

**Н.А. Черных
Ю.И. Баева**

ХИМИЯ БИОСФЕРЫ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

**ХИМИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕНЕЗА**



Москва
Российский университет дружбы народов
2020

В двух частях

ЧАСТЬ 1

Н.А. Черных, Ю.И. Баева

ХИМИЯ БИОСФЕРЫ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Учебное пособие

В двух частях

Часть 1

**ХИМИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕНЕЗА**

Москва

Российский университет дружбы народов

2020

УДК 54:504.7:502.3(075.8)
ББК 24:28.080.3:20.18
Ч-49

Утверждено
РИС Ученого совета
Российского университета
дружбы народов

Рецензенты:

доктор химических наук, профессор *С.Г. Левина*;
доктор биологических наук, профессор *С.В. Горюнова*

Черных, Н. А.

Ч-49 Химия биосферы и экологическая безопасность : учебное пособие : в 2 ч. / Н. А. Черных, Ю. И. Баева. – Москва : РУДН, 2020.

ISBN 978-5-209-09368-8

Ч. 1 : Химия окружающей среды в условиях техногенеза. – 260 с. : ил.

ISBN 978-5-209-09369-5 (ч. 1)

В первой части пособия приводится комплексная характеристика литосферы, атмосферы, гидросферы и педосферы в контексте экологических проблем, обусловленных химическим загрязнением окружающей среды. Рассмотрены химические процессы, протекающие в биосфере, круговороты биогенных элементов и основные биогеохимические циклы. Представлен широкий спектр вопросов, возникающих при накоплении, переработке и утилизации отходов производства и потребления. Обобщены данные по действию применяемых в сельскохозяйственном производстве удобрений и химических мелиорантов на состояние экосистем.

Издание предназначено для студентов и преподавателей биологических, экологических и сельскохозяйственных специальностей вузов, а также специалистов в области охраны природной среды.

УДК 54:504.7:502.3(075.8)
ББК 24:28.080.3:20.18

ISBN 978-5-209-09369-5 (ч. 1)
ISBN 978-5-209-09368-8

© Черных Н.А., Баева Ю.И., 2020
© Российский университет дружбы народов, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. ХИМИЯ АТМОСФЕРЫ	8
1.1. Строение и химический состав атмосферы	8
1.2. Основные химические процессы в атмосфере	12
1.3. Экологические проблемы загрязнения атмосферы	14
1.3.1. Фотохимический смог	18
1.3.2. Кислотные дожди	20
1.3.3. Разрушение озонового слоя Земли	23
1.3.4. Парниковый эффект	27
Контрольные вопросы	29
Список литературы к главе 1	30
ГЛАВА 2. ХИМИЯ ЛИТОСФЕРЫ	31
2.1. Строение и химический состав Земли	31
2.2. Распределение химических элементов в литосфере	36
2.3. Химическое выветривание горных пород и минералов	42
2.4. Добыча природных ресурсов как фактор перераспределения химических элементов в природных средах	45
Контрольные вопросы	48
Список литературы к главе 2	49
ГЛАВА 3. ХИМИЯ ГИДРОСФЕРЫ	51
3.1. Общие сведения о гидросфере Земли	51
3.2. Химический состав природных вод	56
3.2.1. Формирование химического состава природных вод	56
3.2.2. Классификация природных вод по химическому составу	58
3.2.3. Характеристика основных компонентов химического состава природных вод	61
3.2.4. Показатели качества воды	69
3.3. Химия континентальных вод	75
3.3.1. Речные воды	75
3.3.2. Озерные воды	79
3.3.3. Воды болот	81
3.3.4. Подземные воды	82
3.3.5. Воды ледников	84
3.4. Химия океанических вод	84
3.5. Эвтрофирование водоемов	89
3.6. Экологические проблемы загрязнения природных вод	91
Контрольные вопросы	95
Список литературы к главе 3	95

ГЛАВА 4. ФОРМИРОВАНИЕ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ЗЕМЛИ И ХИМИЯ ПОЧВ	98
4.1. Почва – открытая биокосная система	100
4.1.1. Водный баланс и типы водного режима	102
4.1.2. Температурные режимы почв	104
4.1.3. Энергетика почвообразования	104
4.2. Процессы почвообразования	105
4.3. Строение почвенного профиля и морфологические признаки почв	107
4.4. Физические свойства почв	115
4.5. Химический состав и свойства почв	119
4.5.1. Органическое вещество почвы	119
4.5.2. Строение, состав и свойства почвенных коллоидов	123
4.5.3. Поглощительная способность почв	125
4.5.4. Почвенный раствор. Кислотность, щелочность и буферность почвы	127
4.6. Биологическая активность почв	130
4.7. Наиболее распространенные типы почв	130
4.8. Кларки химических элементов в почвах	140
Контрольные вопросы	142
Список литературы к главе 4	143
ГЛАВА 5. ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В БИОСФЕРЕ	144
5.1. Понятие о биосфере	144
5.2. Уровни содержания химических элементов в живых организмах	147
5.3. Миграция химических элементов в биосфере	150
5.3.1. Виды миграции химических элементов	152
5.3.2. Типы миграции химических элементов	155
5.3.3. Факторы миграции химических элементов	156
5.4. Геохимические барьеры	157
5.5. Циклы биогенных элементов в биосфере	160
5.5.1. Круговорот углерода	162
5.5.2. Круговорот кислорода	166
5.5.3. Круговорот азота	167
5.5.4. Круговорот водорода	171
5.5.5. Круговорот фосфора	171
5.5.6. Круговорот серы	172
Контрольные вопросы	175
Список литературы к главе 5	175

ГЛАВА 6. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	177
6.1. Виды загрязнений окружающей среды	178
6.2. Основные виды химических загрязняющих веществ	179
6.3. Нормирование содержания химических веществ в природных средах	182
6.3.1. Нормирование содержания химических веществ в воде	184
6.3.2. Нормирование содержания химических веществ в воздухе	189
6.3.3. Нормирование содержания химических веществ в почве	194
Контрольные вопросы	207
Список литературы к главе 6	207
ГЛАВА 7. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ	210
7.1. Виды отходов и их классификация	210
7.1.1. Основные понятия	211
7.1.2. Классификация отходов	212
7.2. Твердые коммунальные отходы	218
7.3. Радиоактивные отходы	222
7.4. Медицинские отходы	229
7.5. Основные экологические проблемы, возникающие при обращении с отходами	233
Контрольные вопросы	240
Список литературы к главе 7	241
ГЛАВА 8. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ЭКОСИСТЕМ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ И ХИМИЧЕСКИХ МЕЛИОРАНТОВ	243
8.1. Удобрения	244
8.2. Химические мелиоранты	249
8.3. Применение удобрений и химических мелиорантов как источник загрязнения окружающей среды	251
Контрольные вопросы	258
Список литературы к главе 8	258

ВВЕДЕНИЕ

...На земной поверхности нет химической силы
более постоянно действующей, а поэтому более
могущественной по своим конечным последствиям,
чем живые организмы, взятые в целом.

В.И. Вернадский

В результате сложнейшего эволюционного процесса на Земле сформировалась биосфера – оболочка Земли, которая охватывает все живые организмы, среду их обитания, а также продукты жизнедеятельности. Существование и развитие биосферы обусловлены тремя группами факторов, тесно взаимосвязанными между собой: развитием нашей планеты как космического тела и протекающих в ее недрах химических преобразований, биологической эволюцией живых организмов и развитием человеческого общества. Живое вещество оказывает непрерывное воздействие на неживую природу, создавая целостную динамическую систему.

В основе всей совокупности процессов, протекающих в биосфере, лежат химические, физико-химические и химико-биологические превращения компонентов окружающей среды.

В условиях крайне напряженной экологической ситуации в связи с быстрым изменением материального состава окружающей среды появилась насущная необходимость в глубоком изучении химических соединений, накопление которых в природной среде в высоких концентрациях непосредственно связано с деятельностью человека.

В разных регионах мира содержание и соотношение техногенных токсикантов подвержены значительным колебаниям, поэтому приоритеты реабилитации системы жизнеобеспечения следует определять с учетом конкретной экологической ситуации, складывающейся в различных регионах, для чего необходимо проведение экологического мониторинга состояния почв, вод, растительного покрова, животного мира и здоровья человека.

Только четкое понимание того, как ведут себя и какие испытывают превращения те или иные вещества, попадающие в биосферу, позволит оценивать, прогнозировать и регулировать последствия антропогенного воздействия на природные среды. В связи с этим на первый план выходит необходимость изучения химических механизмов взаимодействия между человеком и средой обитания, что и определяет основу отдельного направления исследований на стыке различных научных дисциплин (химии, геохимии, биологии, экологии и др.). Таким образом, формируется комплексная наука о химических процессах и взаимодействиях в окружающей среде, а также о последствиях таких взаимодействий – химия окружающей среды. Это научное направление рассматривает процессы миграции и трансформации химических соединений природного и антропогенного происхождения в различных компонентах биосферы – атмосфере, литосфере, педосфере и гидросфере, с целью получения достоверной оценки изменений химического состава окружающей среды и прогнозирования возможных экологических последствий таких изменений.

В настоящее время тема обеспечения экологической безопасности является одной из самых актуальных в современном мире. Очевиден тот факт, что экологическая безопасность любого государства является важнейшей составной частью его национальной безопасности. С каждым годом все большее внимание уделяется охране окружающей среды – деятельности, направленной на сохранение и восстановление природной среды, рациональное использование и воспроизводство природных ресурсов, предотвращение негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду и ликвидацию ее последствий.



URL: <https://pixabay.com/ru/>

Глава 1. ХИМИЯ АТМОСФЕРЫ



1.1. Строение и химический состав атмосферы

Атмосферой Земли (от греч. *atmos* – пар и *sphaira* – шар) называется газовая оболочка, окружающая Землю. Масса атмосферы – $(5,1-5,3) \cdot 10^{15}$ т, что составляет примерно одну миллионную часть массы Земли. Плотность атмосферного воздуха на уровне моря в среднем равна $1,275 \text{ г/дм}^3$, среднее давление атмосферы у поверхности Земли (на уровне моря) составляет 760 мм рт. ст. С высотой давление убывает по закону, близкому к экспоненциальному, так что на высотах в несколько десятков километров плотность атмосферы уже очень мала.

Атмосфера обладает рядом особенностей, отличающих ее от других компонентов биосферы, а именно высокой подвижностью, изменчивостью компонентного состава, своеобразием физико-химических процессов.

Атмосфера Земли состоит примерно на 78 % из азота, на 21 % из кислорода и на 0,9 % из аргона. На долю всех остальных

компонентов приходится менее 0,1 %, но их роль в общей динамике состояния атмосферы очень велика (табл. 1.1). При этом объемные концентрации постоянно содержащихся в атмосфере компонентов (азота, кислорода, аргона, неона, гелия, криптона, ксенона, водорода) практически неизменны до высоты 100 км. Содержание других газов и аэрозолей меняется в зависимости от сезона, географического положения и высоты над уровнем моря.

Таблица 1.1

Состав незагрязненного воздуха [1, 15]

Газ	Концентрация, %; ppm (10-6)
Азот (N ₂)	78,084 %
Кислород (O ₂)	20,946 %
Аргон (Ar)	0,934 %
Вода (H ₂ O)	0,5-4 %
Оксид углерода (IV) CO ₂	360 ppm
Оксид углерода (II) CO	Следы
Водород (H ₂)	0,5 ppm
Неон (Ne)	18,18 ppm
Гелий (He)	5,24 ppm
Ксенон (Xe)	0,087 ppm
Криптон (Kr)	1,14 ppm
Метан (CH ₄)	1,7 ppm
Озон (O ₃) летом	< 0,07 ppm
Озон (O ₃) зимой	< 0,02 ppm
Оксид азота (I) N ₂ O	0,5 ppm
Оксид азота (II) NO	Следы
Оксид азота (IV) NO ₂	< 0,02 ppm
Аммиак (NH ₃)	Следы
Оксид серы (IV) SO ₂	< 1 ppm
Сероводород (H ₂ S)	Следы

Состав атмосферы находится в состоянии динамического равновесия, поддерживаемого деятельностью живых организмов и геохимическими процессами. При этом азот практически не участвует в геохимических процессах и поэтому накапливается в атмосфере; количество кислорода в атмосфере, активно циркулирующего в различных компонентах биосферы, в значительной степени определяется скоростью химических реакций и фотосинтеза [2].

В атмосфере выделяют пять оболочек: тропосферу, стратосферу, мезосферу, термосферу и экзосферу.

По мере удаления от поверхности Земли воздух становится все более разреженным, атмосферное давление при этом снижается.

Самый ближний к поверхности Земли слой называют тропосферой. Мощность тропосферы составляет 8-10 км в полярных областях и 16-18 км у экватора; на нее приходится 80 % массы атмосферного воздуха [14]. Температура в тропосфере опускается с высотой – примерно на 60 на каждый километр. Верхний ее слой, в котором снижение температуры с высотой прекращается, называют тропопаузой (средняя температура в тропопаузе примерно 220 К). В тропосфере сильно развиты турбулентность и конвекция, сосредоточена преобладающая часть водяного пара, возникают облака, формируются и атмосферные фронты, развиваются циклоны и антициклоны, а также другие процессы, определяющие погоду и климат. Происходящие в тропосфере процессы обусловлены, прежде всего, конвекцией.

Стратосфера расположена над тропосферой до высоты 50 км и делится на две зоны: нижнюю (до 25 км) с температурой, характерной для тропопаузы, и верхнюю (до 50 км), называемую областью инверсии [12]. В этой области температура начинает возрастать и, достигнув на высоте 40 км значения около 273 К, остается неизменной до высоты 55 км. Эта область постоянной температуры называется стратопаузой и является границей между стратосферой и мезосферой. На стратосферу приходится около 19 % массы атмосферного воздуха; его плотность в стратосфере в десятки и сотни раз меньше, чем на уровне моря. Именно в стратосфере на высотах 20-45 км располагается слой озоносферы («озоновый слой»), который определяет верхний предел жизни в биосфере. Озон (O_3) образуется в результате фотохимических реакций, наиболее интенсивно этот процесс происходит на высоте 30 км. Высокое содержание озона и вызывает повышение температуры в стратосфере, так как поглощает ультрафиолетовые лучи Солнца.

Над стратосферой начинается мезосфера, достигающая высоты 80 км. В мезосфере происходит понижение температуры и на ее верхней границе (мезопауза) достигает примерно 180 К. В мезосфере могут появляться серебристые облака.

Выше мезопаузы температура вновь начинает возрастать. Эта область атмосферы выше 80-85 км и мощностью [по данным разных авторов – 11, 12, 14, 15] около 700-900 км называется термосферой (или ионосферой). В ее верхней части температура мо-

жет достигать 1000 и даже 2000 К в зависимости от солнечной активности. Причиной такого повышения температуры является поглощение ультрафиолетового излучения Солнца на высотах 150-300 км, обусловленное ионизацией атмосферного кислорода. В нижней части термосферы рост температуры в значительной степени обусловлен энергией, выделяющейся при объединении (рекомбинации) атомов кислорода в молекулы (при этом в энергию теплового движения частиц превращается энергия солнечного УФ – излучения, поглощенная ранее при диссоциации молекул O_2). На высоких широтах появляется еще один важный источник теплоты в термосфере – тепло, выделяемое электрическими токами магнитосферного происхождения. Этот источник вызывает значительный, но неравномерный разогрев верхней атмосферы в приполярных широтах, особенно во время магнитных бурь.

В термосфере можно видеть полярные сияния (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Полярное сияние в термосфере

(URL: <https://pixabay.com/ru/>)

Над термосферой расположена самая внешняя часть атмосферы Земли с низкой концентрацией нейтральных атомов – экзосфера. Это область диссипации атмосферных газов. Диссипация – это процесс преодоления атомами и ионами поля притяжения Земли, то есть процесс рассеивания веществ в космосе. Экзосфера Земли состоит из ионизированного газа (плазмы); у ее основания отношение концентраций заряженных и нейтральных частиц близ-

ко к 1, в верхней части экзосферы газ почти полностью ионизирован. Нижняя и средняя части экзосферы в основном состоят из атомов О и N, с увеличением же высоты быстро растет относительная концентрация легких газов, особенно ионизированного водорода.

Протяженную экзосферу планеты часто называют короной; она состоит из атомов водорода, «улетучивающихся» из верхней атмосферы. Корона Земли (геококона) распространяется вплоть до высот порядка 100 тыс. км.

Следует отметить, что в реальных условиях границы оболочек атмосферы не являются строго фиксированными и меняются в достаточно больших пределах, однако профили температур в этих слоях остаются неизменными.

1.2. Основные химические процессы в атмосфере

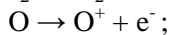
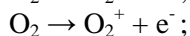
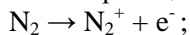
Фотохимические реакции – это химические реакции, протекающие под действием света. Основным источником радиации, поступающей на Землю, является Солнце. Лучистая энергия представлена в виде потока световых квантов или фотонов, испускаемых источником радиации (Солнца) и распространяющихся со скоростью света. При столкновении фотона с атомом или молекулой его энергия передается встреченной частице, которая идет на увеличение внутренней энергии атомов или молекул, поглощающих и ослабляющих радиацию. Поглощение фотона с длиной волны $\lambda \approx 100 - 1500$ нм, чему соответствует энергия 0,8 – 12,4 эВ (80-1200 кДж/моль), вызывает квантовый переход молекулы вещества из основного электронного состояния в одно из возбужденных состояний. Возбужденные молекулы имеют высокую реакционную способность и вступают в химические реакции, первичные продукты которых (ионы, радикалы, изомеры) чаще всего нестабильны. Время жизни возбужденного состояния, как правило, не превышает $10^{-8} - 10^{-9}$ с.

Другим источником протекания фотохимических реакций является космическое излучение, представленное потоками гамма- и рентгеновского излучения, корпускулярной радиации с высокой энергией, высокой проникающей способностью, пронизывающими всю толщу атмосферы. Ионизируя атомы и молекулы атмосферных газов, они вызывают вторичное космическое излучение, которое содержит все виды радиации [12].

К основным типам фотохимических реакций относятся следующие:

Фотоионизация – ионизация молекул и атомов под действием света. В результате отрыва электрона под действием энергии фотонов коротковолнового излучения происходит образование катион-радикалов. Она происходит при энергиях фотонов, равных или превышающих энергию ионизации. Фотоионизация жесткими фотонами (гамма- и рентгеновское излучение) происходит с отрывом от атомов электронов, входящих в глубокие (внутренние) оболочки; при фотоионизации оптическими фотонами происходит отщепление от атома внешних электронов.

Примеры наиболее важных реакций фотоионизации:

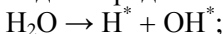


Кроме того, иногда имеют место процессы **фотонейтрализации**, при которых происходит отрыв избыточных электронов от отрицательно заряженных ионов.

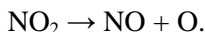
Фотодиссоциация – распад молекулы по какой-либо связи на радикалы, атомы или ионы под действием энергии фотонов.

В качестве примеров можно привести следующие реакции:

- распад молекулы воды на радикалы водорода и гидроксила:

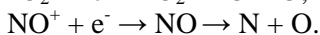
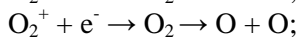


- распад молекулы диоксида азота на оксид азота и атомарный кислород:

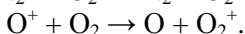
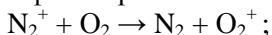


Реакции ионов в атмосфере включают диссоциативную рекомбинацию, перенос заряда, реакции обмена [6].

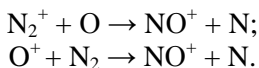
Диссоциативная рекомбинация – взаимодействие иона с электроном с образованием нейтральной молекулы, которая в разряженных условиях верхних слоев атмосферы быстро диссоциирует. Например:



Перенос заряда – взаимодействие иона с нейтральной частицей, сопровождающееся фотопереносом электрона:



Реакции обмена сопровождаются разрывом химической связи:



В результате протекания фотохимических реакций образуется большое количество свободных радикалов, которые существуют, как правило, очень короткое время, но обладают высокой химической активностью. Они возникают тогда, когда внутри исходных молекул межатомные связи уже разорвались, а новые связи еще не образовались. После своего возникновения свободные радикалы сразу же соединяются друг с другом или вступают в дальнейшие превращения. Благодаря своей высокой химической активности свободные радикалы в значительной степени определяют характер множества химических, радиационно-химических и биохимических процессов.

1.3. Экологические проблемы загрязнения атмосферы



URL: <https://pixabay.com/ru/>

Химическое загрязнение атмосферы можно рассматривать как изменение естественной концентрации химических веществ в атмосферном воздухе и/или поступление в атмосферу новых, нехарактерных для него химических соединений.

Каждый год 7-8 миллионов человек во всем мире умирают в результате загрязнения атмосферного воздуха и воздуха в помещениях [3; 18].

В Китае ежегодно по этим причинам погибает около 0,5 млн человек. В Европе, где более 95 % городского населения все еще подвержены воздействию загрязнения воздуха на уровне выше рекомендаций Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), этот фактор снижает среднюю продолжительность жизни на 9 месяцев и является причиной более 0,4 млн случаев преждевременной смерти [8].

Все источники загрязнения атмосферы делятся на две группы:

➤ **природные** – естественные загрязняющие вещества минерального, растительного или микробиологического происхождения, к которым относят извержения вулканов, лесные и степные пожары, пыль, выделения животных и др.;

➤ **антропогенные** – вещества, поступающие в атмосферу в результате хозяйственной деятельности человека.

Источниками загрязнения атмосферы могут служить тепловые электростанции и теплоцентраль, сжигающие органическое топливо; автотранспорт; черная и цветная металлургия; машиностроение; химическое производство; добыча и переработка минерального сырья; сельскохозяйственное производство, строительство, жилищно-коммунальное хозяйство. Интенсивное загрязнение атмосферы обусловлено работой промышленных предприятий черной и цветной металлургии, химических и нефтехимических комбинатов, строительной индустрии, энергетической и целлюлозно-бумажной промышленности. Так, при работе тепловых электростанций в атмосферу поступают углекислый и сернистый газы. Металлургические заводы выбрасывают в атмосферу сероводород, оксиды азота, фтор, хлор, аммиак, соединения фтора, мышьяка, тяжелых металлов и др. Большое количество опасных газов поступают в атмосферу вследствие сжигания топлива для потребностей промышленности и отопления помещений, в результате работы двигателей транспортных средств и т.д. (табл. 1.2). Основной вклад в загрязнение атмосферного воздуха в городах вносят автотранспорт, промышленность, сжигание угля и других видов твердого топлива на электростанциях и котельных

Источники поступления загрязняющих веществ в атмосферу

Примеси	Источники	
	Естественные	Антропогенные
Пыль	Вулканические извержения, пылевые бури, лесные пожары	Сжигание топлива в промышленных и бытовых условиях
Оксиды азота	Лесные пожары	Промышленность, автотранспорт, теплоэлектростанции
Оксиды углерода	Лесные пожары, природный метан	Автотранспорт, испарение нефтепродуктов
Диоксид серы	Вулканические извержения, окисление серы и сульфатов, рассеянных в море	Сжигание топлива в промышленных и бытовых установках
Летучие углеводороды	Лесные пожары, природный метан	Автотранспорт, испарение нефтепродуктов
Полициклические ароматические углеводороды	-	Автотранспорт, химические и нефтеперерабатывающие заводы

Химическое загрязнение подразумевает загрязнение воздуха газообразными летучими веществами и аэрозолями. В настоящее время наиболее опасными из загрязняющих воздух веществ являются озон, твердые частицы, в том числе мелкодисперсные, диоксид серы, диоксид азота, окись углерода, аммиак, метан, сажа, диоксины, бензапирен и соединения тяжелых металлов. Наличие двуокиси серы и окислов азота в атмосфере приводит к формированию кислотных дождей, которые оказывают серьезное негативное воздействие на здоровье человека, состояние дикой природы и водных объектов. Только от загрязнения приземного воздуха твердыми частицами и озоном ежегодно умирают 1,7 млн человек, а при сохранении нынешних тенденций эта цифра может вырасти до 4,4 млн к 2050 г. [4; 17].

По имеющимся оценкам, при сохранении сложившихся тенденций концентрация твердых частиц в атмосфере крупных городов к 2050 г. будет расти. Лишь для небольшой доли городского населения в середине века концентрация твердых частиц будет

соответствовать рекомендациям ВОЗ. Концентрация озона будет расти во всех регионах мира.

Оксиды азота (NO , NO_2). Оксиды азота образуются во всех процессах горения, при этом чем выше температура, тем интенсивнее идет их образование. Другим источником выбросов оксидов азота являются предприятия, производящие азотные удобрения, азотную кислоту, анилиновые красители и т.д. По масштабам выбросов оксидов азота в атмосферу транспорт занимает первое место (55 %), затем следуют предприятия топливно-энергетического комплекса – 28 %, крупные промышленные предприятия – 14 %; оставшиеся 3 % приходятся на мелкие предприятия и бытовой сектор.

Оксиды углерода (CO , CO_2). Оксид углерода CO («угарный газ») образуется в результате неполного сгорания ископаемого топлива (угля, газа, нефти) в условиях недостатка кислорода и при низкой температуре. При вдыхании угарный газ за счет имеющейся в его молекуле двойной связи образует прочные комплексные соединения с гемоглобином крови человека и тем самым блокирует поступление кислорода в кровь. Оксид углерода CO_2 (углекислый газ) является продуктом полного окисления углерода.

Аммиак (NH_3) попадает в воздух в составе выбросов производства аммиака, азотной кислоты, азотных удобрений, металлургических предприятий, различных химических производств.

Диоксид серы (SO_2) образуется, главным образом, в процессе сгорания серосодержащих ископаемых видов топлива, в основном угля, а также при переработке сернистых руд. Диоксид серы играет большую роль в формировании кислотных дождей. Длительное его воздействие на человека приводит к заболеваниям органов дыхания и серьезным нарушениям работы сердечно-сосудистой системы.

Сероводород (H_2S) и сероуглерод (CS_2). Основными источниками выброса являются предприятия по изготовлению искусственного волокна, сахара, коксохимические, нефтеперерабатывающие, а также нефтепромыслы. В атмосфере при взаимодействии с другими загрязнителями подвергаются медленному окислению до серного ангидрида (SO_3).

Соединения фтора. Фторсодержащие вещества поступают в атмосферу преимущественно в виде фторида натрия и кальция. Источники загрязнения – предприятия по производству алюминия, эмалей, стекла, керамики, стали, фосфорных удобрений.

Соединения хлора. В атмосфере встречаются, как правило, в виде смеси молекул хлора и паров соляной кислоты. Поступают в атмосферу в результате деятельности химических предприятий, производящих соляную кислоту, хлорсодержащие пестициды, органические красители, хлорную известь, соду и т.д.

Озон (O_3) относят к наиболее токсичным из загрязняющих воздух примесей. Этот газ является более сильным окислителем, чем кислород. В нижнем атмосферном слое озон образуется в результате фотохимических процессов с участием диоксида азота и летучих органических соединений.

Углеводороды – химические соединения углерода и водорода. К ним относят тысячи различных загрязняющих атмосферу веществ, образующихся в результате работы предприятий энергетики, химической промышленности, при добыче, транспортировке и переработке нефти, содержащихся в выбросах автотранспорта и т.д.

1.3.1. Фотохимический смог

В настоящее время различают два основных вида смога:

➤ *смог, связанный с загрязнением атмосферы дымом, содержащим диоксид серы («лондонский смог»).* Загрязнение воздуха городов происходило с давних времен в результате сгорания угля. При полном сжигании углеводородов образуются, как правило, малотоксичный углекислый газ и вода. Ситуация становится опасной, если сжигание происходит при недостатке кислорода. В этом случае в качестве продуктов получаются СО (угарный газ) и сажа. При низких температурах могут образоваться также полициклические ароматические углеводороды, например бензпирен. В результате возникает аэрозоль, состоящий из смеси дыма, тумана и пыли. Это явление называют смогом. Впервые его наблюдали в Лондоне еще в средние века и поэтому называют первичным или «лондонским»;

➤ *фотохимический смог, вызванный загрязнением воздуха автомобильными выхлопными газами (газовыми отходами производства), содержащими оксиды азота.* Этот смог был впервые зафиксирован над Лос-Анджелесом (США) в 50-х годах прошлого века, в связи с чем и получил название «лос-анджелесский смог». Для образования смога такого типа необходимо протекание фотохимических реакций.

В смоге лондонского типа практически не образуется каких-либо новых веществ, а его токсичность полностью зависит от исходных загрязняющих веществ. Возникает он в виде сплошного тумана в результате сжигания больших количеств топлива.

В смоге лос-анджелесского типа в результате реакций, протекающих под действием солнечного света в смеси углеводородов и оксидов азота, образуются новые вещества, значительно превышающие по своей токсичности исходные атмосферные загрязнения. При этом фотохимический туман образуется при значительно меньших выбросах в атмосферу по сравнению с «лондонским» смогом, и для него характерна желто-зеленая или сизая сухая дымка, а не сплошной туман.

Основной причиной фотохимического смога являются выхлопные газы автомобилей (табл. 1.3). Так, при реакции оксидов азота с неполностью сгоревшими углеводородами из автомобильных выхлопов под действием солнечного света получается озон и пероксиацетилнитрат (ПАН), крайне токсичные для живых организмов вещества:



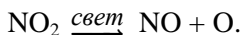
Таблица 1.3

Состав отработанных газов двигателей [10, 12]

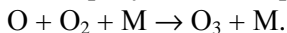
Вещество	Содержание, объем, %	
	Бензиновый	Дизель
O ₂	0,05-0,8	2-18
CO ₂	5-12,5	1-12
H ₂ O	3-13	0,5-10
N ₂	74-77	76-78
NO _x	0,05-0,5	0,1-1
CO	0,1-10	0,01-0,5
C _x H _y	0,2-2	0,01-0,5
Альдегиды	< 0,2	< 0,05
Сажа, мг/м ³	< 100	< 20 000
SO ₂ , мг/м ³	< 0,003	< 0,015
Бензпирен, мкг/м ³	25	10

Ниже приведены уравнения химических реакций, приводящие к образованию фотохимического смога.

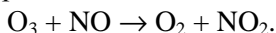
В ясные дни солнечная радиация вызывает расщепление молекул диоксида азота с образованием монооксида азота и атомарного кислорода (фотолиз):



Образовавшийся активный атомарный кислород при взаимодействии с молекулярным кислородом может образовывать озон, при этом необходимо присутствие инертных частиц М:



В близких к поверхности Земли слоях воздуха озон быстро реагирует с NO, окисляя его до NO₂ и при этом превращаясь вновь в молекулярный кислород:



Далее диоксид углерода вновь разлагается на NO и O. Так реакции идут в отсутствие углеводородов. Эти процессы обратимы, в связи с чем концентрации оксидов азота не достигают опасного уровня и нет значительного накопления озона.

Однако в присутствии углеводородов NO реагирует с ними, что приводит, с одной стороны, к образованию очень токсичного органического соединения пероксиацетилнитрата (ПАН), а с другой – к накоплению озона. Озон накапливается в силу того, что NO связывается в результате взаимодействия с углеводородами и тем самым не может вступать в реакцию взаимодействия с озоном.

Озон, в свою очередь, взаимодействует с углеводородами с образованием альдегидов, соединений, представляющих опасность для здоровья человека и животных. Кроме того, в фотохимическом смоге присутствует также и монооксид углерода (CO) – продукт неполного сгорания бензина.

Как следует из приведенного выше материала, в фотохимическом смоге, помимо исходных загрязняющих веществ, присутствуют и вторичные загрязнители: озон, ПАН, альдегиды и др. При этом особую роль в образовании смога лос-анджелесского типа играют оксиды азота, которые дают начало цепи превращений в компоненты смога.

1.3.2. Кислотные дожди

При сжигании горючих ископаемых (угля, газа, нефти) в составе выделяющихся газов всегда присутствуют оксиды серы и азота, количество которых определяется видом и составом топлива. Диоксид серы и оксиды азота относятся к так называемым ки-

слоотообразователям, то есть они взаимодействуют с атмосферным кислородом и водой с образованием кислот. Предприятия топливно-энергетического комплекса являются самыми весомыми поставщиками кислых окислов в атмосферу – на них приходится 55 % всех выбросов диоксида серы и 37 % всех выбросов оксидов азота. Вклад промышленности составляет 44 и 13 % соответственно, а на транспорт приходится 1 и 50 %. Природные источники поступления этих газов – это преимущественно вулканы и лесные пожары.

К кислотным выбросам в атмосферу, помимо диоксида серы и оксидов азота, можно отнести соляную кислоту (HCl). Выбросы HCl носят локальный характер. Источником соляной кислоты в атмосфере являются производства эмалей, фарфора, сжигание отходов и др. В промышленно развитых регионах около 60 % кислотности дождя и снега определяет серная кислота. Вклад в кислотность осадков азотной кислоты составляет около 30 %, соляной кислоты – 5 %, углекислого газа – 2 %, а оставшиеся 3 % кислотности дают другие примеси.

Даже незагрязненная дождевая вода имеет слабокислую реакцию из-за наличия в воздухе диоксида углерода. Диоксид углерода, растворяясь в каплях воды, образует слабую угольную кислоту H_2CO_3 . Поэтому условия равновесия углекислого газа с влагой атмосферы определяют значение pH дождевой воды, которое составляет 5,6 для концентрации CO_2 в чистом воздухе 350 ppm (350 частей на миллион) и является естественным показателем чистой воды. В реальной жизни показатель кислотности дождевой воды в одной местности может отличаться от показателя кислотности дождевой воды в другой. Это прежде всего зависит от состава газов, содержащихся в атмосфере той или иной местности, таких как оксид серы и оксиды азота.

Если значения pH атмосферных осадков ниже 5, то осадки считаются кислыми. В среднем кислотность осадков, выпадающих в основном в виде дождей в Западной Европе и Северной Америке на площади почти около 10 млн кв. км, составляет 4,5-5, а туманы здесь нередко имеют pH, равный 3-2,5. Так, в промышленных районах Западной Европы среднее значение pH осадков составляет 4,1, а на периферии континента над сельскохозяйственными районами Португалии или Ирландии – 4,9. Однако в Европе зафиксированы случаи выпадения сильноокислых осадков с pH 2,4-3,5 [9]. Специфическая особенность кислотных дождей – их трансгранич-

ный характер, обусловленный переносом кислотообразующих выбросов воздушными течениями на большие расстояния. Сейчас эта проблема существует во всем индустриальном мире, приобретая особое значение в связи с возросшими техногенными выбросами оксидов серы и азота. За несколько десятилетий размах этого бедствия стал настолько широк, а отрицательные последствия столь велики, что в 1982 г. в Стокгольме состоялась специальная международная конференция по кислотным дождям, в которой приняли участие представители 20 стран и ряда международных организаций. В настоящее время острота этой проблемы сохраняется, она постоянно находится в центре внимания национальных правительств и международных природоохранных организаций.

Кислотные дожди наносят существенный урон объектам биосферы, причем это касается в равной степени состояния почвенного покрова, растительного и животного мира, водных объектов. Так, при повышении кислотности почв ускоряется вымывание питательных веществ, гибнут полезные микроорганизмы, в том числе азотфиксирующие: среднее количество клубеньков на корнях бобовых растений при снижении pH почвенного раствора с 6 до 3,2 уменьшается почти втрое. Наиболее сильное негативное влияние понижения pH почв отмечается вблизи крупных промышленных центров и проявляется в усыхании и гибели деревьев и травяного покрова. Действие кислотных дождей ярче всего проявляется в угнетении и уменьшении видового разнообразия у низших растений по сравнению с высшими.

Для пресных природных вод характерны значения pH в диапазоне от 6,5 до 8, так как они всегда содержат катионы щелочных и щелочноземельных металлов. Этот состав воды пресноводных водоемов благоприятен для жизнедеятельности всех обитателей рек и озер – от бактерий и водорослей до рыб. При многократном выпадении кислых осадков вода первое время сохраняет нейтрально-слабощелочную реакцию благодаря своим естественным буферным свойствам. Однако постепенно пресноводные водоемы начинают подкисляться, что изменяет условия обитания всех гидробионтов.

Выделяют три стадии воздействия кислотных дождей на водоемы:

➤ Первая стадия – начальная. С увеличением кислотности воды водные растения начинают погибать, лишая других животных водоема пищи, уменьшается количество кислорода в воде,

начинают бурно развиваться водоросли (буро-зеленые). Это первая стадия эвтрофирования (заболачивания) водоема. Так, даже при небольшом понижении значения pH – до 6 начинают погибать пресноводные креветки.

➤ Вторая стадия – кислотность повышается до pH 5,5 – быстро сокращается численность и видовое разнообразие живых организмов. Погибают некоторые виды донных бактерий, разлагающих органические вещества и листья, и органический мусор начинает скапливаться на дне. Затем гибнет планктон, который составляет основу пищевой цепи водоема и питается веществами, образующимися при разложении бактериями органических веществ.

➤ Третья стадия – кислотность достигает pH 4,5 – происходит массовая гибель рыб и теряется способность их к размножению. Погибает большинство лягушек и насекомых.

Однако при подкислении воды бурно развиваются кислотолюбивые мхи, грибы и нитчатые водоросли, которые заглушают всю остальную водную растительность.

Первая и вторая стадии изменения состояния водоемов, в отличие от третьей, обратимы при прекращении воздействия кислотных дождей на водоем.

Следует отметить также, что повышенная кислотность атмосферных осадков, попадающих в водоемы и на поверхность суши, способствует увеличению подвижности большинства тяжелых металлов, что приводит к выщелачиванию их из донных отложений и почв. В результате увеличивается риск поступления данных металлов, представляющих опасность для здоровья человека, в источники водоснабжения населения.

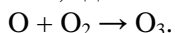
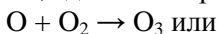
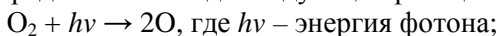
1.3.3. Разрушение озонового слоя Земли

Как известно, в стратосфере на высоте около 20-45 км расположен озоновый защитный слой Земли. Озоновая оболочка предохраняет поверхность Земли от жесткого ультрафиолетового излучения Солнца. Стратосферный озон регулирует поток ультрафиолетовых квантов, задерживая наиболее опасную часть радиации Солнца с длинами волн менее 285 нм и значительно ослабляя излучение в диапазоне 285-315 нм. Кроме того, экзотермическое разложение озона приводит к нагреванию стратосферы, возникновению инверсионного слоя и тем самым препятствует выхолаживанию нижних слоев атмосферы из-за конвективного переноса теплоты [12]. Озон относится к малым газовым компонентам атмо-

сферы и в наибольшей степени подвержен влиянию антропогенных факторов.

Озона в атмосфере очень мало, его объемная доля составляет лишь около $4 \cdot 10^{-7} \%$. Если собрать весь озон атмосферы в один слой, то при нормальных условиях (при давлении 1 атм. и температуре 273°C) он будет иметь толщину всего лишь около 0,3 см. Однако озон распределен в атмосфере до высоты примерно 100 км в соответствии с барометрическим законом, согласно которому давление падает с высотой по экспоненте. А так как молекулы озона образуются в самой атмосфере, их высотное распределение такое же, как у воздуха, – сверху мало, внизу много.

Образование молекул озона в атмосфере по упрощенной схеме можно представить в виде следующих реакций:



Химические связи в озоне менее прочны, чем в кислороде, и оптически активны: $\text{O}_3 + h\nu \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}$. Поэтому он легко разрушается под действием многих физических и химических факторов и очень активно вступает в различного рода реакции.

Более детальный механизм образования озона в атмосфере, учитывающий появление различных промежуточных состояний кислорода как в молекулярной, так и в атомарной форме был предложен выдающимся английским геофизиком С. Чепменом в 1930 г. Суть этого механизма состоит в том, что на высотах 20-45 км молекулярный кислород распадается на атомы под действием солнечного ультрафиолета (фотодиссоциирует). Образующиеся атомы взаимодействуют с молекулами кислорода с образованием озона. Быстрее всего этот процесс идет на высотах 35-45 км, а максимальная концентрация озона наблюдается ниже – на высотах 20-25 км. Это объясняется тем, что вверху велика и скорость разрушения озона, внизу она меньше. Таким образом, накопление или убыль количества озона в атмосфере определяется соотношением процессов образования и разрушения молекул озона.

После разрушения озонового слоя стратосфера станет охлаждаться, а приземные слои воздуха и поверхность Земли – нагреваться. Гласная угроза при этом – усиление ультрафиолетового излучения. Существует две гипотезы появления «озоновых дыр»:

первая гипотеза объясняет разрушение озонового слоя естественными процессами, вторая – техногенными причинами.

В 1974 г. американские ученые Шервуд Роуланд и Марио Молина сообщили о своем открытии, согласно которому хлорфторуглероды (ХФУ) способствуют разрушению молекул озона в атмосфере. В 1995 г. Ш. Роуланд, М. Молина совместно с П. Крутценом (Германия) были удостоены Нобелевской премии за цикл исследований, посвященных образованию и распаду озона в земной атмосфере. Они показали, что под действием солнечных лучей синтетические галогенизированные углеводороды разлагаются с выделением атомарного хлора и брома, разрушающих озоновый слой. К числу таких озоноразрушающих веществ, или ОРВ, в первую очередь относятся хлорфторуглероды (ХФУ, согласно международной классификации – CFC).

Хлорфторуглероды негорючи, малотоксичны и летучи, что является их как положительным, так и отрицательным свойством для озонового слоя. Производство и хранение этих веществ не создает особых проблем, поэтому они получили очень широкое распространение. Сначала ХФУ использовали преимущественно в качестве хладагентов для холодильников и кондиционеров. Затем их стали применять как распылители аэрозолей (пропелленты). Уже в середине 40-х годов прошлого столетия такие наиболее распространенные ХФУ, как бромхлордифторметан (галон-1211) и бромтрифторметан (галон-1301) эффективно использовались для тушения пожаров. Галон-1301 широко применяется пожарными службами многих стран и по сей день.

Более двух тысяч лет общее количество озона в земной атмосфере изменялось незначительно. Об этом свидетельствует реконструкция газового состава атмосферы, сделанная по результатам анализа пузырьков воздуха из антарктических ледовых кернов [5]. Исследуя концентрацию озона в земной атмосфере, ученые обратили внимание на снижение в начале 80-х гг. XX в. общего содержания стратосферного озона (ОСО). Оказалось, что каждой весной в течение 1985–1991 гг. ОСО над Антарктидой было в среднем на 30–40 % ниже, чем за период 1967–1971 гг., а в 1993 г. этот показатель снизился более чем на 60 %. В 1987 и в 1994 гг. было зафиксировано рекордно низкое содержание озона: почти в 4 раза меньше нормы. В январе ОСО над скандинавскими странами и северо-западными районами России бывает обычно на 20–25 % ниже, чем над Северо-Восточной Сибирью и Камчаткой.

В январе 1995 г. снижение ОСО на 15-20 % было зарегистрировано над Западно-Сибирской равниной и Средне-Сибирским плоскогорьем, в то время как над северо-западными районами России ОСО было ниже нормы на 10-15 %. С конца марта до середины мая 1997 г. отмечалось аномально низкое – на 30 % меньше обычного – содержание озона над Арктикой и значительной частью Восточной Сибири. Диаметр этой «озоновой дыры» составил около 3000 км. Таким образом, в 1970–1980-х гг. снижение концентрации озона над территорией России происходило лишь эпизодически. Но со второй половины 90-х гг. «озоновые дыры» в зимнее время стали наблюдаться над обширными районами России уже регулярно.

Время от времени над той или иной территорией, в частности над Швейцарией или озером Иссык-Куль, обнаруживают очередные «озоновые дыры» с разной продолжительностью жизни. Несмотря на усилия ученых, многое еще остается неясным относительно появления этих дыр в отдельных участках земной атмосферы. Одна из возможных причин – некоторые виды человеческой деятельности. Например, при запуске космических ракет и других летательных аппаратов возникают «озоновые дыры» диаметром до нескольких сотен километров, которые сохраняются в стратосфере несколько недель и могут перемещаться в другие места.

