:

$$I = m/(tC_k - 1), \quad (5.1)$$

где  $I$  – интенсивность миграции;  $m$  – масса мигрирующего элемента;  $t$  – промежуток времени существования миграции;  $C_k$  – кларковое или местное фоновое содержание элемента в рассматриваемой части биосферы.

## 5.2 Глобальные биогеохимические циклы

### Общие закономерности биогеохимического круговорота веществ

**Биогеохимия** – наука, изучающая жизнедеятельность организмов в качестве ведущего фактора миграции и распределения масс химических элементов на Земле. Основоположник биогеохимии – выдающийся естествоиспытатель XX века В. И. Вернадский. Предметом изучения биогеохимии служат миграции и массообмена химических элементов между живыми организмами и окружающей средой.

**Биогеохимический круговорот** – носящие циклический характер процессы обмена и трансформации химического элемента между компонентами биосферы (от неорганической формы через живое вещество вновь в неорганическую). Совершается с использованием преимущественно солнечной энергии (фотосинтез) и частично энергии химических реакций (хемосинтез).

Океан и почвы представляют собой геохимически сопряжённые планетарные суперландшафты. В современную эпоху суша в целом является элювиальной системой, океан – аккумулятивной системой.

Земная кора, кора выветривания, почвы, организмы отдают в океан коллоидные и истинные растворы, механические осадки, органическое вещество. В этом процессе участвуют наземные, почвенные, подземные и сверхглубокие воды. За счёт этого океан получает ежегодно огромное количество механических остатков.

Ёмкость биологического круговорота – количество химических элементов, находящихся в составе массы зрелого биоценоза. Интенсивность биологического круговорота – количество химических элементов, содержащихся в приросте фитоценоза на единице площади за единицу времени.

Скорость биологического круговорота – промежуток времени, в течение которого элемент проходит путь от поглощения его живым веществом до выхода из состава живого вещества.

Элементами биогеохимического круговорота веществ являются следующие составляющие:

1) регулярно повторяющиеся или непрерывно текущие процессы притока энергии, образование и синтез новых соединений.

2) постоянные или периодические процессы переноса или перераспределения энергии и процессы выноса и направленного перемещения синтезированных соединений под влиянием физических, химических и биологических агентов.

3) направленные ритмические или периодические процессы последовательного преобразования: разложения, деструкции, синтезированных ранее соединений под влиянием биогенных или абиогенных воздействий среды.

4) постоянное или периодическое простейших минеральных и органических компонентов в газообразном, жидком и твёрдом состоянии, которые играют роль исходных компонентов для новых очередных циклов круговорота веществ.

В природе протекают как биологические циклы веществ, так и абиогенные циклы. Биологические циклы обусловлены во всех звеньях жизнедеятельностью организмов (питание, пищевые связи, размножение, рост, передвижение метаболитов, смерть, разложение, минерализация). Абиогенные циклы сложились на планете намного раньше биогенных. Они включают весь комплекс геологических, геохимических, гидрологических, атмосферных процессов.

В добиогенный период планеты в геологических, гидрологических, геохимических, атмосферных круговоротах определяющая роль принадлежала водной и воздушной миграции и аккумуляции. В условиях развитой биосферы, круговорот веществ направляется совместным действием биологических, геологических и геохимических факторов. Соотношение между ними может быть разным, но действие обязательно совместным. Именно в этом смысле употребляют термины – биогеохимический круговорот веществ и биогеохимические циклы. Ненарушенные биогеохимические циклы носят круговой, почти замкнутый характер. Степень повторяющегося воспроизводства циклов в природе велика до 98%, таким обра-

зом, поддерживается в биосфере известное постоянство и равновесие состава, количества и концентрации компонентов, вовлечённых в круговорот, а также генетическая и физиологическая приспособленность и гармоничность организмов и окружающей среды. Но неполная замкнутость биогеохимических циклов в геологическом времени приводит к миграции и дифференциации элементов и их соединений в пространстве и различных средах. В этом случае мы наблюдаем биогенное накопление азота и кислорода в атмосфере, биогенное и хемогенное накопление соединений углерода в земной коре (нефть, уголь, известняк). История геохимических отношений между океаном и сушей отражена в химическом составе почв и океанических вод. Элементы, являющиеся основой жизни, – Si, Al, Fe, Mn, C, P, N, Ca, K – аккумулируются в почве. «Аквафилы» – H, O, Na, Cl, S, Mg – составляют химическую основу океана (табл. 18).

*Таблица 18*

Химический состав почв и океанических вод, %

Элемент	Почва	Океан	Элемент	Почва	Океан
O	49	85,8	Al	7,3	$n \cdot 10^{-6}$
Mg	$6 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	P	$8 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-6}$
H	1	10,7	Na	0,6	1
K	1,36	$3,8 \cdot 10^{-2}$	N	$1 \cdot 10^{-1}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$
Si	33	$5 \cdot 10^{-5}$	Fe	3,8	$5 \cdot 10^{-6}$
C	2	$2 \cdot 10^{-5}$	S	$8,8 \cdot 10^{-2}$	$8,5 \cdot 10^{-2}$
Mn	$8,5 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-7}$	Cl	$1 \cdot 10^{-2}$	1,89
Ca	1,37	$4 \cdot 10^{-2}$			

Таким образом, круговорот веществ в системе континенты – океан – верхняя мантия – континенты обогащает океан химическими элементами. На суше в процессах выветривания и почвообразования образуются вторичные соединения, которые различаются по геохимической подвижности. Они включаются в новые циклы геологического, почвенного и биологического круговоротов веществ, образуя единый биогеохимический круговорот веществ на планете.

Существует два основных круговорота веществ в природе: большой (геологический) и малый (биогеохимический).

**Большой круговорот веществ в природе (геологический)** представляет собой перераспределение вещества между биосферой и более глубокими горизонтами Земли.

Примером большого круговорота является перераспределение осадочных горных пород между биосферой и внутренними оболочками Земли. Осадочные горные породы, образованные в результате выветривания магматических пород, в подвижных зонах земной коры вновь погружаются в зону высоких температур и давлений. Там они переплавляются и образуют магму – источник новых магматических пород. После поднятия этих пород на земную поверхность и действия процессов выветривания вновь происходит трансформация их в новые осадочные породы.

Символом круговорота веществ является спираль, а не круг. Это означает, что новый цикл круговорота не повторяет в точности старый, а вносит что-то новое, что со временем приводит к весьма значительным изменениям.

Большой круговорот это и круговорот воды между сушей и океаном через атмосферу. Влага, испарившаяся с поверхности Мирового океана, переносится на сушу, где выпадает в виде осадков, которые вновь возвращаются в океан в виде поверхностного и подземного стоков. Подсчитано, что в круговороте воды на Земле ежегодно участвует более 500 тыс. кубических километров воды.

**Малый круговорот веществ (биогеохимический)** – это круговорот, который совершается только в пределах биосферы. Сущность малого круговорота вещества заключается в образовании живого вещества в процессе фотосинтеза и в превращении органического вещества при разложении вновь в неорганические соединения.

Главным источником энергии круговорота является солнечная радиация, которая порождает фотосинтез. Солнечная энергия неравномерно распределяется по поверхности земли. Кроме того, она теряется путем от-



ражения, поглощается почвой и т.д. На фотосинтез тратится не более 5% от всей энергии, но чаще всего 2–3%.

В ряде экосистем перенос вещества и энергии осуществляется преимущественно посредством трофических цепей. Такой круговорот называется биологическим. Он предполагает замкнутый цикл веществ, многократно используемый трофической цепью. Такой круговорот возможен только в водных экосистемах, особенно в планктоне с его интенсивным метаболизмом.

В масштабах всей биосферы такой круговорот невозможен. Здесь действует биогеохимический круговорот, представляющий собой обмен макро- и микроэлементов, и простых неорганических веществ ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) с веществом атмосферы, гидросферы и литосферы.

Круговорот отдельных веществ В. И. Вернадский назвал *биогеохимическими циклами*. Суть биогеохимического цикла в следующем: химические элементы, поглощенные организмом, впоследствии его покидают, уходят в абиотическую среду, затем, через некоторое время, снова попадают в живой организм и т. д. Такие элементы называют биофильными. Этими циклами и круговоротом в целом обеспечиваются важнейшие функции живого вещества в биосфере.

В биогеохимических круговоротах следует различать две части:

1) резервный фонд – это огромная масса движущихся веществ, не связанных с организмами,

2) обменный фонд – значительно меньший, но весьма активный, обусловленный прямым обменом биогенным веществом между организмами и их непосредственным окружением.

Если рассматривать биосферу в целом, то в ней можно выделить:

1) круговорот газообразных веществ с резервным фондом в атмосфере и гидросфере (океан);

2) осадочный цикл с резервным фондом в земной коре (в геологическом круговороте).

Единственный на Земле процесс, который не тратит, а связывает солнечную энергию и даже накапливает ее – это создание органического вещества в результате фотосинтеза. В связывании и накоплении солнечной энергии и заключается основная планетарная функция живого вещества на Земле.

### **5.3 Круговорот воды в природе**

Вода имеет особое значение для живого вещества Земли, она является обязательным условием его существования и главной его составной частью (вода составляет около 60% суммарной массы живых организмов суши и 80% массы организмов океана). Все физиологические процессы и биохимические реакции протекают в водных растворах. Огромное количество воды разлагается при фотосинтезе. Взаимодействие живого вещества с гидросферой является одним из генеральных процессов в биосфере. Океаны, полярные шапки льдов, ледники, озера, реки, почвы и атмосфера содержат 1,4–1,5 млрд км<sup>3</sup> воды, эта масса постоянно находится в постоянном динамическом взаимодействии с другими компонентами биосферы и тем самым определяет факторы изменения окружающей среды.

Значение воды как мощного геологического агента и первостепенного геохимического фактора миграции химических элементов изучено хорошо. Оно в первую очередь связано с её физико-химическими свойствами. Решающее значение имеет способность воды находиться в пределах биосферы Земли в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком, газообразном – и способность растворять в себе многие вещества. С геохимической точки зрения вода относится к химически активному веществу. Она соединяется со многими окислами металлов и неметаллов. Энергично взаимодействует с наиболее активными металлами и может вступать в реакции с многочисленными веществами. Наконец, с помощью только воды происходит обмен веществ между живыми организмами и неорганическими, костными телами нашей планеты.

Вода в жидком состоянии имеет максимальную плотность при 4 °С (принята за единицу), а переход в твердое состояние, сопровождающийся изменением упаковки молекул, понижает плотность до 0,9. Это обстоятельство (лёд плавает) и малая теплопроводность льда способствует стабилизации процессов в гидросфере. Все свойства воды обусловлены наличием двух неподеленных электронных пар у атома кислорода, атомные орбитали которого гибридизированы по  $sp^3$ -типу, и способностью атомов водорода соседних молекул образовывать с этими неподеленными электронными парами достаточно прочные водородные связи. В результате как жидкая, так и кристаллическая вода (лед) оказываются хорошо структурированными, хотя число локальных нарушений дальнего порядка при плавлении возрастает. Химические элементы в гидросфере находятся в разнообразных формах. Среди них наиболее характерны простые и сложные ионы, а также молекулы, находящиеся в состоянии сильно разбавленных растворов. Растворенные ионы, сорбционно связаны с частицами коллоидных и субколлоидных размеров, находящимися в морской воде в виде тонкой взвеси. Особую группу составляют элементы, входящие в состав органических соединений. Под влиянием солнечной радиации воды гидросферы Земли находятся в непрерывном движении – круговороте (рис. 18). Вода в виде паров атмосферной влаги, атмосферных осадков и речного стока, в виде течений в океанах перемещается на большие расстояния. Находясь в атмосфере, она максимально насыщена свободным кислородом и затем расходует его, соприкасаясь с верхними слоями литосферы. В процессе круговорота в единую систему связываются воды гидросферы, а также осуществляется тесная связь природных вод с атмосферой, литосферой и живым веществом планеты.