За последние десятилетия предпринимались многочисленные попытки математического моделирования различных вариантов убыли стратосферного озона в зависимости от масштабов производства хлорфторуглеродов (ХФУ). Оказалось, что для получения реальной картины необходим учет большого количества реакций с участием около 50 реагентов на фоне сложных и слабо изученных процессов динамики стратосферы. В результате произошло значительное (в 5-10 раз) несовпадение итогов расчетов различных групп ученых-теоретиков. Вместе с тем наблюдалось углубление знаний химии стратосферного озона, в силу чего прогнозы становились все более реалистичными и менее драматичными.

В 1987 г. в Монреале был выработан и подписан представителями 43 стран Протокол об озоноразрушающих веществах, предусматривающий замораживание и последующее сокращение производства наиболее опасных для озонового слоя соединений. В 1990 г. в Лондоне был подписан Протокол, который предполагал полное прекращение производства и использования ХФУ с 2000 г.

Таким образом, уменьшение толщины озонового слоя Земли связано как с развитием естественных процессов выбросов в атмосферу озоноразрушающих веществ, так и с хозяйственной деятельностью человека. При этом степень вины человека в образовании «озоновых дыр» пока неясна. Антропогенное влияние, при всей его разрушительности в локальном плане, в планетарном масштабе ничтожно.

1.3.4. Парниковый эффект

Парниковый эффект – эффект разогрева приземного слоя воздуха, вызванный тем, что атмосфера поглощает длинноволновое излучение земной поверхности. Это совместный эффект прозрачности атмосферы для части солнечного излучения и поглощения в атмосфере большинства отражаемого Землей излучения (главным образом молекулами воды и углекислого газа). Главной причиной усиления этого природного процесса служит обогащение атмосферы газами, поглощающими тепловое излучение. Чем выше концентрация этих газов, тем заметнее парниковый эффект.

Парниковые газы – это газы, создающие в атмосфере экран, задерживающий инфракрасные лучи, которые в результате и нагревают поверхность Земли и нижний слой атмосферы. К парниковым газам можно отнести водяной пар, углекислый газ, метан, хлорфторуглероды, монооксид азота и др. Эти газы прозрачны для солнечного света, но не пропускают и поглощают тепловое инфракрасное излучение земной поверхности. Главную роль в поглощении ИК-лучей играет водяной пар. В среднем содержание паров воды примерно в 70 раз выше содержания CO_2 . Кроме того, вода обладает очень высокой теплоемкостью. Вклад паров воды, выступающих в качестве парникового газа, по некоторым оценкам, составляет до 90-95 % [7].

Парниковое «одеяло» из газов создает на Земле условия, пригодные для органической жизни. При отсутствии в атмосфере парниковых газов средняя температура земной поверхности упала бы до минус 19 °С, и Земля была бы покрыта слоем льда. Поступление в атмосферу углекислого газа, метана и монооксида азота антропогенного происхождения усиливает природный парниковый эффект. Выбросы CO_2 создают около 60-64 % дополнительного парникового эффекта, CH_4 – около 20 %, N_2O – в среднем 6-7 %, другие соединения углерода – еще 10-14 % [12].

Абсолютные количества метана, хлорфторуглеродов и оксидов азота, поступающие в атмосферу, невелики по сравнению с углекислым газом. Однако их вклады в парниковый эффект довольно значимы. Из расчета «молекула на молекулу» метан примерно в 20 раз более эффективно поглощает энергию, чем углекислый газ, а некоторые хлорфторуглероды более чем в 12 тыс. раз [16].

Антропогенный парниковый эффект на 57 % обусловлен добычей и потреблением энергии, на 9 % – исчезновением лесов, на 14 % – сельскохозяйственной деятельностью и на 20 % – остальным промышленным производством, не связанным с энергетическим циклом [15].

Углекислый газ атмосферы находится в состоянии постоянного обмена с водами морей и океанов, почвенным покровом и живыми организмами. При подсчете баланса углекислоты учитывают, с одной стороны, поглощающую способность океана и способность растений ассимилировать CO_2 , с другой стороны, углекислоту, выделяющуюся при сжигании топлива. Таким образом, выбросам углекислого газа в атмосферу противостоят процессы его фиксации водами морей и океанов, а также фотосинтез растений. В процессе фотосинтеза используется не только весь CO_2 , выделенный в атмосферу в процессе дыхания и разложения организмов (около 100 млрд т в год), но и около 2/3 количества CO_2 , содержащегося в антропогенных выбросах. При этом поступивший в атмосферу углекислый газ остается в ней в среднем 2-4 года [12].

Как было отмечено выше, метан по своей способности усиливать парниковый эффект в 20 раз превосходит углекислый газ. Молекула метана химически довольно устойчива, и ее нелегко вывести из атмосферы. В основе вывода метана из тропосферы лежит механизм химических превращений метана (90 %). Итогом исчезновения одной молекулы метана в атмосфере является появление 3,5 молекулы озона, 1,75 молекулы воды, 0,5 радикала OH^* и 1 молекулы углекислого газа. Другие механизмы вывода метана из атмосферы не велики, их вклад составляет не более 10 %.

Основные источники поступления метана в атмосферу – биогенные. Однако человек в процессе своей хозяйственной деятельности повышает концентрацию метана в атмосфере. Разложение органического мусора и органических веществ в водах очистных сооружений, увеличение поголовья скота и площадей выращивания риса приводит к усилению микробной деятельности и

способствует образованию и увеличению содержания метана в атмосфере. Его содержание в атмосфере за прошедшие два столетия удвоилось и оценивалось к началу XXI века в 4000-5000 млн т.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляет собой атмосфера? Строение атмосферы.
2. Дайте краткую характеристику химического состава атмосферы.
3. В каком слое атмосферы Земли находится озоновый слой?
4. Изложите суть проблемы истощения озонового слоя Земли.
5. Перечислите основные химические процессы, протекающие в атмосфере.
6. Каковы источники поступления загрязняющих веществ в атмосферу?
7. Перечислите основные экологические проблемы, связанные с загрязнением атмосферы.
8. Что представляет собой фотохимический смог?
9. Изложите причины образования кислотных дождей.
10. В чем могут выражаться последствия выпадения кислотных дождей?
11. Раскройте суть парникового эффекта.
12. Каковы возможные последствия усиления парникового эффекта?
13. Какие газы относят к парниковым?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 1

1. Андрус Дж., Бримблекумб П., Дишкелз Т. и др. Введение в химию окружающей среды. – М.: Мир, 1999.
2. Ингерсол Э.П. Атмосфера Земли // В мире науки. – 1983. – № 11. – С. 88-100;
3. URL: [http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/K1602727 %20INF%205.pdf](http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/K1602727%20INF%205.pdf).
4. URL: <http://dx.doi.org/10.1787/9789264122246-en>.
5. Кароль И.Л., Киселев А.А. Озоносфера Земли в опасности // Экология и жизнь. – 1996. – № 1. – С. 19.
6. Кипрушева Н.С. Техногенные загрязнители окружающей среды: учебное пособие. – Ухта: Изд-во Института управления, информации и бизнеса, 2004. – 56 с.
7. Мешалкин А.В., Дмитриева Т.В., Шемель И.Г., Маньшина И.В. Экологическое состояние атмосферы / под ред. А.П. Коржавого. – Калуга: Изд-во науч. лит. Н.Ф. Бочкаревой, 2006. – 224 с.
8. Об экологическом развитии Российской Федерации в интересах будущих поколений: доклад Госсовету РФ. – М., 2016.
9. Окружающая среда: энциклопедический словарь-справочник / пер. с нем. – М.: Прогресс, 1993. – 640 с.
10. Пшежецкий С.Я. Механизм радиационно-химических реакций. – М.: Химия, 1968.
11. Топалова О.В., Пимнева Л.А. Химия окружающей среды: учебное пособие. – СПб: Изд-во «Лань», 2013. – 160 с.
12. Физико-химические процессы в техносфере: учебник / К.И. Трифонов, В.А. Девисилов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Форум: ИНФРА-М, 2015. – 256 с.
13. Химия окружающей среды / под ред. Дж.О.М. Бокриса – М.: Химия, 1982.
14. Химия окружающей среды: учебное пособие / С.Л. Белопухов, Н.К. Слюняев, М.В. Тютюнькова; под общ. ред. проф. С.Л. Белопухова. – М.: Изд-во «Проспект», 2016. – 240 с.
15. Химия окружающей среды / Л.Ф. Голдовская. – 3-е изд. – М.: Мир; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 295 с.
16. Экотоксиканты: учебно-методическое пособие для лекционного курса «Химия в экологии» / Н.А. Улахович, М.П. Кутырева, Э.П. Медянцева, С.С. Бабкина. – Казань: Изд-во Казанского гос. ун-та, 2010. – 56 с.
17. OECD (2012). OECD Environmental Outlook to 2050, OECD Publishing.
18. UNEP in collaboration with the WHO. 2016. Healthy Environment, Healthy People. Nairobi, 23-27 May 2016.



URL: <https://pixabay.com/ru/>

Глава 2. ХИМИЯ ЛИТОСФЕРЫ



2.1. Строение и химический состав Земли

Литосфера – внешняя твердая оболочка Земли, которая включает всю *земную кору* с частью *верхней мантии* Земли, до *астеносферы*. Нижняя граница литосферы нечеткая и определяется резким уменьшением вязкости пород, изменением скорости распространения сейсмических волн и увеличением электропроводности пород.

Под литосферой располагается *астеносфера*, составляющая внешнюю часть мантии. Астеносфера ведет себя как перегретая и чрезвычайно вязкая жидкость [29], где происходит понижение скорости сейсмических волн, свидетельствуя об изменении пластичности пород [15]. В строении литосферы выделяют подвижные области (складчатые пояса) и относительно стабильные платформы. Блоки литосферы – *литосферные плиты* – двигаются по относительно пластичной астеносфере.

Земная кора – это верхняя часть твердой Земли (рис. 2.1). От мантии отделена границей с резким повышением скоростей сейсмических волн – *границей Мохоровичича* (или в упрощенном виде *границей Мохо*) [14]. На материках граница Мохо обычно располагается на глубинах от 30 до 80 км, а на дне океанов – от 5 до 15 км. Наибольшая мощность коры (до 75-80 км) характерна для участков континентальных горных хребтов.

Масса земной коры оценивается в $2,8 \cdot 10^{19}$ тонн, что составляет лишь 0,5 % общей массы Земли [14; 27].



Рис. 2.1. Строение Земли

Выделяют два основных типа земной коры:

- *континентальная* (материковая) кора;
- *океаническая* кора.

Земная кора под океанами и континентами значительно различается. Континентальная кора составляет более половины массы коры в целом. Она содержит меньше железа, кальция и магния, нежели океаническая кора, но намного больше кремния, алюминия, натрия и калия, то есть более легких элементов. Земная кора под континентами состоит из осадочного, гранитного и базальтового слоев. Земная кора под океанами сильно обеднена легкоплавкими редкими элементами, а гранитный слой полностью отсутствует.

Верхняя часть континентальной земной коры представляет собой прерывистый слой, состоящий из осадочных и вулканических горных пород (*верхний слой*). Ниже расположен гранитный слой (*средний слой*), состоящий из гнейсов и гранитов, под кото-

рым находится базальтовый слой (*нижний слой*), сложенный метаморфическими горными породами, базальтами и габбро [14].

Земная кора под океанами также подразделяется на несколько слоев. Верхний слой (осадочный), мощностью в среднем около 0,5 км, состоит преимущественно из тонких металлоносных осадков с наиболее высокой концентрацией оксидов железа (*верхний слой*). Средняя часть рассматриваемого слоя часто сложена карбонатными осадками, и лишь иногда в разрезах встречаются вулкано-генные отложения [1]. Ниже расположен второй слой (*средний слой*), состоящий, главным образом, из серпентинита, базальта и имеющий мощность 1-2,5 км. Под ним находится *нижний слой*, сложенный преимущественно габбро; мощность данного слоя в среднем составляет 2-5 км.

Мантия составляет 67,8 % массы Земли и около 89 % ее объема (без учета атмосферы). Она простирается от границы с земной корой (на глубине 5—80 километров) до границы с ядром на глубине около 2900 км [16]. Мантия занимает огромный диапазон глубин, и с увеличением давления в веществе происходят фазовые переходы, при которых минералы приобретают все более плотную структуру.

Согласно современным представлениям, в составе мантии преобладает сравнительно небольшая группа химических элементов: Si, Mg, Fe, Al и O (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Средний химический состав мантии [1]

Соединение	% по массе	Соединение	% по массе
SiO ₂	43-46	Na ₂ O	0,3-0,6
MgO	37-42	Cr ₂ O ₃	0,4-0,5
FeO	6-8,2	NiO	0,2-0,3
Al ₂ O ₃	3,7-5,1	MnO	0,13-0,14
CuO	2,5-3,0	K ₂ O	0,10-0,13
Fe ₂ O ₃	0,4-1,5	CaO	около 0,01
TiO ₂	0,3-0,7		

Мантия Земли включает в себя две оболочки: верхнюю и нижнюю мантию.

Нижняя граница *верхней мантии* проходит на глубине 670 км. Верхняя мантия имеет хорошо фиксирующийся внутренний сейсмический раздел, проходящий на глубине 410 км. При перехо-

де этой границы сверху вниз сейсмические скорости резко возрастают, как и на нижней границе верхней мантии, происходят существенные минеральные преобразования. Согласно современным научным представлениям, состав земной мантии считается похожим на состав каменных метеоритов, в частности хондритов. Около 40 % верхней мантии приходится на оливин, 30 % на пироксены, 10-12 % – на железоникелевый сплав, а оставшаяся часть – на плагиоклазы и троилит.

Граница *нижней мантии* с ядром проходит на глубине 2900 км, то есть нижняя мантия заключена между глубинами 670 и 2900 км [21]. В настоящее время полагают, что в ее составе преобладают оксиды: периклаз, стишовит, корунд, вюстит, шпинели хотя возможно присутствие гранатов.

Агрегатное состояние мантии обусловлено воздействием температур и сверхвысокого давления. Из-за давления вещество почти всей мантии находится в твердом кристаллическом состоянии, несмотря на высокую температуру. Исключение составляет лишь астеносфера, где действие давления оказывается слабее, чем температуры, близкой к точке плавления вещества. Вследствие этого эффекта, по-видимому, вещество здесь находится либо в аморфном состоянии, либо в полурасплавленном [27].

Ядро – центральная, наиболее глубокая часть Земли, сфера, находящаяся под мантией и предположительно состоящая из железоникелевого сплава с примесью других *сидерофильных элементов*. Глубина залегания ядра – 2900 км; средний радиус сферы около 3470 км. Температура в центре ядра Земли достигает 6000 °С, давление – до 360 ГПа (3,5 млн атмосфер).

Ядро разделяют на две оболочки: твердое внутреннее ядро радиусом около 1225 км и жидкое внешнее ядро радиусом около 2250 км [21]. В табл. 2.2 и 2.3 приведены общая структура и характеристика оболочек Земли.

Таблица 2.2

Общая структура планеты Земля [21, 30]

Глубина, км	Название оболочки, ядра
0-60	<i>Литосфера</i> (местами варьируется от 5 до 200 км)
0-30	<i>Земная кора</i> (местами варьируется от 5 до 70-80 км)
30-670	<i>Мантия верхняя</i>
670-2900	<i>Мантия нижняя</i>
2900-5146	<i>Внешнее ядро</i>
5146-6371	<i>Внутреннее ядро</i>

Таблица 2.3

Характеристика оболочек и ядра Земли [1]

Название оболочки, ядра	Объем, $\times 10^{27} \text{ см}^3$	Средняя плотность, г/см^3	Масса, $\times 10^{27} \text{ г}$	Масса, %
Атмосфера (включая стратосферу)	$\approx 0,008$	$1,2 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-6}$	0,000005	0,00009
Гидросфера (в среднем)	0,00137	1,03	0,00141	0,024
Литосфера	0,015	2,8	0,043	0,7
Мантия	0,892	4,5	4,054	67,8
Ядро	0,175	10,7	1,876	31,5
Земля в целом	1,083	5,527	5,974	100

Таким образом, из всего вышеизложенного можно сделать вывод, что Земля достаточно резко разделяется на две части – богатую железом (ядро) и силикатную (мантия и ядро). Масса ядра и мантии составляет более 99 % общей массы Земли; при этом на литосферу приходится 0,7 %, а на земную кору – менее 0,5 %. По объему и массе пород лидирует мантия, превосходя ядро и литосферу. По химическому составу мантия ближе к литосфере.

Таблица 2.4

Общий химический состав Земли, % по массе [25]

Элемент	По Г. Вашингтону	По А. Ферсману
Fe	39,76	39,90
O	27,71	28,55
Si	14,53	14,47
Mg	8,69	11,03
Ni	3,16	2,96
S	0,64	1,44
Ca	2,52	1,38
Al	1,79	1,22
Na	0,39	0,52
Cr	0,20	0,26
Co	0,23	0,06
P	0,11	0,12
K	0,14	0,15
Ti	0,02	-
Mn	0,07	0,18

Сравнительная оценка содержания химических элементов, по данным Г. Вашингтона и А.Е. Ферсмана (табл. 2.4), показывает сходство количественного содержания элементов. Существенные различия получены только для серы, кобальта и марганца.

2.2. Распределение химических элементов в литосфере

Как было показано выше, строение земной коры имеет неравномерный характер – горные системы чередуются с равнинами на материках. Материки, в свою очередь, представляют собой приподнятые над уровнем моря участки земной коры. В значительной степени это связано со строением и составом земной коры в пределах континентальной и океанической ее частей. Океаническая кора богата базальтами, а континентальная – гранитами. Гранитные породы содержат больше кремниевой кислоты и меньше железа, чем базальтовые.

Земная кора сложена горными породами. *Горная порода* – любая масса или агрегат одного или нескольких минеральных видов или органического вещества, являющихся продуктами природных процессов. Вещество может быть твердым, консолидированным или мягким, рыхлым [12]. Горные породы – плотные или рыхлые агрегаты, слагающие земную кору, состоящие из однородных или различных минералов либо минералов и обломков других горных пород [13]. Состав, строение и условия залегания пород находятся в причинной зависимости от формирующих их геологических процессов, происходящих внутри земной коры или на ее поверхности. С геохимической точки зрения горные породы – естественные агрегаты минералов, состоящих преимущественно из *петрогенных элементов* (главных химических элементов породо-образующих минералов) [19].

Минерал – однородное природное твердое тело, находящееся или бывшее в кристаллическом состоянии [2; 18].

Горные породы представляют собой ту основу, на которой сформировались почвы, растительные и животные организмы. Они же являются постоянными источниками химических элементов, поступающих в верхние части ландшафтов.

По происхождению выделяют следующие типы горных пород:

➤ *Магматические горные породы* – это породы, образовавшиеся в результате медленного остывания и затвердения магмы в

земной коре или на земной поверхности. Магматические горные породы по своему происхождению делятся на *эффузивные* и *интрузивные*. Эффузивные (вулканические) горные породы образуются при изливании магмы на поверхность Земли. Интрузивные горные породы, напротив, возникают при изливании магмы в толще земной коры. Большая часть земной коры состоит из магматических пород. Чаще всего они покрыты другими породами и отложениями, и на поверхность выходят редко. Самые распространенные примеры горных пород: базальт, гранит, диабаз, андезиты, диорит, габбро, сиенит, вулканический туф, обсидиан, пемза и др.

➤ *Осадочные горные породы* – это породы, образовавшиеся в результате разрушения других пород или из остатков жизнедеятельности организмов. Примеры осадочных горных пород: гравий, песок, галька, глина, известняк, соль, торф, горючий сланец, каменный и бурый уголь, песчаник, фосфорит и др.

➤ *Метаморфические горные породы* – это породы, опустившиеся в недра Земли и изменившие свои свойства, строение и вид под воздействием высоких температур и давления. Примеры метаморфических пород: кварцит, мрамор, гнейс и др.

Общий химический состав земной коры определяют немногие химические элементы. Всего лишь восемь элементов – O, Si, Al, Fe, Ca, Na, Mg и K – распространены в земной коре в весовом количестве более 1 % (табл. 2.5). Наиболее распространенным элементом земной коры, является кислород, составляющий примерно 47 % ее массы и около 90 % ее объема.

Таблица 2.5

**Наиболее распространенные химические элементы,
% по массе [22; 24]**

Вселенная	Земля	Земная кора	Океан	Атмосфера	Биосфера
H – 77	Fe – 35	O – 46,6	O – 85,8	N – 78,08	O – 53
He – 21	O – 29	Si – 29,5	H – 11	O – 20,95	C – 39
O – 0,8	Si – 14	Al – 8,2	Cl – 1,94	Ar – 0,93	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

Распространенность химических элементов в земной коре неравномерна и повторяет в определенной мере космическую распространенность. Преобладают легкие элементы четырех порядковых номеров, составляющих первые четыре периода таблицы Д.Н. Менделеева. Преобладание кислорода среди химических элементов земной коры определяет ведущее значение распространения минералов, в состав которых он входит.

Первичная дифференциация элементов осуществлялась по их химическому родству к железу, так как железо составляет около 35 % массы Земли. В.М. Гольдшмидт [10; 11; 28] разделил элементы на 4 группы:

- 1) *сидерофилы* – восстанавливаются железом;
- 2) *литофилы* – не восстанавливаются железом и склонны к образованию окислов;
- 3) *халькофилы* – не восстанавливаются железом и образуют сульфиды;
- 4) *атмофилы* – улетучившиеся в атмосферу элементы.

Сидерофильные элементы в ходе дифференциации образовали земное ядро. 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.

Литофильные элементы (54 элемента) образовали земную кору и верхнюю мантию. 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.

Халькофильные элементы (19 элементов) обладают сродством к сере, селену, теллуру и сосредоточены в нижней мантии. Cu, Ag, Zn, Cd, Hg, Ga, Tl, As, Sb, Bi, S, Se, Te образуют многочисленную группу сульфидных и теллуридных минералов. Могут встречаться также в самородном состоянии.

Инертные газы (He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn) относятся к *атмофильной группе*.

В настоящее время выделяют еще одну группу элементов – *биофильные элементы*. Их называют «элементами жизни» и разделяют 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).

Первой объективной количественной геохимической характеристикой земной коры стало *среднее содержание химических*

элементов, показывающее, какой процент от массы земной коры составляет масса данного элемента. Эти величины впервые были определены в 1869 г. Ф.У. Кларком для десяти наиболее распространенных химических элементов: кислорода, кремния, алюминия, железа, кальция, магния, калия, натрия, титана и фосфора. Позже, в 1908 г. он опубликовал данные по среднему содержанию для более полного перечня элементов. При этом в массу земной коры были включены гидросфера и атмосфера. Так как последние в сумме составляют очень малую часть массы твердой коры (см. табл. 2.3), то установленные средние содержания элементов практически и отражают состав именно земной коры. Академик А.Е. Ферсман, учитывая большие заслуги Ф.У. Кларка по установлению первых количественных геохимических характеристик земной коры, предложил называть *среднее содержание химического элемента как в земной коре в целом, так и в ее самостоятельных крупных частях кларком*.

Главная особенность распространенности элементов – это огромный разброс значений их кларков. Почти половина твердой земной коры состоит из одного элемента – О, на втором месте стоит Si, на третьем – Al. В сумме они составляют от 80 до 85 % (по данным разных исследователей) массы земной коры. Если к этому числу добавить Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti, то получим 98-99,5 %, то есть почти всю земную кору (табл. 2.6). Эти девять элементов называют *породообразующими*. Остальные 80 элементов составляют менее 1 %. Широко употребляются также термины *микроэлементы* – элементы, содержащиеся в данной системе в малых количествах (менее 0,01 %), и *макроэлементы*, содержащиеся в сравнительно больших количествах (от 0,01 % до десятков %). Так, Al – микроэлемент в организмах и макроэлемент в силикатных породах.

Массовые кларки, показывающие процентное содержание элементов в земной коре от ее общей массы, получили очень широкое распространение. Однако при некоторых процессах в земной коре идет взаимодействие атомов, а их число не соответствует массовым кларкам. В этих случаях удобнее пользоваться *атомными кларками*, показывающими, какой процент составляют атомы данного элемента от их общего числа в земной коре. Эти определения были введены А.Е. Ферсманом и П.Н. Чирвинским [23; 26]. Кроме того, для литосферы были определены *объемные кларки*, показывающие, какой процент в объемном выражении занимает данный элемент в объеме всей литосферы. Так, массовый кларк

ведущего химического элемента земной коры – кислорода – определяется в пределах 46–49,5 %, атомный – 53,4 %, а объемный – 92 %. Это позволяет считать земную кору кислородной сферой.

Таблица 2.6

**Среднее содержание химических элементов в земной коре
по оценкам разных исследователей [1]**

Элемент	Порядковый номер элемента	Распространенность по массе, %		
		Ф. Кларк и Г. Вашингтон [32]	А.П. Виноградов [5, 6]	С.Р. Тейлор [31]
1	2	3	4	5
Ag	47	$n \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$
Al	13	7,51	8,05	8,23
Ar	18	–	–	–
As	33	$n \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$
Au	79	$n \cdot 10^{-7}$	$4,3 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$
B	5	0,001	0,0012	0,001
Ba	56	0,047	0,065	0,0425
Be	4	0,001	0,00038	0,00028
Bi	83	$n \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$
Br	35	$n \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
C	6	0,087	0,023	0,02
Ca	20	3,29	3,96	4,15
Cd	48	$n \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-5}$
Ce	58	–	$7 \cdot 10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-3}$
Cl	17	0,19	0,017	0,013
Co	27	0,01	0,0018	0,0025
Cr	24	0,033	0,0083	0,01
Cs	55	$n \cdot 10^{-7}$	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Cu	29	0,01	0,0047	0,0055
Dy	66	–	$5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$
Er	68	–	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$
Eu	63	–	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
F	9	0,027	0,066	0,0625
Fe	26	4,70	4,65	4,63
Ga	31	–	0,0019	0,0015
Gd	64	–	$8 \cdot 10^{-4}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$
Ge	32	–	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
H	1	0,88	–	–
He	2	–	–	–
Hf	72	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4}$

1	2	3	4	5
Hg	80	$n \cdot 10^{-5}$	$8,3 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-6}$
Ho	67	–	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
In	49	–	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$
I	53	$n \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
K	19	2,4	2,5	2,09
Kr	36	–	–	–
La	57	–	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$
Li	3	0,004	0,0032	0,002
Lu	71	–	$8 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
Mg	12	1,94	1,87	2,33
Mn	25	0,08	0,1	0,095
Mo	42	$n \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
N	7	0,03	0,0019	0,002
Na	11	2,64	2,5	2,36
Nb	41	–	0,002	0,002
Nd	60	–	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-3}$
Ne	10	–	–	–
Ni	28	0,018	0,0058	0,0075
O	8	49,52	47	46,4
P	15	0,12	0,093	0,105
Pb	82	$2 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \cdot 10^{-3}$
Pr	59	–	$9 \cdot 10^{-4}$	$8,2 \cdot 10^{-4}$
Rb	37	$n \cdot 10^{-3}$	0,015	0,009
Re	75	–	$7 \cdot 10^{-8}$	–
S	16	0,048	0,047	0,026
Sb	51	$n \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
Sc	21	$n \cdot 10^{-5}$	0,001	0,0022
Se	34	$n \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Si	14	25,75	29	28,15
Sm	62	–	$8 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-4}$
Sn	50	$n \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Sr	38	0,017	0,034	0,0375
Ta	73	–	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
Tb	65	–	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-5}$
Th	90	$2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$9,6 \cdot 10^{-4}$
Ti	22	0,58	0,45	0,57
Tl	81	$n \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-5}$
Tu	69	–	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$4,8 \cdot 10^{-5}$
U	92	$8 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$
V	23	0,016	0,009	0,0135

1	2	3	4	5
W	74	$5 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Xe	54	–	–	–
Y	39	–	0,002	0,0033
Yb	70	–	$3,3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$
Zn	30	0,004	0,0083	0,007
Zr	40	0,023	0,017	0,0165

2.3. Химическое выветривание горных пород и минералов

Выветривание – это совокупность сложных процессов разрушения и изменения горных пород и слагающих их минералов под влиянием различных факторов. Различают три типа выветривания: физическое, химическое и биологическое.

Физическое выветривание – это процессы механического раздробления горных пород без изменения химического состава образующих их минералов.

Химическое выветривание – это совокупность процессов химического разрушения горных пород и минералов и образования новых соединений. Это процессы, протекающие под влиянием химического воздействия на породы главным образом кислорода, воды и углекислоты и приводящие к изменению размеров и химического состава отдельных частиц выветривающихся пород. Все минералы, образующиеся в земной коре, представлены химическими соединениями разной степени сложности. Процессы физического выветривания, вызывая измельчение горных пород и минералов, увеличивают площадь соприкосновения их с водой и воздухом. Это приводит к ускорению интенсивности протекания химических реакций, так как скорость химических реакций увеличивается прямо пропорционально площади соприкосновения.

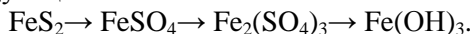
В процессе химического выветривания происходят следующие реакции:

➤ *Растворение* происходит под действием воды, стекающей по поверхности выхода горной породы или просачивающейся через ее трещины и поры. При этом она избирательно выносит (выщелачивает) из породы только некоторые вещества. Сильнее всего растворяются хлориды (галит, сильвин), далее сульфаты (гипс), карбонаты (известняки, доломиты). В зависимости от величины

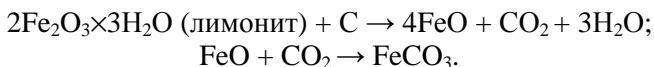
частиц, на которые распалось вещество горной породы, различают два типа растворов: истинные и коллоидные. В первом типе раствора вещество распадается до молекул и ионов. В таком растворе молекулы или ионы растворенного вещества обладают такой же подвижностью, что и молекулы растворителя – воды, что обеспечивает равномерное распределение вещества во всей массе растворителя (диффузию). Особенностью данного типа растворов является то, что при определенном насыщении растворенное вещество выпадает из них в осадок в твердом кристаллическом состоянии, т.е. превращается в минерал. Во втором типе раствора вещество распадается лишь до частиц, превышающих размеры молекул. Эти частицы представляют собой сочетание многих молекул или мелкие обломки кристаллических решеток минералов размером 1-100 нм. Коллоиды могут быть жидкие, вязкие и студнеобразные. Коллоиды способны свертываться (коагулировать) под влиянием электролитов. Под влиянием электролитов частицы коллоида слипаются в хлопья и комочки, которые начинают осаждаться, образуя *гель*. Образование коллоидных растворов зависит от сложного сочетания физико-химических факторов и подчиняется иным закономерностям, нежели обычное растворение. Именно в форме коллоидных растворов выносятся огромное количество продуктов химического выветривания, способствуя тем самым разложению минералов.

➤ *Окисление* – процесс передачи электронов от атомов, входящих в минерал, к кислороду. Реакция идет преимущественно в водной среде. Часто этот процесс идет ступенчато, с образованием промежуточных минералов.

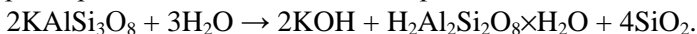
Чаще всего окисляются соли металлов, особенно железа. Например, пирит при взаимодействии с кислородом и водой претерпевает следующие изменения:



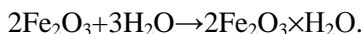
➤ *Восстановление* минералов в условиях биосферы – относительно редкий процесс, так как протекает при отсутствии свободного кислорода. Такие условия иногда возникают в донных отложениях и почвенных горизонтах. Восстановление контролируется главным образом наличием органического вещества и бактериальной деятельностью:



➤ *Гидролиз* – химическая реакция взаимодействия вещества с водой, при которой происходит разложение этого вещества и воды с образованием новых соединений. Это один из наиболее распространенных процессов изменений минералов в биосфере – реакция между ионами воды (H^+ и OH^-) и ионами минералов. Например, гидролиз полевых шпатов с образованием каолинита:

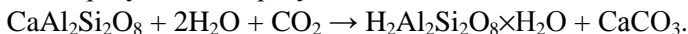


➤ *Гидратация* – присоединение молекул воды к молекулам или ионам. В отличие от гидролиза гидратация не сопровождается образованием водородных или гидроксильных ионов. Это процесс присоединения воды к химическому соединению в результате вхождения ее в кристаллическую решетку или адсорбции поверхностью частиц. Гидратация часто происходит одновременно с процессами окисления, карбонатизации и т.д. При гидратации окисных соединений железа, например гематита, образуется лимонит:



➤ *Дегидратация* – процесс, обратный гидратации, протекающий обычно в условиях недостатка или отсутствия воды.

➤ *Карбонатизация* – процесс взаимодействия ионов CO_3^{2-} и HCO_3^- с минералами с образованием карбонатов. Карбонатизацию труднорастворимых силикатов можно рассмотреть на примере анортита – в результате образуются каолинит и кальцит:



➤ *Диализ* – процесс разделения раствора на коллоидный и истинный. В природных условиях своеобразными мембранами при разделении служат поверхности самих глинистых частиц. При этом ионы металлов из коллоидов глинистых минералов могут отделяться в виде истинных растворов. Процессы диализа распространены в мелководных пресных водоемах с большими объемами глинистого геля. В результате этих процессов разрушаются ранее существовавшие минералы и образуются новые, более устойчивые в условиях биосферы. При этом часть составлявших их элементов переходит в другие формы: водные растворы, коллоидную, биогенную, газовую [17].

Минералы, подвергающиеся химическому выветриванию, называются *первичными*. К ним относятся как простые соли, так и основная часть минералов магматических пород. *Вторичные минералы* – продукты химического выветривания первичных минералов. Они могут быть как простыми, так и сложными соедине-

ниями. К наиболее распространенным вторичным минералам относятся:

- ✓ минералы простых солей: кальцит, магнезит, галит, гипс, сода и др.;

- ✓ минералы окислов и гидроокислов – аморфный кремнезем, гидроокислы: алюминия, железа, гидроокиси марганца;

- ✓ глинистые минералы – каолин, галлуазит, монтмориллонит, гидрослюда (иллит) и др.

При **биологическом выветривании** организмы извлекают из породы необходимые для построения своего тела минеральные вещества и аккумулируют их в поверхностном горизонте породы, создавая условия для формирования почвы. Корни растений и микроорганизмы выделяют во внешнюю среду углекислый газ и различные кислоты (щавелевую, яблочную, янтарную и др.), которые разрушают минералы и усиливают процесс выветривания. Большая роль в биологическом выветривании монолитных пород принадлежит лишайникам, которые разрушают породы как химически, так и механически, проникая гифами внутрь минералов и трещин горных пород. Животные в значительно меньшей степени, чем растения, влияют на горные породы. Однако и они разрушают их путем механического разрыхления и выделения продуктов жизнедеятельности.

2.4. Добыча природных ресурсов как фактор перераспределения химических элементов в природных средах

Наиболее распространенной косной (неживой) природной формой нахождения химических элементов в литосфере являются минералы. Наибольшее число минералов (более 1500 тыс.) образовано при участии кислорода, более 1000 минералов содержит водород и более 500 – кремний. Еще 16 элементов (Ca, Mg, S, Fe, Al, Na, Cu, Pb и др.) входят в состав более чем 100 минералов (каждый). В то же время более 10 элементов (Rh, Os, Ru и др.) образуют всего несколько собственных минералов. При этом необходимо отметить, что распространенность элементов обусловлена не только их способностью к образованию самостоятельных минералов. Так, среднее содержание свинца в земной коре составляет $1,6 \cdot 10^{-3} \%$, а количество собственных минералов равно 199; для галлия соответствующие значения равны $1,9 \cdot 10^{-3} \%$ и 2 [2].

Химические элементы, составляющие минералы, активно используются живыми организмами. При этом элементы становятся доступными для организмов как в процессе, так и после разрушения минералов. Кроме того, минералы широко используются человеком – в настоящее время нет ни одной отрасли промышленности, в которой не применялись бы минералы как в природном виде, так и после соответствующей обработки. Без минерального сырья невозможно развитие топливно-энергетического комплекса, современного сельскохозяйственного производства. При этом потребность человечества в минералах неуклонно растет с каждым годом, что приводит к увеличению масштабов добычи минеральных ресурсов. А это, в свою очередь, влечет за собой увеличение миграционных процессов как самих минералов, так и слагающих их химических элементов. Такая техногенная миграция часто обуславливает резкое возрастание содержания определенных элементов и появление нехарактерных для природных условий ассоциаций химических элементов на отдельных территориях.

Складывающаяся экологическая обстановка при разработке и эксплуатации месторождений становится все более отличной от природной, и площади ее распространения, как правило, увеличиваются. Кроме того, все возрастающая потребность в минеральном сырье приводит к тому, что богатые месторождения быстро отрабатываются, начинается разработка месторождений хотя и с более низким содержанием определенных минералов, но с большими их суммарными запасами. Это, в свою очередь, вызывает необходимость перемещать все большие массы так называемой пустой породы, также состоящей из минералов. В итоге на все больших площадях меняются минералого-геохимические условия, к которым за многие годы адаптировались все живые организмы этих районов. Поскольку сами изменения происходят очень быстро, то часто многие животные и растительные организмы погибают, не успевая приспособиться к новым условиям.

В настоящее время значительная часть редких и рассеянных элементов добывается из изоморфных смесей. *Изоморфные смеси в минералах* – закономерные замещения аналогичных элементов друг другом в кристаллических решетках – широко встречаются в верхних слоях земной коры. Возможности изоморфных примесей как источника многих химических элементов (часто даже добываемых попутно) чрезвычайно велики. Однако отработка руд с развитым изоморфизмом часто способствует специфическому

загрязнению территорий, прилегающих к рудникам, обогатительным фабрикам, металлургическим комбинатам.

При существующих в настоящее время методиках извлечения «попутных элементов» значительная часть этих элементов уходит в отвалы, улетучивается с дымом из труб, сбрасывается с промышленными стоками. Будучи освобожденными из кристаллических решеток, изоморфные примеси начинают самостоятельную миграцию в биосфере. Поэтому в районах рудников, обогатительных фабрик, металлургических комбинатов почвы, воды, растения имеют повышенные концентрации многих элементов, не извлекаемых из руд.

Явление изоморфизма необходимо учитывать при использовании удобрений, так как основная часть минеральных удобрений изготавливается из природных фосфатов и апатитов, в которых в виде изоморфных примесей содержится ряд редких и редкоземельных элементов. Несовершенные технологии приводят к накоплению этих элементов в удобрениях, с которыми они в дальнейшем поступают в почвы, воды, растения, а также в организм животных и человека [17].

Значительные нарушения земной поверхности связаны с горным производством, при этом наибольшие изменения происходят при открытом способе разработке полезных ископаемых. Работа предприятий горнодобывающей и горноперерабатывающей отраслей производства часто приводит к уничтожению почвенного покрова и растительности, возникновению техногенных форм рельефа, деформации участков земной коры (особенно при подземном способе добычи полезных ископаемых) (рис. 2.2). Локальные прогибы земной коры в районах добычи угля зафиксированы в Польше, США, Великобритании, Японии, России, Украине и других странах.

Добывая в огромном количестве и поднимая на поверхность множество минералов, человек существенно изменяет компонентный состав земной коры, а также природные закономерности распространения химических элементов. С увеличением объема и темпов добычи полезных ископаемых не только поверхность Земли, но и земная кора все больше становится объектом использования и воздействия.



Рис. 2.2. Основные типы воздействия горного производства на окружающую природную среду [9]

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляет собой литосфера?
2. Дайте определение земной коры. Есть ли различия в понятиях «литосфера» и «земная кора»?
3. Дайте краткую характеристику двух основных типов земной коры: континентальной и океанической.
4. На какие типы делят горные породы по происхождению?
5. Перечислите основные закономерности распределения химических элементов в литосфере.
6. Дайте определение кларка химического элемента.
7. Перечислите типы выветривания горных пород и минералов.
8. В чем суть химического выветривания?
9. Что представляет собой биологическое выветривание?

10. Определите основные закономерности перераспределения химических элементов в литосфере в процессе хозяйственной деятельности человека.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 2

1. Алексеенко В.А. Экологическая геохимия: учебник. – М.: Логос, 2000. – 627 с.
2. Бетехтин А. Г. Минералогия и понятие о минерале // Курс минералогии. 3-е изд., испр. и доп. – М.: Кн. дом Университет, 2014. – С. 11-13.
3. Беус А.А., Грабовская Л.И., Тихонова Н.В. Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1976.
4. Вернадский В.И. Очерки геохимии. Очерк 3, раздел 2 (Геохимическая история марганца); Очерк 4 (Кремний и силикаты в земной коре); Очерк 5 (Углерод и живое вещество в земной коре); Очерк 6 (Радиоактивные химические элементы рядов урана, тория и актиноурана в земной коре). // Библиотека трудов академика В.И. Вернадского. Труды по геохимии. 8-е изд. – М.: Наука, 1994. – С. 213-229, 237-410.
5. Виноградов А.П. Закономерности распределения химических элементов в земной коре // Геохимия. – 1956. – № 1. – С. 6-52.
6. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 234 с.
7. Виноградов А.П. Избранные труды: Проблемы геохимии и космохимии. – М.: Наука, 1988. – С. 20-90.
8. Войткевич Г.В. Краткий справочник по геохимии / Г.В. Войткевич и др. – М.: Недра, 1974.
9. Войткевич Г.В., Вронский В.А. Основы учения о биосфере: учебное пособие для студентов вузов. – Ростов-на-Дону: Изд-во «Феникс», 1996. – 480 с.
10. Гольдшмидт В.М. История металлов семейства железа в природе // Основные идеи геохимии. Вып. I / под ред. А.Е. Ферсмана. – Л.: Госхимтехиздат, Ленингр. отд., 1933. – С. 221-249.
11. Гольдшмидт В.М. Сборник статей по геохимии редких элементов. – М.-Л.: ГОНТИ, 1938 – 244 с.
12. Горная порода // Российская геологическая энциклопедия. – Т. 1. – М.; СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2010. – С. 432.
13. Горные породы // Геологический словарь. Т. 1. – М.: Госгеолтехиздат, 1960. – С. 187-188.
14. Земная кора / Люстих Е.Н. // Большая советская энциклопедия: [в 30 т.] / гл. ред. А.М. Прохоров. – 3-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1969-1978.

15. Литосфера // Большая советская энциклопедия: [в 30 т.] / гл. ред. А.М. Прохоров. – 3-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1969-1978.
16. Мантия Земли // Большая советская энциклопедия: [в 30 т.] / гл. ред. А.М. Прохоров. – 3-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1969-1978.
17. Мачулина Н.Ю. Геохимия окружающей среды: учебное пособие. – Ухта: УГТУ, 2015. – 154 с.
18. Минерал // Большая советская энциклопедия: [в 30 т.] / гл. ред. А.М. Прохоров. – 3-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1969-1978.
19. Москалева В. Н. Горные породы // Геологический словарь. – Т. 2. – М.: Недра, 1978. – С. 121.
20. Перельман А.И. Геохимия: учебник. – М.: Высшая школа, 1989.
21. Пушаровский Д.Ю., Пушаровский Ю.М. Состав и строение мантии Земли // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 11. – С. 111-119.
22. Сивер Р. Динамичная Земля // В мире науки. – 1983. – № 11. – С. 4-14.
23. Ферсман А.Е. Геохимия. Т. 4 // Ферсман А.Е. Избранные труды. – М.: АН СССР, 1953-1959. – Т. 1-5.
24. Химия окружающей среды: учебное пособие / С.Л. Белопухов, Н.К. Слюняев, М.В. Тютюнькова; под общ. ред. проф. С.Л. Белопухова. – М.: Изд-во «Проспект», 2016. – 240 с.
25. Чертко Н.К. Геохимия: учебное пособие. – Минск: Изд-во Брестского гос. ун-та, 2008. – 170 с.
26. Чирвинский П.Н. Средний химический состав главных минералов изверженных, метаморфических и осадочных пород. – Харьков: Изд-во Харьковского государственного университета им. М. Горького, 1953. – 94 с.
27. Crustal Structure of the Earth // Global Earth Physics: A Handbook of Physical Constants / Thomas J. Ahrens. – Washington, DC: American Geophysical Union, 1995. – P. 214-224.
28. Goldschmidt V.M. Geochemistry. Oxford: Clarendon Press, 1954. – 730 p.
29. Plate Tectonics & Structural Geology. The Geological Survey (February 27, 2004).
30. Structural geology of the Earth's interior // Proceedings National Academy of Science. – 1979. – 76 (9): 4192-4200.
31. Taylor S.R. (1964). Abundance of chemical elements in the continental crust; a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 28(8): 1,273-1,285. doi: 10.1016/0016-7037(64)90129-2.
32. Washington H. Chemical composition of the Earth, meteorites and of the Sun's atmosphere // *Bull. Nat. Res. Coun.* – 1926. – V. 11. – P. 30.



Глава 3. ХИМИЯ ГИДРОСФЕРЫ



3.1. Общие сведения о гидросфере Земли

Гидросфера – водная оболочка Земли. Совокупность всех вод Земли, включая воды, находящиеся в жидком, твердом и газообразном состояниях.

Главный источник всей воды на Земле – дегазация вещества мантии Земли. (*Мантия Земли – это оболочка Земли, которая находится между ядром и земной корой.*)

Гидросфера включает в себя Мировой океан (океаны и моря), озера, реки, влагу атмосферы, воду, содержащуюся в грунтах и земной коре, воду, заключенную в ледниках.

Мировой океан – непрерывная водная оболочка Земли, окружающая все материки и острова и обладающая общностью солевого состава.

Океан – часть Мирового океана, расположенная среди материков, обладающая самостоятельной системой циркуляции вод и специфическими особенностями гидрологического режима.

Море – часть Мирового океана, более или менее обособленная сушей или отделенная от других его частей островами, полуостровами или возвышениями подводного рельефа. Вследствие обособленности в море формируются специфические черты гидрологического режима.

Озеро – заполненная водой котловина (водоем), не соединяющаяся непосредственно с океаном или морем. Гидрологические условия и гидрологический режим формируются в условиях замедленного водообмена.

Река – естественный водный поток (водоток), протекающий в вытянутых понижениях земной поверхности, имеющий относительно разработанное и постоянное русло. Гидрологические условия и гидрологический режим формируются в условиях постоянного, интенсивного турбулентного водообмена.

Воды Земли с содержащимися в них твердыми, жидкими и газообразными веществами называют **природными водами**. Воду, находящуюся на поверхности суши в виде различных водных объектов, называют **водой природной поверхностной**.

Воду, содержащуюся в толще горных пород верхней части земной коры в жидком, твердом и парообразном состояниях, называют **водой природной подземной**. Она образуется в результате конденсации парообразных вод почвы и грунта и инфильтрации поверхностных вод.

К **водным объектам** относят водоемы, водотоки, водохранилища, пруды, болота, ледники и др. В общем случае к водным объектам причисляют также моря и океаны. При этом любую водную поверхность Земли называют **акваторией**.

Водоем – это водный объект в углублении суши, характеризующийся замедленным движением воды или полным его отсутствием. Это озера, водохранилища, пруды, болота. В расширенной трактовке к ним иногда относят также моря и океаны.

Водоток – водный объект, характеризующийся движением воды в направлении уклона в углублении земной поверхности (ручьи, реки, каналы).

Общий объем гидросферы Земли, по данным разных авторов, составляет: около 1,4-1,5 млрд км³ [2; 21; 23; 29; 32]. Наибольший объем гидросферы (94-96,5 %) составляют моря и океа-

ны; 2-4 % – подземные воды; 1,7-2 % – ледники; 0,02 % занимают поверхностные воды суши – озера, реки, болота (рис. 3.1). Океаны покрывают около 71 % земной поверхности (361 млн км²).

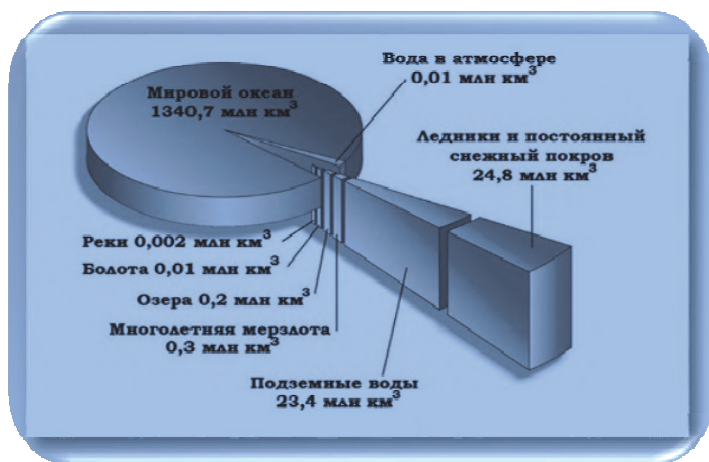


Рис. 3.1. Мировые запасы воды

Любой водный объект может быть описан с помощью набора следующих гидрологических характеристик:

1. Характеристики формы и размера объекта: длина, ширина, глубина, площадь зеркала (поверхности воды) и т.д.
2. Характеристики водного режима: уровень воды, скорость течения, расход, уклон и т. д.
3. Характеристики теплового режима: температура воды, снега, теплоемкость и т. д.
4. Характеристики ледового режима: сроки замерзания, ледостава, вскрытия, очищения ото льда, толщина ледяного покрова и т.д.
5. Характеристики режима наносов: количество наносов, распределение частиц наносов по фракциям и т. д.

Для описания водных объектов используют также гидрохимические характеристики: минерализацию (солесодержание) и соленость, концентрации отдельных ионов, газов и т. д.; гидрофизические характеристики: плотность воды в водном объекте, вязкость и т. д.; гидробиологические характеристики: состав и численность живых организмов, их биомассу и т. д.

Совокупность закономерно повторяющихся во времени гидрологических характеристик объекта формирует его гидрологический режим, а совокупность изменений гидрохимических характеристик – соответственно, гидрохимический режим [4].

Значение **круговорота воды** на Земле невозможно переоценить, так как он не только объединяет части гидросферы, но и связывает между собой все оболочки Земли: атмосферу, гидросферу, литосферу и биосферу. С движением воды связаны эрозионно-аккумулятивные процессы, перенос растворенных и взвешенных веществ; кроме того, живые организмы, населяющие биосферу, не могут существовать без воды. Вода во время круговорота может быть в трех состояниях: жидком, твердом, газообразном. Она переносит огромное количество веществ, необходимых для жизни на Земле. Круговорот воды или влагооборот осуществляется в глобальном, региональном и местном масштабе.

Под действием солнечной радиации вода нагревается, испаряется и, поднимаясь вверх, вступает в единый процесс круговорота тепла и влаги на Земле. В течение года во влагообороте участвует 0,036-0,037 % всей гидросферы; полное обновление гидросферы происходит примерно за 1800 лет. Ежегодно с поверхности Земли испаряется 524,5 тыс. км³ влаги, более 86 % этого объема испаряется с поверхности Мирового океана [2]. Большая часть испарившейся влаги конденсируется над океаном и в виде осадков возвращается обратно, образуя **малый круговорот воды (влагооборот)**. Другая часть испарившейся влаги воздушными течениями переносится на материки, где конденсируется и в виде осадков выпадает на землю. Пролившиеся на землю осадки частично испаряются, а частично просачиваются в грунт или собираются реками. Речные воды, стекая в Мировой океан, завершают **большой круговорот воды (влагооборот)**.

Необходимо отметить особую роль в круговороте воды биологических процессов (транспирации, фотосинтеза), а также потребления воды животными и человеком.

Существенную роль в круговороте воды в природе в современном мире играет деятельность человека. Развитие промышленности, уничтожение лесов, распашка огромных территорий, осушение и орошение земель, создание гигантских водохранилищ и плотин, расходование воды на различные хозяйственные нужды – все это в значительной степени изменило гидрологические процессы на Земле. И хотя хозяйственная деятельность мало повлияла

на общий объем гидросферы, она заметно влияет на отдельные ее части. Сток одних рек уменьшился, других — увеличился, изменилось внутригодовое распределение стока. В результате изъятия воды из вод суши во многих районах мира возросло испарение. Часть воды, которую потребляет человек и которая входит в состав производимой им продукции, надолго выпадает из всеобщего круговорота. Большие объемы воды после использования человеком сбрасываются в водоемы в виде сточных вод. Они загрязнены и приводят в негодность во много раз больший объем чистой воды. Именно угроза загрязнения водных ресурсов представляет сейчас большую опасность, сравнимую с угрозой физической нехватки воды.

Количество воды на Земле не является неизменной величиной. Полагают, что в настоящее время из недр Земли поступает около $0,5\text{--}1 \text{ км}^3$ воды в год; с метеоритами и космической пылью попадает в виде льда около $0,5 \text{ км}^3$ в год и примерно столько же рассеивается в космическое пространство. Кроме того, происходит периодическое перераспределение воды в пределах гидросферы.

Оценить объем переносимой воды, исследовать соотношение между количеством испаряемой с поверхности Мирового океана влаги с ее количеством, возвращающимся обратно в Мировой океан, позволяет **водный баланс Земли**.

Водный баланс основан на том, что соотношение между количеством воды, поступившей в Мировой океан, море, озеро, реку или любой другой водный объект, и убывшей из него, соответствует увеличению или уменьшению количества воды внутри этого водного объекта. В Мировой океан вода поступает в виде атмосферных осадков и материкового стока — это **приходная часть водного баланса**. Расходуется влага на испарение, что составляет **расходную часть водного баланса**. Для суши состав приходной и расходной частей водного баланса иной: в приходной части остаются лишь осадки, а сток, уносящий воду с суши, переходит в расходную часть, присоединяясь к испарению.

Для любого водного объекта может быть написано уравнение водного баланса, в общем случае имеющее вид

$$x + y_1 + w_1 - y_2 - w_2 - z = \pm \Delta u,$$

где x — поступление воды с атмосферными осадками, y_1 и y_2 — соответственно приток и отток воды с поверхностными водами, w_1 и w_2 — соответственно приток и отток воды с подземными водами, z — убыль воды вследствие испарения, $\pm \Delta u$ — изменение количества

воды в пределах водного объекта, которое может быть как положительным, так и отрицательным. Баланс выражается в единицах массы, объема или высоты слоя воды [4].

3.2. Химический состав природных вод

3.2.1. Формирование химического состава природных вод

Природные воды представляют собой сложные растворы различных веществ. Под химическим составом природных вод подразумевают весь набор растворенных газов, минеральных солей и органических соединений.

Средний состав природных вод близок к составу океанической воды. В океанической воде обнаруживаются почти все химические элементы, но 99,78 % массы приходится всего на 8 элементов (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Средний элементный состав воды гидросферы [9]

Элемент	O	H	Cl	Na	Mg	S	Ca	K
% (мас.)	85,7	10,8	1,93	1,03	0,18	0,09	0,04	0,39

Гидросфера постоянно взаимодействует с атмосферой, литосферой и биосферой. По характеру своего воздействия факторы, обуславливающие формирование химического состава природных вод, делятся на следующие группы:

- физико-географические (рельеф, климат, выветривание, почвенный 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 живых организмов);
- антропогенные (деятельность человека).

Вследствие полярности молекул вода обладает практически неограниченной способностью расщеплять вещества на ионы и растворять их. В связи с этим в естественных условиях не существует химически чистой воды. Даже при выпаривании одного литра дождевой воды может быть получено до 30 мг сухого остатка. Вода на Земле находится в состоянии непрерывного круговорота, на

различных этапах которого претерпевает изменения и испытывает следующие воздействия, формирующие ее состав [4]:

- *взаимодействие с атмосферой.* При контакте с атмосферой (например, при прохождении атмосферных осадков через толщу воздуха) вода поглощает находящиеся в ней газы и взвешенные частицы (пыль);

- *взаимодействие с поверхностью суши.* Вода, выпавшая на поверхность суши, частично проникает в почвы и грунты, частично движется вдоль поверхности. В последнем случае она формирует плоскостной безруслый сток и временные потоки, которые устремляются в постоянные водотоки и водоемы. При движении поверхностные потоки воды, разрушая грунты и горные породы, переносят твердые частицы. В результате вода загрязняется взвешенными частицами и органическими веществами как природного, так и антропогенного происхождения;

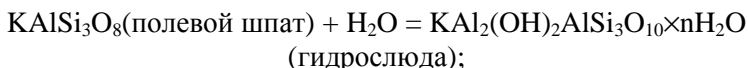
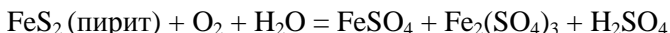
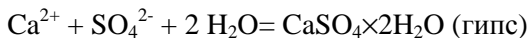
- *прохождение воды через почвы, грунты и горные породы (инфильтрация).* При контакте воды с почвами, грунтами и горными породами происходит целый ряд процессов:

- ✓ механическое удерживание взвешенных и коллоидных частиц;

- ✓ физическая адсорбция, то есть переход молекулярно растворенных веществ, прежде всего органических, из воды в почвы и грунты;

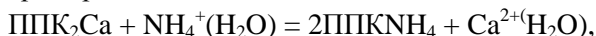
- ✓ физическая десорбция, то есть переход веществ из почв и грунтов в воду;

- ✓ химическое взаимодействие почв и грунтов с водой и ее примесями, включающее процессы растворения, образования малорастворимых соединений, гидролиз, окислительно-восстановительные реакции. *Например:*



- ✓ обмен ионов между водой и почвами и грунтами.

Например:



где ППК – почвенный поглощающий комплекс;

- *образование льда.* При замерзании воды твердая фаза (лед) обедняется примесями, а оставшаяся жидкая фаза ими обогащается. При таянии льда получается вода более чистая, чем исходная;

- *испарение.* При испарении воды в газовую фазу переходят преимущественно H_2O и легколетучие органические примеси; в оставшейся воде увеличивается содержание солей и взвешенных частиц. Как следствие, в зонах с засушливым климатом и высокой испаряемостью соленость природных вод в среднем выше, чем в зонах с меньшей испаряемостью и большей влажностью;

- *биохимические процессы.* В воде протекают различные биохимические процессы: фотосинтез, аэробное и анаэробное окисление органических веществ, нитрификация, сульфатредукция и др.

Растворенные вещества могут находиться в воде в виде молекул (газы), ионов (различные соли), органических низко- и высокомолекулярных соединений (органические вещества), в коллоидном состоянии. 99,3 % солевой массы океана находится в виде ионов.

Помимо растворенных в природных водах присутствуют взвешенные вещества, которые представляют собой нерастворимые в воде частицы, формирующие гетерогенную систему типа «суспензия». К числу взвешенных веществ природного происхождения относятся песок, глинистые частицы, ил. По химической природе взвешенные вещества бывают неорганические (песок, глинистые минералы) и органические (живые и мертвые гидробионты и др.). Неорганические взвешенные вещества попадают в воду главным образом в результате процессов эрозии и выветривания. Органические взвешенные вещества – это в основном гидробионты, прежде всего планктон, и продукты их отмирания. Присутствие взвешенных веществ в воде влияет на такие ее характеристики, как прозрачность и мутность. Концентрация взвешенных веществ в природных водах может колебаться в широких пределах: от 50 мг/л до 1 г/л.

3.2.2. Классификация природных вод по химическому составу

Существует несколько подходов к классификации природных вод. Один из наиболее распространенных способов основан на определении общего количества растворенных минеральных веществ – минерализации (солености).

Для определения минерализации пробу воды предварительно профильтровывают, затем выпаривают и высушивают до постоянной массы при температуре 105 °С. Полученная масса сухого остатка и представляет собой величину минерализации.

По величине минерализации выделяют воды [1]:

- пресные – менее 1 ‰ (г/кг);
- солоноватые – 1 – 25 ‰ (г/кг);
- соленые – 25-50 ‰ (г/кг);
- рассолы – более 50 ‰ (г/кг).

Таблица 3.2

Классификация природных вод по значению минерализации

Минерализация, г/л	Наименование вод
Менее 0,2	Ультрапресные
0,2-1	Пресные
0,5-1	С относительно повышенной минерализацией
1-3	Солоноватые
3-10	Соленые
10-35	С повышенной соленостью
35-50	Переходные к рассолам
50-400	Рассолы

В классификации П.Р. Таубе и А.Г. Барановой [32] в зависимости от минерализации выделено восемь видов или классов природных вод (табл. 3.2).

Согласно классификации, предложенной [1], воды можно разделить на три класса в зависимости от типа преобладающего аниона: гидрокарбонатные, сульфатные, хлоридные (к последним относятся воды Мирового океана). Каждый класс делится на группы в зависимости от преобладающего катиона: кальциевые, магниевые и натриевые.

Наиболее подробной классификацией природных вод является геохимическая классификация вод природных ландшафтов А.И. Перельмана [28]. В этой классификации классы вод выделяются в соответствии с сочетанием окислительно-восстановительных и кислотно-основных условий. По окислительно-восстановительным условиям в ландшафтах выделяются воды с окислительной и восстановительной обстановкой. Окислительная обстановка имеет место в водах, содержащих растворенный кислород. Такие воды называются кислородными, они обладают высокой окислительной способностью и содержат химические соединения

преимущественно в окисленной форме. Воды с восстановительной обстановкой не содержат растворенного кислорода. В таких водах неорганические вещества находятся в восстановленной форме. Окисление органических веществ происходит в результате жизнедеятельности анаэробных бактерий за счет кислорода неорганических соединений, в результате этих реакций происходит образование сероводорода, аммиака, метана. В зависимости от наличия сероводорода воды с восстановительной обстановкой разделяются на сероводородные (содержащие H_2S , HS^- и местами S^{2-}) и глеевые (не содержащие сероводород, гидросульфид- и сульфид-ионы). Для сероводородных вод характерно образование малорастворимых сульфидов железа и ряда других металлов.

По щелочно-кислотным условиям в классификации А.И. Перельмана [28] выделяются воды «сильнокислые» ($\text{pH} < 3 - 4$); «кислые и слабокислые» (pH от 3 – 4 до 6,5); «нейтральные и слабощелочные» (pH от 6,5 до 8,5) и «сильнощелочные» ($\text{pH} > 8,5$). Сильнокислые воды, содержащие серную кислоту, образуются в результате окисления пирита FeS_2 и других дисульфидов, в вулканических районах встречаются и солянокислые воды. Сильнокислые воды получили довольно большое распространение в техногенных ландшафтах. Кислотность слабокислых вод чаще всего обусловлена разложением органических веществ, приводящим к поступлению в воду углекислого газа, фульвокислот и других органических кислот. Такие воды исключительно широко распространены в гумидных ландшафтах (областях с избыточным увлажнением). Нейтральными и слабощелочными обычно являются воды аридных ландшафтов (областей с малым количеством осадков), воды, находящиеся в контакте с известняками и изверженными породами. Углекислый газ, образующийся в этих водах при разложении органических веществ, полностью нейтрализуется кальцитом (CaCO_3) и другими минералами кальция, а также минералами магния, натрия и калия, которыми богаты почвы и породы. К нейтральным и слабощелочным относятся также воды морей и океанов. Сильнощелочные воды обычно обязаны своей реакцией присутствию гидрокарбоната натрия, реже – карбоната натрия.

В каждом из трех классов вод, выделенном по окислительно-восстановительным условиям, щелочно-кислотные условия могут быть различны. Поэтому с учетом этих двух оснований классификации выделяются всего 12 классов вод (табл. 3.3). При этом в одном и том же ландшафте разные воды могут относиться к различ-

ным классам: грунтовые воды – к одному, почвенные – к другому, речные – к третьему и т.д.

Таблица 3.3

Геохимические классы природных вод (по А.И. Перельману [28])

Класс воды по щелочно-кислотным условиям	Класс воды по окислительно-восстановительным условиям		
	Кислородные воды	Глеевые воды	Сероводородные воды
Сильнокислые воды	1	5	9
Кислые и слабокислые воды	2	6	10
Нейтральные и слабо-щелочные	3	7	11
Сильнощелочные (содовые)	4	8	12

Внутри геохимических классов классификация вод продолжается далее по ряду признаков:

➤ по величине общей минерализации выделяют семейства вод от ультрапресных до рассолов;

➤ по содержанию растворимых органических веществ (РОВ) различают, в свою очередь, четыре рода вод: воды, богатые РОВ гумусового ряда (распространены в гумидных ландшафтах); воды, богатые РОВ нефтяного ряда (в ландшафтах достаточно редки), и воды, бедные РОВ (воды аридных ландшафтов, некоторых горных рек и высокогорных озер); воды, промежуточные по содержанию РОВ;

➤ по ионному составу выделяют три вида вод: гидрокарбонатные, сульфатные и хлоридные, которые, в свою очередь, делятся на типы (по преобладающему катиону) и группы (в соответствии с ионными соотношениями в эквивалентах). Ионный состав определяет, в частности, практическое использование вод – пригодность для водоснабжения, орошения, лечения болезней и т.д. [9].

3.2.3. Характеристика основных компонентов химического состава природных вод

Компоненты химического состава природных вод условно разделяют на следующие группы [2; 23; 24; 34]:

- **главные ионы.** Эта группа веществ, главным образом, определяет величину минерализации;
- **растворенные газы** (кислород, азот, двуокись углерода, сероводород и др.);
- **биогенные вещества** – соединения азота, фосфора, кремния, железа;
- **микроэлементы** (группа рассеяния);
- **растворенные органические вещества;**
- **токсичные загрязняющие вещества.**

Содержание основных компонентов и примесей в природных водах выражают в различных единицах измерения: промилле ‰ (тысячная доля), г/л, мг/л, мкг/л, моль/л, мг·экв/л, мг/дм³ и др.

Главные ионы

К числу главных (содержащихся в наибольшем количестве) ионов в природных водах относятся: **анионы** (ионы Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-}) и **катионы** (ионы Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), которые образуют основную часть их минерального состава. Главные ионы называют макрокомпонентами. Концентрация главных ионов может изменяться от нескольких г/л в пресных водах до сотен г/л в рассолах.

Основными природными источниками поступления иона **хлора** в природные воды являются: хлорсодержащие минералы (галит NaCl , сильвин KCl и др.) в горных породах и почвах; атмосферные осадки; вулканические выбросы.

Ионы хлора обладают высокой миграционной способностью. Они не образуют труднорастворимых соединений, не адсорбируются коллоидными системами, не накапливаются биогенным путем. Растворимость хлоридов натрия, калия, кальция и магния очень высокая. В водах с повышенной минерализацией ионы хлора по количественному содержанию занимают первое или второе место, а в высокоминерализованных водах и рассолах ионы хлора преобладают.

Природными источниками **сульфат-ионов** являются различные осадочные породы, в состав которых входит гипс и ангидрит. В качестве источника сульфатов могут выступать солончаки, содержащие мирабилит ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$). Важное значение при обогащении вод сульфат-ионами имеют широко распространенные в земной коре процессы окисления сульфидов.

Сульфатные ионы обладают хорошей миграционной способностью, но уступают в этом отношении хлоридным. Содержание в природных водах ионов SO_4^{2-} ограничивается наличием в воде ионов кальция, которые образуют с сульфат-ионами сравнительно малорастворимый сульфат кальция CaSO_4 .

В анаэробной среде сульфаты восстанавливаются под действием сульфатредуцирующих бактерий до сероводорода. При этом воды обогащаются H_2S и CO_2 , а содержание SO_4^{2-} в них понижается, и появляется сода. Таким образом, при увеличении минерализации природных вод накопление в них сульфат-ионов замедляется.

Значительные количества сульфатных ионов характерны для умеренно минерализованных вод рек и озер. Поверхностные и подземные воды неглубоких горизонтов практически всегда содержат сульфаты, а на больших глубинах при отсутствии кислорода часто залегают бессульфатные воды.

Природными источниками **гидрокарбонат- и карбонат-ионов** в природных водах являются карбонатные породы – известняки, доломиты, мергели и др., карбонатный цемент осадочных пород.

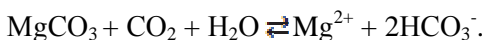
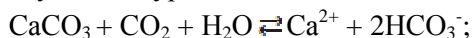
Эти ионы образуют следующую систему динамического химического равновесия:



Распределение ионов HCO_3^- и CO_3^{2-} , а также CO_2 в растворе обусловлено значением pH. Концентрация гидрокарбонатных ионов при $\text{pH} < 5$ практически равна нулю; в кислых растворах в больших количествах присутствует диоксид углерода (CO_2). Гидрокарбонат-ионы преобладают в нейтральных и щелочных водах в интервале pH от 6 до 10. Карбонатные ионы появляются в водах при значениях $\text{pH} > 8$, а в сильно щелочных водах при $\text{pH} > 10$ становятся преобладающими.

Гидрокарбонатные ионы присутствуют практически во всех водах, кроме кислых. Так как незагрязненные природные воды имеют значения pH в пределах 6,5-7,0, то гидрокарбонат-ион является основной формой угольной кислоты в растворе. Ионы HCO_3^- доминируют над другими анионами, в частности над ионами Cl^- и SO_4^{2-} , в водах низкой и умеренной минерализации. Накопление в водах гидрокарбонат-ионов ограничено присутствием кальция, образующего с HCO_3^- слабо растворимую соль. В связи с этим в водах, содержащих значительные количества кальция, содержание гидрокарбонатных ионов невелико.

В подземных водах высокое содержание диоксида углерода приводит к повышению содержания ионов HCO_3^- . Источником CO_2 в природных водах является воздух, биохимические и магматические процессы. Растворение карбонатов кальция и магния описывается следующими уравнениями:



Данные реакции могут идти слева направо только в присутствии диоксида углерода. Таким образом, чем больше CO_2 в воде, тем интенсивнее растворяются карбонаты и тем выше становится содержание HCO_3^- .

Карбонат-ионы из-за низкой растворимости карбонатов кальция и магния присутствуют в природных водах в небольших количествах, и их содержание редко превышает несколько миллиграммов на литр, за исключением содовых щелочных вод, в которых содержание карбонатных и гидрокарбонатных ионов может достигать нескольких граммов и даже несколько десятков граммов на литр. В содовых щелочных водах преобладающим катионом является натрий, а содержание ионов кальция и магния очень низкое.

Ионы натрия и калия обладают большим сходством по химическим свойствам и содержанию в земной коре. Они оба образуют легкорастворимые соединения с главными анионами (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-}). Но при этом миграционная способность ионов натрия и калия существенно различается. Ионы натрия по распространенности в природных водах среди катионов занимают первое место. Соли натрия обладают высокой растворимостью, поэтому миграционная способность Na^+ очень высока. Он может выводиться из раствора, только вступая в реакции обмена с поглощающим комплексом пород. По мере повышения степени минерализации природных вод содержание ионов натрия растет. В природных водах с высокой минерализацией (несколько граммов на литр) во многих случаях Na^+ становится преобладающим катионом. Так, в морской воде ионы натрия составляют около 84 % массы всех катионов [34].

В отличие от ионов натрия, ионы калия содержатся в природных водах в незначительных количествах, за исключением атмосферных осадков. Содержание K^+ составляет только от 4 до 10 % от содержания Na^+ . Слабая миграционная способность ионов

калия обусловлена его высокой биологической потребностью для живых организмов.

Ионы кальция и магния по химическим свойствам и содержанию в земной коре достаточно близки. Однако биологическая активность кальция значительно выше, чем магния. Источниками Ca^{2+} в природных водах являются: известняки, доломиты, известковистый цемент горных пород, гипс, кальцийсодержащие силикаты. Кроме того, после отмирания живых организмов кальций поступает в почву, что приводит к тому, что почвенные растворы содержат большие количества ионов кальция. Природные воды, фильтруясь через почвы, в свою очередь, обогащаются ионами кальция.

Ионы кальция являются доминирующими в катионном составе слабоминерализованных вод. С ростом минерализации относительное содержание ионов кальция быстро снижается, что обусловлено образованием слаборастворимых соединений кальция – CaSO_4 и CaCO_3 .

Ионы магния присутствуют практически во всех природных водах, но очень редко в них доминируют.

Растворенные газы

Наиболее распространенными газами в поверхностных природных водах являются кислород и диоксид углерода, в подземных водах – сероводород и метан. При этом во всех водах присутствует азот. Все эти газы участвуют в гидрохимических и гидробиологических процессах, протекающих в природных водах. Газы поступают в природные воды тремя путями:

- 1) растворяются из атмосферы;
- 2) в результате химических, биологических и биохимических процессов, протекающих в воде и донных осадках;
- 3) приносятся стоком.

Из атмосферы растворяются кислород, диоксид углерода, азот и др., поэтому их содержание в воде в значительной степени зависит от состава атмосферы и от способности самих газов растворяться в природных водах.

Растворимость газа – это количество данного газа, которое может раствориться в 1 л воды при данной температуре, минерализации и влажности воздуха, приведенной к нормальным условиям (к температуре 0°C и атмосферному давлению 760 мм рт.ст.). Растворимость газа при постоянной температуре прямо

пропорциональна давлению и увеличивается с понижением температуры и минерализации. Таким образом, холодные воды более насыщены газами, чем теплые, а в пресных водах (при прочих равных условиях) содержится газов больше, чем в соленых [2].

По величине растворимости в природных водах газы можно разделить на две группы:

1) *хорошо растворимые* – углекислый газ (CO_2) и сероводород (H_2S), так как молекулы этих газов при растворении взаимодействуют с водой, образуя различные химические соединения;

2) *плохо растворимые* – кислород (O_2), азот (N_2), аргон (Ar) и др.

В результате биохимических процессов в воду поступают диоксид углерода, сероводород, азот, водород, метан и др.

Биологические процессы в основном определяют содержание в воде кислорода и диоксида углерода.

Химические, прежде всего окислительные, процессы оказывают большое воздействие на содержание в водах кислорода.

Содержание **кислорода** в природных водах колеблется в среднем от 0 до 14 мг/л. Наиболее богаты кислородом поверхностные воды. Его содержание в отдельных слоях поверхностных вод может достигать 20-30, а иногда и 40-50 мг/л, что является результатом активно происходящих в них процессов фотосинтеза. Кислород, являясь мощным окислителем, играет огромную роль в формировании и поддержании химического состава природных вод. Присутствие растворенного кислорода в водах определяет возможность существования в них самой жизни.

Основным источником **диоксида углерода** в природных водах (помимо поступления из атмосферы) служат процессы окисления органических веществ и дыхание водных организмов. Диапазон содержания CO_2 в природных водах весьма широк – от долей миллиграмма до 3-4 тыс. мг/л. Минимальные значения концентрации характерны для поверхностных вод (особенно минерализованных), максимальные – для подземных. Так же как и кислород, диоксид углерода имеет огромное значение для существования жизни. При этом CO_2 активно участвует в гидрохимических процессах, проходящих в природных водах. Увеличивая растворяющую способность природной воды, диоксид углерода является источником образования в ней гидрокарбонатных и карбонатных ионов.

Источником появления **метана** в природных водах служат биохимические процессы. В поверхностных водах метана практически нет. Максимальные значения его содержания (десятки миллиграммов на 1 л) отмечаются в болотах, а также в глубоких водоносных горизонтах подземных вод, особенно в районах нефтяных и газовых месторождений.

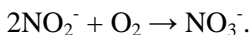
Источник **сероводорода** в природных водах – разложение серосодержащих белковых веществ. Поэтому наибольшие количества сероводорода характерны для придонных слоев водоемов. Так, в нижних слоях глубоких озер и морей часто образуется сероводородная зона. Примером могут служить впадины Балтийского моря. Сероводород всегда присутствует в водах Черного моря, на больших глубинах (1500-2000 м) количество сероводорода может достигать значений 7-7,5 мл/л.

Растворенный **азот** присутствует практически во всех природных водах. Его содержание в водах составляет 10-16 мг/л.

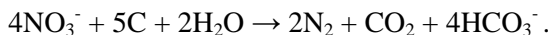
Биогенные вещества

Биогенные вещества в природных водах – это группа содержащихся в воде минеральных соединений: соединений азота, фосфора, кремния и железа. Наличие в воде биогенных элементов является важнейшим условием, определяющим нормальное существование и развитие водных растений. Источники поступления биогенных веществ в природные воды: разложение органических веществ, поверхностный сток, выветривание пород, атмосферные осадки. Основным регулятором количества биогенных веществ в природных водах являются процессы разложения органического вещества и фотосинтез.

Азот и фосфор входят в состав всех тканей живых организмов, что обуславливает их ведущую роль в развитии жизни в водоемах. В свою очередь, содержание этих элементов полностью зависит от интенсивности биохимических и биологических процессов в природных водах. **Азот** присутствует в водах в виде органических и неорганических соединений. В органических соединениях он входит в состав аминокислот и белков тканей организмов и продуктов их распада. Конечным продуктом превращения сложных органических азотсодержащих веществ в неорганические является аммиак. Однако в присутствии кислорода под действием бактерий в процессе нитрификации аммиак окисляется в нитриты и нитраты:



При недостатке кислорода протекает противоположный процесс – денитрификация, приводящий к уменьшению содержания связанного азота в воде:



Таким образом, к числу неорганических ионов азота в природных водах относятся ионы NH_4^+ , NO_2^- и NO_3^- .

Фосфор, так же как и азот, присутствует в природных водах в виде органических и неорганических соединений. Кроме того, он может находиться в виде взвесей различного происхождения. Формы неорганического фосфора обусловлены значениями pH. При значениях $\text{pH} \geq 7$ преобладает форма HPO_4^{2-} (около 90 %) с примесью H_2PO_4^- (около 10 %). При $\text{pH} < 7$ в водах преобладающей формой является H_2PO_4^- .

Кремний постоянно присутствует в природных водах, однако его содержание в поверхностных водах невелико. В речных водах количество кремния изменяется в пределах 1-20, в морских – 0,5-3 мгSi /л. Большое количество кремния вносится в водоемы материковым стоком и ветром.

В растворенном состоянии кремний присутствует в водах в виде кремниевой (H_4SiO_4) и метакремниевой (H_2SiO_3) кислот, в виде коллоидов и некоторого количества дисперсного кристаллического SiO_2 в составе кварца, силикатов и алюмосиликатов.

Высокое содержание растворенных соединений кремния отмечено в углекислотных источниках (50-90 мг/л), а также в водах термальных источников с вулканической деятельностью (120-300 мг/л).

Железо присутствует во всех природных водах в количестве от сотых долей мг/л в верхних слоях поверхностных вод до нескольких мг/л в болотах и грунтовых водах. В группе биогенных элементов железо занимает особое положение, так как входит в состав гемоглобина крови.

В природных водах железо присутствует в форме трехвалентного окисного железа (Fe^{3+}) и двухвалентного закисного железа (Fe^{2+}), легко окисляющегося в окисное. При $\text{pH} = 8$ в воде присутствует преимущественно $\text{Fe}(\text{OH})_3$. При уменьшении pH изменяется соотношение между разными формами гидроксида железа, повышается доля других форм, в частности свободных ионов железа, по сравнению с недиссоциированной $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Увеличивается

растворимость железа. При низких значениях pH встречается в основном двухвалентное железо.

Микроэлементы

В гидрохимии к микроэлементам (микрокомпонентам) относят элементы, среднее содержание которых в водах не превышает 10 мг/л. К их числу относят бром, йод, фтор, барий, молибден, кобальт, стронций, медь, цинк, свинец, никель и др. Формы нахождения микроэлементов в воде многообразны: растворы, коллоиды, взвеси.

Растворенные органические вещества

Все органические вещества, присутствующие в природных водах, представляют собой продукты распада растительных и животных остатков и обмена веществ. Химический состав органических веществ зависит от их происхождения. Основными источниками обогащения природных вод органическим веществом являются:

- продукты жизнедеятельности и останки гидробионтов;
- гумусовые соединения и другие промежуточные продукты распада из иловых отложений на дне водоемов;
- поверхностный сток;
- внутрипочвенный сток.

3.2.4. Показатели качества воды

Показатели качества воды можно разделить на три основные группы: физические, химические и бактериологические.

К физическим показателям относят запах, вкус и привкус, цветность и прозрачность воды.

К основным химическим показателям качества природной воды относят кислотность, щелочность, жесткость, окисляемость и окислительно-восстановительный (редокс-) потенциал.

Кислотность воды

Степень кислотности воды определяется концентрацией ионов водорода. Отрицательный логарифм концентрации водородных ионов принято обозначать pH. Для химически чистой воды при температуре 22⁰ С pH = 7 – нейтральная реакция, pH < 7 – кислая, при pH > 7 – щелочная. По степени кислотности воды делят на 7 групп (табл. 3.4).

Для различных типов природных вод характерны определенные интервалы значений рН. Для болотных вод характерно значение рН 4,5 – 6, что в значительной мере обусловлено присутствием органических кислот.

Таблица 3.4

Классификация природных вод по степени кислотности [25]

Тип вод	Значение рН
Сильнокислые	< 3
Кислые	3-5
Слабокислые	5-6,5
Нейтральные	6,5-7,5
Слабощелочные	7,5-8,5
Щелочные	8,5-9,5
Сильнощелочные	> 9,5

Подземные воды весьма разнообразны по составу и концентрации примесей; величина рН в них колеблется в широких пределах – от 5,5 до 7,3. Воды рек и пресноводных озер имеют водородный показатель, близкий к нейтральному – рН = 6,5-8,5. Несколько большие значения рН характерны для морских вод – 7,7-8,5, а для вод соленых озер значения рН доходят до 8,5-9.

Щелочность воды

Щелочность природных вод – это способность нейтрализовать ионы водорода. Основными компонентами, ответственными за процессы связывания ионов водорода, в большинстве природных вод являются ионы HCO_3^- , CO_3^{2-} и OH^- . Другие ионы, источниками которых служат органические кислоты, фосфаты, бораты и др., вносят лишь незначительный вклад в процессы нейтрализации ионов водорода и начинают играть определенную роль только после связывания гидрокарбонат-ионов.

Различают щелочность карбонатную и общую. **Карбонатная щелочность** – часть общей щелочности, создаваемая карбонатными и гидрокарбонатными ионами. **Общая щелочность** – сумма анионов всех слабых кислот: угольной, борной, фосфорной и др.

В незагрязненных пресных водах угольная кислота существенно преобладает, поэтому общую щелочность обычно принимают равной карбонатной щелочности. Выражается в мг-экв/л или в ммоль/л.

Щелочность прямо пропорциональна содержанию диоксида углерода и обратно пропорциональна величине pH. В океане щелочность составляет 2,0-2,5 мг-экв/л; в водоемах суши изменяется в значительно более широких пределах. Несколько повышена щелочность во внутриконтинентальных морях, где существенно влияние материкового стока, в котором преобладают карбонатные и гидрокарбонатные ионы.

Жесткость воды

Жесткость воды обусловлена присутствием в ней растворенных солей кальция и магния. Под общей жесткостью понимают суммарную концентрацию Ca^{2+} и Mg^{2+} , выраженную в мг-экв/л (или градусах жесткости). Различают *временную жесткость*, образованную гидрокарбонатами (и карбонатами при $\text{pH} > 8,3$), и *постоянную жесткость*, обусловленную присутствием в воде кальциевых и магниевых солей сильных кислот. Это доля общей жесткости, остающаяся после длительного (не менее 1 ч) кипячения воды. Классификации природных вод по величине жесткости представлена в табл. 3.5 и 3.6.

Таблица 3.5

Классификация природных вод по величине жесткости (по О.А. Алекину [1])

Жесткость, мг-экв/л	Группа воды
< 1,5	Очень мягкая
1,5-3	Мягкая
3-6	Умеренно жесткая
6-9	Жесткая
> 9	Очень жесткая

Таблица 3.6

Классификация природных вод по величине жесткости (по А.А. Зенину, Н.В. Белоусовой [12])

Жесткость, мг-экв/л	Группа воды
< 4	Мягкая
4-8	Средней жесткости
8-12	Жесткая
> 12	Очень жесткая

Наименьшая жесткость характерна для дождевых вод. Жесткость грунтовых вод, рек, озер, прудов, расположенных на грунтах с легко выщелачиваемыми солями кальция и магния, может превышать 6-7 мг·экв/л. Жесткость морских вод измеряется десятками мг·экв/л.

Окисляемость воды

Окисляемость характеризует общее содержание в воде восстановителей (неорганических и органических), реагирующих с сильными окислителями. Окисляемость выражают в миллиграммах кислорода, эквивалентного расходу окислителя на 1 литр пробы.

Образующиеся в водоеме и поступающие в него извне органические вещества весьма разнообразны по своей природе и химическим свойствам, в том числе по устойчивости к действию разных окислителей. Соотношение содержащихся в воде легко- и трудноокисляемых веществ в значительной мере влияет на окисляемость воды в условиях того или иного метода ее определения. Перманганатный метод, основанный на окислении веществ, присутствующих в воде, раствором перманганата калия в сернокислой среде при кипячении, применим для определения окисляемости питьевых, поверхностных и малозагрязненных сточных вод.

Для определения окисляемости сильнозагрязненных вод, содержащих трудноокисляемые вещества, рекомендуется использовать бихроматный метод. Определенную этим методом окисляемость называют **химическим потреблением кислорода (ХПК)**.

Показатель **биохимического потребления кислорода (БПК)** определяют как количество кислорода, необходимое для окисления органических соединений микроорганизмами в аэробных условиях. В лабораторных условиях наряду с БПК_{полн.} определяется БПК₅ – биохимическая потребность в кислороде за 5 сут.

ХПК и БПК – одни из важных показателей уровня загрязненности природных и сточных вод органическими соединениями. Величины окисляемости природных вод изменяются в пределах от долей миллиграммов до десятков миллиграммов в литре в зависимости от общей биологической продуктивности водоемов, степени загрязненности органическими веществами и соединениями биогенных элементов, а также от влияния органических веществ естественного происхождения, поступающих из болот, торфяников и т.п. Поверхностные воды имеют более высокую окисляемость по сравнению с подземными (десятые и сотые доли миллиграмма на

1 дм³), исключение представляют воды нефтяных месторождений и грунтовые воды, питающиеся за счет болот. Горные реки и озера характеризуются окисляемостью 2-3 мг О/дм³, реки равнинные – 5-12 мг О/дм³, реки с болотным питанием – десятки миллиграммов на 1 дм³ [25].

Окисляемость незагрязненных поверхностных вод проявляет довольно отчетливую физико-географическую зональность (табл. 3.7) [31].

Таблица 3.7

**Окисляемость природных вод
различных природно-климатических зон**

Окисляемость	Мг О/л	Зона
Очень малая	0-2	Высокогорье
Малая	2-5	Горные районы
Средняя	5-10	Зоны широколиственных лесов, степи, полупустыни и пустыни, а также тундра
Повышенная	15-20	Северная и южная тайга

Таблица 3.8

**Величины БПК₅ в водоемах
с различной степенью загрязненности [20]**

Степень загрязнения (классы водоемов)	БПК₅
Очень чистые	0,5 – 1,0
Чистые	1,1 – 1,9
Умеренно загрязненные	2,0 – 2,9
Загрязненные	3,0 – 3,9
Грязные	4,0 – 10,0
Очень грязные	> 10,0

Окисляемость подвержена закономерным сезонным колебаниям, которые зависят в основном от изменения температуры и от исходной концентрации растворенного кислорода. Влияние температуры сказывается через ее воздействие на скорость процесса потребления, которая увеличивается в 2-3 раза при повышении температуры на 10 °С. Влияние начальной концентрации кислорода на процесс биохимического потребления кислорода связано с тем, что значительная часть микроорганизмов имеет свой кисло-

родный оптимум для развития в целом и для физиологической и биохимической активности. Суточные колебания величин БПК₅ также зависят от исходной концентрации растворенного кислорода, которая может в течение суток изменяться на 2,5 мг/дм³ в зависимости от соотношения интенсивности процессов его продуцирования и потребления. Весьма значительны изменения величин БПК₅ в зависимости от степени загрязненности водоемов (табл. 3.8).

Окислительно-восстановительный (редокс-) потенциал

К основным процессам, обеспечивающим жизнедеятельность любого организма, относятся окислительно-восстановительные реакции, то есть реакции, связанные с передачей или присоединением электронов. Во время окислительных или восстановительных реакций изменяется электрический потенциал окисляемого или восстанавливаемого вещества: одно вещество, отдавая свои электроны и заряжаясь положительно, окисляется, другое, приобретая электроны и заряжаясь отрицательно, – восстанавливается. Разность электрических потенциалов между ними и есть окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) или РЕДОКС-потенциал от англ. redox – REDuction/OXidation.

Окислительно-восстановительный потенциал воды – это показатель ее окислительных (кислотных) либо восстановительных (щелочных) качеств. Он характеризует степень активности электронов в окислительно-восстановительных реакциях, то есть реакциях, связанных с присоединением или передачей электронов. При положительном ОВП вода захватывает и присоединяет электроны тех веществ, с которыми вступает в реакцию (окисляет), а при отрицательном – отдает электроны (восстанавливает).