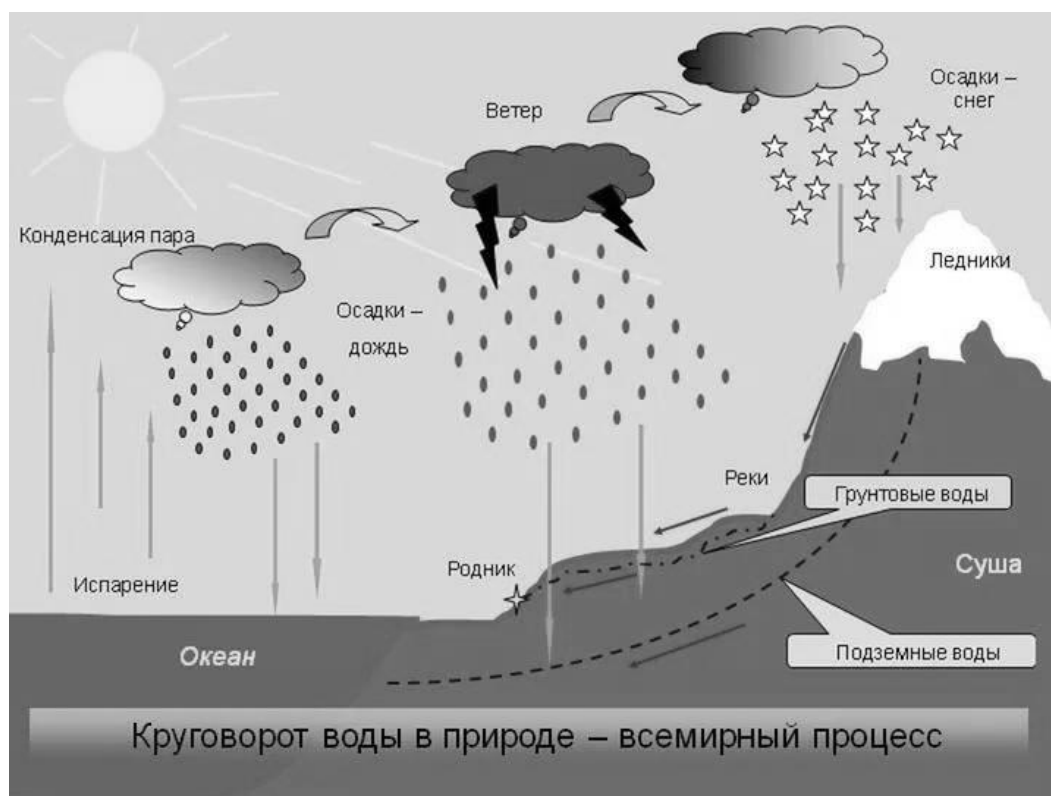


Рис. 18. Круговорот воды в природе

В общем круговороте воды на Земле можно выделить отдельные звенья: атмосферное, океаническое, литогенное, биогенное и промышленно-хозяйственное. Наиболее разнообразны процессы литогенного звена, включающие инфильтрацию, поверхностный и подземный сток, подъем воды к поверхности и последующее испарение.

В биогенном звене в отличие от других происходит разложение воды, которая используется растениями в процессе фотосинтеза для построения тканей организма. Обменные процессы между сушей и атмосферой включает испарение, с поверхности листьев, стеблей и стволов растений, транспирацию, осадки и испарение воды с поверхности водоёмов.

Основную массу водной оболочки Земли образуют солёные воды Мирового океана, покрывающие 2/3 поверхности земли. Так как океанические воды составляют около 93% всех вод биосферы, можно считать, что их химический состав определяет основные черты состава гидросферы в целом. Наличие растворённых веществ определяет солёность воды Мирового океана. Количественно солёность для общей массы определяется

в граммах растворённого вещества на 1000 г морской воды и выражается в промилле – ‰. Максимальная солёность поверхности океана составляет 34,5–35,5 ‰, уменьшаясь от экватора в сторону Северного и Южного полюсов, а также несколько понижается с глубиной. В свою очередь, возрастание солёности приводит к увеличению плотности. Особая роль в геохимических процессах моря и в жизни морских организмов принадлежит азоту, фосфору и кремнию. Значительное место отводится растворённым газам – азот, кислород, углекислота. Азот. Молекулярная форма азота, поступающая в морскую воду из атмосферы, растворяется в воде пропорционально давлению (закон Генри).

Растворимость азота в морской воде уменьшается с увеличением температуры и солёности. Часть азота переносится реками в виде соединений, но эта часть азота менее распространена по сравнению с азотом атмосферного происхождения. Значительная роль в биогеохимическом цикле данного элемента отводится деятельности бактерий (азотфиксация и денитрификация). Кислород. Молекулярная форма кислорода поступает в Мировой океан из атмосферы и образуется в процессе фотосинтеза фитопланктоном в верхних слоях. Количество кислорода, растворённого в морской воде, зависит от температуры, солёности и давления. Фитопланктон мирового океана продуцирует почти столько же кислорода, что и все зелёные растения суши. Углекислота. По сравнению с азотом и кислородом растворённый углекислый газ в океанической воде присутствует в небольших количествах. Кроме атмосферы поступление двуокси углерода связано с процессами окисления органических остатков, брожения, дыхания живых организмов, деятельностью вулканов и привнос реками. Материковые воды (ледники, вода озёр, болот, речные, подземные воды). Большая часть вод суши обрадуется за счёт атмосферных осадков, часть которых идёт на пополнение запаса подземных вод (инфильтрация через почву). При инфильтрации вода взаимодействует с педосферой и живыми организмами, частично растворяет их и минерализуется. Химический со-

став воды зависит от конкретных физико-географических и физико-химических условий стока. Обычно выделяют три источника минерализации: первый, изверженные и метаморфические горные породы; второй, залежи некоторых осадочных пород, состоящие из растворимых солей (карбонаты, сульфаты и др.); третий, соли, рассеянные и абсорбированные в осадочных горных породах, коре выветривания и почве.

## **5.4 Круговороты биогенных элементов**

### **Биогеохимический цикл углерода и его влияние на важнейшие циклы элементов**

Циклические процессы массообмена углерода имеют особо значение для биосферы. Распределение масс этого элемента следующее: в атмосфере находится  $2450 \cdot 10^9$  т углекислого газа, что соответствует  $668 \cdot 10^9$  т углерода. В океане углерод (помимо его содержания в живых организмах) находится в двух главных формах: в составе органического вещества (растворённого в воде и отчасти находящегося в виде взвешенных дисперсных частиц) и в составе ионов  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  и  $\text{CO}_2$ . В Мировом океане содержится примерно  $2100 \cdot 10^9$  т  $\text{C}_{\text{орг}}$ , в виде гидрокарбонатов –  $38600 \cdot 10^9$  т  $\text{C}_k$ .

Основная масса живых организмов находится на суше и в пересчете на сухое вещество составляет  $2500 \cdot 10^9$  т. По средствам хозяйственной деятельности человека масса природной растительности суши сократилась на 25% и в настоящее время составляет  $1880 \cdot 10^9$  т (средняя концентрация углерода в сухом веществе растительности суши составляет 46%). Количество углерода, находящегося в живых организмах океана, составляет доли процента от количества, которое сосредоточено в массе растений Мировой суши. На суше, в педосфере имеется значительное количество неживого органического вещества: слабо разложенных растительных остатков, образующих лесные подстилки и скопления торфа, а также почвенного гумуса. Во всем неживом органическом веществе Мировой суши депонировано около  $1500 \cdot 10^9$  –  $1600 \cdot 10^9$  т углерода.

Обобщая изложенные сведения, можно заключить, что наименьшее количество углерода находится в атмосфере, несколько больше – в живом веществе суши, еще больше – в неживом органическом веществе педосферы. Значительная масса углерода содержится в океане в составе гидрокарбонатов – в 10 раз больше, чем в живом веществе, атмосфере и педосфере вместе. Связующим звеном между карбонатами и органическими соединениями служит  $\text{CO}_2$ , который является необходимым исходным материалом как для фотосинтеза органического вещества, так и для образования карбонатов организмами. Весьма важно для понимания глобальной биогеохимии углерода распределение масс этого элемента в земной коре. Средняя концентрация карбонатного углерода на порядок превышает концентрацию органического. Это имеет место в земной коре в целом и в ее главных слоях: осадочном, «гранитном» и «базальтовом», а также в основных типах коры: континентальном, субконтинентальном и океаническом. Соотношение масс  $C_k : C_{\text{орг}}$  составляет около 5 и несколько возрастает лишь в океанической коре из-за высокого процента карбонатных осадков. Главным резервуаром углерода служит осадочная толща земной коры (стратосфера). Концентрация  $C_k$  и  $C_{\text{орг}}$  в осадочной оболочке на порядок выше, чем в гранитном и базальтовом слоях литосферы. Концентрированные скопления  $C_{\text{орг}}$  в виде нефти и каменного угля на три порядка ниже массы углерода рассеянного органического вещества, содержащегося в осадочной оболочке.

Карбонатообразование и фотосинтез рассматривается как два генеральных процесса в глобальной деятельности живого вещества на протяжении последних 3–3,5 млрд лет. Соотношение масс  $C_k$  и  $C_{\text{орг}}$  характеризует лимит роста живого вещества на разных этапах геологической истории. Количество ежегодно разрушающегося органического вещества пока не поддается точному определению. В гумусе педосферы за время не более 1000 лет накоплено углерода в 2 раза больше, чем его содержится в атмосфере. Можно предполагать, что в состав стабильных, долгоживущих гумусовых соединений уходит до 30% массы углерода ежегодно отмираю-

щих органов растений, а полное возобновление гумуса почв в среднем составляет  $1 \cdot 10^3$ – $1,5 \cdot 10^3$  лет. В различных гидротермических условиях периоды полного возобновления сильно различаются. Синтез и разрушение органического вещества в океане существенно отличаются от того, как протекают эти процессы на суше. Преобладающую часть фотосинтезированного органического вещества обеспечивает фитопланктон. Его сухая масса по крайней мере на три порядка меньше массы растительности Мировой суши, но годовая продукция имеет близкие значения. Это объясняется значительно более быстрыми жизненными циклами главных фотосинтетиков океана – планктонных организмов – по сравнению с наземными растениями. Из соотношения биомассы растительности суши ( $2500 \cdot 10^9$  т) и ее продукции ( $172,5 \cdot 10^9$  т/год сухого органического вещества) следует, что полная замена массы растительности Мировой суши происходит за период около 15 лет. В океане оборот массы фитопланктона происходит за 1–2 суток, а обновление всей биомассы океана примерно за 1 месяц. Вторым крупным биогеохимическим циклом углерода связан с взаимодействием  $\text{CO}_2$  атмосферы и природных вод. Между газами тропосферы и поверхностным слоем океана существует подвижное равновесие. С учётом всех компонентов системы можно считать, что в 1 л океанической воды содержится в растворённом состоянии около  $50 \text{ см}^3 \text{ CO}_2$ . В результате химического взаимодействия  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в Мировом океане содержится огромное количество угольной кислоты, которое почти в 60 раз превышает массу углекислого газа, находящегося в атмосфере. Из чего следует, что океан является основным резервуаром  $\text{CO}_2$  на поверхности Земли. Итак, глобальная динамика масс углерода в биосфере определяется двумя крупными циклами массообмена. Первый из них обеспечивается ассимиляцией  $\text{CO}_2$  и разложением  $\text{H}_2\text{O}$  путём фотосинтеза органического вещества и его последующего разложения с образованием  $\text{CO}_2$ . Второй цикл обусловлен прогрессом поглощения – выделения углекислого газа природными водами при химическом взаимодействии  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  с образованием карбонат–



гидрокарбонатной системы. Оба цикла неразрывно связаны деятельностью живого вещества. Живое вещество биосферы, глобальный круговорот воды и карбонат – гидрокарбонатная система регулируют циклический массообмен углерода между атмосферой, сушей и океаном (табл. 19). Характерной чертой двух главных циклов массообмена является их не замкнутость и выведение из циклов некоторого количества углерода в форме неживого органического вещества и карбонатов. Непрерывный вывод углерода глобального цикла и захоронение его в осадках морей имеет особое значение для развития биосферы. Непрерывное выведение углерода из атмосферы могло бы обусловить постепенное убывание его в атмосфере и постепенное сокращение массы живого вещества, а затем и полное прекращение жизни на нашей планете. Но, в действительности этого нет, так как углекислый газ постоянно дополнительно поступает на поверхность планеты и его количество в атмосфере поддерживается на определенном уровне. Единственным источником такого дополнения служат вулканические газы.