Наибольшей окислительной способностью обладает кислород, а восстановительной – водород, но это далеко не единственные окислители и восстановители. Окислительно-восстановительный потенциал зависит от температуры и взаимосвязан с pH.

ОВП обозначается как **Eh** и выражается в милливольтках (мВ).

Значение ОВП может иметь как положительное, так и отрицательное значение. В природной воде ОВП колеблется от –400 мВ до +700 мВ. Когда значение ОВП положительно, то свойства воды окислительные. Такие показатели наиболее часто встречаются в поверхностных водах. Установлено, что наряду с кисло-

родом неизменным компонентом-окислителем таких вод является пероксид водорода H_2O_2 .

Когда значение ОВП отрицательно, то свойства воды – восстановительные. Это типично для подземных горных источников. Замена окислительного редокс-потенциала в поверхностных водах на восстановительный приводит к активному развитию синезеленых водорослей и гибели рыбной молоди. При этом снижается способность водоема к самоочищению, происходит накопление токсичных веществ и создаются благоприятные условия для размножения патогенной микрофлоры. Изменению характера среды в водоеме от окислительного к восстановительному способствует поступление сточных вод, загрязненных органическими и неорганическими соединениями-восстановителями (спиртами, фенолами, альдегидами, ионами HS^- , S^{2-} , NH_4^+ и др.) [34].

3.3. Химия континентальных вод

В глобальном круговороте воды выделяют два звена: океаническое и материковое. Они действуют по принципу круговорота и связаны между собой переносом водяного пара, поверхностным и подземным стоком с суши в океан. К континентальным водам относят:

- речные воды;
- озерные воды;
- воды искусственных водоемов;
- воды болот;
- подземные воды;
- воды ледников.

Континентальные воды формируются за счет перехвата части океанического круговорота. Далеко не вся вода, принесенная с океана на сушу, выпадает в виде осадков – от 20 до 75 % ее проходит над материками транзитом и снова уносится в океаны [29]. Чем крупнее материк и выше на нем горы, тем больше он перехватывает океанической влаги. Поэтому максимальный перехват наблюдается в Евразии, а минимальный – в Австралии.

3.3.1. Речные воды

Река представляет собой водоток достаточно крупных размеров, питающийся атмосферными осадками и подземными водами. К рекам, как правило, относят постоянные и относительно

крупные водотоки с площадью бассейна не менее 50 км²; водотоки меньшего размера называют *ручьями*.

Реки можно классифицировать по источникам (видам) питания: питание может быть преимущественно снеговым, дождевым, ледниковым (ледовым) или смешанным. Снеговое питание обусловлено таянием снежного покрова, которое на равнинах наиболее интенсивно протекает весной, а в горах – летом. Дождевое питание обеспечивается за счет дождей и ливней, часть которых выпадает непосредственно на поверхность зеркала реки, а часть поступает с поверхностным стоком. Ледниковое питание обязано своим происхождением таянию ледников суши.

Источники питания рек в значительной степени определяют водный режим рек. По водному режиму все реки мира могут быть разделены на реки с весенним половодьем, с половодьем в теплую часть года и реки с паводочным режимом.

По размеру реки подразделяют на три группы:

- 1) *большие* – с площадью бассейна более 50 000 км²;
- 2) *средние* – с площадью бассейна в пределах 2 000–50 000 км²;
- 3) *малые* – с площадью бассейна менее 2 000 км².

Речная сеть – это результат сложных тектонических и эрозионно-аккумулятивных процессов, движения ледников, эвстатических колебаний уровня океана и морей и т.д. При этом в реках вода возобновляется намного быстрее, чем в любых других компонентах гидросферы.

Реки весьма разнообразны по размерам, глубинам и скоростям течения. Двадцать крупнейших рек Земли несут около 40 % общего континентального стока, из которых на одну Амазонку приходится 15 %. В табл. 3.9 приведены основные характеристики десяти самых крупных рек мира [35].

Химический состав рек, озер и грунтовых вод сильно варьирует и контролируется преимущественно тремя факторами:

- 1) химией элементов;
- 2) режимами выветривания;
- 3) биологическими процессами.

В табл. 3.10 показано различие между средним содержанием основных элементов в земной коре и в речных водах. Как видно из приведенных данных, ионный состав растворенных веществ в пресной речной воде принципиально отличается от состава веществ в континентальной коре. При этом содержание основных, преобла-

дающих в речных водах катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ и K^+) в растворе ниже их содержания в земной коре.

Таблица 3.9

Основные характеристики крупнейших рек мира

Название	Континент	Длина, км	Площадь бассейна, млн км ²	Расход воды в устье, тыс. м ³ /с
Амазонка (с Мараньоном)	Южная Америка	6437	6,915	200
Миссисипи (с Миссури)	Северная Америка	5971	3,268	18
Нил	Африка	6670	2,870	3
Янзцы	Азия	5800	1,808	34
Обь (с Иртышом)	Азия	5410	2,990	12,8
Хуанхэ	Азия	4845	0,771	1,5
Меконг	Азия	4500	0,810	14,8
Амур	Азия	4440	1,855	10,9
Лена	Азия	4400	2,490	16,9
Конго	Африка	4370	3,820	41

Таблица 3.10

**Средний состав основных катионов
в породах континентальной коры и речных вод [35]**

Катионы	Содержание, мг/кг	
	Континентальная кора	Речные воды
Al^{3+}	80	0,05
Fe^{3+}	35	0,04
Ca^{2+}	30	13
Mg^{2+}	13	3,4
Na^+	29	5,2
K^+	28	1,3

Воды любой реки характеризуются более или менее своеобразным набором гидрологических и гидрохимических характеристик (табл. 3.11).

В подавляющем большинстве рек вода имеет невысокую минерализацию; она пресная или изредка солоноватая. Содержание взвешенных веществ в воде может быть весьма различно: оно зависит от поступления взвеси и от ее осаждения. Первый процесс определяется в основном геологической деятельностью рек, пре-

обладающими источниками питания, свойствами почв и горных пород, локализованных в области водосбора; второй – режимом движения воды. При прочих равных условиях мутность тем выше, чем выше турбулентность и больше скорость движения воды.

Таблица 3.11

Химический состав воды некоторых рек [5]

Река и населенный пункт	Концентрация, мг/дм ³						
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Сумма ионов
Печора (с. Усть-Цильма)	4,6	2,4	3,2	24,4	2,6	3,0	40,2
Сев. Двина (д. Звоз)	41,4	9,4	13,4	122	47,1	14	247,3
Нева (с. Ивановское)	8,0	1,2	3,8	27,5	4,5	3,8	48,8
Днепр (с. Разумовка)	55,7	11,8	2,3	195,4	12,9	9,2	287,3
Дон (ст. Аксайская)	82,0	18,0	52,2	260,0	112	14,0	538,2
Кубань (хутор Тиховский)	37,0	3,0	12,0	108,0	18,0	17,0	195
Калаус (с. Петровское)	303	379	1769	378	3527	1548	7904
Волга (г. Вольск)	80,4	22,3	12,5	210,4	112,3	19,9	457,8
Ока (г. Муром)	58,8	11,2	18,3	34,5	10,8	4,6	138,2
Москва (с. Татарово)	61,5	14,2	23,0	250,7	5,6	2,3	357,3
Кама (с. Чистополь)	82,2	21,0	10,3	190,3	132,0	13,5	449,3
Урал (г. Чкалов)	106,2	27,4	11,0	265,4	156,1	14,2	580,3
Нура (с. Романовское)	386	38,0	132,5	124,6	145,6	172	998,7
Иртыш (г. Омск)	24,5	4,7	0,1	79,3	15,3	3,4	127,3
Ишим (г. Акмолинск)	81,5	77,3	13,0	124,0	386,7	529	1211,5
Лена (с. Кюсюр)	18,0	3,8	18,8	66,4	21,2	15,2	143,4
Енисей (г. Красноярск)	19,3	4,0	1,5	73,2	4,0	12,6	114,6
Яна (г. Верхоянск)	8,2	2,1	0,5	31,7	2,8	1,5	46,8

Содержание органических веществ в речных водах может меняться в широких пределах. Относительно высокая концентрация органического вещества обычно характерна для рек, берущих свое начало в заболоченных местностях. В реках, протекающих в

твердых, слабо подверженных эрозии грунтах и не испытывающих антропогенной нагрузки, оно обычно невелико (около 20 мг/дм³) [4].

Реки являются средой обитания различных гидробионтов: водорослей, бактерий, пресмыкающихся, рыб, млекопитающих. Их количество, состав и продуктивность зависят от состава природных вод и, в свою очередь, вносят свой вклад в его формирование.

3.3.2. Озерные воды

Озеро – естественный водоем суши, не имеющий прямой связи с океаном. Для образования озера необходимы два непременных условия – наличие естественной котловины, то есть замкнутого понижения земной поверхности, и находящегося в этой котловине определенного объема воды [19; 24].

Озера могут быть классифицированы по следующим признакам:

- *размеру*: очень большие – площадью (S) $> 1\,000\text{ км}^2$; большие – $S = 101 - 1\,000\text{ км}^2$; средние – $S = 10 - 100\text{ км}^2$ и малые – $S < 10\text{ км}^2$. Очень малые озера иногда называют «прудами»;

- *степени постоянства*: постоянные и временные;

- *происхождению котловины*: тектонические, вулканические, метеоритные, ледниковые, карстовые, термокарстовые, суффозионные, эоловые, органогенные, а также котловины речного и морского происхождения;

- *характеру водообмена*: сточные (часть поступающего в них речного стока сбрасывается вниз по течению), бессточные (получая сток извне, расходуют его лишь на испарение, инфильтрацию или искусственный водозабор, не отдавая ничего в естественные или искусственные водотоки);

- *структуре водного баланса*;

- *термическому режиму* (по F.A. Forel [36]): полярные – с температурой всего года ниже $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ и преобладанием обратной температурной стратификации (уменьшение температуры воды от дна к поверхности); тропические – с температурой всего года выше $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ и преобладанием прямой температурной стратификации (увеличение температуры воды от дна к поверхности); озера в условиях умеренного климата с температурой выше $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ и прямой температурной стратификацией летом и температурой ниже $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ и обратной температурной стратификацией зимой;

➤ *минерализации вод* – озера подразделяют по степени минерализации в соответствии с общей классификацией природных вод по минерализации (раздел 3.2.2.) (пресные, солоноватые, соленые и т.д.). Озера с очень высоким содержанием солей называют рапными;

➤ *условиям питания водных организмов* и т.д.

Наибольшее количество крупных озер с площадью более 100 км² находится в Африке, Азии и Северной Америке. Самое большое по площади озеро на Земле – это солоноватое Каспийское море. Из пресных озер самое большое – Верхнее (Северная Америка). Наибольший объем воды сосредоточен в Каспийском море, а среди пресных озер – в Байкале. Кроме того, Байкал – самое глубокое озеро в мире (табл. 3.12).

Таблица 3.12

Основные морфологические характеристики крупнейших пресноводных озер мира [14]

Название озера (страна)	Площадь водного зеркала, км ²	Объем, км ³	Глубина, м
<i>Верхнее</i> (Канада, США)	82 367	12 221	406
<i>Виктория</i> (Уганда, Кения, Танзания)	68 800	2 760	80
<i>Гурон</i> (Канада, США)	59 500	3 537	229
<i>Мичиган</i> (США)	58 016	4 871	281
<i>Танганьика</i> (Бурунди, Заир, Танзания, Замбия)	32 000	17 800	1 470
<i>Байкал</i> (Россия)	31 500	23 000	1 750
<i>Большое Медвежье</i> (Канада)	31 326	2 236	446
<i>Ньяса</i> (Танзания, Малави, Мозамбик)	30 800	8 400	758
<i>Большое Невольничье</i> (Канада)	28 568	2 088	614

Озера могут иметь воду различную степень минерализации. Наименьшую минерализацию имеют воды зон избыточного и достаточного увлажнения (Ладожское, Байкал), наибольшую – озера засушливых зон (Каспийское море, Мертвое море). Когда концентрация солей в озерах или в отдельных частях озер достигает состояния насыщения, начинается осаждение солей: мирабилита Na₂SO₄·10H₂O (Кара-Богаз-Гол), NaCl (Баскунчак) и др.

Так как интенсивность движения воды в озерах обычно значительно меньше, чем в реках, в них активно протекают процессы осадкообразования и, следовательно, концентрация взвешенных веществ в водах обычно невелика.

Помимо растворенных солей вода озер содержит биогенные вещества, такие как соединения азота, фосфора, кремния; растворенные газы, представленные кислородом, азотом, диоксидом углерода и органические вещества.

Растворенный кислород в озерах, как и в других водных объектах, появляется в результате процессов фотосинтеза и абсорбции из воздуха. Содержание O_2 заметно уменьшается с глубиной; в реках аналогичная зависимость выражена гораздо менее резко из-за большего перемешивания воды.

3.3.3. Воды болот

Болото – это избыточно увлажненный с застойным водным режимом участок земной поверхности, в пределах которого происходит накопление органического вещества в виде неразложившихся остатков растительности.

Болота образуются двумя путями: заболачивание суши (основной вид образования болот) и заболачивание (зарастание) водоемов.

Заболачивание суши происходит в результате затопления территории (как результат преобладания количества осадков над испарением при отсутствии хорошего дренажа) и подтопления территории (как результат повышения уровня грунтовых вод).

Заболачивание водоемов в значительной степени распространено в условиях умеренного и теплого климата. Процесс зарастания начинается с берегов, после чего на дне водоема начинается формироваться органический ил (сапропель), состоящий из глинистых частиц и остатков водных организмов. Водоем постепенно мелеет, зарастает высшими растениями. Неполное разложение растительных остатков способствует образованию торфа. Все эти процессы приводят к превращению водоема в болото.

Органические вещества придают воде желтоватый цвет и характерный «болотный» запах. Вода болот, как правило, имеет значение pH от 4,5 до 6, что обусловлено присутствием органических кислот. Содержание минеральных веществ в воде болот при этом значительно меньше, чем в воде рек и озер той же местности. Биохимические процессы в болотах протекают как в аэробных, так и анаэробных условиях. В анаэробных зонах протекают процессы

кислотного и метанового брожения, сульфатредукции и т. д., что приводит к образованию так называемого «болотного газа», основным компонентом которого является метан. Пузырьки болотного газа могут проходить сквозь толщу воды на поверхность и сгорать в воздухе.

Все болота можно разделить на *заболоченные земли* (не имеющие хорошо выраженного слоя торфа) и собственно торфяные болота [17; 18]. К заболоченным землям относятся травяные болота арктической тундры, тростниковые и осоковые болота лесостепи, засоленные болота, полупустыни и пустыни и др. *Торфяные болота*, в свою очередь, в зависимости от условий водно-минерального питания подразделяют на низинные, переходные и верховые. *Низинные болота* (эвтрофные) – тип болот с богатым водно-минеральным питанием, в основном за счет грунтовых вод. Расположены в поймах рек, по берегам озер, в местах выхода ключей, в низких местах. В районах с умеренным климатом — это часто лесные или травяные болота. *Переходные* (мезотрофные) болота по характеру растительности и умеренному минеральному питанию находятся между низинными и верховыми болотами. *Верховые* (олиготрофные) болота расположены обычно на плоских водоразделах, питаются только за счет атмосферных осадков, где очень мало минеральных веществ; вода в них резко кислая.

Оценка гидрологического значения болот неоднозначна. С одной стороны, активное испарение воды из болот, в том числе испарение болотной растительностью (транспирация), способствует уменьшению средней величины речного стока с заболоченных территорий по сравнению с сопредельными незаболоченными землями. Однако в то же время болота часто дают начало ручьям и рекам, и их осушение приводит к обмелению этих водотоков и понижению уровня грунтовых вод. При этом болота – это среда обитания различных видов живых организмов.

Кроме того, болота играют важную роль в формировании химического состава речных вод. Так, реки, берущие начало из верховых болот, питающихся преимущественно атмосферными осадками, содержат мало минеральных веществ, но значительно обогащены органическими веществами.

3.3.4. Подземные воды

Подземные воды – воды, находящиеся в толще горных пород верхней части земной коры в жидком, твердом и газообразном состоянии [22].

Питание подземных вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, конденсации водяного пара, поступления воды из поверхностных водных объектов, поступления воды из выше- и нижележащих пластов подземных вод.

По условиям залегания выделяют следующие типы подземных вод:

- безнапорные воды: почвенные подвешенные, верховодка, межпластовые, грунтовые;
- напорные (артезианские).

Почвенные воды заполняют часть промежутков между частицами почвы; они могут быть свободными, перемещающимися под влиянием силы тяжести, или связанными, удерживаемыми молекулярными силами.

Грунто́вые воды образуют водоносный горизонт на первом от поверхности водоупорном слое. В связи с неглубоким залеганием от поверхности земли уровень грунтовых вод значительно меняется по сезонам года: он то повышается после выпадения осадков или таяния снега, то понижается в засушливое время.

Межпластовые воды – нижележащие водоносные горизонты, заключенные между двумя водоупорными слоями. В отличие от грунтовых, уровень межпластовых вод более постоянен и меньше изменяется во времени. Напорные межпластовые воды полностью заполняют водоносный горизонт и находятся под давлением.

Артезианские воды – напорные подземные воды, заключенные в водоносных пластах горных пород между водоупорными слоями. Обычно встречаются в пределах определенных геологических структур (впадин, мульд, флексур и др.), образуя артезианские бассейны.

Для подземных вод характерно широчайшее разнообразие их состава и свойств. Формирование химического состава подземных происходит в результате длительного взаимодействия с грунтами и горными породами при прямом или косвенном участии биохимических процессов. Связь подземных вод с атмосферой затруднена, и тем более, чем ниже залегают эти воды. На подземные воды в гораздо большей степени, чем на поверхностные, влияют происходящие в недрах Земли геологические процессы. При движении вод через грунты и горные породы происходит механическое удерживание взвешенных частиц, поэтому подземные воды обычно характеризуются очень незначительной мутностью. Со-

держание в подземных водах растворенного кислорода в большинстве случаев невелико, причем при увеличении глубины залегания оно уменьшается. При этом содержание CO_2 иногда настолько значительно, что при выходе на поверхность он выделяется в виде пузырьков. Зоны развития насыщенных углекислотой подземных вод часто приурочены к областям активной геологической деятельности. В результате биохимических анаэробных процессов и поступления из глубин планеты в подземных водах появляются сероводород и метан; высокие концентрации этих газов, особенно CH_4 , часто обусловлены влиянием нефтеносных пластов или вулканической деятельностью [4].

Качество подземных вод имеет очень важное значение для человека, поскольку они являются основным источником питьевой воды. Большие объемы подземных вод используются в промышленности и сельском хозяйстве, а минеральные воды широко применяют в лечебных целях.

3.3.5. Воды ледников

Ледники – естественные массы льда, образованные в результате многолетнего накопления, уплотнения и перекристаллизации снега. Общая площадь современных ледников около 16,3 млн км^2 . Они занимают около 11 % площади суши, а их общий объем достигает 30 млн км^3 [29]. В ледниках сосредоточено около 70 % мировых запасов пресной воды.

Таяние ледников формирует значительную часть стока рек в горных равнинах, особенно летом, хотя в целом вклад ледников в речной сток невелик и составляет не более 1 %. Так, в Средней Азии, где ледники занимают около 5 % площади, их доля в речном стоке в среднем за год составляет 20 %, увеличиваясь в летние месяцы до 50 %.

3.4. Химия океанических вод

Мировой океан представляет собой основную часть гидросферы, непрерывную, но не сплошную водную оболочку Земли. Он чрезвычайно плотно связан с сушей – между ними постоянно происходит обмен веществом и энергией. Континенты и большие архипелаги разделяют Мировой океан на части (океаны). Большие регионы океанов известны как моря, заливы, проливы и т. п. Средняя глубина толщи воды в Мировом океане – 3700 м. Самая глубокая точка находится в Марианском желобе – 11 022 м.

Современные ученые подразделяют Мировой океан на четыре океана: Тихий, Атлантический, Индийский и Северный Ледовитый. С 1937 по 1953 г. выделяли пять океанов – помимо четырех вышеперечисленных, океаном считали Южный (или Южный Ледовитый). Термин «Южный океан» многократно появился в XVIII в., когда началось систематическое исследование региона. В публикациях Международной гидрографической организации Южный океан из состава Атлантического, Индийского и Тихого был выделен в 1937 г. Обоснование этого заключалось в том, что в южной своей части границы между тремя океанами весьма условны, в то же время воды, прилегающие к Антарктиде, имеют свою специфику, а также объединены Антарктическим циркумполярным течением. Однако впоследствии от выделения отдельного Южного океана отказались. В 2000 г. Международная гидрографическая организация вновь приняла решение о разделении Мирового океана на пять океанов, но пока оно не ратифицировано [15]. Южный океан выделяют в районе Антарктиды между 35° ю.ш. (ориентируясь на признаки циркуляции воды и атмосферы) до 60° ю.ш. (ориентируясь по форме рельефа дна).

Краткая характеристика океанов

➤ Самый большой из океанов – *Тихий океан*, занимает площадь 178,68 млн км² при средней глубине около 4 тыс. м. Здесь расположена самая глубокая точка Земли – Марианский желоб (глубина более 11 тыс. м) и самая высокая подводная гора мира – вулкан Мауна-Кеа (высота от поверхности океана 4 тыс. м, а от океанического дна более 10 тыс. м, что почти на 2 тыс. м превышает высоту Эвереста).

➤ Площадь *Атлантического океана* составляет 91,66 млн км² при средней глубине 3,5 тыс. м. Самая глубокая точка – желоб Пуэрто-Рико (более 8,7 тыс. м). Океан имеет вытянутую форму, ориентированную с севера на юг. В Атлантическом океане протекает самое мощное теплое течение мира – Гольфстрим.

➤ Площадь *Индийского океана* – 76,17 млн км², средняя глубина – более 3,7 тыс. м. Самая глубокая точка океана – Яванская впадина (более 7,2 тыс. м).

➤ *Северный Ледовитый океан* имеет площадь 14,75 млн км², среднюю глубину около 1,2 тыс. м. При этом самая большая глубина океана отмечена в Гренландском море – около 5,5 тыс. м.

➤ *Южный океан* (с решением о выделении пятого океана в данный момент соглашаются не все ученые) имеет площадь

20,327 млн км² (данную площадь необходимо отнять от приведенных выше значений площадей трех океанов – Тихого, Атлантического и Индийского). Средняя глубина Южного океана составляет около 3,5 тыс. м, а самым глубоким местом является желоб Южно-Сандвичев (около 8,5 тыс. м) [16].

Все океаны делятся на моря, заливы, проливы. Прямое сообщение с океаном имеет залив, который представляет собой часть океана, которая не впадает глубоко в сушу и всегда имеет общие с ним воды. А вот моря могут находиться на расстоянии нескольких тысяч километров от океана, быть окруженными сушей, но они всегда соединены с океаном проливами, заливами, другими морями. Моря и океаны всегда связаны между собой, если этого сообщения нет, каких бы больших размеров ни был бы водоем и какой бы соленостью не обладал, он считается озером.

Химический состав вод Мирового океана сильно отличается от состава пресных вод суши. Эти различия проявляются в следующем:

➤ *в количественном составе*: в 1 кг океанической воды содержится в среднем 35 г солей, а в 1 кг речной воды – 0,17 г. При этом вкус океанической воды горько-соленый;

➤ *в качественном составе* – распределение ионов имеет следующие закономерности:

➤ воды Мирового океана: $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^{2-} + \text{CO}_3^{2-}$;

$\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$;

в пресных водах суши: $\text{HCO}_3^{2-} + \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$;

$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ + \text{K}^+$;

➤ *в соотношении главных ионов*: в водах Мирового океана действует **закон постоянства солевого состава**, который проявляется в постоянстве процентного соотношения концентраций главных ионов вне зависимости от их абсолютных содержаний. Эта закономерность называется «постоянство солевого состава морских вод» (иногда ее называют «правилом Диттмара»).

Это позволяет рассчитывать соленость различных частей вод Мирового океана на основании содержания какой-либо одной соли. Как правило, такого рода расчет производится по концентрации хлоридов, что связано, с одной стороны, с преобладанием их в океанической воде и, с другой стороны, с легкостью определения их содержания.

В табл. 3.13 и 3.14 приведено среднее содержание различных солей и ионов в морских водах.

Степень солёности океанических вод обусловлена различием между количеством осадков и испаряемостью. Наблюдается общее уменьшение солёности по направлению к высоким широтам, связанное как с изменением водного баланса, так и с увеличением материкового стока. Максимальные значения солёности в тропических широтах отмечаются в условиях дефицита осадков и повышенного испарения при сильных пассатных ветрах. Напротив, в условиях повышенного количества осадков происходит снижение солёности поверхностного слоя воды.

Таблица 3.13

Средний химический состав морской воды [35]

Соль	Содержание соли	
	г/кг воды	%
NaCl	27,2	77,8
MgCl ₂	3,8	10,9
MgSO ₄	1,7	4,7
CaSO ₄	1,2	3,6
K ₂ SO ₄	0,9	2,5
CaCO ₃	0,1	0,3
<i>Итого</i>	34,9	99,8

Таблица 3.14

Катионно-анионный состав морской воды [1]

Содержание анионов		Содержание катионов	
Анионы	‰	Катионы	‰
Cl ⁻	19,35	Na ⁺	10,76
SO ₄ ²⁺	2,7	Mg ²⁺	1,3
HCO ₃ ⁻	0,14	Ca ²⁺	0,41
Br ⁻	0,07	K ⁺	0,39
H ₃ BO ₃ ⁻	0,003	Sr ²⁺	0,01
<i>Сумма</i>	22,29	<i>Сумма</i>	12,87
<i>Общая сумма 35,16</i>			

При средней солёности вод Мирового океана около 35‰ максимальная солёность во всей толще вод характерна для Атлантического океана (35,4‰), минимальная – для вод Северного Ледовитого океана (32‰). Воды Индийского океана более солёные, чем Тихого, хотя поверхность Тихого океана имеет несколько более высокую солёность.

Воды внутренних морей в условиях умеренного климата, как правило, обладают меньшей соленостью по сравнению с водами океанов. Например, соленость Балтийского моря составляет $10-12\text{‰}$, Черного – $16-18\text{‰}$, Азовского – $10-12\text{‰}$, что объясняется опреснением вод значительным речным стоком. В результате превышения в солевом балансе пресной составляющей значительно понижена соленость верхних слоев арктических морей. Однако если опреснение невелико, а испарение достигает больших величин, то соленость внутренних морей может заметно увеличиваться: Средиземное море – 39‰ , Красное море – 42‰ – рис. 3.2.

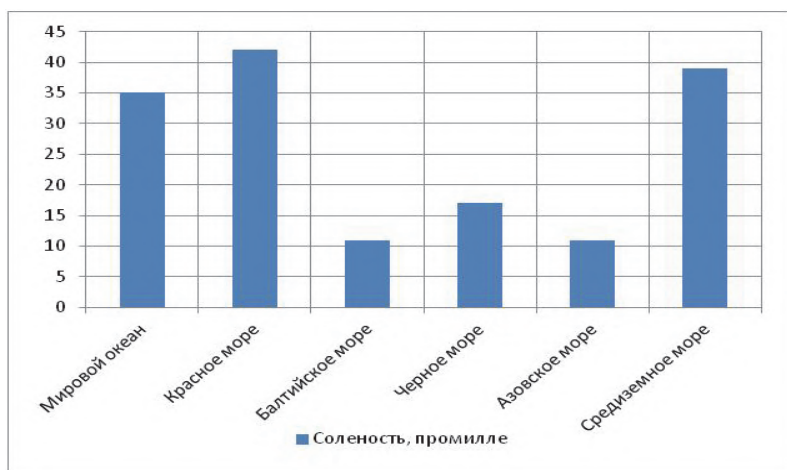


Рис. 3.2. Соленость вод внутренних морей

Самой высокой соленостью обладает Красное море, так как в него не впадает ни одна река, для данного региона характерны малое количество атмосферных осадков и большие потери воды на испарение. Кроме того, в глубоководных впадинах центральной части Красного моря (на глубинах 2020-2050 м) существуют выходы горячих рассолов с соленостью $143-265\text{‰}$ [3]. Высокая соленость отмечается в Средиземном море. Для Черного моря свойственно заметное расслоение по солености. Поверхностные слои морских вод имеют меньшую соленость. Его глубины более 150-200 м заполнены водой средиземноморского происхождения с повышенной соленостью, которая практически не смешивается с вышележащими, распресняемыми материковым стоком слоями.

Аналогичная закономерность наблюдается и в Балтийском море, придонные слои которого заполняются соленой водой североморского происхождения.

3.5. Эвтрофирование водоемов

Эвтрофирование (или эвтрофикация) водоемов (др.-греч. εὐτροφία — хорошее питание) – повышение биологической продуктивности водных объектов в результате накопления в воде биогенных элементов под действием антропогенных или естественных (природных) факторов» (ГОСТ 17.1.01–77). Эвтрофирование может быть результатом как естественного старения водоема, так и антропогенных воздействий. Основные химические элементы, способствующие эвтрофированию, – фосфор и азот.

В 1915 г. Август Фридрих Тинеманн по трофности (питанию) разделил все водоемы на эвтрофные («хорошо питающиеся», «тучные») и олиготрофные («недостаточно питающиеся», «тощие»). Данная классификация оказалась настолько удачной, что применяется в несколько модифицированном и дополненном виде и в настоящее время.

Олиготрофные водоемы имеют сбалансированные скорости продукционно-деструкционных процессов. Воды олиготрофных водоемов бедны минеральным азотом и фосфором и богаты кислородом. Содержание CO_2 в них невелико. Такие водоемы имеют высокую прозрачность воды благодаря низкой численности планктонных водорослей, обусловленной низким содержанием биогенов. Из-за небольшой биомассы первичных продуцентов биомассы на высших трофических уровнях также невысоки. Дно таких водоемов песчаное или каменистое. К такому типу, как правило, относят глубокие озера с песчаными берегами.

В *эвтрофных водоемах* наблюдается цветение водорослей и накопление органических веществ, так как скорости продукции превышают скорости деструкции. Воды эвтрофных водоемов богаты азотом и фосфором. Индикатором эвтрофности является низкая прозрачность воды, вызванная массовым развитием планктонных водорослей. Желто-зеленый цвет типичен для эвтрофных вод, так же как высокое содержание биогенов и варьирующее содержание кислорода. В водоемах такого типа вода в эвтрофическом слое перенасыщена кислородом в дневное время суток благодаря фото-

синтезу, а в ночное время уровень содержания кислорода падает из-за дыхания.

Выделяют также *дистрофные водоемы*, которые характеризуются превышением скорости деструкции органических веществ над скоростью фотосинтеза.

К главным факторам, контролирующим эвтрофирование водоема, относятся:

- средняя глубина озера;
- размеры и плодородие его бассейна.

При этом скорость эвтрофирования в значительной степени обусловлена изменениями ряда местных климатических условий, особенно температурного режима и количества осадков.

В процессе эвтрофирования водная экосистема последовательно проходит несколько стадий. Сначала происходит накопление минеральных солей азота и/или фосфора в воде. Эта стадия, как правило, непродолжительна, так как поступающий лимитирующий элемент немедленно вовлекается в кругооборот и наступает стадия интенсивного развития водорослей. При этом увеличивается биомасса фитопланктона, возрастает мутность воды и повышается концентрация кислорода в верхних слоях воды. Затем наступает стадия отмирания водорослей, происходит аэробная деградация детрита (мертвого органического вещества, временно исключенного из биологического круговорота элементов питания), образование хемоклина (горизонта с максимальным значением вертикального градиента минерализации). Интенсивно отлагаются донные илы с повышенным содержанием органических веществ. В заключительной стадии наступает полное исчезновение кислорода в глубинных слоях и начинается анаэробное брожение. Для последней стадии характерно образование сероводорода, серосодержащих органических соединений и аммиака [13].

Таким образом, эвтрофирование можно рассматривать как нарушение баланса питательных веществ водной экосистемы, ведущее к изменению ее трофического статуса. Получены свидетельства того, что озеро может становиться эвтрофным и возвращаться к олиготрофии. Этот цикл может повторяться несколько раз [38].

Процесс антропогенного эвтрофирования, вызывая нарушения функциональных связей экосистемы, приводит к ухудшению качества воды, утрате природных ресурсов водоема. При эвтрофировании в застойных зонах водоемов ухудшается санитарно-

эпидемиологическая ситуация: наблюдаются вспышки заболеваний гидробионтов, водоплавающих птиц, животных и человека.

В настоящее время существует опасность эвтрофирования даже морей. По имеющимся данным, Северное море получает азота в 4 раза больше фонового уровня, фосфатов – в 7 раз. При этом 37 % азота и 68 % фосфатов от данного прироста – из бытовых сточных вод, а 60 % азота и 25 % фосфатов – из сельскохозяйственных смывов [13].

3.6. Экологические проблемы загрязнения природных вод

В настоящее время влияние хозяйственной деятельности человека на глобальный гидрологический цикл стало очевидным, при этом наиболее ярко этот процесс проявляется в его континентальном звене. Так, население Земли, выросшее за последнее столетие почти в 4 раза и достигшее 6,3 млрд человек, увеличило потребление воды на хозяйственные нужды в 6,5 раза. Значительная часть этой воды испаряется в процессе ее использования, а сравнительно малая включается в состав продуктов производства. Эти виды расхода воды называют безвозвратным водопотреблением. Остальная вода, изъятая из водных объектов, возвращается в природную среду в виде сточных вод [33].

Вода – самый важный из вовлекаемых в человеческое хозяйство природных ресурсов, по объему ежегодного использования она намного превосходит все другие вместе взятые добываемые ресурсы. В процессе потребления ресурсов человечество ежегодно перемещает порядка 300 млрд т грунта и пород, тогда как из разнообразных водных источников в конце прошлого века каждый год отбиралось более $4000 \text{ км}^3 (4 \cdot 10^{12} \text{ т})$ воды, что по массе на порядок больше остальных природных ресурсов в совокупности [37], и с тех пор эта величина существенно возросла [11].

Проблемы, связанные с потреблением воды, ее дефицитом и качеством, настолько обострились в последние десятилетия, что стали оцениваться как одно из самых значимых свидетельств общего кризиса цивилизации. Нехватка пригодной для жизни воды способна сдерживать развитие многих стран, становясь источником межгосударственных конфликтов и нестабильности. Дефицит воды снижает качество жизни, наряду с бедностью становится причиной антисанитарии и роста заболеваемости населения. Дегра-

дация многих водных объектов – это один из наиболее ярких индикаторов общего экологического неблагополучия на планете [10].

Загрязнение поверхностных и подземных вод является главной причиной плохого качества питьевой воды и ежегодной преждевременной гибели почти 2 млн человек. Около 1,4 млн детей в возрасте до 5 лет ежегодно умирает в результате отсутствия доступа к чистой воде и надлежащей санитарии. По оценке ЮНЕП и ВОЗ, в результате загрязнения воды, антисанитарии и недостаточной гигиены ежегодно погибает 3,5 млн человек в мире [27].

Основной вклад в загрязнение водных природных объектов вносят предприятия черной и цветной металлургии, химической и нефтехимической, нефтяной, газовой, угольной, целлюлозно-бумажной, мясной промышленности, предприятия сельского и коммунального хозяйства. Загрязнение водных объектов происходит из-за прямого или косвенного попадания загрязняющих веществ (пестицидов, органических соединений, азота, фосфора, взвешенных твердых частиц, радионуклидов, нефти, твердых отходов, опасных химических веществ, микробных организмов и др.) в водные объекты при отсутствии систем очистки и удаления вредных соединений. В настоящее время зарегистрировано 405 мертвых зон в прибрежных зонах по всему миру. При этом число таких зон удвоилось за последние 5 лет [27].

Использование воды, как правило, ведет в первую очередь к ее загрязнению, так как производство большинства видов продукции включает транзит воды через технические системы и, как следствие, поступление в нее целого комплекса разнообразных веществ. Наряду с загрязнением природных вод из точечных источников следует учитывать и рассеянное индустриальное загрязнение за счет выпадений загрязняющих веществ из атмосферы и поступления их с талыми водами.

Именно загрязнение водных объектов в настоящее время во многих регионах мира служит основной причиной нехватки воды. Потребление больших объемов воды из рек и подземных резервуаров, а также строительство разнообразных гидротехнических сооружений в пределах водных объектов приводит к изменению их водного режима в результате преобразования естественных экосистем на водосборах и в зонах питания подземных вод.

Изменение величины и режима речного стока, загрязнение водных объектов часто являются причинами нарушения цикла жизни гидробионтов, сокращения их популяций и исчезновения

видов. За последние 20 лет около 10 тыс. видов пресноводных рыб оказались угнетенными, численность их стала снижаться или они уже исчезли. Перспективы существования 100 тыс. пресноводных видов позвоночных и не меньшего количества видов беспозвоночных животных, водорослей, бактерий и протозоа, обитающих в донных отложениях, неопределенны, так как эти виды весьма чувствительны к изменениям гидрологических и гидрохимических характеристик водоемов [39]. Изменение водного режима человеком инициирует деградационный процесс с обратной связью, поскольку сокращение численности и уменьшение биоразнообразия этих организмов нарушают их биосферную функцию, снижая их потенциал в регулировании химического состава вод для поддержания устойчивости водных экосистем.

Экологические последствия потребления водных ресурсов тесно связаны со структурой их использования. Основной объем потребляемой в мире воды (70 %) используется в сельском хозяйстве, в основном для орошения; 20 % – расходуется предприятиями промышленно-энергетического комплекса; 10 % – используется предприятиями жилищно-коммунального хозяйства [30; 40]. Индустриальное потребление воды преобладает в относительно небольшом числе развитых стран Европы, в России, Канаде и Австралии, то есть в развитых индустриальных странах. Так, в США расходы воды в промышленности и сельском хозяйстве примерно одинаковы. В остальных странах в водопотреблении доминирует сельское хозяйство.

Следует отметить, что промышленное загрязнение водных объектов обеспечивает присутствие широкого диапазона органических и неорганических поллютантов в природных водах. Существенный приток загрязненных растворов в водные объекты идет также за счет свалок твердых отходов. Значительный вклад в загрязнение природных вод вносит сельскохозяйственная деятельность. Это и стоки с сельхозугодий, содержащие в своем составе удобрения и химические средства защиты растений, и стоки со скотоводческих ферм, загрязненные органическими веществами, биогенными элементами и микробами. Стоки загрязненных вод с сельскохозяйственных территорий создают серьезные экологические проблемы, так как часто содержат опасные вещества, такие как пестициды и их метаболиты, многие из которых относятся к весьма опасным стойким органическим загрязнителям (СОЗ). При

этом поступающие в составе стоков биогены (азот и фосфор) приводят к эвтрофированию водоемов.

Большую опасность для природных водоемов представляют разливы нефти и нефтепродуктов, приводящих к растянутому во времени негативному воздействию на экосистемы в районах добычи, транспортировки, перевалки и хранения нефтяных углеводородов, в том числе в Арктической зоне Российской Федерации.

Еще в 1999 г. Всемирная комиссия по воде (World Commission on Water) отмечала, что более половины крупных рек мира «серьезно истощены и загрязнены, деградируют и отравляют окружающие их экосистемы, угрожая здоровью и жизнеобеспечению зависящего от них населения» [7].

Анализ качества поверхностных вод на территории Российской Федерации, проведенный в 1990-2015 гг. на основе данных гидрохимической сети наблюдений, показывает, что значительная часть поверхностных вод на территории Российской Федерации оцениваются как «грязные» и «экстремально грязные». Многие известные и малоизвестные российские реки имеют класс качества воды «грязная» (Волга, Дон, Москва, Ока, Обь, Охта, Преголя, Тобол, Тагил и др.), «очень грязная» (Пахра, Москва на отдельных участках, Яуза и др.) и «экстремально грязная» (Исеть, Миасс, Клязьма, Чусовая, Пельшма и др.).

Однако отмечается снижение загрязнения водных объектов в городах Казань и Благовещенск, в реках верхнего и среднего течения Амура и его притоках, в том числе р. Зeya (включая Зейское водохранилище), за исключением течения в г. Чита (по-прежнему характеризуются как «загрязненные»). Ухудшилось качество вод в г. Красноярске (р. Кача), в нижней Волге (р. Ахтуба), в отдельных реках Кольского полуострова. В пределах г. Санкт-Петербург р. Нева характеризуется от «слабо загрязненной» до «загрязненной» [26]. Самыми «грязными» реками остаются Охта, Славянка, Ижора, Мга. Вода р. Охта на протяжении десятилетия оценивалась как «грязная».

Только в 2015 г. на территории Российской Федерации был зарегистрирован 3021 случай высокого загрязнения (ВЗ) и экстремально высокого загрязнения (ЭВЗ). Экстремально высокие уровни загрязнения поверхностных вод имели место в 598 случаях на 144 водных 39 объектах. Высокие уровни загрязнения наблюдались в 2423 случаях на 331 водном объекте [27].

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение гидросферы.
2. Что представляет собой Мировой океан?
3. Дайте характеристику малого и большого круговоротов воды на Земле.
4. Напишите в общем виде уравнение водного баланса любого водного объекта. Дайте краткую характеристику приходной и расходной частей водного баланса.
5. Перечислите факторы, определяющие формирование элементного состава природных вод.
6. Какие классификации природных вод по химическому составу вы знаете?
7. Перечислите основные компоненты химического состава природных вод.
8. Дайте краткую характеристику главных (содержащихся в наибольшем количестве) ионов в природных водах.
9. Какие газы наиболее распространены в поверхностных природных водах?
10. Какие показатели качества воды вы знаете?
11. Дайте определение жесткости воды. Чем она обусловлена?
12. Чем обусловлены кислотность и щелочность воды?
13. Дайте определение окисляемости воды.
14. Что такое ХПК и БПК?
15. Какие свойства воды можно охарактеризовать с помощью окислительно-восстановительного потенциала?
16. В чем состоят основные различия химического состава континентальных и океанических вод?
17. Дайте определение эвтрофирования (эвтрофикации) водоемов.
18. Охарактеризуйте стадии эвтрофирования водных экосистем.
19. Перечислите основные экологические проблемы загрязнения природных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 3

1. Алекин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 413 с.
2. Берникова Т.А. Гидрология с основами метеорологии и климатологии: учебник. – М.: Изд-во «Моркнига», 2011. – 600 с.
3. Бубнов В.А., Федорова В.С., Щербинин А.Д. 1977. Новые данные о рассолах Красного моря // Океанология, 1977. – Т. 17. – Вып. 4. – С. 603-611.
4. Вольф И.В., Синякова М.А. Химия окружающей среды. Химия гидросферы: учебное пособие. – СПб.: Изд-во СПбГТУРП, 2013. – 90 с.

5. Вольф И.В., Ткаченко Н.И. Химия и микробиология природных и сточных вод. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1973. – 238 с.
6. Гидрогеология СССР. Сводный том. Вып. 1 / под ред. А.В. Сидоренко. – М.: Недра, 1976. – 656 с.
7. Глобальная экологическая перспектива 3. Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде. – Издана Российским Национальным комитетом содействия ЮНЕП. – М., 2002.
8. ГОСТ 17.1.1.01-77 Охрана природы. Гидросфера. Использование и охрана вод. Основные термины и определения (с Изменениями № 1, 2).
9. Гришина Е.П. Основы химии окружающей среды: учебное пособие: в 3 ч. Ч. 2: Химические процессы в гидросфере. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. – 60 с.
10. Данилов-Данильян В.И. Водные ресурсы мира и перспективы водохозяйственного комплекса России. – М.: ООО «Типография ЛЕВКО», Институт устойчивого развития / Центр экологической политики России, 2009. – 88 с.
11. Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С. Потребление воды: экологические, экономические, социальные и политические аспекты. – М.: Наука, 2006. – 221 с.
12. Зенин А.А., Белоусова Н.В. Гидрохимический словарь. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 240 с.
13. Зилов Е.А. Химия окружающей среды: учебное пособие. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2006. – 148 с.
14. Зилов Е.А. Гидробиология и водная экология (организация, функционирование и загрязнение водных экосистем): учебное пособие. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2008. – 138 с.
15. URL: About.com:Geography: The Fifth Ocean. URL: <http://geography.about.com/od/learnabouttheearth/a/fifthocean.htm>
16. URL: <http://awesomeworld.ru/nezhivaya-priroda/mirovoy-okean.html>
17. Кац Н.Я. Болота и торфяники: пособие для ун-тов. – Учпедгиз, 1941. – 399 с.
18. Кац Н. Я. Болота земного шара. – М.: Наука, 1971. – 295 с.
19. Короновский Н. В., Ясаманов Н. А. Геология. – М.: Изд. центр «Академия», 2007. – 448 с.
20. Косов В.И., Иванов В.Н. Охрана и рациональное использование водных ресурсов. – Ч. 1: Охрана поверхностных вод: учебное пособие. – Тверь: Изд-во Твер. гос. техн. ун-та, 1995.
21. Крупнова Т.Г., Сухарев Ю.И. Химия окружающей среды: учебное пособие. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – Ч. 2. – 36 с.
22. Ланге О.К. Подземные воды СССР. – М.: Изд-во МГУ, 1963. – Ч. 1-2. – 555 с.
23. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д. Гидрология. – М.: Высшая школа, 2008. – 463 с.

24. Михайлов В. Н., Добровольский А. Д., Добролюбов С. А. Гидрология. – М.: Высшая школа, 2008. – 463 с.
25. Никаноров А.М. Гидрохимия: учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб: Гидрометеиздат, 2001. – 444 с.
26. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. – М., 2016.
27. Об экологическом развитии Российской Федерации в интересах будущих поколений. Доклад Госсовету РФ. – М., 2016.
28. Перельман А.И. Геохимия природных вод. – М.: Наука, 1982. – 154 с.
29. Рассказов А.А., Васильева Е.Ю., Горбатов Е.С. Учение о гидросфере: учебно-методическое пособие. – М.: Изд-во РУДН, 2011. – 76 с.
30. Состояние мира 1999. Доклад института Worldwatch о развитии по пути к устойчивому обществу / пер. с англ. – М.: Весь Мир, 2000. – 384 с.
31. Справочник по гидрохимии: электронная версия. – Эколайн, 1998. – URL: <http://bio.krc.karelia.ru/misc/hydro/>
32. Таубе П.Р., Баранова А.Г. Химия и микробиология воды. – М.: Высшая, 1983. – 280 с.
33. Тихонова И.О., Кручинина Н.Е., Десятов А.В. Экологический мониторинг водных объектов: учебное пособие. – М.: Форум НИЦ ИНФРА-М, 2012. – 152 с.
34. Топалова О.В., Пимнева Л.А. Химия окружающей среды: учебное пособие. – СПб: Изд-во «Лань», 2013. – 160 с.
35. Химия окружающей среды: учебник для академического бакалавриата. / Т.И. Хаханина, Н.Г. Никитина, Л.С. Суханова; под ред. Т.И. Хаханиной. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 2015. – 215 с.
36. Forel F.A. La thermigue des lacs l'eau douce // Verh. schweiz. Naturf. Ges. – 1892. – Vol. 75.
37. Helmer R. Water Demand and Supply // Nucl. Desali nat. Sea Water: Proc. Int. Symp., Taejon, 26-30 May, 1997. – Vienna, 1997. – P. 15-24.
38. Horne A. & Goldman C. 1994: Limnology. – McGraw-Hill.
39. Postel S. Hydro Dynamics // Natural History. – 2003. – V. 112. – № 4. – P. 60-63, 66-67.
40. State of the World 2000. A Worldwatch Institute Report on Progress Toward a Sustainable Society. – W.W. Northon & Co. – New York & London, 2000. – 262 p.



Глава 4. ФОРМИРОВАНИЕ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ЗЕМЛИ И ХИМИЯ ПОЧВ



Почвенный покров является важнейшим компонентом биосферы, так как именно почвенная оболочка определяет многие процессы, происходящие в биосфере в целом. Особые свойства и функции почвенного покрова проявляются в плодородии почв, в их способности производить органическую биомассу. Как показывают расчеты, основная масса живого вещества продуцируется именно на суше. Почвы обеспечивают существование наземной растительности, которая использует солнечную энергию в 9 раз интенсивнее, чем живое вещество океана. Через почву проходят наиболее значительные потоки многих элементов в биосфере: углерода, кислорода, азота, калия, магния, фосфора, серы и др. Важнейшее значение почв состоит и в аккумулировании органического вещества, различных химических элементов, а также энергии. Так, запасы углерода в почвенном гумусе, по крайней мере, на порядок превышают его запасы в живом веществе, а количество аккумулированной в органическом веществе почв энергии на поря-

док выше энергии биомассы суши и вполне сопоставимо с энергией горючих полезных ископаемых [9].

Кроме того, почвенный покров служит биологическим поглотителем и преобразователем различных загрязняющих веществ, способным предотвращать распространение последних в сопредельные среды. Таким образом, почва представляет собой незаменимую часть механизма функционирования биосферы, разрушение которого приведет к необратимым негативным последствиям в биосфере в целом.

Помимо исключительно важной роли в сохранении биосферы в целом почвы имеют также огромное значение в решении продовольственной безопасности человечества. Состояние почв оказывает воздействие на окружающую среду и природные ресурсы, уровень экономического и социального развития государства, здоровье населения. Без решения проблем охраны почв невозможны устойчивое развитие биосферы, безопасность и благополучие нынешнего и будущих поколений людей.



Рис. 4.1. Основные функции почв как базового компонента окружающей природной среды [12]

Среди функций почвы в окружающей среде наиболее существенными являются экологические, природорегулирующие и производственные (рис. 4.1).

4.1. Почва – открытая биокосная система

Почва – дневные (верхние) или близкие к ним горизонты горных пород, которые были более или менее естественным образом изменены взаимным влиянием воды, воздуха и различного рода организмов – живых и мертвых (В.В. Докучаев, 1886) [7; 8]. В табл. 4.1 приведены основные факторы, определяющие процесс почвообразования.

Таблица 4.1

Факторы почвообразования

Почвообразующий фактор	Характеристика	Роль в процессе почвообразования
Почвообразующие (материнские) горные породы	<i>Магматические (первичные)</i> – образуются при застывании магмы (гранит, андезит, базальт, дунит)	Определяют химический состав, физико-химические свойства, мощность, строение по вертикали и горизонтали, тепловые и водно-химические свойства
	<i>Осадочные (вторичные)</i> – образуются на поверхности в результате выветривания первичных пород: <ul style="list-style-type: none"> • <i>элювий</i> – продукты выветривания коренных пород, оставшиеся на месте образования; • <i>делювий</i> – продукты выветривания, переносимые вниз по склонам мало-мощными временными водными потоками; • <i>пролювий</i> – продукты выветривания, переносимые вниз по горным склонам временными водными и селевыми потоками значительной силы; • <i>аллювий</i> – осадки речных водных систем; • <i>морена</i> – часть литосферы, оставшаяся после отхода ледника, представляющая собой смесь частиц различного размера с преобладанием валунов и крупных обломков; 	

Почвообразующий фактор	Характеристика	Роль в процессе почвообразования
	<ul style="list-style-type: none"> • <i>флювиогляциальные пески</i> – наносы песчаного состава, образованные потоками вод тающего ледника; • <i>покровные суглинки</i> – отложения, остающиеся на месте тающих масс льда; • <i>лессы</i> (лессовидные породы) – суглинки и глины вне ледниковых равнин различного генезиса, расположенные в суббореальном и тропическом поясах <p><i>Метаморфические</i> – образуются на глубине при высоких давлении и температуре из первичных и вторичных пород (мрамор, сланцы, гнейсы)</p>	
Климат	<p>Виды климата по сумме среднесуточных температур выше 10 градусов за вегетационный период:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>холодный</i> (полярный) меньше 600 градусов; • <i>умеренно холодный</i> (бореальный) 600-2000 градусов; • <i>теплый</i> (субтропический) 3800-8000 градусов; • <i>жаркий</i> (тропический) больше 8000 градусов <p>Виды климата по условиям увлажнения атмосферными осадками:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>очень влажный</i> (экстрагумидный) с коэффициентом увлажнения больше 3; • <i>влажный</i> (гумидный) – 1-3; • <i>полувлажный</i> (семигумидный) 1-0,5; • <i>полусухой</i> (семиаридный) – 0,5-0,3; • <i>сухой</i> (аридный) – 0,3-0,1; • <i>очень сухой</i> (экстрааридный) – меньше 0,1 	Создает определенный водный, воздушный и тепловой режимы.

Почвообразующий фактор	Характеристика	Роль в процессе почвообразования
Рельеф	<i>Макрорельеф</i> – крупные формы рельефа: равнины, платогорные массивы	Перераспределяет влагу и тепло, определяет развитие почвенно-эрозионных процессов
	<i>Мезорельеф</i> – это формы средних размеров – увалы, холмы, лощины, долины, террасы	
	<i>Микрорельеф</i> – мелкие формы рельефа: бугорки, понижения, западины, возникающие на ровной поверхности рельефа вследствие осадочных (суффузионных) явлений, мерзлотной деформации, микрорельеф определяет комплексность почв	
Живое вещество	Растительность – основной поставщик биомассы для ее последующей трансформации в почвенную органику и гумус. Животные и микробное население – поставляют органический материал, перемешивают и разрыхляют почвы	Обеспечивают почвы органическим веществом, влияют на водный и воздушный режимы
Время	Является всеобщей координатой развития всех процессов и явлений в природе	Обеспечивает развитие и эволюция почв

Кроме того, к факторам почвообразования можно отнести подземные и морские воды, которые могут оказывать существенное влияние на водный и воздушный режимы, химические свойства почв.

В настоящее время мощное воздействие на почвообразовательные процессы оказывает хозяйственная деятельность человека.

4.1.1. Водный баланс и типы водного режима

Поступающая в почвы с осадками влага **P** расходуется на испарение **E**, десукцию **D** (потребление влаги из почвы корнями растений), поверхностный сток **F₁**, внутрипочвенный сток **F₂**. При большом количестве осадков часть влаги просачивается сквозь почвенную толщу, то есть идет на инфильтрацию **I** и пополнение грунтовых вод.

Водный баланс *автоморфных плакорных почв*, то есть почв, развивающихся на повышенных, относительно выровненных элементах рельефа, не получающих дополнительной влаги за счет по-

верхностного стока или грунтовых вод, можно представить уравнением:

$$P = E + D + F_1 + F_2 + I.$$

Соотношение между годовой суммой осадков P (мм) и годовой нормой испаряемости E_n (мм) – коэффициент увлажнения – используется в качестве показателя степени увлажненности территории $K_y = P/E_n$. Величина, обратная коэффициенту увлажнения, называется индексом сухости $K_c = E_n/P$.

Испаряемость E_n – это количество влаги, выраженное в миллиметрах водного слоя, которое может испариться при данных климатических условиях с открытой водной поверхности или с поверхности постоянно переувлажненной почвы.

В зависимости от коэффициента увлажнения, характера дренированности и уровня грунтовых вод в автоморфных почвах формируются различные типы водного режима:

- при $K_y > 1$ и хорошем дренаже складывается *промывной тип водного режима*, то есть избыток атмосферной влаги просачивается сквозь всю почвенную толщу и пополняет грунтовые воды. Характерен для почв таежной зоны, субтропических и тропических лесов;

- при $K_y > 1$ и плохом дренаже (чему способствует плоский рельеф и тяжелый механический состав почвы) складывается *водозастойный режим*. Такой тип водного режима развит во многих тундровых и болотных таежных почвах;

- при $K_y < 1$ вся влага, попадающая в почву, расходуется на испарение и десукцию. Существует постоянно сухой слой, названный «мертвым горизонтом». Это *непромывной тип водного режима*, характерный для степей, полупустынь и пустынь;

- при колебаниях значений коэффициента увлажнения ($K_y > 1$ либо $K_y < 1$) складывается *периодически промывной тип водного режима*;

- для *гидроморфных почв*, то есть почв, получающих влагу также и от грунтовых вод, складываются свои типы водного режима:

- при $K_y > 1$ и плохом дренаже формируется *водозастойный тип режима*;

- при $K_y < 1$ в почвах возникают восходящие токи влаги и складывается *выпотный тип водного режима*. Характерен для степей, пустынь и полупустынь;

➤ при $K_y < 1$, когда влага от грунтовых вод достигает только корней растений, а на поверхность не попадает, формируется *де-суктивно-выпотной тип режима*.

4.1.2. Температурные режимы почв

Выделяют следующие типы температурных режимов почв:

➤ *мерзлотный* характерен для почв с вечной мерзлотой. Среднегодовая температура почвенного профиля и температура на глубине 0,2 м в самый холодный месяц года – отрицательные;

➤ *длительно-сезонно-промерзающий* – почва промерзает не менее чем на 5 месяцев в году. Среднегодовая температура почвенного профиля обычно положительная, но температура на глубине 0,2 м в самый холодный месяц года отрицательная;

➤ *сезонно-промерзающий* – почва промерзает не более чем на 5 месяцев в году. Среднегодовая температура почвенного профиля положительная, но температура на глубине 0,2 м в самый холодный месяц года – отрицательная. Вечная мерзлота отсутствует;

➤ *непромерзающий* – промерзания почвы нет. Среднегодовая температура почвенного профиля и температура на глубине 0,2 м в самый холодный месяц года – положительные.

4.1.3. Энергетика почвообразования

Уравнение энергетического баланса почвы можно представить в следующем виде:

$$Q = W_1 + W_2 + b_1 + b_2 + e_1 + e_2 + g + c,$$

где Q – количество энергии, поступающей в почву за год; W_1 и W_2 – расход энергии на физическое и химическое выветривание минералов; b_1 – энергия, расходуемая во внутрипочвенных биохимических реакциях; b_2 – энергия, аккумулированная в гумусе; e_1 и e_2 – энергия, затрачиваемая на испарение и транспирацию; g – энергия, затрачиваемая на механическую миграцию солей в почве; c – энергия, расходуемая на теплообмен с атмосферой.

Основная доля энергии, поступающей в почву, тратится на испарение и транспирацию, в 100 раз меньше идет на биохимические процессы и трансформацию органических веществ, еще в 100 раз меньше – на выветривание минералов.

Преобразование почвы и ее развитие происходит главным образом за счет той доли солнечной энергии, которая аккумулируется в растениях, а затем с отмершими растительными остатками

поступает в почву. Поскольку неперенным условием жизни всех организмов, кроме тепла, является наличие влаги, то существует связь между биопродуктивностью и поступлением в почву энергии органического вещества и соотношением тепла и влаги. Таким образом, энергия почвообразования, а следовательно, и скорость почвообразовательных процессов наиболее высоки во влажных и теплых областях и наиболее низки в сухих и холодных.

4.2. Процессы почвообразования

Все процессы, происходящие в почвенной толще, делятся на четыре основные группы: микропроцессы (прямые и обратные процессы), макропроцессы (элементарные почвообразовательные), частные и общие почвообразовательные процессы.

К *микропроцессам* относятся:

- поглощение живыми организмами из почвы минеральных веществ и синтез органических соединений; выделение живыми организмами в почву органических и минеральных веществ;
- разложение и минерализация органических остатков; синтез новых органических веществ, свойственных почве;
- разрушение первичных и вторичных минералов; синтез новых минералов;
- подкисление почв органическими кислотами; нейтрализация почвенных растворов основаниями;
- окислительные и восстановительные процессы;
- коагуляция и пептизация почвенных коллоидов;
- гидратация и дегидратация минеральных соединений;
- увлажнение и иссушение почвы;
- восходящие и нисходящие токи влаги в почвенном профиле;
- нагревание и охлаждение почвы;
- абсорбция газов почвой и выделение газов в атмосферу и др.

Сочетания взаимосвязанно протекающих микропроцессов в почве называются *макропроцессами*, которые объединяются в три группы:

1) элементарные процессы, в которых ведущую роль играют разложение и трансформация органического вещества (накопление торфа, образование гумуса и т.д.);

2) элементарные процессы, в которых ведущую роль играют разложение и трансформация минерального вещества (образова-

ние различных конкреций, образование и накопление вторичных минералов и т.д.);

3) миграционные процессы (элювиально-иллювиальное распределение вещества по профилю почвы и т.д.).

Совокупность элементарных почвообразовательных процессов, приводящих к образованию почвенного горизонта, называется **частным процессом почвообразования**. Примером являются процессы оподзоливания, осолодения, оглеения и др.

Совокупность частных почвообразовательных процессов формирует **общий процесс**, результатом которого является определенный почвенный профиль.

Основные почвообразовательные процессы

Гумификация – это совокупность биохимических и физико-химических процессов, в результате которых органические вещества индивидуальной природы превращаются в специфические гумусовые вещества.

Дерновый процесс – образование гумусового горизонта, состоящего, по крайней мере, наполовину по объему из корневых систем растений.

Оподзоливание – разрушение (кислотный гидролиз) в верхних горизонтах первичных и вторичных глинистых минералов и вынос продуктов разрушения в нижележащие горизонты.

Лессиваж – вынос из верхних горизонтов в нижние илистых частиц без их химического разрушения.

Оглинение – процесс внутрипочвенного выветривания первичных минералов с образованием и относительным накоплением *in situ* вторичных глинистых минералов.

Оглеение – процессы восстановления различных соединений, главным образом окислов железа и алюминия в анаэробных условиях, возникающих при временном или постоянном переувлажнении.

Болотный процесс развивается под влиянием болотной растительности в условиях постоянного избыточного увлажнения. Идет процесс торфообразования – накопления на поверхности почвы полуразложившихся растительных остатков в результате замедленной их гумификации и минерализации в условиях избыточного увлажнения.

Засоление – процесс накопления в почвенной толще легкорастворимых солей из минерализованных грунтовых вод при выпотном водном режиме.

Осолонение – разрушение (щелочной гидролиз) в верхних горизонтах первичных и вторичных глинистых минералов и вынос продуктов разрушения в нижележащие горизонты.

Осолонцевание – процесс накопления в почвенном поглощающем комплексе (ППК) большого количества обменного натрия и магния, сопровождающийся пептизацией почвенных коллоидов и выщелачиванием их из верхнего горизонта. В состоянии геля коллоиды накапливаются на некоторой глубине, создавая плотный солонцовый горизонт.

Латеритизация – разрушение первичных и вторичных минералов (алюмо- и ферросиликатов) в условиях жаркого и влажного климата, сопровождающееся накоплением окислов железа и алюминия.

4.3. Строение почвенного профиля и морфологические признаки почв

Генетический горизонт – это относительно однородный слой почвенной толщи, который отличается от другого слоя морфологическими признаками, составом и свойствами (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Наиболее распространенные генетические горизонты почв

Горизонт Ao (O) (лесная подстилка или степной войлок)	Опад растений на различных стадиях разложения – от свежего до полностью разложившегося. Это самая верхняя часть почвенного профиля. Встречается только в естественных почвах
Горизонт A (H) (гумусовый горизонт)	Наиболее темноокрашенный горизонт в верхней части почвенного профиля, в котором происходит накопление органического вещества в форме гумуса. Цвет от черного, бурого, коричневого до светло-серого; мощность от нескольких сантиметров до 1,5 м и более
Горизонт At (T) (торфянистый)	Поверхностный органогенный горизонт с содержанием органического вещества от 30 до 70 %, состоящий из разложившихся органических остатков (степень разложения – более 50 %) и гумуса с примесью минеральных компонентов
Горизонт Ad (Hd) (дерновый)	Горизонт, в котором живых корней растений более 50 %

Горизонт Ап (Апах) (пахотный)	Горизонт, измененный продолжительной сельскохозяйственной обработкой, сформированный из различных почвенных горизонтов на глубину вспашки – обычно 25-30 см. Встречается только в пахотных почвах
Горизонт А₁ (минеральный гумусово-аккумулятивный)	Верхний темноокрашенный горизонт, содержащий наибольшее количество органического вещества
Горизонт А₂ (Е) (элювиальный, подзолистый или осолоделый)	Формируется под влиянием кислотного или щелочного разрушения минеральной части. Сильно осветленный, бесструктурный или слоеватый рыхлый горизонт, обедненный гумусом и илистыми частицами за счет вымывания их в нижележащие слои и относительно обогащенный остаточным кремнеземом
Горизонт В (I) (переходный или иллювиальный)	Подповерхностный горизонт, частично затронутая почвообразовательным процессом горная порода, находящаяся в тесном взаимодействии с органической фазой почвы. В первом случае является переходным слоем к почвообразующей породе, характеризуется постепенным ослаблением процессов аккумуляции гумуса, разложения первичных минералов. Во втором случае располагается под элювиальным горизонтом и представляет собой бурый, охристо-бурый, красновато-бурый, уплотненный и утяжеленный, хорошо оструктуренный горизонт, характеризующийся накоплением глины, оксидов железа, алюминия и других коллоидных веществ за счет вымывания их из вышележащих горизонтов
Горизонт G глеевый)	Характерен для почв с постоянно избыточным увлажнением (болотных, тундровых, аллювиальных и др.), которое вызывает восстановительные процессы в почве и придает горизонту характерные черты – сизую, серовато-голубую или грязно-зеленую окраску, наличие ржавых и охристых пятен, слитость, вязкость и т.д.
Горизонт С (Р) (материнская горная порода)	Незатронутая почвообразовательным процессом горная порода, которая служит исходным материалом для формирования почвы
Горизонт D (подстилающая горная порода)	Горная порода, сменяющая почвообразующую породу в нижней части профиля и не принимающая участия в образовании почвы. Встречается только в случае перекрытия горных пород

Мощность почвы – протяженность генетических горизонтов от почвообразующей породы до поверхности.

Почвенный профиль – сочетание связанных между собой генетических горизонтов.

Генетические горизонты обособляются постепенно в процессе формирования почвы и, как правило, не имеют резкой границы и постепенно переходят один в другой. По степени выраженности различают:

➤ *резкий переход* – смена одного горизонта другим происходит на протяжении 2-3 см;

➤ *ясный переход* – смена горизонтов происходит на протяжении 5 см;

➤ *постепенный переход* – очень постепенная смена горизонтов на протяжении более 5 см.

Морфологические признаки почвы:

➤ *Строение почвенного профиля.*




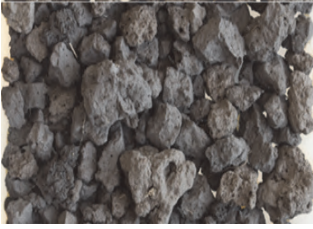
➤ *Окраска*, показывающая однородность и неоднородность цвета.


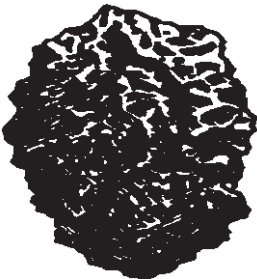

➤ *Цвет почвы* – одно из важных внешних свойств ее, наиболее доступных для наблюдения и широко используемых в почвоведении для присвоения названий почвам (чернозем, краснозем, желтозем, серозем и др.).

Таблица 4.3

Типичные структурные элементы почв (по С. А. Захарову)[2]

Кубовидный (равномерное развитие структуры по трем взаимно перпендикулярным осям)	Грани и ребра выражены плохо, агрегаты большей частью плохо оформлены			
	глыбистая	крупноглыбистая мелкоглыбистая	> 10 см 10-5 см	
	комковатая	крупнокомковатая комковатая мелкокомковатая	5-3 см 3-1 см 1-0,5 см	

	пылеватая	пылеватая	< 0,5 см	
Грани и ребра хорошо выражены, агрегаты ясно оформлены				
	ореховатая	крупноореховатая ореховатая мелкоореховатая	> 10 мм 10-7 мм 7-5 мм	  

		крупнозернистая зернистая (крупитчатая) мелкозернистая (порошистая)	5-3 мм 3-1 мм 1-0,5 мм	
Призмовидный (развитие структуры главным образом по вертикальной оси)	Грани и ребра плохо выражены, агрегаты сложные и мало оформлены			
	столбовидная	крупностолбовидная столбовидная мелкостолбовидная	> 5 см 5-3 см < 3 см	
	Грани и ребра хорошо выражены			
	столбчатая	крупно-столбчатая столбчатая мелкостолбчатая	> 5 см 5-3 см < 3 см	

	призматическая	крупно-призматическая призматическая мелко-призматическая	> 5 см 5-3 см < 3 см	 
Плито-видный (развитие структуры по горизонтальным осям)	плитчатая	сланцеватая плитчатая пластинчатая листоватая	> 5 мм 5-3 мм 3-1 мм < 1 мм	 


	чешуйчатая	скорлуповатая грубочешуйчатая мелкочешуйчатая	> 3 мм 3-1 мм < 1 мм	
--	-------------------	---	----------------------------	---

Таблица 4.4

**Классификация почвенных новообразований
химического происхождения [10]**

Химический состав	Налеты и выцветы	Примазки, потеки и корочки	Прожилки, трубочки и т.д.	Конкреции или стяжения	Прослойки
Легкорастворимые соли: соленые – NaCl , CaCl_2 и MgCl_2 , горькие – Na_2SO_4	Светлые и белесоватые налеты и выцветы легко-растворимых солей	Светлые примазки легкорастворимых солей, тонкие корочки глауберовой соли	Белые прожилки легкорастворимых солей и псевдомицелий глауберовой соли	Белые крапинки легко-растворимых солей	—
Гипс – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Светлые налеты и выцветы гипса (гипсовое поло-тенце)	Белые при-мазки и корочки гипса	Белые про-жилки кристалличе-ского гипса	Земляные сердца и ласточкины хвосты, двойники гипса	Гажи (в Закавказье)
Углекислая известь – CaCO_3	Налеты (сединка) и выцветы (плесень) карбонатные «дендриты», вскипающие от кислоты	Карбонатные светлые при-мазки, пятна, корочки и бородки извести	Карбонатный псевдомицелий, трубочки и прожилки кристаллической или мучнистой извести	Белоглазка, журавчики, дутики, погремки, желваки	Прослойки луговой извести

Химический состав	Налеты и выцветы	Примазки, потеки и корочки	Прожилки, трубочки и т.д.	Конкреции или стяжения	Прослойки
Полуторные окислы, соединения марганца и фосфорной кислоты – Fe_2O_3, Al_2O_3, Mn_3O_4, FePO_4, AlPO_4	Охристые налеты и выцветы	Ржавые, охристые пятна, примазки, потеки, языки и разводы, бурые точечные пятна	Ржавая лже-грибница, бурые трубочки, бурые желто-красные прожилки	Темно-бурые рудяковые зерна, бобовинки, глазки	Железняк, орштейны и прослойки бобовой руды; псевдо-фибры и ортзанды
Соединения закиси железа – FeCO_3, $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \times 8\text{H}_2\text{O}$	—	Голубоватые пятна, языки и разводы	Сизоватые прожилки	Белые, синеющие и буреющие на воздухе скопления	—
Кремнекислота – SiO_2	Кремнеземистая седая присыпка	Белые и белесые пятна и языки	Белесоватые прожилки	—	—
Перегонные вещества	Темные налеты на поверхности структурных элементов	Бурые глянцевитые пятна; темно-бурые потеки, языки и тонкие корочки	Буро-черная инкрустация на поверхности структурных отделиностей	Частично рудяковые зерна	Перегонные прослойки ортзанды и слои орштейна

Цвет почвы находится в прямой зависимости от ее химического состава, условий почвообразования, влажности. Верхние горизонты окрашены гумусом в темные цвета (серые и коричневые). Чем большее количество гумуса содержит почва, тем темнее окрашен горизонт. Наличие железа и марганца придает почве бурые, охристые, красные тона. Белесые, белые тона предполагают наличие процессов оподзоливания, осолодения, засоления, окarbonачивания, то есть присутствие в почве кремнезема, каолина, карбонатов кальция и магния, гипса и других солей. Почвы редко бывают окрашены в какой-либо один чистый цвет. Обычно окраска почв довольно сложная и состоит из нескольких цветов

(например, серо-бурая, белесовато-сизая, красновато-коричневая и т.д.), причем название преобладающего цвета ставится на последнем месте.

➤ *Структура* – форма агрегатов, на которые распадается почва (табл. 4.3);

➤ *Текстура* – характер выраженности порозности почвы;

➤ *Новообразования и включения* (табл. 4.4).

4.4. Физические свойства почв

Физические свойства почв можно объединить в пять основных групп.

Общие физические свойства:

- *Плотность твердой фазы* почвы (d , г/см³) – масса сухого вещества почвы в единице объема твердой фазы без учета порового пространства;

- *Плотность почвы* (d_v) – масса сухого вещества почвы в единице ее объема вместе с поровым пространством.

- *Пористость* (или *порозность*) – совокупность всех пор, присутствующих в почве.

Физико-механические свойства:

- *Пластичность* – способность почвы изменять форму под действием внешних сил без разрушения и сохранять ее после устранения действия этих сил.

- *Липкость* – способность почвы прилипать к соприкасающейся с ней поверхности.

- *Набухание* – способность почвы увеличивать свой объем при увлажнении.

- *Усадка* – способность почвы уменьшать свой объем при высыхании.

- *Связность* – способность почвы противостоять действию внешних сил, приводящих к разъединению почвенных частиц.

- *Твердость* – способность почвы противостоять сжатию и расклиниванию.

Водные свойства:

- *Водопроницаемость* – способность почвы пропускать воду.

- *Водоподъемная способность* – способность почвы поднимать воду по капиллярам.

- *Влагоемкость* – способность почвы удерживать воду.
- *Влажность* – количество воды, которое содержится в почве.

Воздушные свойства:

• *Воздухопроницаемость* – способность почвы пропускать воздух.

- *Воздухоёмкость* – способность почвы удерживать воздух.

Тепловые свойства:

• *Теплопоглощительная способность* – способность почвы поглощать лучистую энергию Солнца:

• *Теплоёмкость* – способность почвы удерживать тепло. Различают удельную теплоёмкость (количество тепла в Дж, необходимое для нагревания 1 г почвы на 1 °С; Дж/г) и объемную теплоёмкость (количество тепла в Дж, необходимое для нагревания 1 см³ почвы на 1 °С; Дж/см³).

• *Теплопроводность* – способность почвы проводить тепло (количество тепла в Дж, которое проходит за 1 с через 1 см³ почвы; Дж · см³/с).

Почва и почвообразующие породы состоят из частиц различных размеров, образовавшихся при выветривании горных пород. В почве, кроме преобладающей минеральной части, содержится также некоторое количество органических и органо-минеральных частиц, которые образовались в результате биологических процессов при взаимодействии минеральных и органических компонентов.

Отдельные частицы (гранулы) называются ***механическими элементами***. Близкие по размерам механические элементы образуют ***гранулометрические фракции*** – табл. 4.5.

В почве встречаются крупные каменные обломки, песчаные, пылеватые, илистые и коллоидные частицы. В разных почвах соотношение мелких и крупных фракций различно.

*Процентное содержание в почве частиц различного размера и их соотношение называется **гранулометрическим (механическим) составом почвы***.

Соотношение между группами фракций (физическим песком и физической глиной) является главным критерием для классификации пород и почв по механическому составу – табл. 4.6. На основании значений, приведенных в данной таблице, дается основное название механического состава почвы или породы.

Таблица 4.5

**Классификация механических элементов почвы
(по Н.А. Качинскому) [6]**

Группы частиц	Размер, мм	
камни	> 3	
гравий	1-3	Физический песок
песок	1,0-0,05	
<ul style="list-style-type: none"> • крупный • средний • мелкий 	<ul style="list-style-type: none"> • 1,0-0,5 • 0,5-0,25 • 0,25-0,05 	
пыль	0,05-0,001	
<ul style="list-style-type: none"> • крупная • средняя • мелкая 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,05- 0,01 • 0,01-0,005 • 0,005-0,001 	Физическая глина
ил	0,001-0,0001	
<ul style="list-style-type: none"> • грубый • тонкий 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,001-0,0005 • 0,0005-0,0001 	
коллоиды	< 0,0001	

Таблица 4.6

Классификация почв по гранулометрическому составу [14]

Название почвы		Содержание физической глины, %
песчаная	легкие	0-10
<ul style="list-style-type: none"> • рыхло-песчаная • связно-песчаная 		<ul style="list-style-type: none"> • 0-5 • 6-10
супесчаная		11-20
суглинистая		21-55
<ul style="list-style-type: none"> • легкосуглинистая • среднесуглинистая • тяжелосуглинистая 		<ul style="list-style-type: none"> • 21-30 • 31-40 • 41-55
глинистая	тяжелые	56-75
<ul style="list-style-type: none"> • легкоглинистая • среднеглинистая • тяжелоглинистая 		<ul style="list-style-type: none"> • 56-60 • 61-70 • 70-75

Преобладание в составе почвы той или иной фракции определяет ее физико-химические свойства. Так, песчаные фракции имеют высокую водопроницаемость и не обладают способностью удерживать влагу. По мере уменьшения размеров песчаных гранул заметно возрастает водоудерживающая способность и увеличивается высота подъема воды по капиллярам. При увлажнении песок не набухает, не обладает пластичностью и липкостью.

Пылеватые фракции медленно впитывают влагу, хорошо ее удерживают и обладают хорошей водоподъемной способностью, при увлажнении набухают незначительно. Пластичность и липкость у них выражены слабо.

Илистая фракция имеет очень малую водопроницаемость и большую водоудерживающую способность. Водоподъемная способность у этой фракции ниже, чем у пылеватых частиц, так как тонкие промежутки между илистыми частицами заняты прочно-связанной неподвижной водой. При увлажнении илистая фракция сильно набухает, увеличиваясь в объеме примерно в 4 раза, а при высыхании объем возвращается к первоначальному, что приводит к растрескиванию ее на отдельные куски.

Максимальная молекулярная влагоемкость, набухание, пластичность резко возрастают у частиц размером менее 0,01 мм.

Гранулометрический состав почвы тесно связан с ее химическим и минералогическим составами. В песчаных и пылеватых фракциях преобладают такие первичные минералы, как кварц и полевые шпаты (ортоклаз, микроклин, альбит), а также инертные соединения кремнекислоты. Илистая фракция состоит в основном из вторичных минералов с высокой степенью дисперсности: монтмориллонита, нонтронита, галлуазита и др. Она характеризуется повышенным содержанием оксидов железа и алюминия, а также калия, фосфора, серы и других макро- и микроэлементов. Кроме того, в состав илистой фракции входят органические коллоиды, поэтому она является самой плодородной частью почвы с высокой поглотительной способностью.

При этом необходимо отметить, что в природных условиях почвенные частицы находятся не в разьединенном состоянии, а собраны в агрегаты. Способность к агрегированию зависит от содержания в почве ила, гумуса, карбонатов и т.д. При одном и том же содержании физической глины в почвах с лучшей агрегированностью и структурностью создаются более благоприятные водные и воздушные свойства, чем в слабоагрегированных почвах. Поэто-

му для полной характеристики почв помимо определения гранулометрического состава, основанного на полном разрушении агрегатов, проводят агрегатный анализ, целью которого является выявление процентного содержания в почве агрегатов различной величины. Влияние гранулометрического и агрегатного составов проявляется в том, что песчаные, супесчаные, суглинистые и глинистые почвы имеют различный водный, воздушный, тепловой и питательный режимы.

4.5. Химический состав и свойства почв

4.5.1. Органическое вещество почвы

Биологический круговорот веществ в почве можно представить в виде трех процессов:

- 1) поглощение растениями элементов питания из почв;
- 2) построение из этих элементов органического вещества;
- 3) гибель растений и возврат элементов в почву.

Органические остатки трансформируются в гумус. Основная роль в разложении, трансформации и минерализации органических остатков в почве принадлежит микроорганизмам, среди которых наиболее многочисленными являются бактерии. При этом почвенная микрофлора принимает участие в преобразовании минералов, фиксации атмосферного азота, осуществляет реакции нитрификации, сульфификации (хемотрофы). Гетеротрофные анаэробы восстанавливают нитраты до аммиака и молекулярного азота, сульфаты до сероводорода. Железобактерии переводят закисные формы железа в окисные. При анаэробном разложении органических соединений продуктами минерализации являются летучие соединения: водород, метан, аммиак, молекулярный азот, сероводород и фосфористый водород.

*Совокупность биохимических и физико-химических реакций, в результате которых индивидуальные органические соединения превращаются в специфическое органическое вещество почвы, называется **процессом гумификации**.*

***Гумус** – совокупность всех органических соединений, находящихся в почве, но не входящих в состав живых организмов или образований, сохраняющих анатомическое строение.*

Часть органических веществ минерализуется до NH_3 , CO_2 и H_2O . Первый этап гумификации осуществляют в основном плесневые грибы и неспороносные бактерии, второй этап – споровые

бактерии, третий этап – целлюлозные миксобактерии, четвертый этап – актиномицеты.

Плесневые грибы и сапрофитные бактерии используют углеводы, аминокислоты, простые белки и доступную часть целлюлозы. Миксобактерии способны использовать различные углеводы, но азот они усваивают только в минеральной форме. Актиномицеты разлагают труднодоступные соединения почвы, вплоть до лигнина.

На рис. 4.2 представлен состав органического вещества почвы.



Рис. 4.2. Органическое вещество почвы

Промежуточные продукты распада и гумификации – соединения, утратившие признаки индивидуальности, но еще не имеющие специфических признаков гумусовых веществ.

Неспецифические вещества – группа органических соединений, поступающих в почву в результате разложения растительных и животных остатков, а также с корневыми выделениями и т.п. Частично они могут образовываться за счет разложения специфических гумусовых веществ. Эта группа соединений представлена такими веществами, как лигнин, целлюлоза, протеины, аминокислоты, моносахариды, воска, жирные кислоты и т.д., то есть практически всеми компонентами, составляющими животные и растительные ткани или входящими в состав прижизненных выде-

лений макро- и микроорганизмов. Неспецифические соединения присутствуют в почвах в свободном состоянии или связаны с минеральными компонентами почвы.

Специфические гумусовые вещества – это более или менее темноокрашенные, азотсодержащие высокомолекулярные соединения кислотной природы. Они представлены гумусовыми кислотами, прогуминовыми веществами и негидролизуемым остатком (гумином).

Прогуминовые вещества – вещества, не имеющие ярко выраженной природы гумусовых кислот. В методах анализа качественного состава гумуса определение прогуминовых веществ не предусмотрено, но их присутствие обнаруживается при детальном фракционировании выделенных из почвы препаратов.

Негидролизуемый остаток (гумин) – это часть органического вещества, которую не удастся извлечь из почвы растворами кислот, щелочей или органическими растворителями. Перевести его в раствор удастся только после разрушения силикатной части почвы (обработка почвы HF) или после окисления, вызывающего очень сильное изменение состава и свойств входящих в его состав веществ.

Негидролизуемый остаток включает такие группы веществ, как гумусовые кислоты, прочно связанные с минеральной частью, декарбоксилированные гумусовые вещества, утратившие способность растворяться в щелочах, неспецифические и нерастворимые органические соединения, а также частично остатки, не утратившие анатомического строения (обломки хитинного покрова насекомых).

Гумусовые кислоты – высокомолекулярные азотсодержащие оксикарбоновые кислоты с интенсивной темно-бурой или красновато-бурой окраской. Их четко выделяют среди других групп соединений по свойствам и составу. Гумусовые кислоты экстрагируют из почвы растворами щелочей (0,1-0,5 н. NaOH), а затем по растворимости разделяют на гуминовые кислоты, гиматомелановые кислоты и фульвокислоты.

Гуминовые кислоты отделяют от других компонентов щелочной вытяжки путем подкисления до pH 1-2. В кислой среде гуминовые и гиматомелановые кислоты выпадают в осадок, в растворе остаются фульвокислоты. Из полученного осадка можно выделить гиматомелановые кислоты – они растворяются при обработке осадка этанолом, образуя вишнево-красный раствор.

Гуминовые кислоты (ГК) обладают высокой молекулярной массой. У них более развито ядро молекулы, в состав которого входят бензол, пиррол, пиридин и т.д. В состав периферии входят карбоксильные, фенольные, спиртовые, метаксильные и карбонильные функциональные группы.

Фульвокислоты (ФК) – кислоторастворимая часть гумусовых кислот. Отличаются от гуминовых кислот большим содержанием кислорода и меньшим содержанием углерода, более развитой периферийной частью. ФК более активны, более подвижны, обладают большей емкостью поглощения, имеют меньшую молекулярную массу по сравнению с ГК.

Гиматомелановые кислоты (ГМК) занимают промежуточное положение по свойствам между гуминовыми и фульвокислотами. Долгое время их включали в группу гуминовых кислот. В настоящее время получено достаточно доказательств для их выделения в особую группу [11].

Таблица 4.7

Содержание гумуса в различных типах почв

Почвы (верхний слой)	Гумус, %	Относительное содержание углерода	
		Гуминовые кислоты	Фульвокислоты
Подзолистые, дерново-подзолистые	1,5-4	12-30	25-30
Серые лесные	4-6	25-30	25-27
Черноземы (мощные и обыкновенные)	7-10	35-40	15-20
Каштановые	1,5-4	25-35	20-25
Сероземы светлые	0,8-1	17-23	25-33
Красноземы	4-6	15-20	22-28

Содержание, запасы и состав гумуса относятся к числу важнейших показателей, от уровня которых зависят практически все агрономически ценные свойства почв. Эти же показатели используются при решении задач классификации и диагностики почв. В формировании почв и почвенного плодородия гумус выполняет многочисленные функции. Оптимальное содержание гумуса в почве обеспечивает агрономически ценную структуру и благоприятный водно-воздушный режим, улучшает прогреваемость почв. С гумусом связаны важнейшие физико-химические свойства почв:

емкость катионного обмена, кислотность, буферность, развитие восстановительных процессов и т. д. При оптимальном гумусном состоянии почва максимально устойчива к действию разрушающих факторов – эрозии, дефляции, загрязнению и др. В табл. 4.7 представлено среднее содержание гумуса в различных типах почв [5].

4.5.2. *Строение, состав и свойства почвенных коллоидов*

Почвенные коллоиды составляют частицы размером $< 0,0001$ мм. По происхождению все почвенные коллоиды делятся на три группы:

1) **минеральные коллоиды**, образующиеся в результате разрушения минералов;

2) **органические коллоиды**;

3) **органоминеральные коллоиды**.

Коллоиды образуются при диспергировании более крупных частиц или в результате поликонденсации молекул. Чем выше содержание гумусовых веществ и чем тяжелее гранулометрический состав почв, тем выше содержание коллоидов.

Коллоидная мицелла состоит из:

- **ядра**, образованного негидратированными и недиссоциированными молекулами аморфного или кристаллического вещества;

- **слоя потенциалопределяющих ионов**;

- **неподвижного слоя компенсирующих ионов**;

- **диффузного слоя компенсирующих ионов**.

Ядро вместе со слоем потенциалопределяющих ионов образует **гранулу**; гранула вместе с неподвижным слоем компенсирующих ионов образует **частицу**; частица вместе с диффузным слоем компенсирующих ионов образует **мицеллу** (рис. 4.3).

В зависимости от заряда выделяют следующие виды коллоидов:

- **ациитоиды** – коллоиды с отрицательным зарядом потенциалопределяющего слоя (глинистые минералы, гумусовые кислоты, кремневая кислота и др.);

- **базоиды** – коллоиды с положительным зарядом потенциалопределяющего слоя (гидроксиды железа и алюминия и др.);

- **амфолитоиды** – меняют заряд потенциалопределяющего слоя в зависимости от кислотно-щелочных условий (гидроксиды железа и алюминия и др.). В кислой среде они ведут себя как базоиды, а в щелочной – как ациитоиды.

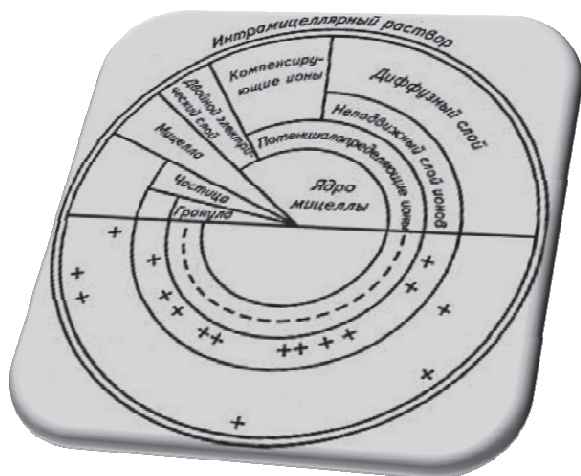


Рис. 4.3. Строение коллоидной мицеллы

По степени сродства к воде коллоиды разделяют на *гидрофильные*, удерживающие повышенное количество воды (минералы монтмориллонитовой группы, гумусовые кислоты, гидроксид кремния и др.), и *гидрофобные*, связывающие небольшое количество воды (гидроксиды железа и алюминия, минералы группы каолинита и др.).