*Таблица 19*

Миграция масс углерода в биосфере

Процессы обмена	Масса С, $1 \cdot 10^9$ т/год
Мировая суша: Биологический круговорот (фотосинтез – деструкция органического вещества)	85
Массообмен между сушей и тропосферой ионов $[\text{HCO}_3^-]$ :	
– поступление в тропосферу	0,136
– вымывание с осадками из тропосферы	0,139
Вынос с речным стоком:	
– растворенных неорганических ионов	0,47
– растворенного органического вещества	0,28
– взвешенного органического вещества	0,20

Процессы обмена	Масса С, $1 \cdot 10^9$ т/год
Перенос ионов $[\text{HCO}_3^-]$ с воздушными массами морского происхождения на сушу	0,003
Океан:	
– круговорот фотосинтетиков фитопланктона	50
– растворение $\text{CO}_2$ океаном	30
выделение $\text{CO}_2$ из океана	30
удаление в осадки $\text{C}_{\text{орг}}$	0,08
удаление в осадки $\text{C}_{\text{к}}$	0,16

Усиление притока углекислого газа в периоды активного вулканизма, сопровождалось общим изменением (потеплением) климата, уменьшением контрастности температур высоких и низких широт. Считается, что смена ледниковых и межледниковых периодов в плейстоцене обусловлена колебаниями содержания углекислого газа в атмосфере. Можно допустить, что распространение материкового льда и сильное сокращение площади лесной растительности способствовало повышению углекислоты в воздухе и относительному потеплению. Вызванное этим сокращение ледников и распространение лесов сопровождалось изъятием  $\text{CO}_2$  из атмосферы и связыванием его в биомассе и органическом веществе педосферы, что вызывало постепенное похолодание и появление очередного материкового оледенения, за которым следовало сокращение площади лесов и повторение всего цикла. Необходимо отметить, что все рассмотренные изменения в циклическом массообмене углерода могли происходить естественным путем, без антропогенного вмешательства. Живое вещество состоит из углерода, кислорода, водорода, поэтому распределение и динамика этих элементов в биосфере неразрывно связаны.

Основная масса кислорода на периферии Земли находится в кристаллическом силикатном веществе земной коры. Кислород также составляет большую часть (86%) массы гидросферы. Для биосферы исключи-

тельно важное значение имеет свободный молекулярный кислород, аккумулярованный в атмосфере и растворённый в гидросфере. Будучи продуктом процессов жизни, кислород, в то же время служит одним из основных условий существования её главных форм и определяет самые важные реакции в биосфере. Необходимо также отметить, что образование свободного кислорода связано со световой энергией Солнца и поэтому может осуществляться только на поверхности Земли либо абиогенно, путём фотолиза паров воды, либо путём биологического фотосинтеза. Исходным «Сырьём» для образования кислорода посредством реакций фотолиза и фотосинтеза служит вода. Связывание 1 г углерода в органическое вещество при реакции фотосинтеза сопровождается выделением примерно 2,7 г кислорода в результате расщепления молекул воды. Наличие органического вещества установлено в древних осадочных отложениях, имеющих возраст до 3,8 млрд лет, следовательно, выделение кислорода при фотосинтезе продолжалось на протяжении огромного времени. Исходя из продуктивности растительного покрова Мировой суши, не нарушенного человеком, выделение кислорода можно оценить в  $220 \cdot 10^9$  т  $O_2$  в год. В настоящее время после вырубки части лесов и уничтожения природной растительности на большой площади продуктивность растительности, сократилась примерно на 25% и выделение кислорода составляет около  $165 \cdot 10^9$  т/год. Суммарное выделение кислорода фотосинтетиками суши и океана составляет около  $(300-350) \cdot 10^9$  т/год. Количество кислорода в атмосфере равно  $1,185 \cdot 10^{15}$  т. При выделении кислорода  $(280 - 300) \cdot 10^9$  т/год указанное количество может быть удвоено примерно за 4000 лет. Но этого не происходит, так как на протяжении года разными путями разлагается такое количество органического вещества, которое почти равно образованному при фотосинтезе, и при этом поглощается почти весь выделившийся кислород. Тем не менее, благодаря сохранению части органического вещества свободный кислород постепенно накапливался в атмосфере. Второй миграционный цикл свободного кислорода связан с массообменом в системе тро-

посфера – природные воды. В 1 л воды растворено от 2 до 8 см<sup>3</sup> O<sub>2</sub>. Следовательно, в воде океана находится от 3·10<sup>9</sup> до 10·10<sup>9</sup> м<sup>3</sup> растворённого кислорода. Холодная вода высоких широт поглощает кислород; поступая с океаническими течениями в тропический пояс, она выделяет O<sub>2</sub>. Поглощение и выделение кислорода происходят также при смене тёплых и холодных сезонов года. В годовой массообмен между атмосферой и океаном вовлекается около 0,5% атмосферного кислорода (5900·10<sup>9</sup> т), это почти в 20 раз больше биогенного продуцирования кислорода.

Водород – один из двух химических элементов, которые благодаря ничтожной массе их ядер могут диссипировать: уходить из поля тяготения Земли. Транзит водорода и гелия проходит через биосферу. Водород под влиянием жизнедеятельности организмов вступает в соединения и вследствие этого задерживается в биосфере. Водород в свободной (молекулярной) форме и в составе химических соединений активно дегазируется из мантии. Значительные массы H<sub>2</sub> поступают на поверхность Земли при вулканических извержениях и поствулканических процессах, выделяются в результате жизнедеятельности водородных бактерий, участвующих в преобразовании органического вещества в анаэробных условиях, образуются при разложении воды при электрохимических реакциях и под воздействием продуктов распада радиоактивных элементов. В то же время в атмосфере находится всего 0,18·10<sup>9</sup> т H<sub>2</sub> благодаря его диссипации. Накопление кислорода в атмосфере связано с удалением из неё водорода. На ранних стадиях истории Земли ведущую роль в удалении водорода, образывавшегося при фотолизе паров воды, играл процесс диссипации. В дальнейшем все большее значение стало приобретать удаление водорода путём связывания его в составе органического вещества. Для создания массы растительности Мировой суши, существовавшей до вмешательства человека, было расщеплено примерно 1,8·10<sup>12</sup> т воды и соответственно связано 0,3·10<sup>12</sup> т водорода. В настоящее время в процессе фотосинтеза природной растительностью на суше и фотосинтетиками в океане на про-

тяжении года расщепляется около  $200 \cdot 10^9$  т воды и в органическом веществе связывается примерно  $(30 - 35) \cdot 10^9$  т водорода. Как было показано на примере углерода, многократно повторяющиеся циклические процессы миграции химических элементов способствуют дифференциации изотопов. Организмы не только непосредственно закрепляют водород в биосфере, связывая его в органическом веществе, но также оказывают сильное влияние на фиксацию водорода минеральным веществом педосферы. В почвенных растворах в результате диссоциации кислотных продуктов метаболизма образуется ион  $H^+$ , который связывается водородными связями с молекулой воды, образуя гидроксоний  $H_3O^+$ . Трансформация кристаллохимических структур гипогенных силикатов в структуры минералов глини возможна лишь с поглощением гидроксония.

### **Биогеохимический цикл кислорода**

Кислород – самый распространённый элемент земной коры, его кларк равен 47. Ещё выше концентрация кислорода в мировом океане – 85,7% и в живом веществе – 70%. Благодаря исключительно высокой химической активности кислород играет особо важную роль в земной коре. Он определяет окислительно-восстановительные и щелочно-кислотные условия растворов и расплавов, формирование геохимических объектов. Для него характерна как ионная, так и не ионная форма миграции в растворах. Эволюция процессов на Земном шаре сопровождается увеличением содержания кислорода. Наличие органического вещества установлено в древних осадочных отложениях, возраст которых исчисляется в 3,8 млрд лет. Следовательно, выделение кислорода в процессе фотосинтеза продолжается миллиарды лет. В настоящее время количество кислорода в атмосфере равно  $1,185 \cdot 10^{15}$  тонн. Масштабы продуцирования кислорода таковы, что указанное количество при сохранении скорости могло бы быть удвоено за 4000 лет. Но этого не происходит, так как в течение года различными путями разлагается.

Примерно такое же количество органического вещества, какое образуется в ходе фотосинтеза и при этом поглощается практически весь выделенный кислород. Тем не менее, благодаря сохранению части органического вещества, свободный кислород постепенно накапливается в атмосфере. Реакции образования кислорода в земной коре весьма разнообразны, но главная «фабрика» по его производству – зелёные растения. В процессе фотосинтеза высвобождается основная масса свободного кислорода, обладающего чрезвычайно высокой химической активностью. Второй миграционный цикл свободного кислорода связан с массообменом в системе природные воды – тропосфера. В воде океана находится от  $3 \cdot 10^9$  до  $10 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> растворённого кислорода. Холодная вода высоких широт поглощает кислород, поступая с океаническими течениями в тропический пояс, она выделяет кислород. Поглощение и выделение кислорода происходит и при смене сезонов года, сопровождающихся изменением температур воды. Кислород расходуется в огромных количествах окислительных реакций, большинство из которых имеет биохимическую природу. В этих реакциях высвобождается энергия, поглощенная в ходе фотосинтеза. Таким образом, общая схема круговорота кислорода в биосфере складывается из двух основных ветвей: образование свободного кислорода при фотосинтезе, поглощение кислорода в окислительных реакциях. В биогеохимическом круговороте можно выделить потоки кислорода, чётко выраженные между отдельными компонентами биосферы (рис. 19).



ническое вещество в анаэробных условиях. Организмы закрепляют водород в биосфере планеты, связывая его не только в органическом веществе, но и участвуя в фиксации водорода минеральным веществом почвы. Это становится возможным в результате диссоциации кислотных продуктов метаболизма с высвобождением иона  $H^+$ , который с молекулой воды посредством водородных связей образует ион гидроксония ( $H_3O^+$ ). При поглощении иона гидроксония гипогенными силикатами происходит трансформация их кристаллохимических структур в глинистые минералы.

Таким образом, интенсивность продуцирования кислотных продуктов метаболизма, является важным фактором гипергенного преобразования кристаллических горных пород и образования коры выветривания.

Из циклических процессов в поверхностных оболочках Земли, один из наиболее мощных – круговорот воды: ежегодно через атмосферу проходит более 520 тыс.  $m^3$  влаги. В процессе круговорота воды в биосфере происходит фракционирование изотопов кислорода и водорода. Пары воды при испарении обогащаются лёгкими изотопами, поэтому атмосферные осадки, поверхностные и грунтовые воды содержат больше лёгких изотопов. Океанические воды характеризуются устойчивым изотопным составом. Материковые льды Арктики и Антарктиды содержат наиболее лёгкую воду, так как активность разделения изотопов кислорода усиливается при понижении температуры.

Биогеохимия рассматривает не отдельные особи или виды организмов, а всю их совокупность, так называемое живое вещество, выраженное в массе, химическом составе и энергии, которую оно привносит в биогеохимические процессы. Живое вещество неравномерно распределяется по поверхности Земли. Известны области его скопления, или сгущения, например планктона в океанах и морях, лесов на суше, гумуса, торфяника в почвах; плотность населения неравномерна и в значительной степени зависит от почвенно климатических зон. Растительные организмы составляют главную массу живого вещества (около 1% падающей солнечной энер-



гии поглощается растениями, что эквивалентно 1014 кг углерода: это примерно соответствует массе живого вещества на земном шаре). Одна масса живого вещества не даёт правильного представления об интенсивности участия его в биогеохимических процессах. Огромное значение имеет скорость размножения организмов, т. е. общая продукция органического вещества, образуемая за определённое время. Особенно это относится к низшим организмам - бактериям, грибкам, водорослям и др., обладающим высокой скоростью размножения.

В состав живого вещества входят все известные химические элементы и их изотопы. Но основную массу любого организма составляет ограниченное число известных химических элементов, которые в условиях биосферы образуют легкоподвижные и легкорастворимые соединения, например газы  $\text{CO}_2$  или  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , ионы  $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , а также тяжёлые металлы, образующие комплексные ионы. Химические элементы, не образующие в биосфере растворимых и легкоподвижных соединений (Ti, Zr, Th), несмотря на их заметное количество в породах земной коры, в организмах содержатся лишь в очень малых количествах. Организмы не повторяют полностью химического состава среды, а активно выбирают те или иные соединения. Нередко тот или иной вид организмов накапливает определённый химический элемент, т. е. химический состав организмов является характерным признаком для определённого вида.