Коллоиды могут находиться в состоянии **золя**, то есть взвеси, или в виде студнеобразного осадка – **геля**. Переход коллоида из состояния золя в состояние геля называется **коагуляцией** (свертыванием), а обратный переход – **пептизацией**.

Коагуляция почвенных коллоидов происходит при взаимодействии противоположно заряженных коллоидных систем, дегидратации, добавлении электролитов. При высыхании и замораживании коллоидов в почвах происходит их коагуляция. Основным коагулирующим агентом в почвах часто служат ионы кальция. Коагуляция может быть обратимой и необратимой.

Пептизация происходит при набухании и растворении осадка, при увеличении щелочности среды, при замене двух- и трехвалентных катионов на одновалентные катионы калия, натрия и аммония.

4.5.3. Поглощительная способность почв

Свойство почвы задерживать, поглощать твердые, жидкие и газообразные вещества, находящиеся в соприкосновении с твердой фазой почвы, называется ее **поглощительной способностью**.

Создатель учения о поглощительной способности почвы академик К.К. Гедройц выделил несколько типов поглощительной способности:

➤ **механическая поглощительная способность** – свойство почвы задерживать в своих порах частицы из фильтрующихся через почву суспензий. Механическое поглощение зависит от гранулометрического состава и сложения почвы. Глинистые и суглинистые почвы поглощают взвешенные частицы в большей степени, чем песчаные;

➤ **физическая поглощительная способность (физическая адсорбция)** – концентрирование отдельных молекул на поверхности твердых почвенных частиц, обусловленное силой молекулярного притяжения. Чем сильнее степень раздробленности частиц и чем больше их общая поверхность, тем выше физическая поглощительная способность. Тонкодисперсные частицы почв могут притягивать как молекулы жидких веществ, так и молекулы газов (например, молекулы водяного пара из воздуха). В частности, наличие пленочной влаги вокруг почвенных частиц обусловлено поверхностными силами. Следует подчеркнуть, что сорбированные молекулы не входят в состав твердых частиц, а лишь концентрируются на их поверхности;

➤ **физико-химическая или обменная поглощительная способность (физико-химическая адсорбция)** – это способность почвы обменивать некоторую часть катионов диффузного слоя коллоидной мицеллы на эквивалентное количество катионов, находящихся в почвенном растворе. В отличие от физической адсорбции, при этом поглощаются не целые молекулы, а отдельные ионы (катионы или анионы). Физико-химическая поглощительная способность обусловлена наличием на поверхности почвенных коллоидных частиц положительного или отрицательного потенциалоопределяющего электрического заряда. Так как большая часть почвенных коллоидов заряжена отрицательно, то из раствора преимущественно поглощаются положительно заряженные ионы, то есть катионы. Между почвенной высокодисперсной массой (почвенным поглощающим комплексом) и почвенным раствором существует подвижное равновесие. Обмен катионов почвенного рас-

творя на катионы ППК при этом происходит эквивалентно. Так, один двухвалентный катион Ca^{2+} обменивается на два одновалентных катиона H^+ (K^+ , NH_4^+ и др.).

Почвенный поглощающий комплекс (ППК) – это совокупность минеральных и органических коллоидов почвы вместе с поглощенными ими ионами. ППК состоит из двух частей: коллоидов-адсорбентов и адсорбируемых веществ – различных катионов и анионов.

В состав коллоидов-адсорбентов входят минеральные, органические и органоминеральные вещества.

Минеральные почвенные коллоиды:

- группа глинистых минералов (монтмориллонит, бейделлит, каолинит, галлуазит, аллофаны и др.) – отрицательно заряженные коллоиды;
- гидраты окиси кремния и марганца ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Mn}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) – отрицательно заряженные коллоиды;
- гидроксиды железа и алюминия ($\text{Fe}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) – амфолитоиды. В кислой среде они заряжены положительно, в щелочной – отрицательно.

Органические почвенные коллоиды:

- коллоиды гумусовых веществ, и прежде всего гуминовой кислоты, – отрицательно заряженные коллоиды;
- тела некоторых мелких бактерий, обладающих свойством физико-химического поглощения и обмена. У белковых тел в зависимости от реакции среды заряд может быть отрицательным или положительным.

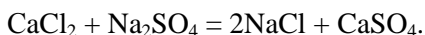
С ППК тесно связана емкость поглощения почвы. *Максимальное количество обменных катионов, выраженное в мг-экв/100 г почвы, называется емкостью поглощения.* Песчаные почвы имеют очень малую емкость обмена – 1-5 мг-экв/100 г; супесчаные – 7-8 мг-экв/100 г; суглинистые – до 15-18 мг-экв/100 г; глинистые – 25-30 мг-экв/100 г и выше. Емкость обмена в гумусовых горизонтах, как правило, выше, чем в материнской породе. Так, в верхнем горизонте чернозема она достигает 50-60 мг-экв/100 г.

Разные типы почв отличаются не только величиной емкости поглощения, но и составом поглощенных катионов.

Почвы, поглощенные катионы которых представлены катионами металлов (преимущественно катионами щелочных и ще-

лочноземельных металлов), называются **насыщенными**. К ним относятся черноземы, каштановые почвы, сероземы и ряд других почв, преимущественно аридных ландшафтов. Почвы, содержащие в составе ППК ионы водорода и алюминия, называются **ненасыщенными**. К ним относятся подзолистые почвы, красноземы и другие почвы, преимущественно гумидных ландшафтов.

➤ **Химическая поглощательная способность** – образование в почвенном растворе нерастворимых или малорастворимых соединений, которые выпадают в осадок и примешиваются к твердой фазе почвы. Например, возникновение новообразований гипса в почве протекает следующим образом:



➤ **Биологическая поглощательная способность** обусловлена присутствием в почве животных и растительных организмов, а также микроорганизмов. В процессе своего жизненного цикла растения, животные и микроорганизмы накапливают ряд химических элементов, необходимых для их нормальной жизнедеятельности. После отмирания накопленные элементы остаются в почве, тем самым обогащая ее.

4.5.4. Почвенный раствор.

Кислотность, щелочность и буферность почвы

Почвенный раствор – это жидкая фаза почвы вместе с растворенными в ней веществами. В почвах с промывным типом водного режима в почвенном растворе преобладают органические кислоты и их соли; в южных степных и полупустынных почвах – минеральные кислоты и их соли; в черноземах данное соотношение примерно одинаковое.

Кислотность почвенных растворов обусловлена присутствием в почве органических и минеральных кислот, кислых и гидролитически кислых солей, а также поглощенных (обменных) ионов H^+ и Al^{3+} .

Различают следующие **виды почвенной кислотности**: актуальную (активную) и потенциальную, которая, в свою очередь, подразделяется на обменную и гидролитическую.

Актуальная кислотность обусловлена содержанием свободных ионов водорода в почвенном растворе и действует непосредственно на корневую систему и почвенные микроорганизмы. При определении этой формы кислотности концентрацию водородных ионов выражают в условных единицах, обозначая симво-

лом pH. Этот символ представляет собой отрицательный логарифм концентрации ионов водорода в растворе и получен следующим образом:

Чистая вода диссоциирует на ионы H^+ и OH^- :



По закону действующих масс константа диссоциации (K) чистой воды равна:

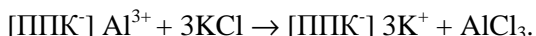
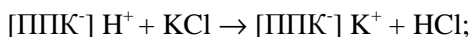
$$K = \frac{[H^+] \times [OH^-]}{[H_2O]}.$$

При температуре $22^\circ C$ дистиллированная вода, имеющая нейтральную реакцию, распадается на ионы в количестве $1/10\,000\,000$ грамм-молекулы, то есть 10^{-7} моль на 1 л воды. Константа диссоциации при этом равна $1 \cdot 10^{-14}$. Из каждой молекулы образуется равное количество ионов H^+ и OH^- , следовательно, $[H^+] = [OH^-] = 1 \cdot 10^{-7}$ г-ион/л.

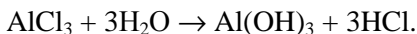
Абсолютные показатели концентрации ионов водорода очень малы, и ими неудобно пользоваться, поэтому для обозначения реакции почвы введен показатель pH – отрицательный десятичный логарифм концентрации ионов водорода, выраженной в граммах на 1 л раствора ($pH = -\lg [H^+]$). Так, если концентрация иона H^+ в 1 л равна 0,001 г, то $pH = 3$, если 0,0001, то $pH = 4$ и т.д. В зависимости от величины pH почвы относят к кислым ($pH < 7$), нейтральным ($pH = 7$) и щелочным ($pH > 7$).

Потенциальная кислотность зависит от наличия ионов водорода и алюминия в почвенном поглощающем комплексе, обладающих способностью обмениваться на другие ионы. В определение потенциальной кислотности входят обменная кислотность и гидролитическая.

Обменная кислотность определяется взаимодействием почвенно-поглощающего комплекса (ППК) с нейтральными солями:

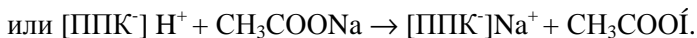
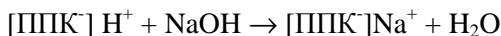
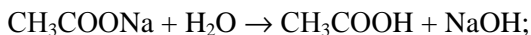


Полученная соль $AlCl_3$ легко гидролизуеться в почве с образованием HCl :



Учитывая методом титрования количество образующейся в обоих случаях кислоты, определяем обменную кислотность почвы.

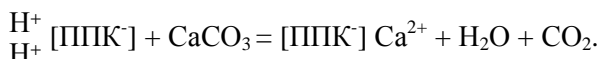
Гидролитическая кислотность обусловлена наличием ионов водорода, более прочно связанных с ППК и вытесняемых при взаимодействии почвы с растворами гидролитически щелочных солей или щелочей. Реакция может проходить в две стадии:



Количество образовавшейся уксусной кислоты определяют титрованием щелочью.

Следует отметить, что при этом в раствор переходит большее количество ионов водорода, чем при действии нейтральных солей (KCl). Гидролитически щелочная соль взаимодействует как с ППК, так и с почвенным раствором, поэтому гидролитическая кислотность больше обменной и является суммой актуальной и потенциальной кислотности. Эта величина используется на практике для расчета дозы извести на кислых почвах.

Процесс известкования кислых почв можно представить следующей реакцией:



Щелочность почвы – способность почвы подщелачивать почвенный раствор вследствие наличия в составе почвы гидролитически щелочных солей (**актуальная щелочность**), а также обменного натрия (**потенциальная щелочность**). Щелочность почв принято оценивать только по значениям актуальной щелочности. Для устранения щелочности почв используют гипс.

Буферность – способность почвы противостоять изменению реакции почвенного раствора. Различают *буферность против подкисления* и *буферность против подщелачивания*. Почвы, не насыщенные основаниями, имеющие в составе ППК обменные катионы водорода и алюминия, обладают высокой буферностью против подщелачивания и низкой – против подкисления. И наоборот, почвы, насыщенные основаниями, обладают высокой буферностью против подкисления и низкой – против подщелачивания. Буферность почвы повышается с утяжелением гранулометрического состава и увеличением содержания гумуса. Буферность почв определяет их устойчивость к техногенным воздействиям.

4.6. Биологическая активность почв

Биологическая активность почвы обусловлена активностью населяющих ее живых организмов. Наиболее многочисленными являются микроорганизмы (грибы, бактерии и актиномицеты), которым принадлежит главная роль в разложении, трансформации и минерализации органических веществ и разрушении минералов почвы. Численность и активность микроорганизмов в почвах изменяется в значительных пределах в зависимости от климатических условий, характера почвообразующей породы и типа растительности. В процессе своей жизнедеятельности микроорганизмы выделяют различные ферменты-катализаторы, которые ускоряют превращение отмершего органического вещества в гумусовые кислоты и простые соединения (вода, сероводород, углекислый газ и др.). При участии микроорганизмов в почвах происходит окисление и восстановление соединений железа и марганца, процессы нитрификации и денитрификации, сульфификации и десульфификации. Гидролиз и полный распад минералов в почвах также идут под воздействием микроорганизмов, которые выделяют в окружающую среду различные агрессивные органические вещества кислотной и щелочной природы, комплексообразователи и реагенты, обладающие сильными окислительными или восстановительными свойствами.

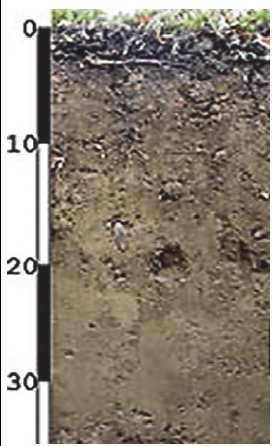
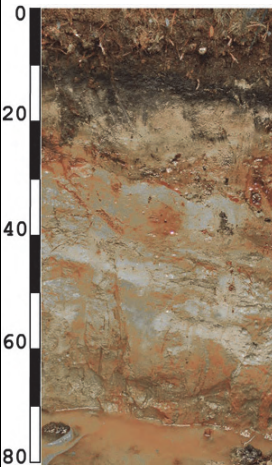
Микробиологическая активность зависит от соотношения температуры и влажности почв. Наиболее высокая активность наблюдается при значениях температуры 26-30 °С и влажности 60-80 % от полной влагоемкости.

Следует отметить, что помимо микроорганизмов растения также выделяют в почву биологически активные вещества, увеличивая тем самым ее ферментативную активность.

4.7. Наиболее распространенные типы почв

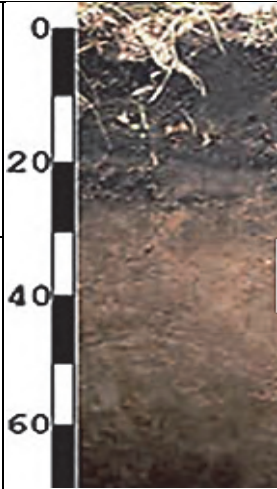
Разнообразие природных условий на Земле привело к формированию большого разнообразия почв, различающихся по своему строению, свойствам, уровню плодородия (табл. 4.8).

Почвы различных природно-климатических зон(Фото с сайта <http://soils.narod.ru/interactive/in.html>)

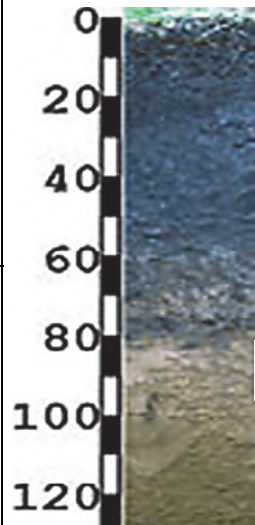
Арктические почвы		
Условия почвообразования	Климат холодный, слабовлажный. Растительность представлена мхами, лишайниками, некоторые злаки. Рельеф равнинный. Почвообразующие породы – ледниковые, морские и аллювиальные отложения	
Особенности почвообразования	Слабая дифференциация профиля, небольшое поступление органических остатков, наличие вечной мерзлоты	
Почвенный профиль	Нет горизонтов оглеения, содержание гумуса до 2-4 %, реакция среды – от слабокислой до слабощелочной в зависимости от почвообразующей породы	
Тундровые почвы		
Условия почвообразования	Небольшое количество тепла, избыточная переувлажненность, длительная, холодная зима и короткое, прохладное лето. Постоянные ветра и отсутствие леса. Три подзоны: 1) лишайниково-моховая тундра; 2) кустарничковая тундра; 3) лесотундра (карликовые формы деревьев). Рельеф в основном равнинный, местами холмистый. Почвообразующие породы – ледниковые, морские и аллювиальные отложения	
Особенности почвообразования	Небольшой растительный опад, обедненный зольными элементами, наличие слоя вечной мерзлоты, развитие процессов оглеения	

Почвенный профиль	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Торфянистый горизонт</i>; • <i>Гумусовый горизонт</i> – содержание гумуса 1-3 %, грубый, имеет бурый цвет; • <i>Переходный горизонт</i>; • <i>Материнская порода</i>. <p>В составе гумуса преобладают фульвокислоты. Реакция среды кислая и слабокислая, насыщенность основаниями – 20-50 %</p>
Почвы таежно-лесных ландшафтов	
Условия почвообразования	<p>Климат умеренно холодный. Коэффициент увлажнения 1,10-1,33. В растительном покрове преобладают хвойные деревья. Рельеф: европейская часть представлена холмистыми равнинами, западносибирская – слабодренированная равнина, восточносибирская – горный рельеф. Почвообразующие породы – ледниковые и вечно-ледниковые бескарбонатные и карбонатные различного гранулометрического состава</p>
Подбуры	
Особенности почвообразования	<p>Типичные почвы. Основной почвообразовательный процесс – альфегумусовый. Формируются на породах легкого механического состава, богатых полуторными окислами и основаниями.</p>
Почвенный профиль	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Органогенный горизонт</i> 10-20 см – содержание органического вещества до 60 %; • <i>Аккумулятивно-иллювиальный горизонт</i> – темно-бурового цвета, органического вещества – 10 %; • <i>Иллювиальный железо-алюмогумусовый горизонт</i> бурого цвета, мощностью 30-40 см; • <i>Материнская порода</i> – сильно-каменистая, бескарбонатная
	
<p>В гумусе преобладают фульвокислоты. Малая емкость поглощения во всем почвенном профиле. Почвы кислые и малоплодородные</p>	

Подзолы		
Особенности почво-образования	Основные процессы почвообразования – оподзоливание и альфегумусовый. Формируются на породах легкого гранулометрического состава, бедных полуторфными окислами и основаниями	
Почвенный профиль	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Органогенный горизонт</i> содержит 50 % органического вещества. Делится на типичную подстилку и горизонт грубого гумуса; • <i>Подзолистый элювиальный горизонт</i>; • <i>Иллювиально-гумусный горизонт</i>, содержащий 3-8 % органического вещества; • <i>Материнская порода</i> – песчаная или опесчаненная. <p>В отличие от подбуров обеднена окисными основаниями. Подзолы самые кислые почвы, значение pH может снижаться до 3. В составе гумуса преобладают фульвокислоты, емкость поглощения малая</p>	
Подзолистые почвы		
Особенности почво-образования	В отличие от подзолов формируются на породах тяжелого гранулометрического состава: суглинки и легкие глины. Ведущие процессы почвообразования: оподзоливание и лессиваж	
Почвенный профиль	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Лесная подстилка</i> состоит из опада хвои, листьев, обломков веток и трав; • <i>Гумусово-аккумулятивный горизонт</i> мощностью до 15 см; • <i>Подзолистый горизонт</i> – содержание гумуса меньше 0,5 %; • <i>Иллювиальный горизонт</i> – часто ожелезненный; • <i>Бескарбонатная материнская порода</i> <p>В гумусе преобладают фульвокислоты. Низкая емкость поглощения. Подзолистые почвы разделяют на 3 подтипа: 1) глеево-подзолистые; 2) типичные подзолистые; 3) дерново-подзолистые – самые южные в таежной зоне. Ярko выражен дерновый процесс. Самые плодородные среди подзолистых</p>	 <p>Дерново-подзолистые</p>

Почвы зоны лиственных лесов			
Буроземы			
Условия почво-образования	В основном приурочены к территориям с умеренно теплым, влажным климатом. Как правило, не промерзают. Характерен промывной тип водного режима		
Особенности почво-образования	Формируются на породах различного состава: песках, суглинках, глинах, богатых полуторными окислами и основаниями. Формируются часто под широколиственными лесами, опад которых богат зольными элементами с высоким содержанием кальция и магния		
	<ul style="list-style-type: none">• Лесная подстилка – маломощный горизонт• Гумусово-аккумулятивный горизонт – содержит 5-7 % органического вещества• Метаморфический оглиненный горизонт• Материнская порода – иногда остаточо-карбонатная		
Почвенный профиль	Соотношение гуминовых и фульвокислот примерно одинаковое. Емкость поглощения буроземов в целом невысокая, но в верхней части может достигать 35 мг-экв на 100 г почвы		
Серые лесные почвы			
Условия почво-образования	Развиты в пределах умеренно-континентального климата. Коэффициент увлажнения больше 1, периодически промывной водный режим. Почвообразующие породы – лессовидные, покровные или аллювиально-озерные суглинки, обычно содержащие карбонаты. Рельеф волнистый или холмистый с ярко выраженной овражно-балочной сетью. Растительность включает два типа лесов: 1) широколиственные леса; 2) мелколиственные леса. Опад богат основаниями, азотом, содержит относительно мало смол и восков		

<p>Почвенный профиль</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Лесная подстилка</i> • <i>Гумусово-аккумулятивный горизонт</i> • <i>Гумусово-элювиальный горизонт</i> – есть признаки оподзоленности • <i>Элювиально-иллювиальный горизонт</i> • <i>Метаморфический оглиненный</i> • <i>Карбонатный горизонт</i> • <i>Материнская порода</i> преимущественно карбонатная <p>В верхнем горизонте содержание гумуса 5-8 %, в его составе преобладают гуминовые кислоты. В верхней части реакция среды слабокислая, в нижней части щелочная. Емкость поглощения 15-30 мг-экв на 100 г почвы</p>
<p><i>Почвы луговых и лугово-разнотравных степей</i></p>	
<p>Черноземы</p>	
<p>Условия почвообразования</p>	<p>Климат континентальный или умеренно-континентальный. Коэффициент увлажнения 0,5-0,8. Непромывной тип водного режима. Почвообразующие породы – лессы, лессовидные суглинки – пористые породы, богатые кальцием и обладающие благоприятными физическими свойствами. Рельеф равнинный, с разной степенью развитости овражно-балочной сети. Растительность степная. Опад богат зольными элементами, прежде всего азотом, кальцием, фосфором и магнием. Мало дубильных веществ, смол, восков</p>
<p>Почвенный профиль</p>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Степной войлок</i> • <i>Мощный гумусово-аккумулятивный горизонт</i> • <i>Переходный гумусовый горизонт</i>, содержащий карбонаты в нижней части • <i>Иллювиально-карбонатный горизонт</i> – имеет белоглазки. • <i>Материнская порода</i> – лессы, лессовидные суглинки <p>Содержание гумуса 6-9 %, в его составе значительно преобладают гуминовые кислоты. Очень высокая емкость поглощения</p>



Почвы сухих и пустынных степей		
Каштановые почвы		
Условия почво-образования	По степени гумусированности они подразделяются на темно-каштановые (3,5-4,5 % гумуса), каштановые (2,5-3,5 % гумуса) и светло-каштановые (1,5-2,5 %). Последние тяготеют к полупустынным ландшафтам. Мало осадков, жаркое лето. Весь профиль, кроме гумусового горизонта, содержит карбонаты	
Почвенный профиль	<ul style="list-style-type: none"> • Войлок • Гумусово-аккумулятивный • Переходный • Карбонатный • Иллювиально-гипсовый • Карбонатная материнская порода – лессы <p>Емкость поглощения меньше, чем у черноземов</p>	
Гидроморфные почвы степной зоны		
Солончаки	<p>Содержат большое количество легкорастворимых солей. В зависимости от состава солей выделяют:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) корковые (преобладают сульфаты натрия и кальция); 2) мокрые (хлориды кальция и магния); 3) черные (много гумуса); 4) белые – (хлорид натрия). <p>Высокая степень насыщенности основаниями, pH выше 7. Гумуса меньше 1 %, но в черных и до 5 %</p>	
Солонцы	Обменного натрия в ППК больше 20 % от емкости обмена. Содержание легкорастворимых солей увеличивается к материнской породе	

<p>Солоди</p>	<p>Зональный тип почв. Небольшое количество легкорастворимых солей, небольшое количество натрия в ППК. Характерно невысокое содержание гумуса (3-4 %) в верхней части и быстрое его убывание с глубиной. В верхних горизонтах реакция среды нейтральная или слабокислая, ниже – щелочная. Профиль похож на подзолы</p>	
<p>Почвы пустынь</p>		
<p>Серо-бурые почвы</p>	<p>Сухой климат. Водный режим почв непромывной, а летом – выпотной. Опад растений богат зольными элементами, с преобладанием кальция, калия и натрия с хлором. Содержание гумуса 0,7-1 %. Сильнощелочные почвы (рН 8,5-9,5)</p>	
<p>Пойменные почвы</p>		
<p>Почвообразующие породы – аллювий. Различают:</p> <ul style="list-style-type: none"> • аллювиальные дерновые, имеющие легкий гранулометрический состав. Кислые в таежной зоне, карбонатные в полупустынной и пустынной зонах. Материнская порода – песчаный и супесчаный аллювий. Насыщены основаниями (более 90 % от ЕКО), слабокислая реакции. В гумусе преобладают гуминовые кислоты; • аллювиальные луговые почвы, развивающиеся в условиях увлажнения паводковыми и грунтовыми водами. В профиле есть глеевый горизонт. Материнская порода – суглинистый или глинистый аллювий, обычно оглеен. Богаче гумусом, чем 1 вид. ППК насыщен основаниями. Реакция среды нейтральная или близкая к ней; • аллювиальные болотные почвы, формирующиеся в притеррасной пойме в условиях устойчивого избыточного увлажнения. Близкая к нейтральной реакция среды, повышенное содержание оснований и элементов питания для растений 		

Болотные почвы	
<p>В основном приурочены к таежной и тундровой зонам. Различают:</p> <ul style="list-style-type: none"> • торфяные болотные верховые, имеют низкую зольность, высокую кислотность, высокую влагоемкость, низкое содержание оснований и элементов питания. В составе гумуса преобладают ФК; • торфяные болотные низинные почвы, имеют более высокую зольность, слабокислую или нейтральную реакцию среды. Почвы насыщены основаниями. Содержание гумусовых веществ достигает 40-50 % массы торфа, в их составе преобладают гуминовые кислоты 	
<p>Почвенный профиль:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Сфагновый оес</i> • <i>Слои торфа</i>, различающиеся по цвету, плотности, степени разложения • <i>Глеевый горизонт</i> • <i>Материнская порода</i> 	
Почвы горных областей	
<p>Климат по сравнению с равниной характеризуется более низкой температурой, повышенной влажностью и большей солнечной инсоляцией. Различают:</p> <ul style="list-style-type: none"> • горно-луговые почвы, формирующиеся в высокогорьях под субальпийскими лугами в условиях холодного и влажного климата (промывной водный режим); • горные лугово-степные почвы, формирующиеся в более засушливом лугово-степном поясе в условиях периодически промывного водного режима; • горно-луговые черноземовидные почвы, формирующиеся в таких же условиях, как и горные лугово-степные, но на карбонатных породах 	

В Российской Федерации в настоящее время выявлено 76 наименований почв и 25 видов почвенных комплексов [13], что обусловлено множеством природно-климатических зон на территории страны (табл. 4.9).

Таблица 4.9

**Распределение типов почв по отдельным природным зонам
Российской Федерации [13]**

Природная зона	Доля зоны, % от территории РФ	Преобладающий тип почв	Площадь, млн га
Полярно-тундровая	11,6	Тундрово-глебовые и тундрово-иллювиально-гумусовые	132,5
		Болотные	17,5
		Арктические и полярно-пустынные	2,5
Лесотундрово-северотаяжная	13,7	Глееподзолистые и подзолы иллювиально-гумусовые	119,0
		Глее-мерзлотно-таяжные	82,5
		Болотные	22,5
Среднетаяжная	13,0	Подзолистые	91,0
		Мерзлотно-таяжные	80,5
		Болотно-подзолистые	21,0
		Болотные	20,5
Южнотаяжная	14,3	Дерново-подзолистые	157,5
		Буро-таяжные	27,0
		Болотные	24,0
		Болотно-подзолистые	18,0
		Бурые лесные	10,5
Лесостепная	7,5	Черноземы оподзоленные, выщелоченные и типичные	45,0
		Серые лесные	41,0
		Лугово-черноземные	13,5
		Болотные	5,0
Степная	4,7	Черноземы обыкновенные и южные	52,0
		Лугово-черноземные	11,5
		Солонцы и солонцовые комплексы	11,0
		Болотные	3,5
Сухостепная	1,3	Темно-каштановые и каштановые	11,0
		Солонцы и солонцовые комплексы, солончаки	10,5
Полупустынная	0,9	Светло-каштановые и бурые полупустынные	14,5
Горные территории	33,0	Горные почвы	-

Наибольшее распространение имеют таежно-лесные почвы (56,4 %); почвы лиственно-лесной, лесостепной и степной зон занимают 14,7 %; субтропические почвы (коричневые и желтоземы) составляют только 0,05 % всего почвенного покрова страны. В составе горных почв, расположенных главным образом в Средней и Восточной Сибири, на Дальнем Востоке, обнаружены почвы, не имеющие равнинных аналогов.

4.8. Кларки химических элементов в почвах

Как уже было показано выше, почвы представляют собой относительно самостоятельную биокосную систему. Химические элементы в почвах входят в состав живых организмов, органических и минеральных соединений, почвенных растворов, газовых смесей. При определении кларковых содержаний химических элементов в почвах обычно учитываются все формы нахождения элементов в сумме, за исключением газовых смесей.

Сравнение кларков почв и горных пород позволяет выявить следующую закономерность: кларковые содержания химических элементов в почвах представляют собой усредненные значения кларков этих же элементов в горных породах. При этом данная закономерность отмечается не только в масштабе всей планеты, но и в почвах отдельных регионов. Вероятнее всего, это объясняется биокосностью почв. Основная часть организмов приспосабливается не к максимальным или минимальным концентрациям химических элементов в среде обитания, а к средним их значениям [1].

В настоящее время большая часть почв равнинных территорий различных стран в той или иной степени задействована человеком в хозяйственной деятельности. В связи с этим содержание многих элементов в почвах в значительной степени стало зависеть от антропогенной нагрузки. Все это привело к тому, что во многих случаях установить среднее содержание химических элементов для почв до их хозяйственного использования не представляется возможным. Большую работу по изучению распределения химических элементов в почвах провел А.П. Виноградов [3]. Установленные им средние значения содержания химических элементов в почвах представлены в табл. 4.10.

Таблица 4.10

Кларки химических элементов в почвах, % массы

Элемент	Почвы	Элемент	Почвы
Ag	$n \cdot 10^{-5}$	Li	$3 \cdot 10^{-3}$
Al	7,13	Mg	$6,3 \cdot 10^{-1}$
As	$5 \cdot 10^{-4}$	Mn	$8,5 \cdot 10^{-2}$
B	$1 \cdot 10^{-3}$	Mo	$2 \cdot 10^{-4}$
Ba	$5 \cdot 10^{-2}$	N	$1 \cdot 10^{-1}$
Be	$6 \cdot 10^{-4}$	Na	$6,3 \cdot 10^{-1}$
Br	$5 \cdot 10^{-4}$	Ni	$4 \cdot 10^{-3}$
Ca	1,37	P	$8 \cdot 10^{-2}$
Cd	$5 \cdot 10^{-5}$	Pb	$1 \cdot 10^{-3}$
Ce	$5 \cdot 10^{-3}$	Rb	$1 \cdot 10^{-2}$
Cl	$1 \cdot 10^{-2}$	S	$8,5 \cdot 10^{-2}$
Co	$8 \cdot 10^{-4}$	Sc	$7 \cdot 10^{-4}$
Cr	$2 \cdot 10^{-2}$	Se	$1 \cdot 10^{-6}$
Cs	$5 \cdot 10^{-4}$	Si	33
Cu	$2 \cdot 10^{-3}$	Sn	$1 \cdot 10^{-3}$
F	$2 \cdot 10^{-2}$	Sr	$3 \cdot 10^{-2}$
Fe	3,8	Th	$6 \cdot 10^{-4}$
Ga	$3 \cdot 10^{-3}$	Ti	$4,6 \cdot 10^{-1}$
Ge	$n \cdot 10^{-4}$	U	$5 \cdot 10^{-4}$
Hf	$6 \cdot 10^{-4}$	V	$1 \cdot 10^{-2}$
Hg	$1 \cdot 10^{-6}$	Y	$5 \cdot 10^{-3}$
J	$5 \cdot 10^{-4}$	Zn	$5 \cdot 10^{-3}$
K	1,36	Zr	$3 \cdot 10^{-2}$
La	$4 \cdot 10^{-3}$		

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение почвы.
2. Перечислите основные факторы почвообразования и дайте им краткую характеристику.
3. Из чего складывается водный баланс почв?
4. Какие типы водного режима почв вы знаете?
5. Перечислите основные типы температурного режима почв.
6. Напишите в общем виде уравнение энергетического баланса почвы и охарактеризуйте его приходную и расходную части.
7. Перечислите основные почвообразовательные процессы и дайте им краткую характеристику.
8. Охарактеризуйте строение почвенного профиля.
9. Какие морфологические признаки почвы вы знаете?
10. Дайте определение процесса гумификации.
11. Что такое оподзоливание, дерновый процесс и лессиваж?
12. В чем суть процессов оглинения и оглеения, а также болотного процесса?
13. Что представляют собой процессы засоления, осолодения и осолонцевания?
14. В чем суть процесса латеритизации?
15. Перечислите основные физические свойства почвы.
16. Перечислите основные химические свойства почвы.
17. Что представляет собой органическое вещество почвы?
18. Дайте определение гуминовых кислот и фульвокислот.
19. Представьте схематично строение коллоидной мицеллы. Охарактеризуйте состав почвенных коллоидов.
20. Чем обусловлена поглощательная способность почв? Перечислите основные типы поглощательной способности.
21. Что такое кислотность, щелочность и буферность почвы? Дайте определения.
22. Какие виды кислотности и щелочности почвы вы знаете?
23. Чем обусловлена биологическая активность почвы?
24. Перечислите наиболее распространенные на территории Российской Федерации типы почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 4

1. Алексеенко В.А. Экологическая геохимия: учебник. – М.: Логос, 2000. – 627 с.
2. Баева Ю.И., Черных Н.А. Судебная экология: учебное пособие: в 6 т. – Т. 1: Исследование экологического состояния объектов почвенно-геологического происхождения. – 2-е изд., стер. – М.: РУДН, 2018. – 252 с.
3. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 234 с.
4. Глазовская М.А., Геннадиев А.Н. География почв с основами почвоведения. – М.: Изд-во МГУ, 1995.
5. Добровольский В.В. Практикум по географии почв с основами почвоведения: учебное пособие. – М.: Просвещение, 1982. – 127 с.
6. Добровольский В.В. География почв с основами почвоведения: учебник. – М.: Высшая школа, 1989. – 320 с.
7. Докучаев В.В. Русский чернозем // В.В. Докучаев. Избр. соч. – М.: Госсельхозиздат, 1948. – Т. 1.
8. Докучаев В.В. К учению о зонах природы // Соч. – М.: Изд-во АН СССР, 1951. – Т. VI.
9. Ковда В.А. Основы учения о почвах. – М.: Наука, 1973. – Кн. 2. – 486 с.
10. Муравьев А.Г., Каррыев Б.Б., Ляндзберг А.Р. Оценка экологического состояния почвы: практическое руководство. – СПб.: Изд-во «Кристалл», 2008. – 216 с.
11. Орлов Д.С. Химия почв. – М.: Изд-во Московского университета, 1985. – 375 с.
12. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году: государственный доклад. – М.: Минприроды России; НИИ-Природа, 2017. – 760 с.
13. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году: государственный доклад. – М.: Минприроды России; НПП «Кадастр», 2018. – 888 с.
14. Прудникова Т.И., Леонтьев Д.В., Неделько О.П. Почвоведение: методические рекомендации к лабораторным занятиям для студентов биологического факультета. – Харьков: ХНУ, 2010. – 42 с.



URL: <https://pixabay.com/ru/>

Биосфера – организованная, определенная оболочка земной коры, сопряженная с жизнью.

В.И. Вернадский

Глава 5. ХИМИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В БИОСФЕРЕ



5.1. Понятие о биосфере

Биосфера (греч. *bios* – жизнь, *sphaira* – шар, *сфера*) – своеобразная оболочка Земли, содержащая всю совокупность живых организмов и ту часть вещества планеты, которая находится в непрерывном обмене с этими организмами. Живая оболочка Земли (совокупность всех ее живых организмов), составляющая около $3 \cdot 10^{-9}$ ее массы, «теснейшим образом связана со строением земной коры, входит в ее механизм и в этом механизме выполняет величайшей важности функции, без которых он не мог бы существовать» (В.И. Вернадский).

Биосфера проникает во всю гидросферу, верхнюю часть литосферы и нижнюю часть атмосферы.

Французский ученый-естествоиспытатель Жан Батист Ламарк в начале XIX в. впервые предложил концепцию биосферы, еще не введя даже самого термина. Термин «биосфера» был предложен австрийским геологом и палеонтологом Эдуардом Зюссом в 1875 году.

Целостное учение о биосфере было разработано и развито академиком Владимиром Ивановичем Вернадским («Биосфера», 1926), который рассматривал совокупность живых организмов Земли – «живое вещество» – как единый всеобщий фактор, который вовлекает в круговорот косную материю планеты, аккумулирует энергию Космоса и преобразует ее в энергию земных процессов [3, 4]. Рассматривая биосферу как оболочку Земли, населенную живыми организмами и продуктами их жизнедеятельности, он подчеркивал, что состав биосферы определяется деятельностью живых организмов, а также является результатом их совокупной химической активности в настоящем и прошлом. Таким образом, В.И. Вернадский впервые отвел живым организмам роль главной преобразующей силы планеты Земля.

Согласно представлениям В.И. Вернадского, биосфера состоит из нескольких разнородных компонентов: главный и основной – это *живое вещество*, совокупность всех живых организмов, населяющих Землю. В процессе жизнедеятельности живые организмы взаимодействуют с неживым (абиогенным) – *косным веществом*. Такое вещество образуется в результате процессов, в которых живые организмы не принимают участия, например, изверженные горные породы. Следующий компонент – *биогенное вещество*, создаваемое и перерабатываемое живыми организмами (газы атмосферы, каменный уголь, нефть, торф, известняк, мел, лесная подстилка, почвенный гумус и т.д.). Еще одно составляющее биосферы – *биокосное вещество* – результат совместной деятельности живых организмов (вода, почва, кора выветривания, осадочные породы, глинистые материалы) и косных (абиогенных) процессов.

Таким образом, *биосфера Земли* – это открытая сложная многокомпонентная саморегулирующаяся, связанная с космосом система живого вещества и минеральных соединений, образующая внешнюю оболочку планеты (В.А. Ковда, 1985) [12] .

Целостность и устойчивость биосферы обеспечивает обмен веществом и энергией между ее компонентами (живым, биокосным, биогенным и косным веществом) и окружающей средой.

Ноосфера (от греч. *noos* — разум) — это биосфера, разумно управляемая человеком. Ноосфера является высшей стадией развития биосферы, связанной с возникновением и становлением в ней цивилизованного общества, с периодом, когда разумная деятельность человека становится главным фактором развития на Земле.

Понятие «ноосфера» было предложено профессором математики Сорбонны Эдуардом Леруа (1870—1954), который трактовал ее как «мыслящую» оболочку, формирующуюся человеческим сознанием. Э. Леруа подчеркивал, что пришел к этой идее совместно со своим другом — крупнейшим геологом и палеонтологом-эволюционистом, и католическим философом Пьером Тейяром де Шарденом. При этом Леруа и Шарден основывались на лекциях по геохимии, которые в 1922/1923 годах читал в Сорбонне В.И. Вернадский (1863—1945).

Несмотря на сравнительно небольшое содержание живых организмов в земной коре, их деятельность во многом определяет протекающие на поверхности Земли геохимические процессы.

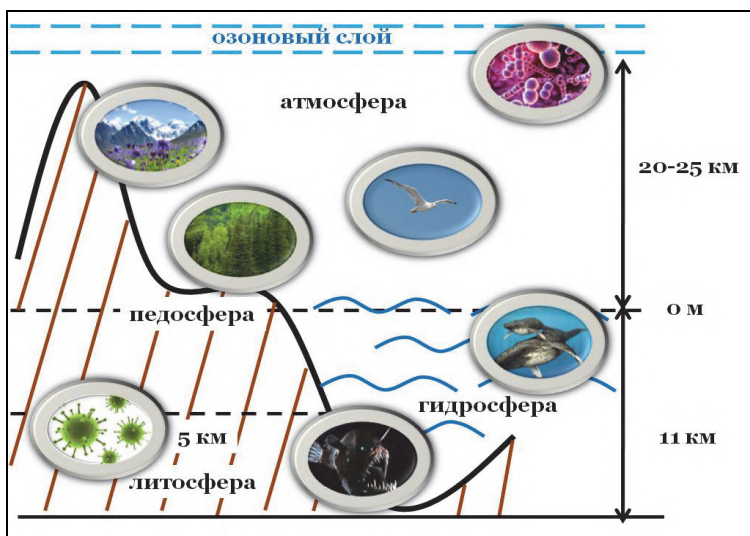


Рис. 5.1. Границы биосферы

Границы биосферы определяются границами существования живых организмов (рис. 5.1). Весь Мировой океан заселен организмами: они живут и в Марианской впадине, и подо льдами Ледовитого океана и Антарктиды. В атмосфере жизнь выявлена не только в пределах атмосферы, но и в стратосфере (жизнеспособные организмы были обнаружены даже на высоте около 80 км) [1]. При этом активная жизнь большинства организмов проходит до высот около 13 км. В пределах континентов нижняя граница биосферы проходит по меняющимся глубинам, обусловленным в основном особенностями подземных вод. В ряде районов активные и разнообразные формы микрофлоры обнаружены на глубинах около 3 км.

5.2. Уровни содержания химических элементов в живых организмах

Точно установить среднее содержание химических элементов в живом веществе очень сложно. Концентрации элементов в живом веществе постоянно уточняются. При этом за основу берется фитомасса, значительно преобладающая над зоомассой. В свою очередь, в фитомассе преобладающей является древесина.

Четыре элемента, отнесенные по классификации А.И. Перельмана [15-17] к активным воздушным мигрантам (О, Н, N, С), составляют 98,8 % массы всех живых организмов (табл. 5.1). На долю всех микро- и ультрамикроэлементов приходится меньше 0,1 %. Однако роль многих из них в функционировании организмов очень велика.

*Способность химических элементов накапливаться в составе живых организмов принято называть **биофильностью*** [16]. Степень биофильности определяется **коэффициентом биологического поглощения**, показывающим во сколько раз содержание в золе растений или животных больше по сравнению с его содержанием в почве (реже в породе). Биофильность характеризует способность живых организмов накапливать определенные элементы. Высокой биофильностью обладает углерод, азот, водород, кислород, сера, фосфор и др. Ряды биологического поглощения химических элементов, составленные А.П. Перельманом [17], представлены в табл. 5.2.

Таблица 5.1

**Среднее содержание химических элементов
в живом веществе [5; 8; 16]**

Элемент	Содержание, %	Элемент	Содержание, %
O	70	Ni	$8 \cdot 10^{-5}$
C	18	Cr	$7 \cdot 10^{-5}$
H	10,5	V	$6 \cdot 10^{-5}$
N	$3 \cdot 10^{-1}$	Li	$6 \cdot 10^{-5}$
Ca	$5 \cdot 10^{-1}$	Co	$4 \cdot 10^{-5}$
K	$3 \cdot 10^{-1}$	La	$3 \cdot 10^{-5}$
Na	$2 \cdot 10^{-1}$	Y	$3 \cdot 10^{-5}$
Si	$2 \cdot 10^{-1}$	Mo	$2 \cdot 10^{-5}$
Mg	$4 \cdot 10^{-2}$	J	$1,2 \cdot 10^{-5}$
P	$7 \cdot 10^{-2}$	Sn	$1 \cdot 10^{-5}$
S	$5 \cdot 10^{-2}$	As	$6 \cdot 10^{-6}$
Cl	$2 \cdot 10^{-2}$	Cs	$6 \cdot 10^{-6}$
Fe	$1 \cdot 10^{-2}$	Be	$4 \cdot 10^{-6}$
Mn	$9,6 \cdot 10^{-3}$	Ga	$2 \cdot 10^{-6}$
Al	$5 \cdot 10^{-3}$	Se	$2 \cdot 10^{-6}$
Zn	$2 \cdot 10^{-3}$	W	$1 \cdot 10^{-6}$
Sr	$1,6 \cdot 10^{-3}$	Ag	$1,2 \cdot 10^{-6}$
Ti	$1,3 \cdot 10^{-3}$	U	$8 \cdot 10^{-7}$
B	$1 \cdot 10^{-3}$	Hf	$5 \cdot 10^{-7}$
Ba	$9 \cdot 10^{-4}$	Sb	$2 \cdot 10^{-7}$
Cu	$3,2 \cdot 10^{-4}$	Cd	$2 \cdot 10^{-7}$
Zr	$3 \cdot 10^{-4}$	Hg	$1 \cdot 10^{-7}$
Rb	$2 \cdot 10^{-4}$	Au	$1 \cdot 10^{-8}$
Br	$1,6 \cdot 10^{-4}$	Ra	$n \cdot 10^{-12}$
F	$1,4 \cdot 10^{-4}$		
Pb	$1 \cdot 10^{-4}$		
Обнаружены в организмах, но нет достоверных данных о среднем содержании He, Ne, Ar, Sc, Kr, Nb, Rh, Pd, In, Te, Xe, Ta, Bi, Th			
Пока не обнаружены с достоверностью в организмах Ru, Re, Os, Ir, Po, Ac, Tc, At, Fr (последние три элемента не обнаружены в земной коре)			

Таблица 5.2

Ряды биологического поглощения химических элементов

Элементы		Коэффициенты биологического поглощения				
		100n	10n	n	0,n	0,0n-0,00n
Биологического накопления	Энергичного	P, S, Cl, Br, I				
	Сильного			Ca, Na, K, Mg, Sr, Zn, B, Se		
Биологического захвата	Среднего			Mn, F, Ba, Ni, Ge, Cu, Ga, Co, Pb, Sn, As, Mo, Hg, Ag, Ra, Au		
	Слабого и очень слабого				Si, Al, Fe, Ti, Zr, Rb, V, Cr, Li, Y, Nb, Th, Sc, Be, Ta, U, W, Sb, Cd	

Таблица 5.3

Шкала относительного накопления химических элементов растениями [11]

Соотношение	Коэффициент биологического поглощения					
	0,09	0,09-0,6	0,7-1,3	1,3-15	15-100	> 100
Растения / литосфера	F, Hg, Cd	Li, Be, Al, Si, Cl, Ti, V, Fe, Co, Ni, As, Rb, Pb, U	Na, K, Ca, Sr, Ba	Mg, Cr, Mn, Cu, Zn, Ag, Sn	B, P, S, Br, Mo, Cs	I
Растения / почва	F, As, Cd	Li, Be, Al, Si, Ti, V, Fe, Sn, Hg, U	Cl, Cr, Ni, Sr, Ba, Pl	Na, Mg, K, Ca, Mn, Co, Cu, Zn, Rb, Mo, Ag, I	B, P, S, Br, Cs	I

Соотношение кларков химических элементов в золе растений и литосфере (почве) свидетельствует о глобальности геохимической деятельности растений (табл. 5.3).

Если соотношение содержания элемента в золе растений к его концентрации в литосфере менее 0,7, то элемент не накапливается в растениях. Если это отношение колеблется в пределах 0,7-1,3, то растение практически не влияет на изменение статуса этого элемента в почве и литосфере. Отношение выше 1,3 свидетельствует об избирательности растений к этому элементу и его накоплении в растительных организмах.

5.3. Миграция химических элементов в биосфере

Миграция – это процесс перемещения химических элементов в пространстве и во времени, приводящий к их концентрации или рассеянию.

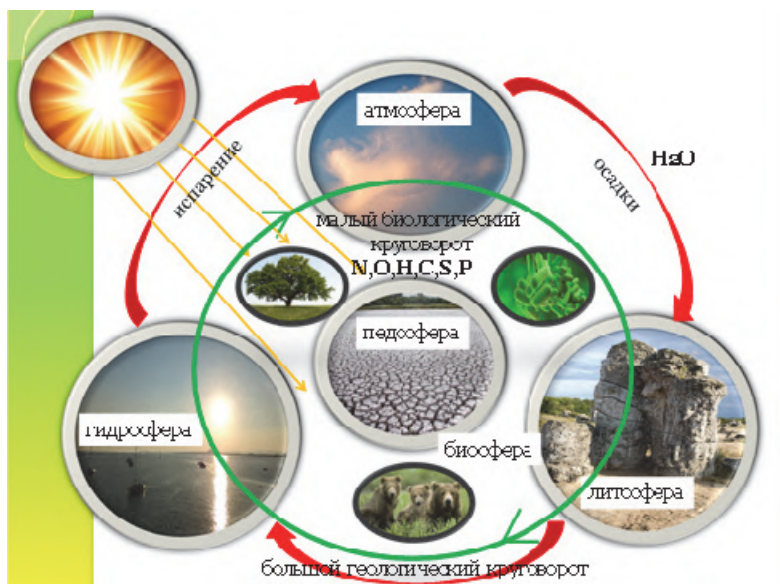


Рис. 5.2. Круговороты веществ

Перемещение элементов в биосфере можно представить в виде почти замкнутого цикла (рис. 5.2). При этом часть элементов не только постоянно поступает из мантии и космоса в биосферу, но и мигрирует из нее в глубинные зоны земной коры и в космос. При этом для перемещения какой-либо массы вещества необходима энергия, формы которой могут быть довольно разнообразны. Источники энергии, расходуемой на Земле, можно разделить на четыре основные группы [19]:

1) *энергия гравитационных сил* – проявляется в расслоении Земли на оболочки, когда преимущественно легкие атомы слагают верхние оболочки, а тяжелые – ядро. С данным видом энергии связано в большинстве случаев механическое перемещение вещества на поверхности планеты;

2) *космическая энергия* – практически вся космическая энергия, поступающая на Землю, может быть сведена к энергии солнечных лучей, которая в основном определяет тепловые режимы Мирового океана и атмосферы, а следовательно, и перемещения масс воды и газовых смесей. С энергией Солнца связан и процесс фотосинтеза. В результате взаимодействия космического излучения с газами атмосферы возникают нейтроны, участвующие в ядерных реакциях. Так, под воздействием космических лучей азот атмосферы превращается в углерод и радиоактивный изотоп водорода тритий (^3H или T). В процессе ядерных реакций, вызванных космическим излучением, образуются радиоактивные изотопы ^{10}Be , ^{22}Na , ^{26}Al , ^{36}Cl ;

3) *энергия радиоактивного распада*, с которой многие ученые связывают большинство тектонических движений. Несмотря на относительно небольшие количества существующих сейчас в горных породах радиоактивных элементов, суммарного количества выделенной ими энергии за геологическую историю Земли достаточно для расплавления массы горных пород;

4) *теплота глубин земного шара* – энергию остаточной теплоты глубин земного шара одни ученые связывают с радиоактивными процессами, другие – с остаточной теплотой звезды [19]. Верхние оболочки Земли получают тепловую энергию из глубин планеты, и с ней связаны очень многие геологические процессы, приводящие к миграции химических элементов;

5) иногда отдельно выделяют *энергию живого вещества*, но более корректно было бы говорить о проявлении ранее накопленной живым веществом энергии [1].

5.3.1. Виды миграции химических элементов

Поведение химических элементов в биосфере различно. Одни элементы (активные мигранты), такие как H, N, C, O, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Mn, Fe и др., легко образуют химические соединения, вступают в химические реакции. Другие же элементы (Zr, Hf, Nb, Pt, Os, Ir и др.) почти не участвуют в реакциях. Эти неактивные мигранты передвигаются в биосфере пассивно при механическом перемещении частиц горных пород и минералов с водой, ледниками, воздушными массами. К неактивным мигрантам относятся также инертные газы – Ge, Ne, Kr, Xe, которые практически не способны к химическим реакциям, в связи с чем играют малую роль в биосфере и экосистемах.

По способу миграции активные мигранты делятся на воздушные и водные:

- *воздушные мигранты* (H, N, C, O) образуют газообразные соединения; их миграция и накопление определяют важнейшие геохимические особенности среды. Данные элементы играют ведущую роль в биосфере, так как образуют органическое вещество;

- к *водным мигрантам* относят элементы, мигрирующие преимущественно в почвенных, грунтовых, поверхностных водах в виде ионов, недиссоциированных молекул и коллоидных частиц. Это большая часть элементов: Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Mn, Fe, Co, Ni, V и др. Водные мигранты уступают по значению воздушным [9].

Миграция химических элементов в современной биосфере представлена механической, физико-химической, биогенной и техногенной видами миграций [16].

➤ **Механическая миграция** – механическое перемещение химических элементов без изменения форм их нахождения. Таким образом перемещаются обломки минералов в поверхностных водах и атмосфере, воды рек, газы атмосферы и т.д. Данный вид миграции не зависит непосредственно от химических процессов; особое значение имеют размеры и плотность частиц. Механическая миграция обусловлена «работой» рек, течений, ветра, ледников, вулканов. В результате механической миграции образуется делювий, пролювий, аллювий, морена, лессы и другие осадочные породы. Эта миграция существенна для элементов – пассивных мигрантов и мала для элементов – активных мигрантов.

Механическая миграция происходит в водной и воздушной среде. В атмосфере есть распыленные частицы твердых и жидких веществ, эти взвеси называют аэрозолями. Аэрозольные частицы поступают из суши и моря и попадают обратно в составе атмосферных осадков и в форме сухих осаджений. Над океаном в составе аэрозолей преобладают растворимые в морской воде соли, на суше в обмен с атмосферой вступает твердое вещество литосферы. Частицы почвы, пород, вулканического пепла мигрируют на десятки тысяч километров. Ветром поднимаются не только мелкие обломки пород, но и рыхлые продукты выветривания и почвообразования; в гумусе, органических остатках, на поверхности глинистых минералов аккумулированы некоторые элементы. Значительное влияние на механическую миграцию химических элементов оказывают поверхностные воды суши.

➤ **Физико-химическая миграция** – миграция и сопровождающие ее химические реакции для таких форм нахождения химических элементов, как водные растворы и газовые смеси. К данному виду миграции относят также диффузию, процессы радиоактивного распада, явление изоморфизма, процессы сорбции.

Так как физико-химическая миграция происходит или в природных водах, или в атмосфере, то ее соответственно делят на водную и воздушную миграции.

• **Водная миграция.** Химические элементы мигрируют в ионных, молекулярных и коллоидных растворах. Интенсивность водной миграции элементов в значительной степени зависит от физико-химических свойств вод, особенно от кислотно-щелочных и окислительно-восстановительных условий.

Интенсивность водной миграции характеризуется коэффициентом водной миграции (**K**), равным отношению содержания элемента в минеральном остатке воды к его содержанию в породе, по которой или в которой перемещаются воды:

$$K = m \cdot 100 / a \cdot n,$$

где **m** – содержание в водах, г/л; **n** – содержание в породах, %; **a** – минерализация воды, г/л.

Чем выше коэффициент водной миграции, тем сильнее элементы выщелачиваются из пород, тем интенсивнее их водная миграция. По величине коэффициента водной миграции А.И. Перельман (1989) разделил элементы на четыре группы [17]:

- 1) очень подвижные мигранты ($K = n \cdot 10 - n \cdot 100$);
- 2) легкоподвижные ($K = n - n \cdot 10$);

3) подвижные ($K = 0,1 \text{ n} - \text{n}$);

4) слабоподвижные и инертные ($K = 0,01$ и менее).

• *Миграция газов.* Первоисточником газов атмосферы Земли являлся процесс дегазации мантии. В современной биосфере дифференциация химических элементов в системе поверхность суши – атмосфера – поверхность океана является результатом длительной деятельности живого вещества, а существующая динамика циклических процессов миграции элементов в газопаровой форме обусловлена главным образом современными биогеохимическими процессами [9].

• *Миграция с атмосферными осадками.* С атмосферными осадками происходит значительный перенос веществ. В атмосферных осадках преобладают те же ионы, что и в поверхностных водах. Они поступают за счет растворения газов воздуха, переноса ветром солей с моря, растворения солей и пыли континентального происхождения, вулканических выбросов.

➤ *Биогенная миграция* – миграция химических элементов, связанная с жизнедеятельностью организмов. Процессы синтеза и разложения, постоянная смена отмерших организмов новыми, обуславливают ход миграции химических элементов в биосфере. В результате, в соответствии с законом В.И. Вернадского, «любое перемещение химических элементов происходит либо при непосредственном участии живого вещества, либо в среде, геохимические особенности которой обусловлены этим живым веществом».

➤ *Техногенная миграция* – миграция химических элементов, вызванная деятельностью человека. Ее роль в поведении элементов в биосфере непрерывно возрастает.

Важность и необходимость геохимического изучения техногенной миграции была установлена В.И. Вернадским и А.Е. Ферсманом [22] в начале двадцатого столетия. Однако огромное практическое значение такого подхода было выявлено только во второй половине XX века, когда резко возросло влияние техногенеза на природную среду. Осуществляя техногенную миграцию, человечество еще плохо знает ее законы, новые явления, которые возникают на нашей планете. Часть планеты, охваченная техногенезом, представляет собой особую систему – техносферу.

Техногенез – это процесс трансформации окружающей среды под воздействием различных видов технической деятельности человека.

Техносфера – часть биосферы, коренным образом преобразованная человеком в технические и техногенные объекты (ресурсы, здания, дороги, механизмы, сооружения и др.), становящиеся частью ноосферы с целью удовлетворения социально-экономических потребностей [18].

В техносфере происходит грандиозная миграция химических элементов. Ежегодно перемещаются миллиарды тонн угля, нефти, газа, руд и др. В течение коротких отрезков времени рассеиваются месторождения полезных ископаемых, накопленные природой за миллионы лет. С продукцией сельского хозяйства и промышленности элементы мигрируют на огромные расстояния.

Выделяют два геохимических типа техногенной миграции:

1) техногенная миграция, унаследованная от биосферы, но измененная в техносфере;

2) техногенная миграция, чуждая биосфере. В техносфере протекает множество химических реакций, находящихся в резком противоречии с природными условиями. Во все большем количестве производятся химические соединения, в биосфере не существовавшие (искусственные полимеры, пластмассы, ядохимикаты и т. д.). Новым является производство атомной энергии, получение радиоактивных изотопов. Наконец, чужды биосфере экспорт-импорт и другие виды миграции, подчиняющиеся социальным законам. Для характеристики подобных процессов недостаточно старых понятий и методов, необходимы новый понятийный аппарат и новые подходы к исследованиям [14].

5.3.2. Типы миграции химических элементов

Химические элементы, находящиеся в биосфере, образуют различные, относительно устойчивые системы, получившие название *«формы нахождения»*. В зависимости от форм нахождения (часто определяющих доступность химических элементов организмам) выделяют *три основных типа миграции* [1]:

➤ *первый тип миграции* – изменение формы нахождения элементов без их значительного перемещения, например, переход элемента из минеральной формы в водные растворы, из почвы (породы) в растения и т.д. Для его характеристики используют коэффициенты перехода элементов из одной формы в другую. Впервые такой коэффициент был приведен Б.Б. Плыновым для биогенной формы – коэффициент биологического поглощения, равный отношению содержания элемента в золе растения к содержа-

нию данного элемента в почвах (породах), на которых произрастает растение (раздел 5.2). Рассматриваемый процесс (несмотря на практическое отсутствие перемещения) часто играет значительную роль в природной и техногенной миграциях элементов. При значениях коэффициента биологического поглощения больше единицы идет выборочное «перекачивание» элементов из почв. При последующем отмирании растений минеральная часть опада в подстилке лесов будет иметь более высокое содержание этих элементов, чем нижележащие почвенные горизонты;

➤ *второй тип миграции* – перемещение элемента без изменения формы его нахождения. Например, перемещение аэрозолей в атмосфере, обломков минералов в поверхностных водах или элементов, находящихся в растворе, при движении поверхностных и подземных вод;

➤ *третий тип миграции* объединяет два предыдущих и состоит в перемещении элементов с изменением форм их нахождения: перемещение элементов в подземных водах, растворяющих минералы на месторождениях; переход из минеральной формы в биогенную при мощном чехле рыхлых отложений и т. д. Этот тип миграции является преобладающим в биосфере.

5.3.3. Факторы миграции химических элементов

При изучении миграционных процессов химических элементов необходимо установить причины миграции, чтобы объяснить образование повышенных или пониженных содержаний элементов в горных породах, атмосферном воздухе, почвах, водах, растениях и животных. Все причины миграции А.Е. Ферсман условно разделил на две группы.

1. *Внутренние* факторы миграции определяются свойствами атомов и их соединений. От них зависит способность элементов давать летучие, растворимые или инертные формы. К ним относятся:

- электростатические свойства ионов:
 - ионный потенциал – отношение заряда иона к его радиусу,
 - энергетический коэффициент ионов (отражает последовательность кристаллизации минералов из растворов и расплавов и обусловлен в основном энергией их кристаллических решеток);
- свойства связи соединений, включая строение кристаллической решетки (определяют способность соединения противостоять разрушению);

- химические свойства соединений (это уже с учетом условий среды – например, более высокой устойчивости кислородных соединений в большинстве гипергенных обстановок);

- гравитационные свойства атомов (проявляются при кристаллизации, седиментации, выветривании);

- радиоактивные свойства.

2. *Внешние* факторы миграции (обусловлены средой, окружающей мигрирующие элементы) – ландшафтно-геохимические условия, определяющие поведение элементов в различных химических (окислительно-восстановительных, кислотно-щелочных) обстановках:

- температура (в целом повышение ускоряет физико-химическую миграцию, а для некоторых видов миграции, например биогенной, нужны определенные диапазоны температур);

- давление (повышение давления в равновесной системе приводит к изменению системы в сторону уменьшения объема);

- степень электролитической диссоциации (зависит от соотношения свойств растворителя и растворяемого вещества, температуры раствора и его концентрации);

- концентрация водородных ионов, определяющая кислотность-щелочность среды (рН);

- окислительно-восстановительный потенциал;

- поверхностные силы коллоидных систем (определяют масштабы селективной сорбционности);

- комплексы типоморфных элементов или ионов в почвах и водах (к типоморфным, по А.И. Перельману, относятся «распространенные элементы, наиболее интенсивно мигрирующие и накапливающиеся в ландшафте»);

- геоморфологические факторы (рельеф);

- радиационные характеристики среды;

- жизнедеятельность организмов и техногенез – наиболее сложные по механизму влияния.

5.4. Геохимические барьеры

По определению А.И. Перельмана (1961), *геохимические барьеры* – это «те участки земной коры, на которых на коротком расстоянии происходит резкое уменьшение интенсивности миграции химических элементов и, как следствие, их концентрирование» [15].

Существует два основных типа геохимических барьеров:

➤ *природные барьеры* – располагаются на участках изменения факторов миграции и смены геохимической обстановки, вызванных природными особенностями конкретного участка биосферы;

➤ *техногенные барьеры* – располагаются на участках изменения факторов миграции и смены геохимической обстановки, являющихся результатом антропогенной деятельности.

Оба типа геохимических барьеров подразделяются на четыре класса:

1) *физико-химические барьеры* – связаны с изменением физико-химической обстановки. В настоящее время детально разработана классификация физико-химических барьеров. Среди них выделяют следующие: сероводородный, глеевый, кислородный, кислый, щелочной, испарительный, сорбционный и термодинамический;

2) *биогеохимические барьеры* – представляют собой накопление химических элементов живыми организмами. Они связаны в основном с первым типом миграции элементов и относятся к числу наиболее распространенных барьеров в биосфере;

3) *механические барьеры* – в основном связаны со вторым типом миграции элементов, а в пределах биосферы – преимущественно с миграцией элементов в минеральной или коллоидной форме и представляют собой участки резкого уменьшения интенсивности механической миграции;

4) *социальные барьеры* – созданы искусственно на участках, где в природных условиях не возникают. Это зоны складирования и захоронения промышленных и бытовых отходов. Социальные барьеры связаны с техногенной миграцией элементов.

Накопление химических элементов (соединений) на геохимических барьерах часто приводит к их аномальным концентрациям. При определенных условиях концентрация и общее содержание элементов на барьере резко возрастают, образуются месторождения полезных ископаемых. До недавнего времени эти процессы были только природными. Сейчас техногенные процессы достигли таких масштабов, что и на природных, и на техногенных барьерах возможно накопление определенных элементов в промышленных концентрациях [1].

А.И. Перельман вывел формулу для расчета концентрации элементов на геохимических барьерах:

$$h = \frac{m_1 - m_2}{a_1 - a_2},$$

где h – содержание рассматриваемого элемента, концентрирующегося на барьере; k – коэффициент, зависящий от инертной массы на барьере; m_1 – содержание рассматриваемого элемента в миграционном потоке до барьера; m_2 – содержание рассматриваемого элемента в миграционном потоке после барьера; a_1 – содержание всех веществ в потоке до барьера; a_2 – содержание всех веществ в потоке после барьера.

Из формулы видно, что для накопления определенного элемента на барьере необязательно его высокое содержание в миграционном потоке. Так, если какой-либо участок является барьером только для одного (или нескольких) элемента (элементов), а у большинства остальных элементов на этом участке интенсивность миграции не изменяется, то даже при низкой концентрации рассматриваемого элемента в мигрирующем потоке его концентрация на барьере может со временем быть очень высокой.

Геохимические барьеры отличаются друг от друга не только концентрациями определенных элементов и их общим количеством на барьере, но и величиной самих барьеров. В зависимости от этого критерия А.И. Перельман выделил макро-, мезо- и микробарьеры.

- *макробарьеры* – геохимические барьеры шириной до первых километров и длиной тысячи километров (современные и древние зоны смешивания пресных речных вод с солеными морскими);
- *мезобарьеры* – протяженность доходит до десятков километров при ширине до сотен метров (краевые зоны болот, где отлагаются многие элементы, сносимые с водоразделов);
- *микробарьеры* – размеры колеблются от нескольких миллиметров до первых метров (возникают на отдельно разлагающихся на дне водоема раковинах или рыбах; в родниках, на месте выхода на дневную поверхность глеевых вод, из которых в присутствии свободного кислорода воздуха отлагается окислившееся трехвалентное железо и т.д.

В случаях, когда к одному и тому же барьеру поступают химические элементы (соединения) из разных миграционных потоков, возникают *многосторонние барьеры*. Часто при поступлении нескольких миграционных потоков в одно место геохимический

барьер образуется именно за счет слияния этих потоков. Тогда возможно образование не только многосторонних, но и *комплексных барьеров* (пространственное наложение друг на друга нескольких разных геохимических барьеров).

Барьеры разделяют также в зависимости от положения в пространстве поступающих к ним миграционных потоков. Если они продвигаются в горизонтальном направлении, например, по границе почв и подстилающих их горных пород, то формируются *латеральные геохимические барьеры*. При вертикальном и слабо-наклонном продвижении миграционного потока (независимо от того, сверху вниз или снизу вверх) формируются *вертикальные (радиальные) барьеры*.

5.5. Циклы биогенных элементов в биосфере

Живые организмы создают в биосфере круговороты важнейших биогенных элементов, которые попеременно переходят из живого вещества в неорганическую материю.

Эти циклы делят на две основные группы: круговороты газов и осадочные круговороты. В первом случае главный поставщик элементов – атмосфера (углерод, кислород, азот), во втором – горные осадочные породы (фосфор, сера и др.)

В.В. Докучаев

Между компонентами биосферы постоянно происходит обмен веществом и энергией. Изначально процессы обмена химическими элементами имели циклический характер, обусловленный суточными, сезонными, годовыми и большей протяженности циклами колебаний поступающей от Солнца энергии. Циклические процессы менялись на протяжении геологической истории Земли, что влекло за собой изменение химического состава атмосферы, гидросферы, земной коры. Живое вещество встраивалось в существующую систему циклов и продуцировало различные продукты жизнедеятельности, накопление которых сильно изменяло циклические миграционные потоки.

Выделяют *большой* или *геологический (абиотический) круговорот веществ* (рис. 5.2), в основе которого лежит процесс переноса минеральных соединений из одного места в другое в масштабах планеты. Около половины поступающей на Землю лучистой энергии расходуется на перемещение воздуха, выветрива-

ние горных пород, испарение воды, растворение минералов и т. д. Движение воды и ветра приводит к эрозии, транспорту, перераспределению, осаждению и накоплению механических и химических осадков на суше и в океане.

В основе *малого* или *биологического (биотического) круговорота веществ* в природе лежат процессы синтеза и разрушения органических соединений. В отличие от большого, малый круговорот веществ происходит лишь в пределах биосферы. При этом все организмы экосистемы связаны между собой и абиотическим окружением потоками вещества и энергии. Биологический круговорот характеризуется небольшим количеством энергии. Так, на создание органического вещества затрачивается всего около 1 % падающей на Землю лучистой энергии. Однако эта энергия, вовлеченная в биологический круговорот, совершает огромную работу по созданию живого вещества [2].

Большой и малый круговороты веществ слагаются из *биогеохимических циклов элементов* – перемещений и превращений, происходящих при активном участии живого вещества. Эти процессы обеспечивают жизнь и составляют одну из главных ее особенностей. В каждом биогеохимическом цикле можно выделить два фонда веществ:

1) *резервный* – большая масса медленно движущихся веществ, в основном в составе абиотического компонента;

2) *обменный (подвижный) фонд* – обусловлен быстрым обменом между организмами и их непосредственным окружением. Он существенно меньше, чем резервный, но более активный.

Ходом биологического круговорота химических элементов обуславливается своеобразная вертикальная зональность окислительно-восстановительных обстановок – одна из важнейших геохимических характеристик биосферы. Окислительная обстановка в почвах ландшафтов суши часто с глубиной сменяется глеевой и, как правило, резко восстановительной в подземных водах. В аквальных ландшафтах (прудах, заливах, озерах, водохранилищах) водные растения, выделяя в результате фотосинтеза O_2 , насыщают верхние горизонты воды свободным (растворенным) кислородом и формируют в них окислительную обстановку. В нижних частях этих ландшафтов разлагающееся на дне органическое вещество потребляет кислород, часто создавая в илах восстановительную глеевую или сероводородную обстановку. Геохимическая работа живого вещества создала преобладание резко окислительной об-

становки на земной поверхности, сменяющейся с глубиной на восстановительную.

5.5.1. Круговорот углерода

Углерод как химический элемент является основой жизни. Он разными способами соединяется со многими другими элементами, образуя простые и сложные органические молекулы, входящие в состав живых клеток. В живом веществе углерод составляет в среднем около 18 % сухой биомассы. Источник первичного углекислого газа в биосфере – дегазация мантии Земли.

Главный резервный фонд углерода сосредоточен в Мировом океане. Углекислый газ атмосферы и гидросферы представляет собой обменный фонд в круговороте углерода, откуда его черпают наземные растения и водоросли. Фотосинтез лежит в основе всех биологических круговоротов на Земле. Высвобождение фиксированного углерода происходит в ходе дыхательной активности самих фотосинтезирующих организмов и всех гетеротрофов (бактерий, грибов, животных), включающихся в цепи питания за счет живого или мертвого органического вещества.

Особенно активно происходит возврат в атмосферу углекислого газа из почвы, где сосредоточена деятельность многочисленных групп организмов, разлагающих остатки отмерших растений и животных, и осуществляется дыхание корневых систем растений. Этот интегральный процесс обозначается как «почвенное дыхание» и вносит существенный вклад в пополнение обменного фонда CO_2 в воздухе. Параллельно с процессами минерализации органического вещества в почвах образуется гумус – богатый углеродом сложный и устойчивый молекулярный комплекс. Гумус почв является одним из важных резервуаров углерода на суше.

В условиях, где деятельность деструкторов тормозят факторы внешней среды (например, при возникновении анаэробного режима в почвах и на дне водоемов), органическое вещество, накопленное растительностью, не разлагается, превращаясь со временем в такие породы, как каменный или бурый уголь, торф, сапропели, горючие сланцы и др., богатые накопленной солнечной энергией. Они пополняют собой резервный фонд углерода, надолго выключаясь из биологического круговорота. Углерод временно депонируется также в живой биомассе, в мертвом опаде, растворенном органическом веществе океана и т.д. Однако основным резервным фондом углерода являются не живые организмы и не

горючие ископаемые, а осадочные породы – известняки и доломиты. Их образование также связано с деятельностью живого вещества. Углерод этих карбонатов надолго захоронен в недрах Земли и поступает в круговорот лишь в ходе эрозии при обнажении пород в тектонических циклах.

Особый интерес представляет движение масс углекислого газа в пределах биосферы. Содержание CO_2 в различных резервуарах земного шара наглядно показывает роль каждого из них в глобальном цикле углерода: атмосфера / суша / океан / геосфера = 1 / 3-4 / 50 / 10. Существует следующая закономерность в распределении углерода – наименьшее количество элемента находится в атмосфере, несколько больше – в живом веществе суши, еще больше – в неживом органическом веществе педосферы; при этом наибольшая часть углерода содержится в составе гидрокарбонатов океана – в 10-12 раз больше, чем в живом веществе, атмосфере и педосфере вместе взятых. Приведенные данные, конечно, являются ориентировочными и отражают современный уровень наших знаний [9].

В атмосфере углерод находится преимущественно в виде CO_2 , CO и растворенном в атмосферных осадках HCO_3^- , в меньшей степени – в виде метана CH_4 . На суше элемент содержится в составе живого органического вещества и органического вещества почв, а также в виде карбонатов и гидрокарбонатов. В Мировом океане присутствует и «органический» углерод – в живых организмах, и «карбонатный» углерод – CO_2 , H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-} . В геосфере углерод находится в составе ископаемого топлива (органический C), в кристаллических и вулканических породах (неорганический C), в виде карбонатов, карбидов, сорбированного CO_2 в составе осадочных пород органического и неорганического происхождения.

В круговороте углерода ведущую роль играет углекислый газ. Ежегодно в атмосферу поступает около $5,6 \cdot 10^{16}$ т CO_2 , а в гидросферу – примерно $2 \cdot 10^{16}$ т [21]. Брожение и минерализация органических веществ, а также дыхание наземных и водных растительных организмов дают около 56 % поступающего в атмосферу CO_2 , жизнедеятельность почвенных микроорганизмов – около 38 %, а дыхание животных и людей – всего 1,6 %. Промышленные выбросы CO_2 в атмосферу составляют $\sim 5 \cdot 10^9$ т в год, из них 50 % остается в атмосфере, а остальная часть попадает в процессе фотосинтеза в биосферу и поглощается гидросферой [6].

Около 30 % CO_2 атмосферы адсорбируется гидросферой, причем в больших количествах в холодных частях Мирового океана. Гидросфера действует как насос, перекачивающий углекислый газ из холодных регионов в теплые, где он частично вновь выделяется в атмосферу. Примерно 10^{11} т CO_2 находится в непрерывном круговороте между атмосферой и океаном.

Глобальная динамика масс углерода в биосфере определяется двумя крупными циклами массообмена:

➤ Первый из них обеспечивается ассимиляцией CO_2 и H_2O путем фотосинтеза органического вещества и его последующего разложения с образованием CO_2 . Этот поток не замкнут, так как значительное количество углерода постоянно выводится из цикла в составе «мертвого» органического вещества (гумус почв, органический ил, торф и др.). Только в гумусе почвы за время не более 1000 лет накоплено углерода в 2 раза больше, чем его содержится в атмосфере. Из соотношения биомассы и продукции на суше следует, что полная замена массы растительности происходит за период около 15 лет. В океане оборот массы фитопланктона происходит за 1-2 сут, а обновление всей биомассы океана – примерно за месяц. На протяжении года живое вещество биосферы поглощает около $1,2 \cdot 10^{11}$ т углерода, большая часть которого вновь возвращается в океан и атмосферу [9];

➤ Второй цикл обусловлен процессом поглощения и выделения углекислого газа природными водами при химическом взаимодействии CO_2 и H_2O с образованием карбонат-гидрокарбонатной системы. Между газами тропосферы и поверхностным слоем океана существует подвижное равновесие. Растворимость газов в воде зависит от температуры, давления и количества растворенных солей. В пресной воде растворимость выше, но доля пресных вод в биосфере мала. При этом углекислый газ активно растворяется в холодных водах приполярных районов.

Оба цикла неразрывно связаны с деятельностью живого вещества. Характерной чертой двух главных циклов массообмена является их незамкнутость и выведение из циклов некоторого количества углерода в форме неживого органического вещества и карбонатов металлов.

Таким образом, **биологический круговорот углерода** осуществляется благодаря протеканию двух фундаментальных процессов – фотосинтеза и клеточного дыхания. В процессе фотосинтеза из углекислого газа и воды образуются органические вещества

(прежде всего углеводы), а лучистая энергия Солнца переходит в энергию химических связей этих соединений. Клеточное дыхание – противоположный фотосинтезу процесс, в котором расщепляются углеводы и из них извлекается энергия, которая далее используется на различные энергетические нужды клетки.

В *глобальном круговороте углерода* происходят следующие процессы:

- растворение углекислого газа в Мировом океане и атмосферных осадках;
- перенос углеродсодержащих веществ с водным стоком с суши в Мировой океан в виде HCO_3^- и органического вещества;
- связывание углерода в виде карбонатов.

Движение масс углекислого газа схематично можно представить в следующем виде: углекислый газ активно растворяется в холодной воде приполярных районов океана; холодная вода имеет большую плотность, поэтому массы воды с повышенным содержанием CO_2 опускаются на глубину Мирового океана и в виде мощных холодных течений перемещаются к экватору, постепенно нагреваются, уменьшают плотность, поднимаются вверх и освобождаются от избытка углекислого газа.

Углекислый газ участвует в реакциях, протекающих в гидросфере: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$

В обычных условиях pH океанов не выходит из пределов 7,0-8,5. Для этой области значений pH более 80 % углерода будет находиться в виде HCO_3^- -ионов. В такой форме углерод легко усваивается организмами, живущими в водной среде.

Диоксид углерода атмосферы расходуется на процесс выветривания горных пород, превращая последние сначала в карбонаты, а затем в гидрокарбонаты, которые вымываются водой и накапливаются в океане. Общее количество CO_2 , связываемое ежегодно при выветривании горных пород, достигает 2 млрд т углерода [13; 20].

В земной коре основная форма нахождения углерода (C_k) – карбонаты. При этом содержание C_k на порядок превышает концентрацию углерода в составе органических соединений ($C_{\text{орг}}$). Главным резервуаром углерода служит осадочная оболочка земной коры. Концентрация углерода в осадочных породах на порядок выше, чем в гранитном и базальтовом слоях литосферы. Основная масса $C_{\text{орг}}$ представлена рассеянным органическим веществом. Концентрированные скопления $C_{\text{орг}}$ в виде залежей нефти,

каменных углей имеют подчиненное значение – в сумме их масса на три порядка ниже массы углерода рассеянного органического вещества осадочной оболочки. Карбонатные и органические соединения земной коры имеют преимущественно биогенное происхождение; карбонаты небиогенного происхождения встречаются довольно редко. Связующим звеном между ними является CO_2 – материал для фотосинтеза и образования биогенных карбонатов (известковые скелеты организмов). На протяжении длительного времени происходило закономерное распределение исходного CO_2 между фотосинтезом и образованием карбонатов. При этом более 80 % углерода, поступающего в атмосферу при дегазации мантии, связывалось в карбонатах. Процессы образования карбонатов и фотосинтез приводят к удалению из атмосферы CO_2 , непрерывно поступающего из мантии. Возможно, что эти процессы являются частью глобального механизма поддержания невысокой концентрации CO_2 в атмосфере, что имеет важное значение в связи с так называемым – парниковым эффектом [9].

5.5.2. Круговорот кислорода

Круговорот кислорода теснейшим образом сопряжен с углеродным циклом. Кислород – важнейший компонент жизненных и энергетических процессов. Его содержание в живом веществе составляет в среднем 70 %.

Большая масса кислорода сосредоточена в кристаллическом силикатном веществе земной коры. Но для организмов биосферы исключительно важен свободный кислород, аккумулированный в атмосфере и растворенный в гидросфере.

Основной круговорот кислорода в природе осуществляется в результате жизнедеятельности живого вещества: с одной стороны, процесса фотосинтеза кислорода, с другой – дыхания, горения и других окислительных процессов. При этом лишь 25 % синтезируемого кислорода выделяется растительностью суши, а остальное количество – фотосинтезирующими организмами Мирового океана. Подсчитано, что весь кислород атмосферы проходит через живые организмы, включая человека, примерно за 10 лет [6; 23].

Именно фотосинтезу Земля обязана своей уникальной атмосферой с высоким содержанием свободного кислорода. С круговоротом кислорода тесно связано образование озона в высоких слоях атмосферы.

Абиотическим путем кислород образуется в верхних слоях атмосферы за счет фотодиссоциации паров воды, но этот источник составляет лишь тысячные доли процента от количеств, образующихся в процессе фотосинтеза.

Между содержанием кислорода в атмосфере и гидросфере существует подвижное равновесие. При этом обменный фонд кислорода в атмосфере составляет не более 5 % от общей продукции фотосинтеза.

Выделившийся кислород интенсивно расходуется на процессы дыхания всех аэробных организмов и окисление разнообразных минеральных соединений. Эти процессы происходят в атмосфере, почве, воде, илах и горных породах. В настоящее время выявлено, что значительная часть кислорода, связанного в осадочных породах, имеет фотосинтетическое происхождение. Резервный фонд кислорода, находящегося в виде органических соединений в осадочных породах, углях, торфах, служит основой поддержания обменного фонда кислорода в атмосфере.

В настоящее время на миграционные потоки кислорода и кислородсодержащих соединений в биосфере существенное влияние оказывают техногенные процессы. Значительная часть кислорода атмосферы связывается в результате работы транспорта, промышленности и других форм антропогенной деятельности. Вырубка лесов, окисление почвенной органики, опустынивание земель на больших территориях уменьшают продуцирование свободного кислорода. В ряде регионов при сжигании горючих полезных ископаемых расходуется больше кислорода, чем его образуется за счет фотосинтеза.

5.5.3. Круговорот азота

Биогеохимический круговорот азота не менее сложен, чем углерода и кислорода, и охватывает все области биосферы. Азот относится к элементам, поддерживающим жизнь на планете. Он входит в состав важнейших органических молекул – ДНК, белков, липопротеидов, АТФ, хлорофилла и др. В растительных тканях его соотношение с углеродом составляет в среднем 1 : 30, а в морских водорослях 1 : 6.

Резервный фонд азота находится в атмосфере. Выделение азота из литосферы шло за счет дегазации мантии, позднее – при извержении вулканов, выносе гидротерм и газовых струй. В настоящее время поступление элемента из недр составляет около

$1 \cdot 10^6$ т/год. Молекулярный азот – наиболее устойчивая форма нахождения элемента. По этой причине азот аккумулирован в атмосфере, а не в водах или осадочной оболочке планеты. Так как азот не образует нерастворимых минеральных соединений, то основная часть азота в осадочной оболочке планеты находится в составе органического вещества. Являясь самым распространенным газом в атмосфере, азот, тем не менее, не может напрямую вовлекаться зелеными растениями в биогеохимический цикл. Молекулярный азот атмосферы недоступен растениям, которые могут усваивать этот элемент только в виде ионов аммония, нитратов или из почвенных или водных растворов. Поэтому недостаток азота часто является фактором, лимитирующим первичную продукцию – работу организмов, связанную с созданием органических веществ из неорганических.

В атмосфере некоторое количество азота превращается в окись и двуокись азота, которые, связываясь с молекулами воды, переходят в ионную форму нитритов и нитратов. При этом затрачивается энергия электрических разрядов. Таким путем в биогеохимический цикл вовлекается примерно 20 % всего участвующего в нем азота. Остальной азот становится доступен растениям и, следовательно, остальной биоте только благодаря деятельности бактерий, способных усваивать молекулярный азот, превращая его в ионы аммония. Микробиологическое связывание азота происходит постоянно. Образование же из ионов аммония нитрит- и нитрат-анионов может происходить самопроизвольно в присутствии кислорода, а вот образование из неорганических веществ (аммония, нитритов, нитратов) аминокислот и нуклеотидов, белков и нуклеиновых кислот возможно только в результате биохимических реакций, осуществляемых растениями. Организмы, используя азот, возвращают его в атмосферу. Таким образом, цикл замыкается [24].

Ниже представлены основные биохимические процессы превращения соединений азота при участии микроорганизмов:

➤ **азотфиксация** – биологическая фиксация азота – процесс связывания атмосферного азота некоторыми свободноживущими (например, рода *Azotobacter*) и симбиотическими бактериями-азотфиксаторами (например, клубеньковыми бактериями бобовых растений рода *Rhizobium*). В настоящее время установлено, что некоторые виды синезеленых водорослей, многие водные и почвенные бактерии, примитивные грибы (актиномицеты) в клубень-

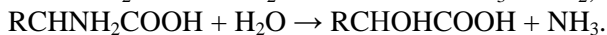
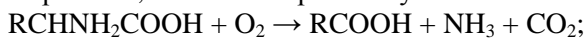
ках ольхи и других деревьев также обладают этим свойством (всего около 160 видов);

➤ **аммонификация** – процесс разложения органических веществ, протекающий с участием специфических аммонифицирующих микроорганизмов и ведущий к образованию аммиака. При этом распад наиболее сложных высокомолекулярных азотсодержащих органических веществ (белков) идет в несколько стадий:

I. Расщепление белков до аминокислот микроорганизмами, вырабатывающими фермент протеазу:

белки → пептоны → полипептиды → аминокислоты.

II. Разложение аминокислот бактериями, актиномицетами и грибами как в аэробных, так и в анаэробных условиях:

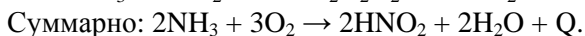
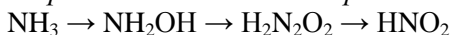


Аммонификация – первая стадия минерализации азотсодержащих органических соединений.

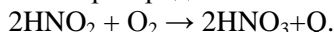
➤ **Нитрификация** – окисление аммиака до нитратов и нитритов при участии нитрифицирующих бактерий. Этот процесс протекает в два этапа:

I. При участии бактерий рода *Nitrosomonas*:

(аммиак → гидроксилламин → гипонитриты → нитриты).



II. При участии бактерий рода *Nitrobacter*:



Реакции нитрификации идут с выделением энергии, которую бактерии используют для своей жизнедеятельности, то есть они являются хемоавтотрофами. Образовавшиеся при нитрификации нитриты и нитраты могут быть потенциальным источником кислорода в анаэробных условиях. Нитрификация протекает в почвах в окислительных условиях при величине окислительно-восстановительного потенциала около 0,4–0,5 В.

➤ **Денитрификация** – процесс восстановления нитрат-ионов до молекулярного азота, осуществляемый почвенными анаэробными бактериями-денитрификаторами (например, родов *Pseudomonas* и *Micrococcus*):

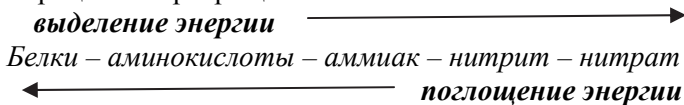


Денитрификация протекает с потреблением энергии за счет жизнедеятельности бактерий.

Реакция денитрификации, замыкающая цикл азота, показывает, как молекулярный азот возвращается в атмосферу.

Ступенчатый процесс разложения белков до нитратов служит источником энергии для организмов, осуществляющих это разложение. А обратный процесс требует других источников энергии, таких как органическое вещество или солнечный свет. Необходимо отметить, что фиксация азота требует особо больших затрат энергии, так как много ее идет на разрыв тройной связи в молекуле N_2 , чтобы с добавлением водорода из воды произошло превращение в две молекулы аммиака.

В процессах превращения:



справа налево требуются затраты энергии, слева направо, наоборот, энергия выделяется [24].

Азотфиксация и денитрификация в природе примерно уравновешены. Цикл азота, таким образом, зависит преимущественно от деятельности бактерий, тогда как растения встраиваются в него, используя промежуточные продукты этого цикла и немного увеличивая масштабы циркуляции азота в биосфере за счет продуцирования биомассы.

Роль бактерий в круговороте азота настолько велика, что если уничтожить только 20 их видов, жизнь на нашей планете прекратится.