Таким образом, организмы выполняют геохимическую функцию, участвуя в биогенной миграции того или иного химического элемента. Например, кальций издавна использовался организмами для образования скелета в виде  $\text{CaCO}_3$ . Эта очень древняя геохимическая функция была характерна для многих низших организмов. Позже, наряду со скелетом из  $\text{CaCO}_3$ , появились организмы со скелетом из фосфата кальция (в первую очередь среди брахиопод), который утвердился и у всех высших организмов. У многих древних низших организмов (включительно до морских губок) встречается также скелет из кремниевой кислоты. Это указывает на

направление эволюции организмов. Участие живого вещества в биогеохимических процессах проявляется прямо либо косвенно. Так, после гибели организмов живое вещество непосредственно участвует в образовании диатомита, известняков, углей, нефтей и др. Зелёные растения в результате фотосинтетической деятельности создают всю массу кислорода современной атмосферы Земли. Морские водоросли концентрируют значительные количества йода; после их гибели в морских илах происходят захоронение и процесс превращения органического детрита в вещество нефти. В результате выпрессовывания из захороненных илов жидкой нефти в пористые породы (пески и другие коллекторы) выдавливаются иловые воды, содержащие большое количество йода.

Ещё более разнообразно косвенное влияние организмов и продуктов их жизнедеятельности на геохимические процессы. Микроорганизмы принимают участие, например, в окислении соединений железа, марганца и других элементов. Это ведёт к выпадению их из природных растворов и отложению в осадках. Микроорганизмы восстанавливают сульфаты, образуя биогенные месторождения серы и т. д. Под влиянием живого вещества изменяются во времени геохимические процессы. Так, когда на Земле ещё не было биосферы, уран, германий и ванадий концентрировались в осадочных железных рудах, а с её появлением уран, ванадий и германий накапливаются и в некоторых ископаемых углях и битумах. Исключительную роль живое вещество наряду с  $H_2O$  и  $CO_2$  играет в процессах выветривания и образования осадочных пород (биогенных осадков в морях и океанах). Представляет интерес участие организмов в процессах разделения близких по свойствам пар химических элементов, например Si/Ge, Fe/Mn, K/Na, Ca/Sr и т. д.

В свою очередь среда обитания отражается на составе организмов. В пределах так называемых биогеохимических провинций возникают формы организмов, накапливающие иногда значительные количества химического элемента, т. е. имеет место интенсивная биогенная миграция. Извест-

но также, что организмы участвуют в нарушении изотопного состава ряда лёгких химических элементов (углерода, кислорода, серы). Как правило, в биогенных процессах организмами поглощаются преимущественно более лёгкие изотопы. Огромную биогеохимическую роль выполняет в результате своей геологической деятельности человек. Ежегодно из недр Земли извлекается до нескольких десятков т горной породы на душу населения. Человек влияет на химический и изотопный состав атмосферы, биосферы и земной коры, и это влияние с каждым столетием непрерывно растёт.

### **Биогеохимический цикл азота**

Азот и его соединения играют в жизни биосферы и всей планеты, в формировании почвенного покрова и плодородия экосистем такую же важную и незаменимую роль, как и углерод. Исключительное значение азот и его соединения играют для жизни растений. Биофильность азота сравнима с биофильностью углерода: индекс биогенного обогащения почв по отношению к земной коре, а растений по отношению к почвам составляет для углерода 100 и 1000 соответственно. Из других биофильных элементов только фосфор характеризуется таким же высоким индексом концентрации в биомассе.

Около 80% запасов азота сосредоточено в атмосфере планеты, что связано с направлением биогеохимических потоков соединений азота, образующихся при денитрификации. Первично азот в атмосфере был, вероятно, результатом процессов дегазации верхней мантии, магмы и вулканических выделений. Электрические и фотохимические реакции в высоких слоях атмосферы приводят к заметному поступлению соединений азота на сушу и в океан с атмосферными осадками (3–8 кг/ Га аммонийного азота в год и 1,5–6,0 кг/ Га нитратного). Этот азот включается в общий биогеохимический поток растворённых соединений, мигрирующих с водными массами, участвуют в почвообразовательных процессах и в формировании биомассы растений.

Общая направленность биогеохимического круговорота азота на планете – аккумуляция в молекулярной форме азота (рис. 20).

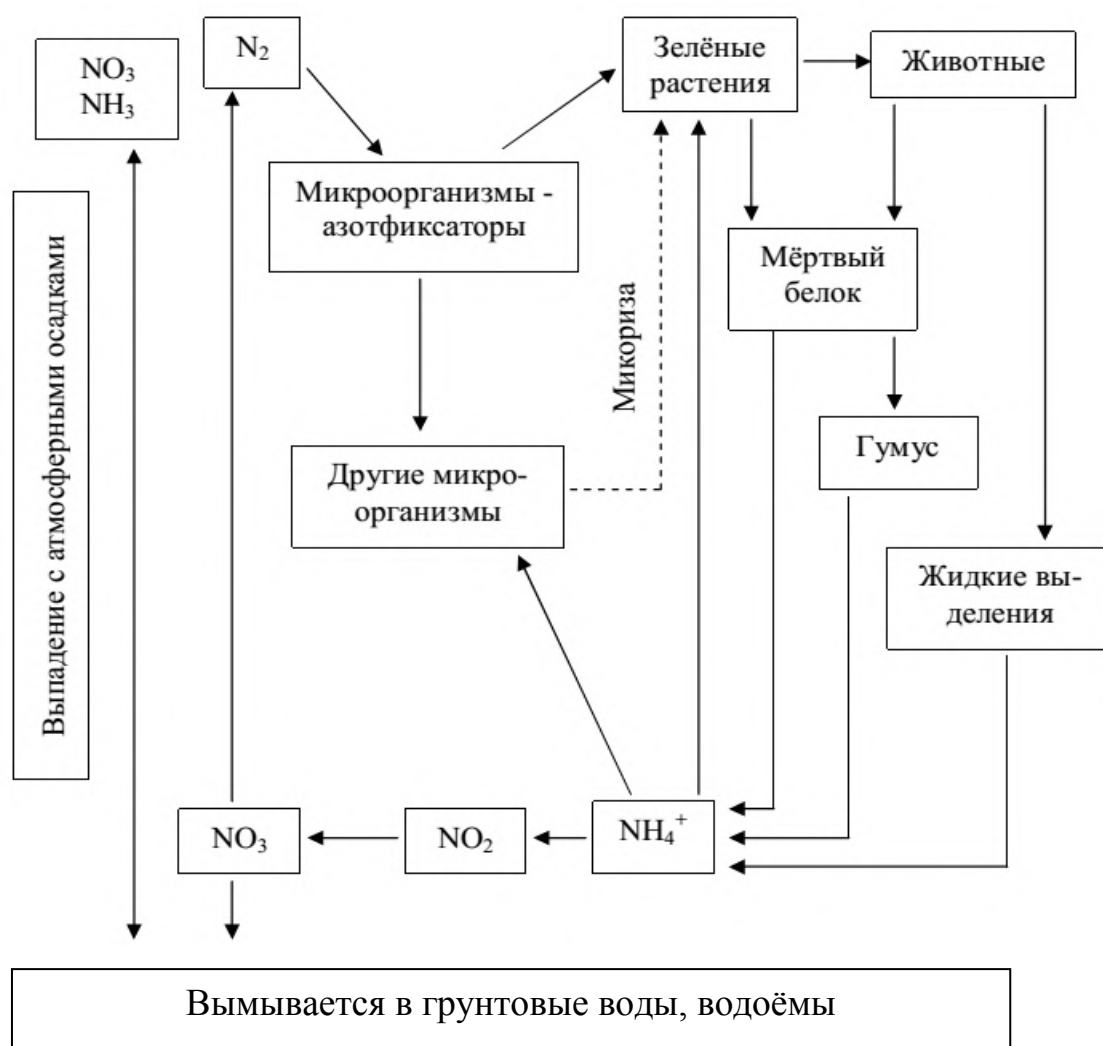


Рис. 20. Биогеохимический круговорот азота

Огромное количество азота содержится в биосфере в связанном виде: в органическом веществе почвенного покрова ( $1,5 \cdot 10^{11}$  т), в биомассе растений ( $1,1 \cdot 10^9$  т), в биомассе животных ( $6,1 \cdot 10^7$  т). В больших количествах азот содержится в биогенных ископаемых.

Вместе с тем, вследствие высокой растворимости солей азотной кислоты и солей аммония, азота в почве мало и почти всегда недостаточно для питания растений. Поэтому потребность растений в азоте всегда велика и почву ежегодно удобряют азотными удобрениями, что значительно по-

вышает урожаи культурных растений. Поступление за счёт азотных удобрений составляет 30% от общих поступлений азота на сушу и в океан.

Это часто приводит к загрязнению среды и тяжёлым заболеваниям животных человека. Особенно велики потери нитратных форм азота, так как он не сорбируется почвой, легко вымывается водами, восстанавливается в газообразные формы и до 20–40% его теряется для питания растений. Всё это сказывается на биогеохимическом круговороте азота.

Тревожным нарушением цикла азота является сильное увеличение отходов животноводства, отходов и стоков больших городов, поступление в атмосферу  $\text{NH}_3$  и оксидов азота при сжигании угля нефти и мазута. Опасно проникновение оксидов азота в стратосферу (ядерные взрывы, выхлопы сверхзвуковых самолётов, ракет), так как это может быть причиной разрушения озонового слоя.

Таким образом, для удовлетворения нужд человечества потребность в азотных удобрениях должна быть компенсирована как можно быстрее, но культура их применения должна стать более высокой.

### **Биогеохимический цикл серы**

Сера определяет важные биохимические процессы живой клетки, является компонентом питания растений и микрофлоры. Соединения серы участвуют в формировании химического состава почв, в значительных количествах находятся в подземных водах, а это, в свою очередь, играет решающую роль в процессах засоления почв.

Содержание серы в земной коре составляет  $4,7 \cdot 10^{-2}\%$ , в почве –  $8,5 \cdot 10^{-2}\%$ , в океане –  $8,8 \cdot 10^{-2}\%$ . Однако в засоленных почвах содержание серы может достигать значений, измеряемых целыми процентами. Сера имеет ряд изотопов, среди которых в природных соединениях наиболее распространены  $\text{S}^{32}$  (95,06%)  $\text{S}^{34}$  (4,18%). В результате биогеохимических и биологических процессов происходит изменение в соотношении этих изотопов в сторону увеличения лёгкого изотопа в верхних гумусовых го-

ризонтах почв. Это свидетельствует в пользу того, что интенсивный биологический круговорот серы в почвах охватывает только её верхние слои.

Почвенно-грунтовые и подземные воды также принимают участие в биогеохимическом цикле серы. На это указывает сходство изотопного состава серы подземных, почвенно-грунтовых вод и воднорастворимых сульфатов из горизонта сульфатно-содовых солончаков и свидетельствует об участии серы подземных вод в формировании сульфатно-содового засоления. Таким образом, в засоленных почвах биогеохимический круговорот серы не ограничивается верхними гумусовыми горизонтами, а охватывает значительную толщу: 5–10 и более метров.

Промышленные процессы и перевозки серных отходов уносят в атмосферу большое количество серы, что иногда служит причиной нарушений в окружающей среде. Присутствие в воздухе двуокиси серы поражает как высшие растения, так и лишайники, причём эпифитные лишайники служат индикаторами повышенной концентрации серы в воздухе, так как их чувствительность к появлению  $\text{SO}_2$  в воздухе значительно выше, чем у других представителей растительного мира. Связано это с тем, что лишайники поглощают атмосферную влагу всем слоевищем, поэтому при достижении предельно допустимой концентрации серы в организме, особь погибает.

Биогеохимический цикл серы состоит из четырёх стадий:

1) Усвоение минеральных соединений серы живыми организмами (растениями и бактериями) и включение серы в состав белков и аминокислот.

2) Превращение органической серы живыми организмами (животными и бактериями) в конечный продукт  $\text{H}_2\text{S}$ .

3) Окисление минеральной серы живыми организмами (серобактериями, тионовыми бактериями) в процессе сульфатредукции. На этой стадии происходит окисление сероводорода, элементарной серы, её тио- и тетра- соединений.

4) Восстановление минеральной серы живыми организмами (бактериями) в процессе десульфификации до  $\text{H}_2\text{S}$ .

Таким образом, важнейшим звеном всего биохимического цикла серы в биосфере является биогенное образование сероводорода. Антропогенное поступление серы в биосферу существенно изменяет круговорот этого элемента, так приход серы в биосферу превышает её расход, как результат – на современном этапе в биосфере, в целом, наблюдается приход нециклической серы.

### Биогеохимический цикл фосфора

Круговорот фосфора в природе значительно отличается от биогеохимических циклов углерода, кислорода, азота и серы, так как газовая форма соединений фосфора (например,  $\text{PH}_3$ ) практически не участвует в биогеохимическом цикле фосфора. Значение фосфора в жизни клетки и организмов очень велико: соединения фосфора входят в состав тканей мозга, скелета, панцирей. Поэтому главная роль в биогеохимическом цикле фосфора принадлежит живому веществу и таким процессам, как питание, размножение, передвижение. Для растений наиболее доступным является фосфор неспецифических органических соединений и гумуса, и именно он играет главную роль в малом (локальном) биологическом цикле фосфора (рис. 21).

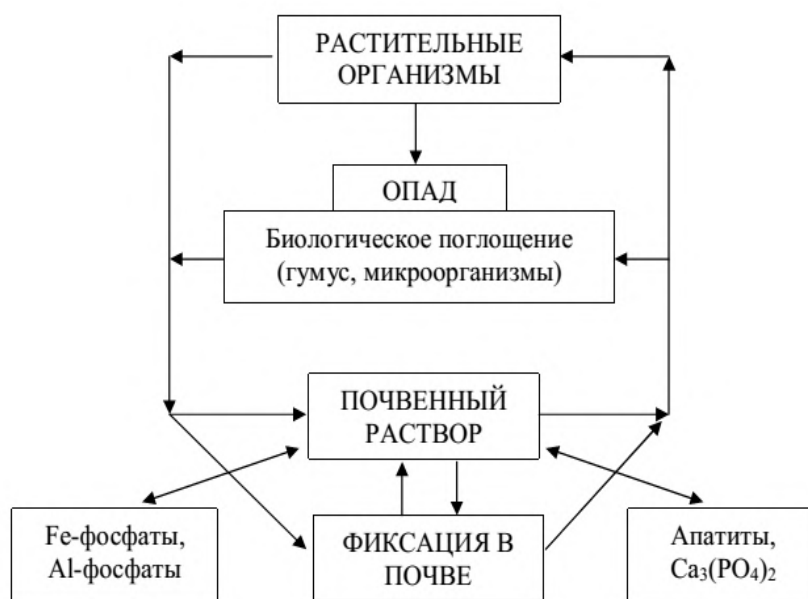


Рис. 21. Схема локального (малого) биологического цикла фосфора

В почвах и породах широко распространено явление фиксации фосфора. Фиксаторами фосфора являются гидрооксиды железа, марганца, алюминия, глинистые минералы (особенно группы каолинита). Однако фиксированный фосфор может на 40–50% быть десорбирован и использован растениями.

Это зависит от условий. Повышенная кислотность среды, образование  $\text{H}_2\text{CO}_3$  способствует десорбции фосфора и усилению миграции фосфорных соединений. В восстановительной среде образуются соединения фосфора с двухвалентным железом, и это тоже способствует выносу фосфора из почвы. Миграция фосфора возможна и за счёт таких явлений, как водная и ветровая эрозия. Поэтому биогеохимический цикл фосфора значительно менее замкнут и менее обратим, чем циклы углерода и азота, а загрязнение среды фосфором особенно чувствительно (рис. 22).

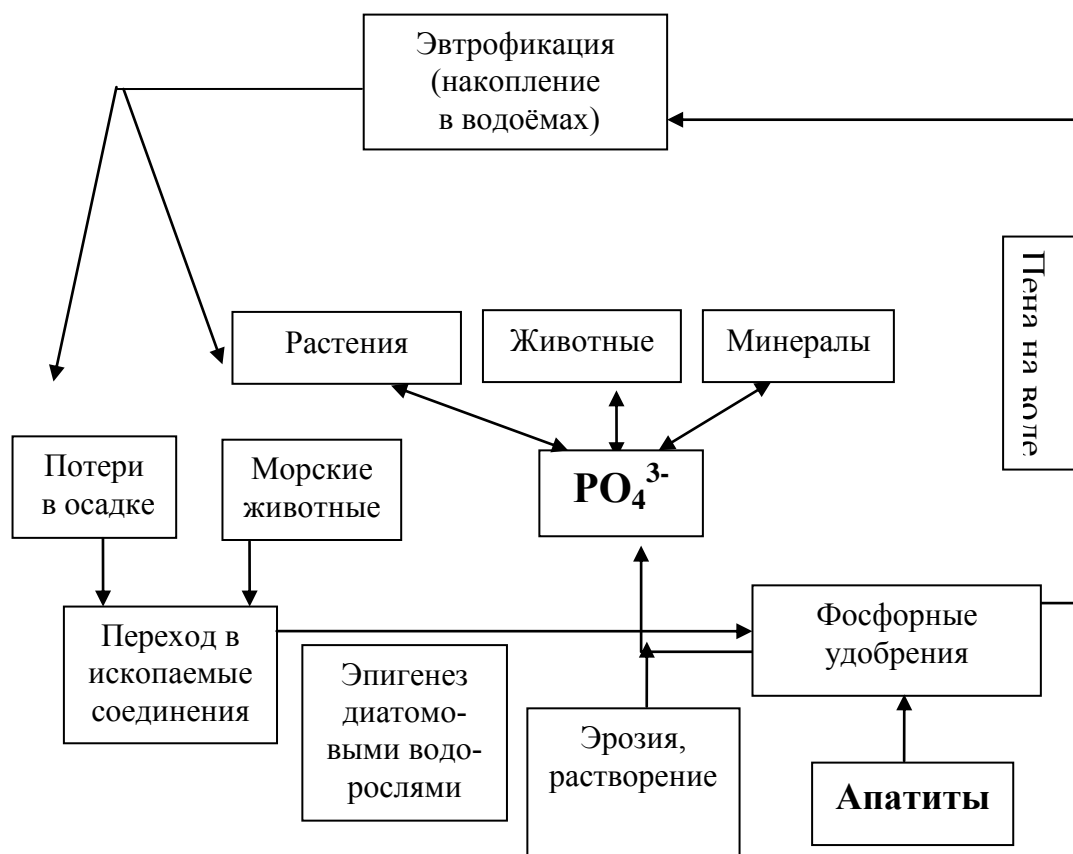


Рис. 22. Глобальный цикл фосфора в биосфере

Фосфорные удобрения являются важным и необходимым звеном в получении урожаев сельскохозяйственных культур, в то же время соеди-



нения фосфатов в последнее время являются серьёзным фактором загрязнения речных вод и озёр. В последние 50–75 лет общая картина распределения и миграции фосфора в биосфере резко нарушена человеком по следующим причинам:

1. Мобилизация фосфора из агроруд и шлаков, производство и применение фосфорных удобрений.
2. Производство многочисленных фосфорсодержащих препаратов и их использование в быту.
3. Производство фосфорсодержащих ресурсов продовольствия и кормов.
4. Развитие рыбного и китобойного промыслов, добыча морских моллюсков, водорослей влечёт за собой перераспределение фосфора с океана на сушу.

В итоге наблюдается процесс фосфотизации суши. Процесс этот проявляется неравномерно. Увеличивается содержание фосфора в окружающей среде больших городов, промышленных центров, и, наоборот, страны, экспортирующие органические продукты и не применяющие фосфорные удобрения, теряют запасы фосфора в своих почвах.

### **Биогеохимический цикл кремния**

Кремний – второй по распространённости (после кислорода) в земной коре химический элемент. Его кларки: в земной коре – 29,5, в почве – 33, в океане –  $5 \cdot 10^{-5}$ . Кварц и силикаты составляют 87% всей литосферы, однако, несмотря на широкую распространённость в природе, биогеохимические циклы кремния, особенно континентальный, изучены недостаточно.

Содержание кремнезёма в водах современных рек и озёр составляет 10–30 мг/л, в морской воде – 0,5–3 мг/л, то есть он в природных водах находится в виде резко ненасыщенного раствора. Это связано с тем, что кремний из воды непрерывно поглощается живыми организмами, из которого у них образуются твёрдые части скелета. Живое вещество извлекает кремний из природных вод и почв для питания и функционирования биохимических процессов, высвобождая его затем с экскрементами и при от-

мирании. Эта ветвь круговорота  $\text{SiO}_2$  относительно статична, необратима, так как  $\text{SiO}_2$  таким путём выводится из биогеохимического круговорота (рис. 23).

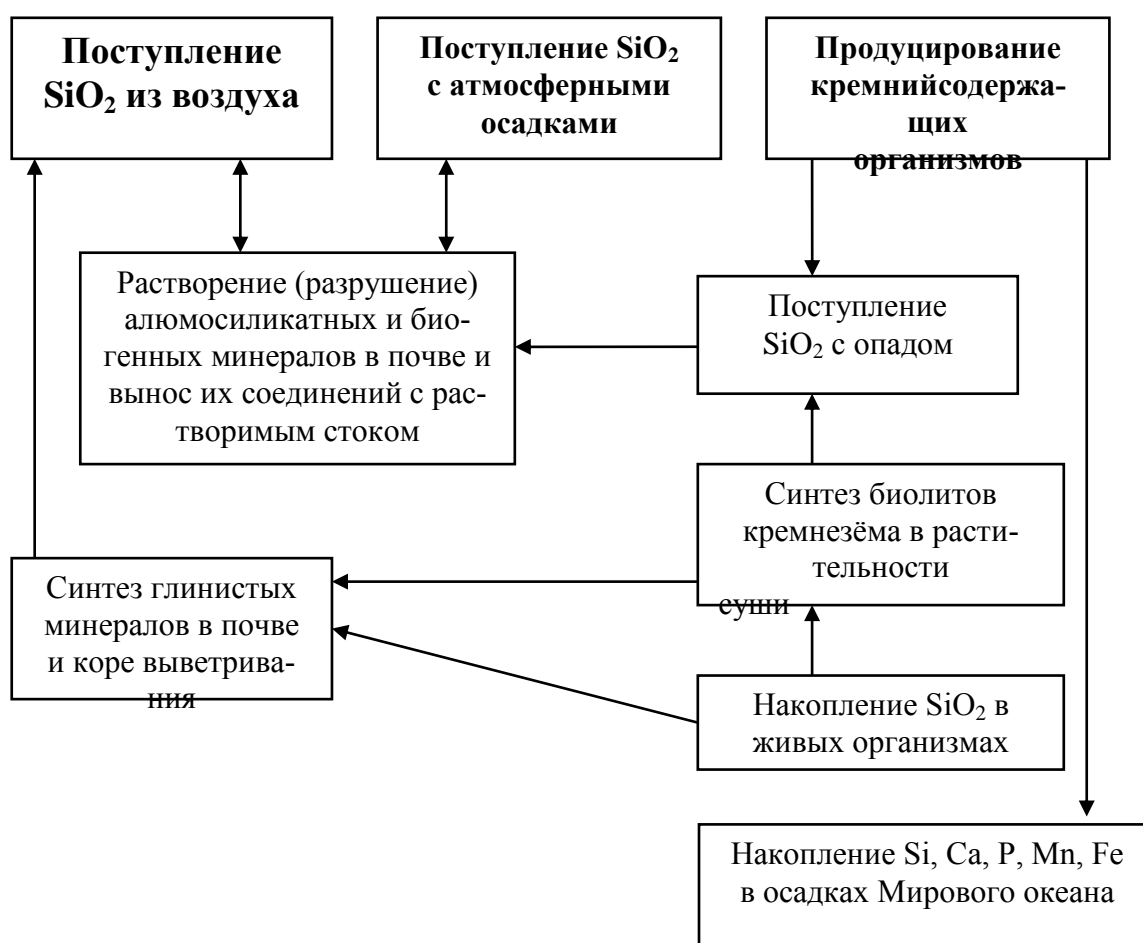


Рис. 23. Биогеохимический цикл кремнезёма

Важнее другая, более динамичная ветвь круговорота, которая и является цикличной. Это тот  $\text{SiO}_2$ , который многократно в году переходит из организмов фитопланктона в окружающую среду и обратно. При этих микроциклических переходах реально проявляется наиболее важная функция водного биогеохимического цикла  $\text{SiO}_2$ . Это – функция энерго- и масс-переноса вещества из поверхностных в глубинные зоны мирового океана, так как вместе с Si концентрируются и переносятся в виде труднорастворимых соединений многие элементы. Вторая особенность биогеохимического цикла кремния в Мировом океане – его неразрывная связь с углеродом.

Таким образом, в гидросфере планеты существует гидробиогеохимический цикл миграции кремнезёма. Он – часть глобального цикла, но, при этом, является достаточно самостоятельным.

### **Биогеохимический цикл кальция**

Общее содержание кальция в литосфере составляет 2,96%. Кальций активно вовлечён в процессы геологического круговорота веществ, в виду высокой неустойчивости кальциевых силикатов в зоне гипергенеза и при выветривании горных пород они разрушаются в первую очередь.

Кальций обладает высокой миграционной способностью, которая определяется особенностями климата. В гумидных условиях при активном развитии в почвах процессов выщелачивания, он выносится в реки, озёра, моря, где активно потребляется морскими организмами и накапливается после их отмирания в виде карбонатных отложений. В аридном и супераридном климате кальций выпадает из растворов в виде карбонатов, формируя мощные толщи карбонатных пород и иллювиально-карбонатных горизонтов в почве.

Кальций играет важную роль в процессах почвообразования, он входит в состав почвенно-поглощающего комплекса, участвует в обменных реакциях почвенного раствора, обуславливая в высокую буферную способность почв в кислом интервале среды. Кальций активно участвует в процессе осаждения полуторных окислов, марганца, нередко образуя конкреционные образования совместно с этими элементами и кремнезёмом.

В кислых почвах, характеризующихся выщелачиванием, наблюдается явление биогенного накопления кальция в подстилке и аккумулятивных поверхностных горизонтах. Обусловлено это важной ролью кальция в растительных организмах – кальций входит в группу элементов биофилов, без которых существование живых организмов невозможно.

Размеры вовлечения кальция в биологический круговорот различаются в разных природных зонах. Так, лесостепной растительностью еже-

годно потребляется 100 кг/га кальция, а тундровой – 8,6 кг/га, самое большое количество кальция потребляется разнотравно-типчаковой растительностью степей.

Посчитано, что в доисторический период его потребление с приростом составляло 137 кг/га в год. Весь этот кальций возвращался в почву с растительным опадом, то есть малый биологический круговорот кальция носил почти замкнутый характер. В настоящее время ситуация коренным образом изменилась, растительность полей выносит ежегодно только 30–50 кг/га кальция, но большая его часть отчуждается с урожаем (рис. 24).

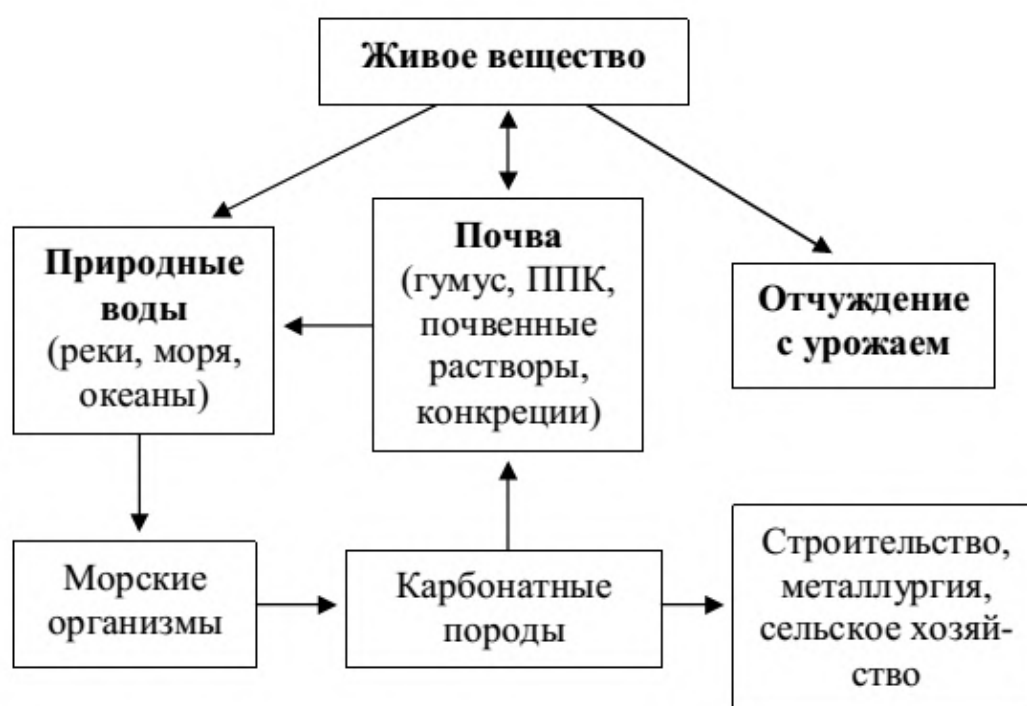


Рис. 24. Биогеохимический цикл кальция

В настоящее время происходит нарушение круговорота кальция не только за счёт отчуждения его с сельскохозяйственной продукцией, но и за счёт использования карбонатных пород в строительстве, сельском хозяйстве (известкование почв), металлургической промышленности.

### Биогеохимический цикл магния

Кларк магния в земной коре 1,87%, но распределение его очень неоднородно; так в ультраосновных породах его концентрация составляет

25,9%, в основных – 4,5%, в кислых – 0,3%. По размеру ион  $Mg^{2+}$  такой же, как у никеля, близок к железу и кобальту. Поэтому наблюдается изоморфизм  $Mg^{2+}$  с  $Fe^{2+}$  и  $Ni^{2+}$ , он входит в состав оливинов и пироксенов.

В то же время магний накапливается в океане и соляных озёрах и по миграционной способности он приближается к таким элементам, как натрий и калий. Обусловлено это хорошей растворимостью хлоридов и сульфатов магния. В отличие от других щелочных и щелочно-земельных элементов благодаря малому размеру ионного радиуса он легко входит в кристаллическую решётку глинистых минералов, образуя магнезиальные силикаты и алюмосиликаты.

Магний – биофильный элемент. Его кларк в живом веществе 0,02. Магний входит в состав хлорофилла из старых листьев к молодым. Перемещение пигментов идёт по жилкам листа, поэтому они долгое время остаются зелёными, в то время как межжилковые участки листа желтеют. Известны болезни живых организмов, связанные с нарушением магниевого обмена, тем не менее, биофильность магния ниже, чем у калия и кальция.

В гумидных ландшафтах магний выщелачивается из почв, хотя по сравнению с кальцием его подвижность ниже. Обусловлено это наличием нескольких биохимических барьеров. Во-первых – он активно используется живым веществом; во-вторых, так же как и калий входит в состав кристаллических решёток вторичных силикатов, и, наконец, поглощается сорбционным путём глинистыми коллоидами и гумусом. В то же время значительная часть магния выносится с жидким стоком, и в грунтовых и речных водах магний стоит на втором месте после кальция.

В аридных ландшафтах на распределение магния влияет высокая растворимость его хлоридов и сульфатов. В результате наблюдается накопление этих солей на испарительных барьерах и затем – формирование солончаков.

Кларк магния в океане 0,13%. Его талассофильность (0,07) значительно выше, чем у кальция, бария, стронция, но ниже, чем у натрия.

В океан магний попадает из выветривающихся горных пород, и масштабы его поступления в прошлом были значительны.

Технофильность магния значительно ниже, чем у кальция и натрия. До начала 20-го столетия использовались только соединения магния – доломит, магнезит. В последнее время в промышленности стали применять сплавы, содержащие металлический магний, но говорить о влиянии техногенеза на биохимический цикл магния не приходится. Только в обеднённых магнием ландшафтах наблюдается некоторое его накопление за счёт внесения магнезиевого удобрения, известкования с помощью доломита.

В целом для биогеохимических циклов щелочных и щелочноземельных и щелочноземельных металлов характерна незамкнутость глобальных годовых циклов. В результате наблюдается аккумуляция этих элементов в осадках Мирового океана: до 99% Ca, 98% K, свыше 60% Na сосредоточено в осадочных породах.

### **Глобальный цикл натрия**

Натрий – один из главных элементов, аккумулярованных в земной коре в процессе её вылавливания. Основная масса этого элемента выпадает на последних стадиях магматической кристаллизации и частично остаётся в постмагматических растворах. Концентрация  $\text{Na}_2\text{O}$  в «гранитном» слое земной коры 2, 71%, в осадочной оболочке – 1,5%. Масса натрия в гранитном слое равна  $165 \cdot 10^{15}$  т, в осадочной оболочке –  $26,7 \cdot 10^{15}$  т (табл. 20).

Таблица 20

Распределение масс натрия и хлора в биосфере,  $1 \cdot 10^9$  т

Главные резервуары	Натрий	Хлор
<i>Живое вещество:</i>		
Мировой суши	3,0	5,0
Мирового океана	0,09	0,03
Педосфера (органические остатки и гумус)	0,3	0,3
<i>Океан</i> <i>(растворенные ионы)</i>	1 4740 000	26 500 000
<i>Земная кора:</i>		
– осадочная оболочка	26 700 000	6 500 000
– гранитный слой	165 500 000	1 700 000

Освобождаясь из кристаллического вещества земной коры, натрий в форме хорошо растворимого катиона переносится с континентальным стоком в океан, в водах которого содержится  $14,7 \cdot 10^{15}$  т этого элемента.

Главный миграционный поток натрия в биосфере связан с водным стоком с суши, с которым выносятся  $0,185 \cdot 10^9$  т ионов этого элемента. Одновременно натрий выносятся в составе твёрдого стока, находясь преимущественно в сорбированном состоянии. Принимая среднюю концентрацию натрия во взвесах речного стока равной 4,6 мг/л, можно оценить массу элемента, выносимую в составе взвесей, в  $0,19 \cdot 10^9$  т/год.

В цикле массообмена между поверхностью океана и тропосферой участвует около  $1,3 \cdot 10^9$  т/год водорастворимых форм натрия, между поверхностью суши и тропосферой – примерно  $0,14 \cdot 10^9$  т/год. С воздушными массами морского происхождения на сушу переносится более  $0,1 \cdot 10^9$  т/год растворимых форм натрия. В то же время с поверхности суши в океан выносятся с ветровой пылью примерно  $0,01 \cdot 10^9$  т натрия в сорбированном состоянии.

Преобладание растворимого катиона  $\text{Na}^+$  в биосфере обуславливает присутствие больших масс натрия во всех типах природных вод, в которых он связан эквивалентными соотношениями с анионами  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и отчасти с  $\text{HCO}_3^-$ . В педосфере натрий играет важную роль в процессах катионного

обмена. Высокое содержание натрия в поглощённом комплексе почв способствует диспергации почвенных агрегатов и образованию солонцов.

В организмах соли натрия (главным образом хлориды) имеют важное значение. Хлорид натрия является обязательным компонентом жидких тканей животных (плазмы, крови, лимфы) и клеточного сока растений, играет важную роль в поддержании кислотно-щелочного равновесия, регулирует осмотическое давление и влияет на содержание воды в тканях и др. Из растительных остатков соли натрия легко выщелачиваются, поэтому концентрация натрия в неживом органическом веществе и гумусе педосферы невелика – около 0,01%. Натрий активно сорбируется осадками морей, поэтому в осадочной оболочке содержится его большая масса.

В структуре глобального биологического круговорота натрия ярко проявляется его талассофильность. Живое вещества Земли на протяжении года пропускает через себя около  $4,6 \cdot 10^9$  т натрия, причём на суше в биологический круговорот вовлекается  $0,2 \cdot 10^9$  т, а в океане почти в 20 раз больше.

### **Глобальный цикл хлора**

Хлор – типичный телассофильный элемент. Его распределение в биосфере характеризуется явно выраженной аккумуляцией в воде Мирового океана, в которой в форме растворённых ионов  $\text{Cl}^-$  содержится преобладающая часть массы элемента. Содержание хлора в граничном слое земной коры составляет 0,021%, масса –  $1,7 \cdot 10^{15}$  т. В осадочной оболочке концентрация хлора в 10 раз выше – 0,27%, а масса равна  $6,5 \cdot 10^{15}$  т.

Подобно натрию, среди форм нахождения хлора в биосфере доминируют хорошо растворимые ионы  $\text{Cl}^-$ . Они определяют основные черты глобального цикла массообмена элемента, среди которых главная – исключительно высокая способность к водной миграции. Значительные массы хлора, так же как и натрия, многие миллионы лет мигрируют с поверхности Мировой суши в океан. Вторая особенность глобального геохимического цикла хлора, выраженная еще более сильно, чем в цикле натрия, ак-



тивная миграция в атмосфере в составе аэрозолей и возврат значительной массы элемента на сушу. На протяжении года из океана в атмосферу поступает  $2,4 \cdot 10^9$  т/год (с учетом сухих осадчений), а возвращается с осадками и в форме сухих осадчений  $2,2 \cdot 10^9$  т/год. Разница в  $0,2 \cdot 10^9$  т/год переносится с воздушными массами на сушу и там выпадает. Таким образом, значительная масса СГ циркулирует в системе суша – океан – суша. В химической метеорологии хлор называют циклическим элементом.

В аридных регионах, особенно в пределах бессточных территорий, хлор вместе с натрием и другими галогенными элементами аккумулирует в педосфере и в замкнутых водоёмах. Хлор имеет важное физиологическое значение и содержится в живых организмах в виде соляной кислоты, ее солей, среди которых наиболее распространен хлорид натрия, а также разнообразных хлорорганических соединений. Средняя концентрация хлора в массе живого вещества суши равна 0,2% (сухая масса), в фитомассе океана значительно выше – около 1%. Можно считать, что в живом веществе суши находится  $5 \cdot 10^9$  т, в биомассе фитосинтетиков –  $0,17 \cdot 10^9$  т хлора. Концентрация рассматриваемого элемента в неживом органическом веществе педосферы и гумусе примерно равна 0,01%, следовательно, масса хлора в педосфере составляет около  $0,3 \cdot 10^9$  т.

В биологический круговорот на суше захватывается около  $0,34 \cdot 10^9$  т/год хлора. В морской воде его концентрация значительно выше и он составляет около 3% сухой массы организмов. На протяжении года биота Мирового океана вовлекает в круговорот примерно  $4,4 \cdot 10^9$  т хлора, т.е. на порядок больше, чем на суше.

Как следует из изложенного, в структуре глобальных циклов массообмена натрия и хлора много общего: преобладание хорошо растворимых форм, активная водная миграция с континентов в океан и возвратный атмосферный перенос значительных масс с океана на сушу, ведущая роль обоих элементов в процессе галогенеза. Важной чертой биосферной геохимии рассматриваемых элементов является их сильно выраженная талас-

софилльность, результатом которой является превышение массы биологического круговорота в океане над массой биологического круговорота на суше. Сближает биогеохимию этих элементов важное физиологическое значение их главного химического соединения – хлорида натрия.

Вместе с тем распределение масс хлора и натрия в биосфере принципиально различается. Огромное количество натрия, сосредоточенное в осадочных породах и в океане ( $40,7 \cdot 10^{15}$  т), составляет всего лишь 19,8% массы элемента, содержащейся в исходном гранитном слое земной коры, из которой натрий постепенно извлекался и включался в процессы циклического массообмена. Совершенно иная картина распределения масс хлора. В осадочных породах и в основном резервуаре – океане – хлора почти в 20 раз больше, чем в гранитном слое. Если бы весь огромный гранитный слой был разрушен, то освободившейся при этом массы хлора было бы меньше его массы, находящейся в настоящее время в океане. Очевидно, что источники поступления рассматриваемых элементов в циклы массообмена, происходившие на протяжении геологической истории в биосфере, были разные. Натрий поступал в результате процессов гипергенной мобилизации и выщелачивания из гранитного слоя коры континентов, хлор – благодаря процессам дегазации мантии и выносу вулканических газов. В соответствии с этим выводом целесообразно отдельно рассмотреть особенности глобальных циклов элементов, поступивших в биосферу из указанных источников.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адамович, Т. А. Методы моделирования химических процессов в природных средах и объектах [Электронный ресурс] : учеб. пособие для студентов специальности 04.05.01 «Фундаментальная и прикладная химия», магистров направления 04.04.01 «Химия» / Т. А. Адамович, С. Ю. Огородникова ; ВятГУ, ИнХимЭК, каф. ФХМО. – Киров, 2017.
2. Введение в химию окружающей среды [Текст] = An Introduction to environmental chemistry / Дж. Андруз [и др.] ; пер. с англ. А. Г. Заварзиной ; под ред. Г. А. Заварзина. – Москва : Мир, 1999 – 271 с.
3. Братков, В. В. Геоэкология [Текст] : учеб. пособие / В. В. Братков, Н. И. Овдиенко. – Москва : Высшая школа, 2006. – 271 с. – (Для высших учебных заведений. Охрана окружающей среды).
4. Браун, Т. Химия в центре наук [Текст]. В 2 ч. Ч. 1 / Т. Браун, Г. Ю. Лемей ; пер. с англ. Е. Л. Розенберга. – Москва : Мир, 1983. – 447 с.
5. Бурков, Н. А. Прикладная экология [Текст] : учеб. пособие / Н. А. Бурков. – Киров : Вятка, 2005. – 272 с.
6. Водные ресурсы России и их использование [Текст] : монография / [И. А. Шикломанов и др.] ; под ред. И. А. Шикломанова. – Санкт-Петербург : Изд-во Гос. гидролог. ин-та, 2008. – 598 с.
7. Водный кодекс Российской Федерации [Электронный ресурс] : закон РФ от 03.06.2006 №74-ФЗ : ред. от 29.07.2017 // Российская газета. – 2006. – № 121. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
8. Войткевич, Г. В. Основы геохимии [Текст] : учеб. пособие для студентов геолог. спец. / Г. В. Войткевич, В. В. Закруткин. – Москва : Высшая школа, 1976. – 368 с.
9. Голдовская, Л. Ф. Химия окружающей среды [Текст] : учебник / Л. Ф. Голдовская. – Москва : Мир, 2006. – 296 с.
10. Гусакова, Н. В. Химия окружающей среды [Текст] : учеб. пособие / Н. В. Гусакова. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2004. – 192 с. – (Высшее образование).

11. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды [Текст] : справ. материалы / Т. В. Гусева [и др.]. – Москва : Эколайн, 2000. – 54 с.
12. Зилов, Е. А. Химия окружающей среды [Текст] : учеб. пособие / Е. А. Зилов. – Иркутск : Изд-во Иркутск. гос. ун-та, 2006. – 148 с.
13. Исидоров, В. А. Введение в химическую экотоксикологию [Текст] : учеб. пособие / В. А. Исидоров. – Санкт-Петербург : Химиздат, 1999. – 144 с.
14. Кароль, И. Л. Радиоактивные изотопы и глобальный перенос в атмосфере [Текст] / И. Л. Кароль. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1972. – 366 с.
15. Кондратьев, К. Я. Моделирование глобального круговорота углерода [Текст] / К. Я. Кондратьев, В. Ф. Крапивин. – Москва : Физматлит, 2004. – 336 с.
16. Крайнов, С. Р. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты [Текст] : монография / С. Р. Крайнов, Б. Н. Рыженко, В. М. Швец. – Москва : Наука, 2004. – 677 с.
17. Михайлов, В. Н. Общая гидрология [Текст] : учебник / В. Н. Михайлов, А. Д. Добровольский. – Москва : Высшая школа, 1991. – 368 с.
18. Небел, Б. Наука об окружающей среде [Текст]. В 2 т. Т. 2 / Б. Небел ; пер. с англ. М. В. Зубкова [и др.]. – Москва : Мир, 1993. – 330 с.
19. О состоянии окружающей природной среды Кировской области в 2011 году [Текст] : регион. докл. / под общ. ред. А. В. Албеговой ; сост. Г. В. Акпарисова и [др.]. – Киров : Старая Вятка, 2012. – 185 с.
20. Атмосферный воздух [Текст] : учеб.-метод. пособие / [сост. С. Ю. Огородникова ; под общ. ред. Т. Я. Ашихминой и [др.]]. – Киров : Старая Вятка. – 95 с. – (Серия тематических сборников и DVD-дисков «Экологическая мозаика» ; сб. 2) (Вятка – территория экологии).
21. Водные ресурсы [Текст] : учеб.-метод. пособие / [сост. С. Ю. Огородникова, Н. М. Зимонина ; под общ. ред. Т. Я. Ашихминой и [др.]]. – Киров : Старая Вятка, 2012. – 95 с. – (Серия тематических сборников и DVD-дисков «Экологическая мозаика» ; сб. 3) (Вятка – территория экологии).

22. Основы учения о биосфере [Текст] : учеб.-метод. пособие / сост. В. Б. Голуб, О. П. Негробов, В. А. Соболева. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2012. – 143 с.

23. Петросян, В. С. Химические спутники Земли и химические бумеранги: проблемы химической безопасности [Текст] / В. С. Петросян // Химия в интересах устойчивого развития. – 2011. – № 19. – С. 345-358.

24. Реймерс, Н. Ф. Природопользование [Текст] : словарь-справочник / Н. Ф. Реймерс. – Москва : Мысль, 1990. – 637 с.

25. Задачи и вопросы по химии окружающей среды [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов / Н. П. Тарасова [и др.]. – Москва : Мир, 2007. – 368 с.

26. Тинсли, И. Поведение химических загрязнителей в окружающей среде [Текст] / И. Тинсли ; пер. с англ. Л. А. Мазитова. – Москва : Мир, 1982. – 281 с.

27. Трифионов, К. И. Физико-химические процессы в техносфере [Текст] : учебник / К. И. Трифионов, В. А. Девисилов. – Москва : Форум : Инфра-М, 2007. – 240 с.

28. Ерёмченко, О. З. Учение о биосфере [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов / О. З. Ерёмченко. – Москва : Академия, 2006. – 240 с.

29. Федоров, Л. А. Пестициды – токсический удар по биосфере и человеку [Текст] / Л. А. Федоров, А. В. Яблоков. – Москва : Наука, 1999. – 462 с.

30. Фокина, А. И. Химические основы экотоксикологии [Текст] : учеб. пособие / А. И. Фокина [и др.]. – Киров : Лобань, 2015. – 266 с.

31. Водоподготовка [Текст] : справ. для профессионалов / авт.-сост. Е. А. Хохрякова, Я. Е. Резник ; под ред. С. Е. Беликова. – Москва : Акватерм, 2007. – 240 с.

32. Чибисова, Н. В. Экологическая химия [Текст] : учеб. пособие / Н. В. Чибисова, Е. К. Долгань. – Калининград : Изд-во Калининград. ун-та, 1998. – 113 с.

33. Экскурсии по памятникам природы г. Кирова и области [Текст]. Ч. 2 / [сост. И. М. Зарубина ; под общ. ред. И. М. Зарубиной, В. М. Рябова, Е. В. Рябовой]. – Киров : Кировская областная типография, 2007. – 256 с.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1

### Тестовые задания для студентов

Вариант ответа на каждый вопрос теста может быть только один.

1. Термин «экология» предложил:

- а) Э. Геккель;
- б) В. И. Вернадский;
- в) Ч. Дарвин;
- г) А. Тенсли.

2. Раздел экологии, изучающий закономерности взаимодействия человека и человеческого общества с окружающими природными, социальными, эколого-гигиеническими и другими факторами, называется ...

- а) экологией человека;
- б) природопользованием;
- в) охраной окружающей среды;
- г) антропогенезом.

3. Область знаний и практическая деятельность человека по рациональному использованию природных ресурсов в целях удовлетворения материальных и культурных потребностей общества называется ...

- а) природопользованием;
- б) социологией;
- в) естествознанием;
- г) культурологией.

4. Совокупность геохимических процессов, вызванных горно-технической, инженерно-строительной и сельскохозяйственной деятельностью человека, называется ...

- а) ноогенезом;
- б) урбанизацией;
- в) экоцентризмом;
- г) техногенезом.

5. Что относится к «законам» экологии, которые сформулировал в 1974 году Б. Коммонер?

- а) все должно куда-то деваться;
- б) природа «знает» лучше;
- в) ничто не дается даром;
- г) все связано со всем.
- д) все варианты.

6. Система долговременных наблюдений, оценки, контроля и прогноза состояния окружающей среды и ее отдельных объектов – это ...

- а) экологический мониторинг;
- б) экологическая экспертиза;
- в) экологическое прогнозирование;
- г) экологическое нормирование.

7. Контроль состояния окружающей среды с помощью живых организмов называется ...мониторингом

- а) биосферным;
- б) биологическим;
- в) природно-хозяйственным;
- г) импактным.

8. Изучением источников, реакций, поведением химических веществ в различных средах и действием на них техносферы занимается ...

- а) экология популяций;
- б) экология человека;
- в) химия окружающей среды.

9. Центральным элементом концепции устойчивого развития, согласно Декларации Рио (1992), является:

- а) сохранение природной окружающей среды;
- б) обеспечение экономического роста;
- в) развитие международных отношений;
- г) забота о человеке.

10. Какой из экологических факторов не относится к абиотическим?
- а) вырубка леса;
  - б) климат;
  - в) рельеф;
  - г) магнитное поле.
11. Термин «биосфера» впервые применил в 1875 году ...
- а) Э.Зюсс;
  - б) Ж. Кювье;
  - в) Л. Пастер;
  - г) Т. Мальтус.
12. Ученый, впервые предложивший концепцию биосферы в 1802 году?
- а) Э. Зюсс;
  - б) Л. Пастер;
  - в) Т. Мальтус;
  - г) Ж. Б. Ламарк.
13. Верхняя часть литосферы, населенная геобионтами и входящая в биосферу, называется ...
- а) аэробiosферой;
  - б) гидробiosферой;
  - в) геобiosферой.
14. Тропобiosфера – слой от вершин деревьев до высоты кучевых облаков, постоянно населенный живыми организмами простирается до высоты ...
- а) 5–6 км;
  - б) 10–15 км;
  - в) 20–25 км; г
  - г) 2–3 км.
15. Согласно учению Вернадского, верхняя граница биосферы обусловлена ...
- а) снижением температуры с высотой;
  - б) действием инфракрасного излучения;



- в) концентрацией кислорода в воздухе;
  - г) действием жесткого ультрафиолетового излучения.
16. Среднее содержание белков в живых организмах составляет ...
- а) 25–40%;
  - б) 10–15%;
  - в) 1–2%;
  - г) 2–5%.
17. Слой гидробиосферы куда не проникает солнечный свет это ...
- а) дисфотосфера;
  - б) афотосфера;
  - в) фотосфера.
18. Как называется геохимическая функция живого вещества, заключающаяся в связывании солнечной энергии и последующем рассеянии ее при потреблении и минерализации органического вещества?
- а) окислительно-восстановительная;
  - б) концентрационная;
  - в) энергетическая;
  - г) транспортная.
19. Как называются процессы, которые происходят в биогеоценозах под влиянием внутренней энергии Земли?
- а) экзогенные;
  - б) эндогенные;
  - в) биогеохимические.
20. Какой тип брожения является аэробным процессом?
- а) уксуснокислое;
  - б) спиртовое;
  - в) молочнокислое;
  - г) маслянокислое.

21. Как называлась искусственная модель биосферы созданная в 1991-1994 годах?

- а) «Ноосфера»;
- б) «Биосфера»;
- в) «Биосфера-2».

22. Как называется гипотеза о том, что жизнь на Землю была занесена из космоса, и прижилась здесь, после того как на Земле сложились благоприятные для этого условия?

- а) панспермии;
- б) стационарного состояния;
- в) креационизма;
- г) абиогенеза.

23. Сфера разума, высшая стадия развития биосферы, когда разумная человеческая деятельность становится главным, определяющим фактором ее развития, называется ...

- а) техносферой;
- б) антропосферой;
- в) ноосферой;
- г) биосферой.

24. Первая точка Пастера – это достижение такого уровня содержания кислорода в атмосфере Земли, при котором стала возможна жизнь ...

- а) анаэробная;
- б) аэробная;
- в) пресмыкающихся;
- г) млекопитающих.

25. Процесс образования органических веществ из углекислого газа и воды на свету при участии особых пигментов – это ...

- а) хемосинтез;
- б) дыхание;
- в) фотосинтез;
- г) брожение.

26) Процесс образования организмами разных компонентов клеток благодаря энергии, получаемой при окислении неорганических соединений – это ...

- а) фотосинтез;
- б) хемосинтез;
- в) дыхание.

27. Процесс анаэробного расщепления органических веществ, преимущественно углеводов, происходящий под влиянием микроорганизмов – это ...

- а) хемосинтез;
- б) дыхание;
- в) брожение.

28. Экологические факторы это:

- а) все элементы среды, воздействующие на организм;
- б) только температурный фактор;
- в) только пищевой фактор.

29. Азот попадает в растения в процессе круговорота веществ в форме:

- а) оксида азота;
- б) аммиака;
- в) нитратов;
- г) азотной кислоты.

30. Природные тела почвы, представляющие собой результат совместной деятельности всех живых организмов, а также физико-химических и геологических процессов, протекающих в неживой природе, В. И. Вернадский назвал:

- а) живым веществом;
- б) косным веществом;
- в) биогенным веществом;
- г) биокосным веществом.

31. Как называются растения, создающие органическое вещество из неорганического с помощью окружающей среды?

- а) продуценты;
- б) редуценты;
- в) консументы;
- г) детритофаги.

32. Какой фактор определяет нижний предел жизни в литосфере?

- а) вода;
- б) воздух;
- в) температура.

33. Какая глубина распространения жизни в Мировом океане?

- а) Мировой океан полностью обитаем;
- б) до глубины проникновения солнечного света;
- в) до глубины 5 км.

34. В состав биосферы по В. И. Вернадскому входят такие типы веществ как живое, рассеянные атомы, биогенное, биокосное, радиоактивное, космическое и ...

- а) абиогенное;
- б) палеобиогенное;
- в) косное;
- г) биотическое.

35. Основной компонент в составе атмосферы:

- а) Ne;
- б) Ar;
- в) N<sub>2</sub>;
- г) O<sub>3</sub>.

36. Индикатором какого атмосферного явления, вызванного антропогенным загрязнением атмосферы, является образование O<sub>3</sub> в тропосфере:

- а) Лондонский смог;
- б) Кислотные дожди;

- в) Фотохимический смог;
- г) «Аляскинский смог».

37. Потепление климата на Земле связано ...

- а) с озоновым экраном;
- б) с «парниковым эффектом»;
- в) с появлением смога;
- г) с Ла-Нинья.

38. Где был подписан протокол, направленный на контроль производства и использования хлорфторуглеродов?

- а) в Монреале (1987 г.);
- б) в Риме (1996 г.);
- в) в Лондоне (1972 г.);
- г) в Париже (1992 г.).

39. Что **не** относится к трем видам загрязнения окружающей среды?

- а) химическое;
- б) физическое;
- в) биологическое;
- г) информационное.

40. Газ, который пропускает длинноволновое инфракрасное излучение и не приводит к «парниковому эффекту».

- а)  $\text{SO}_2$ ;
- б)  $\text{CO}_2$ ;
- в)  $\text{CH}_4$ ;
- г)  $\text{N}_2\text{O}$ .

41. Газ, который **не** способствует разрушению озонового слоя?

- а)  $\text{N}_x\text{O}_y$  ;
- б)  $\text{CH}_4$ ;
- в)  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2-x(\text{F,Cl})x}$ ;
- г)  $\text{COS}$ .

42. Лос-анджелесский смог возникает летом в солнечную погоду при безветрии, температурной инверсии и наличии ...

- а) высокой влажности;
- б) сернистого ангидрида;
- в) фотооксидантов;
- г) резкого понижения температуры.

43. Основную роль в инициировании процессов окисления примесей в тропосфере играют:

- а) кислород воздуха;
- б) азот;
- в) свободные радикалы;
- г) оксиды азота.

44. Какое из утверждений, характеризующих влияние загрязнения атмосферного воздуха на климат, **неверно**?

- а) увеличение концентрации диоксида углерода может привести к повышению средней глобальной температуры на Земле;
- б) увеличение концентрации соединений серы в стратосфере может привести к уменьшению средней глобальной температуры на Земле;
- в) увеличение концентрации фреонов в тропосфере может привести к повышению средней глобальной температуры на Земле;
- г) увеличение концентрации пыли в атмосфере может привести к повышению средней глобальной температуры на Земле;

45. В результате антропогенной деятельности состав атмосферы за последние 20 лет:

- а) претерпел значительные изменения на уровне макрокомпонентов;
- б) не изменился;
- в) изменился на уровне микрокомпонентов.

45. Какой газ в стратосфере поглощает 99% излучения Солнца в опасной для биосферы УФ-области?

- а)  $O_2$ ;
- б)  $O_3$ ;
- в)  $CCl_xF_{4-x}$ ;
- г)  $H_2O$ .

46. Массовая вырубка лесов приводит:

- а) к опустыниванию;
- б) к нарушению кислородного цикла;
- в) к увеличению концентрации диоксида углерода в тропосфере;
- г) правильными являются все перечисленные выше ответы.

47. Озон в тропосфере – это:

- а) парниковый газ;
- б) сильнейший окислитель;
- в) УФ-«экран» планеты;

48. Какой вид антропогенной деятельности более всего ответствен за глобальное повышение концентрации диоксида углерода в атмосфере?

- а) автотранспорт;
- б) железнодорожный транспорт;
- в) морской транспорт;
- г) сжигание бытовых отходов.

49. Заменители фреонов менее опасны для озонового слоя по сравнению с фреонами, потому что они:

- а) характеризуются меньшим временем жизни в атмосфере;
- б) не реагируют с озоном;
- в) эффективнее фреонов в качестве хладагентов;
- г) правильными являются несколько из перечисленных выше ответов.

50. Газы, являющийся основной причиной образования кислотных осадков, это:

- а)  $N_2$ ;
- б)  $NO_x$  и  $SO_x$ ;
- в)  $O_3$ .

51. Озон в тропосфере:

- а) образуется в результате фотохимических превращений компонентов антропогенных выбросов;
- б) опасен для здоровья людей;
- в) образуется в результате лесных пожаров;
- г) правильными являются несколько из перечисленных выше ответов.

52. Компонент переменного состава в атмосферы:

- а)  $N_2$ ;
- б)  $O_2$ ;
- в) He;
- г)  $H_2O$ .

53. Процесс образования ионов из нейтральных атомов или молекул под действием электромагнитного излучения .– это ...

- а) фотоионизация;
- б) радиоактивность;
- в) фотодиссоциация.

54. Потепление климата на Земле связано ...

- а) с озоновым экраном;
- б) с «парниковым эффектом»;
- в) с появлением смога;
- г) с Ла-Нинья.

55. Что не относится к источникам загрязнения атмосферы?

- а) пылевые бури;
- б) лесные пожары;
- в) извержение вулкана;



г) сточные воды.

56. Какой процент содержания кислорода в воздухе (по объёму)?

а) 20,93%;

б) 0,93%;

в) 78,09%;

г) 54,13%.

57. Что является активной частицей в азотном цикле разрушения озона:

а)  $\text{OH}\cdot$ ;

б)  $\text{H}_2$ ;

в)  $\text{N}_2$ ;

г)  $\text{NO}$ .

58. «Аномальные» свойства воды объясняются:

а) ее химическим составом;

б) ее цветом;

в) полярностью ее молекул;

г) наличием водородных связей между молекулами.

59. Непрерывная водная оболочка Земли, окружающая все материки и острова и обладающая общностью солевого состава это:

а) гидросфера;

б) океан;

в) мировой океан.

60. Средняя солёность вод Мирового океана составляет:

а) 35% ;

б) 3500 мг/дм<sup>3</sup> ;

в) 35‰ ;

г) 3,5 г/дм<sup>3</sup>.

## Ответы на вопросы теста

№ вопроса	Вариант ответа	№ вопроса	Вариант ответа
1	А	31	А
2	А	32	В
3	А	33	А
4	Г	34	В
5	Д	35	В
6	А	36	В
7	Б	37	Б
8	В	38	А
9	Г	39	Г
10	А	40	А
11	А	41	Г
12	Г	42	В
13	В	43	В
14	Г	44	Г
15	Г	45	Б
16	Б	46	Г
17	Б	47	В
18	В	48	А
19	Б	49	Г
20	А	50	Б
21	В	51	Г
22	А	52	Г
23	В	53	А
24	Б	54	Б
25	В	55	Г
26	Б	56	А
27	В	57	Г
28	А	58	Г
29	В	59	В
30	Г	60	В

Учебное издание

Березин Григорий Иванович  
Адамович Татьяна Анатольевна  
Огородникова Светлана Юрьевна  
Албегова Алла Викторовна

# ОСНОВЫ ХИМИИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Учебное пособие

Авторская редакция  
Технический редактор М. Н. Котельников

Подписано в печать 19.03.2018. Печать цифровая. Бумага для офисной техники.  
Усл. печ. л. 12,19. Тираж 14 экз. Заказ № 4955.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Вятский государственный университет».

610000, г. Киров, ул. Московская, 36, тел.: (8332) 74-25-63, <http://vyatsu.ru>