Наиболее интенсивный биологический круговорот азота происходит в Океане, отличительной особенностью которого является то, что в воде уже имеются растворенные ионы NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , способные усваиваться организмами, поэтому не требуется предварительной фиксации молекулярного азота.

В целом развитие цикла азота во времени можно представить следующим образом: на первых этапах азот поступал из недр, окислялся под воздействием фотохимических процессов в тропосфере, в виде нитратов и сульфата аммония вымывался осадками. По мере развития жизни цикл усложнялся, включая звенья микробиологических круговоротов: *азотфиксация – аммонификация – нитрификация – денитрификация*. В связи с этим возникла предпосылка для появления наземных растений с почвенным питанием. Возникает биологический круговорот азота на суше и формируется почвенный покров как основной регулятор глобального

цикла азота. На основе фотосинтезируемого органического вещества образуется круговорот азота с участием животных [9].

С каждым годом деятельность человека на круговорот азота усиливается, способствуя превышению перевода данного элемента в связанные формы над процессами возврата в молекулярное состояние.

5.5.4. Круговорот водорода

На Земле водород находится преимущественно в гидросфере в составе воды. Содержание элемента в литосфере и атмосфере сравнительно невелико. Кроме того, он входит в состав органических веществ. Огромные массы водорода, наряду с кислородом, участвуют в круговороте воды – одном из наиболее мощных циклических процессов на планете. Особенностью водорода является его способность (наряду с гелием) уходить из поля тяготения Земли благодаря своей малой атомной массе. Эти потери компенсируются выделением водорода из мантии. Молекулярный водород поступает в атмосферу Земли в результате вулканической деятельности, его выделяют также некоторые бактерии. После появления на нашей планете живых организмов водород стал связываться в органическом веществе. При этом живое вещество не только закрепляет водород в биосфере, связывая его в органическом веществе, но и оказывают сильное влияние на его фиксацию минеральным веществом.

5.5.5. Круговорот фосфора

Фосфор необходим для синтеза многих органических веществ, включая АТФ, ДНК, РНК и др., но при этом усваивается растениями только в виде ионов ортофосфорной кислоты (PO_4^{3-}).

Фосфор относится к элементам, лимитирующим первичную продукцию и на суше, и особенно в океане, поскольку обменный фонд фосфора в почвах и водах невелик. Именно недостаточное количество фосфора чаще всего ограничивает рост массы живого вещества. Резервный фонд данного элемента находится в литосфере. Фосфор образует многочисленные минералы (например фосфориты), однако они нечасто встречаются в горных породах в больших количествах. Круговорот элемента в масштабах биосферы незамкнут.

В природных водах фосфор присутствует в составе органических соединений и взвешенных твердых частиц. Лишь неболь-

шая его часть находится в растворе в виде ортофосфат-иона PO_4^{3-} и гидроортофосфат-иона HPO_4^{2-} .

В океане «органический» фосфор многократно переходит от одного живого организма к другому и медленно накапливается в донных отложениях в виде малорастворимых фосфатов. Эти потери фосфора компенсируются только из одного источника – выветривающихся горных пород суши, куда они попадают со дна океанов в результате длительных геологических процессов.

На суше растения черпают из почвы фосфаты, освобожденные редуцентами из разлагающихся органических остатков. Однако в щелочной или кислой почве растворимость фосфорных соединений резко падает. Основной резервный фонд фосфатов содержится в горных породах, созданных на дне океана в геологическом прошлом. В ходе выщелачивания пород часть этих запасов переходит в почву и в виде взвесей и растворов вымывается в водоемы. В гидросфере фосфаты используются фитопланктоном, переходя по цепям питания в другие гидробионты. Однако в океане большая часть фосфорных соединений накапливается с органическими остатками на дне, а затем в составе осадочных пород переходят в большой геологический круговорот. На глубине растворенные фосфаты связываются с кальцием, образуя фосфориты и апатиты. В биосфере поток фосфора из горных пород суши в глубины океана является однонаправленным, следовательно, обменный фонд его в гидросфере очень ограничен [25].

Деятельность человека нарушает природный круговорот фосфора. Соединения фосфора широко используются для производства удобрений и моющих средств. Это приводит к загрязнению водоемов соединениями фосфора. В таких условиях фосфор перестает быть элементом, ограничивающим рост массы живых существ, особенно водорослей и других водных растений.

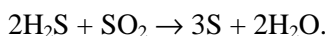
5.5.6. Круговорот серы

Резервный фонд серы, как и фосфора, сосредоточен в осадочных породах. Цикл данного элемента достаточно прост, но очень интересен тем, что в нем существенную (едва ли не большую, чем в цикле азота) роль играют микроорганизмы [7]. Сера содержится в атмосфере в небольших количествах, в основном в виде сероводорода и диоксида серы. Довольно много этого элемента (в виде сульфат-ионов) находится в гидросфере. В литосфере сера встречается в виде простого вещества (самородная сера) и

в составе многочисленных минералов – сульфидов и сульфатов металлов. Кроме того, соединения серы есть в углях, сланцах, нефти, природном газе. Сера входит в состав многих белков, поэтому всегда содержится в организмах животных и растений. Она необходима для построения ряда аминокислот, отвечает за трехмерную структуру белков.

Основное накопление серы происходит в океане, куда ионы сульфатов непрерывно поступают с суши с речным стоком. При выделении из вод сероводорода сера частично возвращается в атмосферу, где окисляется до диоксида, превращаясь в дождевой воде в серную кислоту [25].

Выделяясь из глубин Земли, газообразные соединения серы (преимущественно диоксид серы и сероводород) растворяются в подземных водах. Здесь они образуют малорастворимые сульфиды (главным образом пирит – дисульфид железа FeS_2) и сульфаты (в частности, сульфат кальция CaSO_4). Образуется также самородная сера:

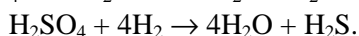
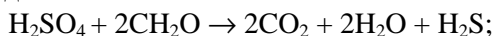


Газообразные соединения серы попадают в почву, атмосферу и Мировой океан, где их поглощают серные бактерии. Поглощение соединений серы бактериями происходит и в почве.

Круговорот серы поддерживается в биосфере широким спектром бактерий. В отдельных звеньях этого цикла участвуют аэробные микроорганизмы, окисляющие серу органических остатков до сульфатов, а также анаэробные редуторы сульфата, восстанавливающие сульфаты до сероводорода. Кроме перечисленных, группы серобактерий окисляют сероводород до элементарной серы и далее до сульфатов. Растения усваивают из почвы и воды только ионы SO_4^{2-} .

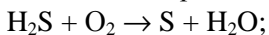
Ниже приведены примеры участия микроорганизмов в превращениях соединений серы [7; 24]:

➤ *Сульфатредуцирующие бактерии*, использующие серу в качестве акцептора электронов для извлечения необходимой им энергии из органических веществ, образуют сероводород в отсутствие кислорода:



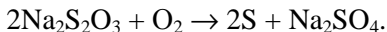
Примером таких бактерий может служить облигатный анаэроб *Desulfovibrio*.

➤ Окисление серными бактериями сероводорода до серы и серной кислоты в присутствии кислорода:



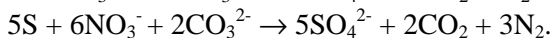
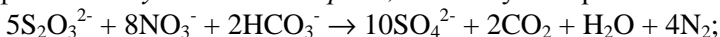
В качестве примера можно привести бактерии родов *Beggiatoa* и *Thiothrix*, которые накапливают серу внутри своих клеток.

Бактерии же рода *Thiobacillus* окисляют сульфиты до серы и сульфатов, откладывая серу снаружи клеток:



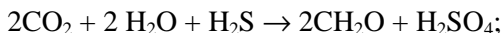
Благодаря этим и подобным бактериям сформировались современные запасы самородной серы.

➤ Окисление серными бактериями серы и сульфитов до сульфатов в отсутствие кислорода, используя нитраты:

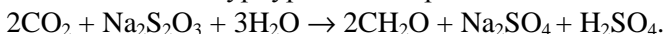


➤ Хемосинтез органического вещества бактериями с использованием серы:

■ зеленые серные бактерии:



■ пурпурные бактерии:



Антропогенная деятельность существенно изменила круговорот серы между атмосферой, океанами и поверхностью суши. Эти изменения сильнее, чем воздействие человека на цикл углерода. Как и в случае глобального цикла углерода, техногенные выбросы серы в окружающую среду мало влияют на распределение масс этого элемента на поверхности Земли. Однако повышенное содержание серы в промышленных и бытовых отходах создает опасность для жизни на обширных территориях. Массированный выброс диоксида серы в атмосферу порождает кислотные дожди, которые могут выпадать далеко за пределами промышленных районов. Загрязнение природных вод растворимыми соединениями серы несет угрозу живым организмам внутренних водоемов и прибрежных областей морей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение биосферы.
2. Каков вклад В.И. Вернадского в развитие учения о биосфере?
3. Что представляет собой ноосфера? Дайте определение.
4. Дайте общую характеристику химического состава живых организмов.
5. Раскройте суть большого геологического и малого биологического круговоротов элементов в биосфере.
6. Перечислите основные виды миграции химических веществ в биосфере.
7. Какие факторы миграции химических элементов в биосфере вы знаете?
8. Дайте определение техногенеза и техносферы.
9. Что представляют собой геохимические барьеры на пути миграции элементов?
10. Дайте краткую характеристику круговорота углерода и кислорода в биосфере.
11. Охарактеризуйте циклы азота и водорода в биосфере.
12. Опишите круговороты фосфора и серы в биосфере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 5

1. Алексеенко В.А. Экологическая геохимия: учебник. – М.: Логос, 2000. – 627 с.
2. Введение в химическую экологию. Ч. I. Химия окружающей среды: учебное пособие / О.Н. Хохлова. – Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета, 2008. – 67 с.
3. Вернадский В.И. Биосфера. – Ленинград: Научное химико-техническое издательство, 1926.
4. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. – М.: Изд-во «Айрис-пресс», 2004. – 576 с.
5. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. – М.: АН СССР, 1957. – 234 с.
6. Воронова Г.А., Юрмазова Т.А. Химические элементы в биосфере: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 94 с.
7. Гусакова Н.В. Химия окружающей среды. Сер. Высшее образование. – Ростов-на-Дону: Изд-во «Феникс», 2004. – 192 с.
8. Добровольский В.В. География микроэлементов: глобальное рассеяние. – М.: Мысль, 1983. – 272 с.

9. Еремченко О.З. Учение о биосфере. Организованность биосферы и биогеохимические циклы: учебное пособие. – Пермь: Изд-во Пермского государственного университета, 2010. – 104 с.
10. Зиллов Е.А. Химия окружающей среды: учебное пособие. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2006. – 148 с.
11. Карпачевский Л.О. Экологическое почвоведение. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 184 с.
12. Ковда В.А. Биогеохимия почвенного покрова. – М.: Наука, 1985. – С. 223-229.
13. Коровин Н.В. Общая химия: учеб. для студ. учреждений высш. проф. образования / Н.В. Коровин. – 14-е изд., перераб. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 496 с.
14. Мачулина Н.Ю. Геохимия окружающей среды: учебное пособие. – Ухта: УГТУ, 2015. – 154 с.
15. Перельман А.И. Геоология и география. XII серия – Геохимия и ландшафты. – И.: Знание, 1961. – 48 с.
16. Перельман А.И. Геохимия. – М.: Высшая Школа, 1979. – 423 с.
17. Перельман А.И. Геохимия. – М.: Высшая школа, 1989. – 528 с.
18. Ресурсосбережение. Термины и определения. ГОСТ Р 52104-2003 (утв. Постановлением Госстандарта России от 03.07.2003 № 235).
19. Сауков А.А. Геохимия. – М.: Государственное издательство геологической литературы, 1951. – 383 с.
20. Степин Б.Д., Цветков А.А. Неорганическая химия. – М.: Высшая школа, 1994. – 612 с.
21. Тинсли И. Поведение химических загрязнителей в окружающей среде. – М.: Мир, 1982. – 280 с.
22. Ферсман А.Е. Избранные труды. – М.: Изд-во АН СССР, 1953-1959. – Т. 1-5.
23. Федорова А.И., Никольская А.Н. Практикум по экологии и охране окружающей среды. – М.: Мир, 2001. – 288 с.
24. Химия окружающей среды: учебное пособие / С.Л. Белопухов, Н.К. Сюняев, М.В. Тютюнькова. – М.: Изд-во «Проспект», 2016. – 240 с.
25. URL: <http://www.grandars.ru/shkola/geografiya/krugovorot-veshchestv-v-biosfere.html>



URL: <https://pixabay.com/ru/>

Глава 6. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ



В любой экосистеме живые организмы, в том числе и человек, и окружающая их внешняя среда находятся в тесной взаимосвязи. Связь эта создается и поддерживается постоянно действующими потоками вещества и энергии, поддержание стабильности которых – основа существования живых организмов. Нарушение же потоков веществ под влиянием постоянно усиливающейся хозяйственной деятельности человека ведет к постепенной деградации отдельных экосистем и биосферы в целом.

Загрязнение относится к числу наиболее опасных видов деградации биосферы. В настоящее время существует множество определений, что такое загрязнение окружающей среды. Ниже приведены некоторые из них:

❖ «**Загрязнение** – все то, что не в том месте, не в то время и не в том количестве, какое естественно для природы, что выводит ее системы из состояния равновесия, отличается от обычно наблюдаемой нормы и (или) желательного для человека» (Н.Ф. Реймерс) [26].

❖ **Загрязнение окружающей среды** – это привнесение в окружающую среду или возникновение в ней новых, обычно нехарактерных физических, химических или биологических агентов, или превышение их естественного среднесуточного уровня в различных компонентах, приводящее к негативным воздействиям (Экологическая энциклопедия) [5; 32; 33].

❖ **Загрязнение окружающей среды** – это неблагоприятное изменение окружающей среды, которое целиком или частично является результатом человеческой деятельности, прямо или косвенно меняет распределение приходящей энергии, уровни радиации, физико-химические свойства окружающей среды и условия существования живых существ (Ф. Рамад) [25; 30].

Загрязнение окружающей среды подразделяют на *природное*, вызванное какими-то естественными причинами: извержение вулканов, разломы земной коры, стихийные пожары, пыльные бури и т. д., и *антропогенное*, возникающее в связи с хозяйственной деятельностью человека.

6.1. Виды загрязнений окружающей среды

В настоящее время существует множество классификаций загрязнений окружающей среды:

- по объектам: загрязнение вод (поверхностных и подземных), атмосферы, почвенного покрова и т. п.;
- по масштабам: локальное, региональное, глобальное;
- по характеру воздействия на объекты окружающей среды и по природе действующих факторов: механическое, физическое, химическое, биологическое.

➤ **Механическое** – загрязнение материалами, оказывающими механическое воздействие без химических изменений (например, свалки мусора, поступление пыли в атмосферу и др.).

➤ **Физическое** – это тепловое, световое, шумовое, вибрационное, электромагнитное и радиоактивное загрязнения. *Тепловое загрязнение* – изменение температуры среды в связи с выбросами нагретых или охлажденных газов, воздуха, воды в окружающую

среду. *Световое загрязнение* – нарушение естественной освещенности среды. *Шумовое загрязнение* – увеличение интенсивности и повторяемости шума сверх природного уровня. *Вибрационное загрязнение* возникает в результате работы разных видов транспорта, вибрационного оборудования. *Электромагнитное загрязнение* – изменение электромагнитных свойств окружающей среды. Источниками электромагнитного загрязнения являются линии электропередач, радио и телецентры, радиолокаторы. *Радиоактивное загрязнение* – превышение природного радиоактивного уровня среды. Источниками радиоактивного загрязнения окружающей среды являются ядерные взрывы, захоронение радиоактивных отходов, аварии на атомных станциях и др.

➤ ***Химическое загрязнение*** – изменение естественных химических свойств окружающей среды в результате выбросов промышленными предприятиями, транспортом, сельским хозяйством различных загрязняющих веществ (тяжелых металлов, пестицидов, диоксинов и др.).

➤ ***Биологическое загрязнение*** включает в себя бактериальное и органическое. *Бактериальное загрязнение* – привнесение в среду болезнетворных микроорганизмов, способствующих распространению различных заболеваний. *Органическое загрязнение* – загрязнение экосистем веществами, способными к брожению, гниению: отходами пищевых, целлюлозно-бумажных производств, не очищенными канализационными сточными водами. К биологическому загрязнению можно отнести *переселение животных* в новые экосистемы, где отсутствуют их естественные враги. Такое переселение может привести к взрывообразному росту численности переселенных животных и иметь непредсказуемые последствия.

6.2. Основные виды химических загрязняющих веществ

В настоящее время в мире производится около 80 тыс. видов химических веществ, каждый год на рынок поступает более тысячи новых. При этом значительная их часть после использования бесконтрольно попадает в окружающую среду, постепенно изменяя состав компонентов биосферы [10].

Загрязняющие вещества можно классифицировать по различным признакам:

✓ химическая природа вещества (органические, минеральные или органоминеральные; естественного или искусственного происхождения);

✓ фазовое состояние;

✓ источники поступления в окружающую среду;

✓ характер воздействия на компоненты биосферы;

✓ токсичность для живых организмов;

✓ технофильность и др.

Технофильность – показатель использования вещества человеком в хозяйственной деятельности (данный термин предложен А.И. Перельманом). Коэффициент технофильности химического элемента определяется как отношение средней ежегодной мировой добычи элемента (в тоннах) к кларку этого элемента в литосфере.

Таблица 6.1

Коэффициенты технофильности различных химических элементов [17]

Элемент	Коэффициент технофильности	Элемент	Коэффициент технофильности
C (уголь, нефть)	10^{11}	I, W, U, Ni, F, Ba, Mn, Fe, P	10^8
Bi, Hg, Sb, Pb, Cu, Cl	10^{10}	Pt, Na, K, B, Co, Zr	10^7
Ca, Se, Ag, As, Mo, Sn, Cr, Zn, S	10^9	Ai, Mg, Ge, Be, Li, V, Sr	10^6

Коэффициент технофильности не является постоянной величиной. Чем интенсивнее элемент используется человеком в хозяйственной деятельности, тем выше значение этого показателя (табл. 6.1). Максимальный уровень технофильности характерен для углерода, основного компонента органических веществ, составляющих основу различных видов топлива. Так, масштабы ежегодной добычи угля и нефти составляют миллиарды тонн. Высоко потребление хлорида натрия, который используется как в производственных целях, так и с пищей.

Особую группу веществ в биосфере составляют **ксенобиотики** – вещества, несвойственные природе. Среди них есть вещества, близкие к природным, а также вещества, не имеющие аналогов в природе.

При этом действие загрязнителей на живые организмы и экосистемы различно. Некоторые из них токсичны и оказывают прямое действие на метаболизм организма, отравляя его. Их называют **токсикантами** или ядовитыми веществами. Более распространено не прямое действие загрязняющих веществ на организмы – через неблагоприятное изменение среды обитания. Необходимо отметить, что большинство загрязнителей обладает избирательной токсичностью, то есть они токсичны только для определенных видов организмов. Так, в условиях загрязнения экосистем может происходить угнетение и удаление одних видов (наиболее чувствительных), что создает более благоприятные условия для существования других за счет появления новых мест обитания и источников пищи, а также за счет исчезновения конкурентов или хищников. То есть в экосистемах происходят некоторые экологические сдвиги. Однако при высокой степени загрязнения происходит частичная или полная деградация экосистем.

Воздействие загрязняющих веществ на живые организмы может иметь мутагенный, канцерогенный и тератогенный характер.

Генетически активные вещества, вызывающие изменения (мутации) наследственной информации подвергающихся их действию организмов, называют **мутагенами**.

Канцерогены – вещества, стимулирующие рост злокачественных новообразований (раковых опухолей) у подверженных их воздействию организмов.

Тератогены – вещества, способные нарушать нормальное развитие эмбрионов многоклеточных организмов, вызывая появление измененных дефектных особей [24].

По степени воздействия на человека все вещества биосферы можно объединить в четыре группы [31]:

- безвредные вещества;
- вещества, действующие опосредованно, делая среду обитания менее комфортной;
- вещества, прямо действующие на человека, отравляя его;
- вещества неопределенного характера действия, так как отсутствуют достоверные сведения об их действии.

6.3. Нормирование содержания химических веществ в природных средах

Под качеством окружающей природной среды понимается степень соответствия природных условий потребностям людей или других живых организмов. В более широком смысле качество природной среды не ограничивается только степенью соответствия природных условий потребностям популяций, поскольку изменение качества одного элемента природной среды неизбежно нарушает природное равновесие и влечет за собой изменения других элементов биосферы. Для оценки состояния окружающей среды разработаны *стандарты ее качества*, которые подразделяются на *экологические* и *производственно-хозяйственные*. Экологические стандарты устанавливают предельно допустимые нормы антропогенного воздействия на окружающую среду, превышение которых несет опасность здоровью человека, губительно для растительности и животных. Производственно-хозяйственные стандарты качества окружающей среды регламентируют экологически безопасный режим работы производственного, коммунально-бытового и других объектов.

Нормирование качества окружающей среды является важной задачей в обеспечении экологической безопасности и представляет собой установление предельно допустимых уровней антропогенного воздействия на экосистему, обеспечивающих состояние окружающей среды, безопасное для живых организмов и их будущих поколений. При этом практическое применение находят два вида нормативов: показатели содержания химических веществ в объектах окружающей среды и показатели содержания этих веществ в выбросах, поступающих в окружающую среду.

Оценка качества окружающей среды проводится дифференцированно по ряду направлений, по которым анализируется качество воздушного бассейна, водной среды, почвенного слоя, продуктов питания и т.д.

Современная система регулирования антропогенных нагрузок на окружающую природную среду и обеспечения безопасности среды для человека основывается на нормировании уровней концентраций загрязняющих веществ с использованием стандартов допустимых концентраций:

- предельно допустимых концентраций (ПДК);
- ориентировочно допустимых количеств (ОДК);

- ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ);
- максимально допустимых уровней (МДУ);
- ориентировочно допустимых уровней (ОДУ);
- допустимых остаточных количеств (ДОК);
- предельно допустимых выбросов (ПДВ)
- предельно допустимых сбросов (ПДС) и др.

В нашей стране наиболее распространенной для характеристики загрязненности окружающей природной среды является система ПДК загрязняющих веществ.

***Предельно допустимые концентрации веществ (ПДК)** – максимальные концентрации, при которых вещества не оказывают прямого или опосредованного влияния на состояние здоровья человека (при воздействии на организм в течение всей жизни) и не ухудшают санитарно-гигиенические условия жизни населения.*

Основные принципы санитарно-гигиенической регламентации (нормирования) химических веществ, разработанные А.Н. Сысиным и С.Н. Черкинским в 1949 г., заключаются в следующих положениях:

- Принцип опережения токсикологических исследований по сравнению с внедрением в народное хозяйство.
- Приоритет медицинских и биологических показателей в установлении нормативов по сравнению с другими требованиями (например, экономическими).
- Концепция пороговости воздействия. Порогом воздействия называют величину концентрации химического вещества, которая вызывает переход из одного качественного состояния биологического объекта в другое. При этом концепция пороговости вызывает ряд возражений у специалистов и продолжает обсуждаться и в настоящее время.

Нормативные материалы по опасным химическим веществам, помимо ПДК, включают также классификацию в зависимости от их различных характеристик: токсичности, канцерогенности, мутагенности и др. В различных сферах природопользования используют классы опасности, в которых учтены особенности влияния и поведения химических веществ в соответствующих средах. При этом нормативы токсических веществ легче установить для гомогенных сред (воды, воздуха) и значительно сложнее для гетерогенных, в частности для почв.

В Российской Федерации в 2014 г. вышел Федеральный закон № 219-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон “Об

охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации»» [11; 12].

Цель закона – выведение природоохранной деятельности Российской Федерации на новый эффективный и сочетаемый с мировой практикой уровень государственного управления. В Федеральном законе № 219-ФЗ [12] указано, что «загрязняющие вещества, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды, определяются:

- с учетом уровня токсичности, канцерогенных и (или) мутагенных свойств химических и иных веществ, в том числе имеющих тенденцию к накоплению в окружающей среде, а также их способности к преобразованию в окружающей среде в соединения, обладающие большей токсичностью;

- с учетом данных государственного экологического мониторинга и социально-гигиенического мониторинга;

- при наличии методик (методов) измерения загрязняющих веществ».

В развитие данного положения Федерального закона [12] распоряжением Правительства Российской Федерации от 08.07.2015 г. № 1316-р утвержден «Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды» (далее Перечень), состоящий из трех разделов [13]: I – для атмосферного воздуха; II – для водных объектов; III – для почв.

6.3.1. Нормирование содержания химических веществ в воде

Для установления ПДК вещества в воде используют следующие показатели вредности:

- ❖ для хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования – три показателя: органолептического, общесанитарного и санитарно-токсикологического;

- ❖ для рыбохозяйственного водопользования – пять показателей: органолептического, общесанитарного и санитарно-токсикологического, токсикологического и рыбохозяйственного.

Органолептический показатель вредности показывает способность вещества изменять органолептические свойства воды (цвет, запах, привкус и т.д.).

Общесанитарный показатель вредности определяет влияние вещества на процессы естественного самоочищения вод за

счет биохимических и химических реакций с участием естественной микрофлоры. Общесанитарные показатели устанавливаются в виде нормативов для относительно малотоксичных и нетоксичных соединений.

Санитарно-токсикологический показатель вредности характеризует вредное воздействие на организм человека, а *токсикологический* – показывает токсичность вещества для живых организмов, населяющих водный объект.

Рыбохозяйственный показатель определяет «порчу качеств» промысловых рыб.

Наименьшее значение из предельно допустимых концентраций определенного вещества, установленных по трем показателям вредности, принимается за ПДК данного вещества в воде с указанием лимитирующего показателя вредности.

В рыбохозяйственном водопользовании выделено четыре класса опасности загрязняющих воду веществ:

- 1) чрезвычайно опасные;
- 2) высокоопасные;
- 3) опасные;
- 4) умеренно опасные.

К *первому классу опасности* отнесены вещества, лимитируемые по токсикологическому и рыбохозяйственному показателям вредности (накопление в рыбе и промысловых гидробионтах, опасное для человека и домашних животных). Представлен исключительно ксенобиотиками. ПДК ниже 0,00001 мг/л, высокая или сверхвысокая материальная кумуляция (отношение концентраций вещества в организме и в воде 200-1000 и более), стабильность вещества и вредных продуктов его распада более 180 сут. при 20 °С. Отнесение к классу опасности проводится по любому из указанных признаков, одному или нескольким.

К *второму классу опасности* отнесены вещества со свойствами, указанными для 1-го класса. Представлен исключительно ксенобиотиками. ПДК от 0,0001 до 0,00001 мг/л. К данному классу относят вещества с умеренной кумуляцией (отношение концентраций вещества в организме и в воде 51-200), в отдельных случаях – со слабой. Стабильность веществ и метаболитов – 60-80 суток при 20 °С.

К *третьему классу опасности* отнесены вещества с ПДК 0,01-0,0001 мг/л. Могут быть как ксенобиотиками, так и веществами природного происхождения. К данному классу относятся также

вещества со слабой материальной кумуляцией (отношение концентраций вещества в организме и в воде 1,1-50). Стабильность менее 60 суток при 20 °С.

К четвертому классу опасности относятся загрязняющие вещества, ПДК которых выше 0,01 мг/л, не обладающие кумулятивными свойствами, лимитируемые по любому показателю вредности. Представлены в основном веществами природного происхождения, частично – ксенобиотиками. Стабильность менее 10 суток при 20 °С.

В целях обеспечения нормативов качества воды для каждого выпуска сточных вод и для каждого загрязняющего вещества устанавливают **предельно допустимый сброс (ПДС)**, представляющий собой массу загрязняющих веществ, максимально допустимую к отведению с установленным режимом в данном пункте водного объекта в единицу времени.

Таблица 6.2

Предельно допустимые концентрации элементов в воде источников водоснабжения хозяйственно-питьевого назначения [22]

Элемент	Лимитирующий показатель вредности	ПДК, мг/л
Нефтепродукты, суммарно		0,1
Алюминий (Al^{3+})	Санитарно-токсикологический	0,5
Барий (Ba^{2+})	« »	0,1
Бериллий (Be^{2+})	« »	0,0002
Бор (суммарно)	« »	0,5
Железо (суммарно)	Органолептический	0,3 (1,0)
Кадмий (суммарно)	Санитарно-токсикологический	0,001
Марганец (суммарно)	Органолептический	0,1 (0,5)
Медь (суммарно)	Органолептический	1
Молибден (суммарно)	Санитарно-токсикологический	0,25
Мышьяк (суммарно)	« »	0,05
Никель (суммарно)	« »	0,1
Ртуть (суммарно)	« »	0,0005
Свинец (суммарно)	« »	0,03
Селен (суммарно)	« »	0,01
Стронций (Sr^{2+})	« »	7
Хром (Cr^{6+})	Санитарно-токсикологический	0,05
Цинк (Zn^{2+})	Органолептический	5,0

Санитарные документы для оценки качества воды:

– ГОСТ 2761-84 «Источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. Гигиенические и технические требования и правила выбора»;

– Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.1315-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования» [22] – табл. 6.2;

– СанПиН 2.1.4.1175-02 «Требования к качеству воды нецентрализованного водоснабжения. Санитарная охрана источников» [29];

– СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества» [18] – табл. 6.3 и 6.4;

– СанПиН 2.1.4.1116-02 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды, расфасованной в емкости. Контроль качества».

Таблица 6.3

Гигиенические нормативы содержания ряда вредных веществ в питьевой воде [18]

Наименование вещества	Величина норматива, мг/л	Показатель вредности	Класс опасности
1	2	3	4
НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА			
<i>Элементы, катионы</i>			
Таллий	0,0001	Санитарно-токсикологический	2
Ниобий	0,01	« »	2
Теллур	0,01	« »	2
Самарий	0,024	« »	2
Литий	0,03	« »	2
Сурьма	0,05	« »	2
Вольфрам	0,05	« »	2
Серебро	0,05	« »	2
Ванадий	0,1	« »	2
Висмут	0,1	« »	2
Кобальт	0,1	« »	2
Рубидий	0,1	« »	2
Европий	0,3	Органолептический (привкус)	4
Хром (+3)	0,5	Санитарно-токсикологический	3
Кремний	10,0	« »	2
Натрий	200,0	« »	2

1	2	3	4
Анионы			
Роданид-ион	0,1	Санитарно-токсикологический	2
Хлорит-ион	0,2	« »	3
Бромид-ион	0,2	« »	2
Персульфат-ион	0,5	« »	2
Гексанитрокобальт-ион	1,0	« »	2
Ферроцианид-ион	1,25	« »	2
Гидросульфид-ион	3,0	« »	2
Нитрит-ион	3,0	Органолептический	2
Терхлорат-ион	5,0	Санитарно-токсикологический	2
Хлорат-ион	20,0	Органолептический (привкус)	3
Сероводород	0,003	Органолептический (запах)	4
Перекись водорода	0,1	Санитарно-токсикологический	2
ОРГАНИЧЕСКИЕ ВЕЩЕСТВА			
Изопрен	0,005	Органолептический (запах)	4
Бутадиен-1,3	0,05	« »	4
Бутилен	0,2	« »	3
Этилен	0,5	« »	3
Пропилен	0,5	« »	3
Изобутилен	0,5	« »	3
Циклогексен	0,02	« »	2
Циклогексан	0,1	Санитарно-токсикологический	2
Бензол	0,01	« »	2
Этилбензол	0,01	Органолептический (привкус)	4
Ксилол	0,05	Органолептический (запах)	3
Стирол	0,1	« »	3
Толуол	0,5	« »	4
Бенз(а)пирен	0,000-005	Санитарно-токсикологический	1
Дифенил	0,001	« »	2
Алкилдифенил	0,4	Органолептический (пленка)	3
Нафталин	0,01	Органолептический (запах)	4
Хлорциклогексан	0,05	« »	3
Спирт гептиловый нормальный	0,005	Санитарно-токсикологический	2
Спирт бутиловый нормальный	0,1	« »	2
Спирт метиловый	3,0	« »	2
Фенол	0,001	Органолептический (запах)	4
Хлорфенол	0,001	« »	4
альфа-Нафтол	0,1	« »	3
Диэтиловый эфир	0,3	Органолептический (привкус)	4
Диметиловый эфир	5,0	Санитарно-токсикологический	4
Глицерин	0,06 <1>	Органолептический (пена)	4
Этиленгликоль	1,0	Санитарно-токсикологический	3
Анилин	0,1	« »	2

Нормативы радиационной безопасности питьевой воды [18]

Показатели	Единицы измерения	Нормативы	Показатель вредности
Общая α -радиоактивность	Бк/л	0,1	радиаци.
Общая β -радиоактивность	Бк/л	1,0	радиаци.

6.3.2. Нормирование содержания химических веществ в воздухе

В соответствии с Гигиеническими требованиями к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест (СанПиН 2.1.6.1032-01) [3] основой регулирования качества атмосферного воздуха населенных мест являются гигиенические нормативы – *предельно допустимые концентрации (ПДК)* атмосферных загрязнений химических и биологических веществ, соблюдение которых обеспечивает отсутствие прямого и косвенного влияния на здоровье населения и условия его проживания.

Для отдельных веществ допускается *использование ориентировочных безопасных уровней воздействия (ОБУВ)*, для которых устанавливаются сроки их действия.

Для воздушной среды различают ПДК для атмосферного воздуха (ПДК_{мр} и ПДК_{сс}) и для рабочей зоны (ПДК_{рз}).

Предотвращение появления запахов, раздражающего действия и рефлекторных реакций у населения, а также острого влияния атмосферных загрязнений на здоровье в период кратковременных подъемов концентраций обеспечивается соблюдением **максимальных разовых ПДК (ПДК_{мр})**.

Предотвращение неблагоприятного влияния на здоровье населения при длительном поступлении атмосферных загрязнений в организм обеспечивается соблюдением **среднесуточных ПДК (ПДК_{сс})**.

ПДК рабочей зоны (ПДК_{рз}) – это предельная концентрация загрязняющего вещества, которая при ежедневной (кроме выходных дней) работе в течение рабочей смены в период всего рабочего стажа не должна вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследования в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующего поколений.

Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации № 25 от 13 февраля 2018 года утвер-

ждены гигиенические нормативы ГН 2.2.5.3532-18 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны» (табл. 6.5).

Таблица 6.5

Предельно допустимые концентрации (ПДК) ряда вредных веществ в воздухе рабочей зоны [23]

Наименование вещества	Формула	ПДК, мг/м ³	Класс опасности
Аверсектин-С (авермектины, смесь)		0,05	1
Азота диоксид (двуокись азота)	NO ₂	2	3
Азота оксиды / в пересчете на NO ₂ / (окислы азота)		5	3
Азотная кислота	HNO ₃	2	3
Алсумин		0,1	2
Аммиак	NH ₃	20	4
Ацетат калия (калий уксуснокислый)	C ₂ H ₃ KO ₂	5	3
Ацетат натрия (натрий уксуснокислый)	C ₂ H ₃ NaO ₂	10	4
Бенз(а)пирен (3,4-бензпирен)	C ₂₀ H ₁₂	-/0,00015	1
Бензин (растворитель, топливный)		300/100	4
Бензоат натрия (бензойной кислоты натриевая соль)	C ₇ H ₅ NaO ₂	5	3
Бензол+	C ₆ H ₆	15/5	2
Бериллий и его соединения / в пересчете на бериллий		0,003/0,001	1
Бор аморфный и кристаллический	B	5/2	2
Бром+	Br ₂	0,5	2
Бутан	C ₄ H ₁₀	900/300	4
Ванадий и его соединения: Диванадий пентоксид, дым; Диванадий пентоксид, пыль; Феррованадий	O ₅ V ₂ O ₅ V ₂	0,1 0,5 1	1 2 2
Висмут и его неорганические соединения	Bi	0,5	2
Вольфрам	W	-/6	4
Диборан	B ₂ H ₆	0,1	1
О,О-Диметил (1-гидрокси-2,2,2-трихлорэтил фосфонат+ (Хлорофос)	C ₄ H ₈ Cl ₃ O ₄ P	0,5	2
Диэтилртуть	C ₄ H ₁₀ Hg	0,005	1
Диэтилтеллур	C ₄ H ₁₀ Te	0,0005	1
Дрожжи кормовые сухие, выращенные на послеспиртовой барде		0,3	2
Железо	Fe	-/10	4
Зола		-/4	3
Известняк (кальцит)	CaCO ₃	-/6	4
Йод+	I ₂	1	2

Наименование вещества	Формула	ПДК, мг/м ³	Класс опасности
Кадмий и его неорганические соединения		0,05/0,01	1
Кобальт и его неорганические соединения+		0,05/0,01	1
Литий и его растворимые неорганические соединения /по литию/		0,02	1
Медь	Cu	1/0,5	2
Метан	CH ₄	7000	4
Метилбензол (толуол)	C ₇ H ₈	150/50	3
Мышьяк, неорганические соединения (мышьяк более 40 %) /по мышьяку/		0,04/0,01	1
Мышьяк, неорганические соединения (мышьяк до 40 %) /по мышьяку/		0,04/0,01	2
Нафталин	C ₁₀ H ₈	20	4
Нефть сырая+		-/10	3
Никель, никель оксиды, сульфиды и смеси соединений никеля (файнштейн, никелевый концентрат и агломерат, оборотная пыль очистных устройств) /по никелю/		0,05	1
Нитробензол+	C ₆ H ₅ NO ₂	6/3	2
Озон	O ₃	0,1	1
Пирен+	C ₁₆ H ₁₀	0,03	1
Пыль доменного шлака		-/6	4
Свинец и его неорганические соединения /по свинцу/		-/0,05	1
Сера	S	-/6	4
Сера диоксид+ (сернистый ангидрид; сернистый газ)	SO ₂	10	3
Серебро	Ag	1	2
Табак		3	3
Таллий бромид /по таллию/ (таллий бромистый)	BrTl	0,01	1
Теллур	Te	0,01	1
Титан	Ti	-/10	4
Трихлорметан+ (хлороформ)	CHCl ₃	10/5	2
Углерода оксид (угарный газ, углерода окись)	CO	20	4
Углерода диоксид (углекислый газ, двуокись углерода)	CO ₂	27000/9000	4

Наименование вещества	Формула	ПДК, мг/м ³	Класс опасности
Уран, нерастворимые соединения		0,075	1
Уран, растворимые соединения		0,015	1
Фенолформальдегидные смолы (летучие продукты):			
а) контроль по фенолу;		1	2
б) контроль по формальдегиду		0,05	2
Фосфор (желтый, белый)	P	0,1/0,03	1
Хлор+	Cl ₂	1	2
Хлорбензол+	C ₆ H ₅ Cl	100/50	3
Цинк оксид	ZnO	1,5/0,5	2
Чай		3	3
Этанол (этиловый спирт)	C ₂ H ₆ O	2000/1000	4
Этилбензол	C ₈ H ₁₀	150/50	4

Примечания:

1. Одно значение гигиенического норматива, приведенное в графе 3, соответствует максимальной разовой предельно допустимой концентрации вещества в воздухе рабочей зоны (ПДК_{м.р.}); если приведено два значения гигиенических норматива, то это означает, что в числителе стоит значение максимальной разовой предельно допустимой концентрации (ПДК_{м.р.}), а в знаменателе – среднесменной предельно допустимой концентрации (ПДК_{с.с.}).

2. «+» – вещества, при работе с которыми требуется специальная защита кожи и глаз.

В жилой зоне и на других территориях проживания должны соблюдаться ПДК, а в местах массового отдыха населения, на территориях размещения лечебно-профилактических учреждений длительного пребывания больных и центров реабилитации – 0,8 ПДК.

Предельно допустимый выброс (ПДВ) – это количество загрязняющих веществ в единицу времени (г/с; т/год), которое не разрешается превышать при выбросе в атмосферу. ПДВ устанавливают для каждого источника загрязнения. В результате суммирования ПДВ отдельных источников выбросов устанавливают ПДВ для предприятия в целом.

В табл. 6.6 приведены значения ПДК (ПДК_{рз}; ПДК_{мр} и ПДК_{сс}) ряда химических веществ в воздухе.

Таблица 6.6

**Контролируемые показатели некоторых химических веществ
(металлов и их соединений) в воздухе, мг/м³ [27, 28]**

Химическое вещество	Нормируемые показатели		
	ПДК _{рз}	ПДК _{мр}	ПДК _{сс}
Алюминий	2	-	-
Бериллий	0,001	-	-
Бор	6	-	-
Ванадий	3	-	-
Ванадия оксид (в пересчете на V)	-	-	0,002
Вольфрам	6	-	-
Вольфрамат натрия (в пересчете на W)	-	-	0,1
Германий	2	-	-
Германия диоксид (в пересчете на Ge)	-	-	0,04
Кадмий	0,05	-	-
Кадмия оксид (в пересчете на Cd)	-	-	0,0003
Кобальт	0,5	-	0,001
Кобальта сульфат	-	0,001	0,0004
Марганец и его оксиды (на MnO ₂)	0,3	0,01	0,001
Медь	1,0	-	-
Меди оксид (в пересчете на Cu)	-	-	0,002
Меди сульфат (в пересчете на Cu)	-	0,003	0,001
Модибден	4	-	-
Мышьяк	0,04	-	0,003
Никель	0,05	-	0,001
Олова оксиды (в пересчете на Sn)	-	-	0,02
Ртуть	0,01	-	0,0003
Свинец	0,01	-	0,0003
Селен	2	-	-
Селена диоксид (в пересчете на Se)	-	0,0001	0,00005
Серебро	1	-	-
Сурьма	0,5	-	-
Сурьмы оксид (III) (в пересчете на Sb)	-	-	0,02
Теллур	0,01	-	-
Теллура диоксид (в пересчете на Te)	-	-	0,0005
Титан	10	-	-
Торий	0,05	-	-
Уран	0,075	-	-
Хром (+6)	0,01	0,0015	0,0015
Цирконий	6	-	-

Примечание: ПДК_{рз} – предельно допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны; ПДК_{мр} – предельно допустимая максимально-разовая концентрация в атмосферном воздухе населенных мест; ПДК_{сс} – предельно допустимая среднесуточная концентрация в атмосферном воздухе населенных мест.

6.3.3. Нормирование содержания химических веществ в почве

При проведении контроля загрязнения почв химические вещества в соответствии с ГОСТ 17.4.1.02-83 [16] подразделяют на 3 класса опасности:

- 1) высокоопасные;
- 2) умеренно опасные;
- 3) малоопасные.

Класс опасности устанавливают не менее чем по трем показателям из перечня, приведенного в табл. 6.7.

Таблица 6.7

Показатели определения класса опасности химических веществ [16]

Показатель	Нормы для классов опасности		
	1-го	2-го	3-го
Токсичность, ЛД ₅₀	До 200	От 200 до 1000	Свыше 1000
Персистентность в почве, мес.	Св. 12	От 6 до 12	Менее 6
ПДК в почве, мг/кг	Менее 0,2	От 0,2 до 0,5	Св. 0,5
Миграция	Мигрирует	Слабо мигрирует	Не мигрирует
Персистентность в растениях, мес.	3 и более	От 1 до 3	Менее 1
Влияние на пищевую ценность сельскохозяйственной продукции	Сильное	Умеренное	Нет

Таблица 6.8

Классы опасности некоторых химических веществ [16]

Класс опасности	Химическое вещество
1	мышьяк, кадмий, ртуть, селен, свинец, цинк, фтор, бенз(а)пирен; пестициды: атразин, гексахлорбутадиен, гранозан, ГХЦГ, гептахлор, ДНОК, ДДТ, карбатион, метафос, ПХК, ПХП, севин, тордон, тиодан, ТМТД
2	бор, кобальт, никель, молибден, медь, сурьма, хром; пестициды: агелон (атразин+прометрин), 2,4-Д, далапон, карбофос, купрозан, кельтан, нитрафен, пропанид, симазин, трефлан, хлорофос, ялан, рогор
3	барий, ванадий, вольфрам, марганец, стронций, ацетофенон; пестициды: банвел Д, дактал, дилор, мильбекс, полидим, поликарбацин, прометрин, трихлорацетат натрия, тедион, цинеб, эрадикан

Важнейшим является **показатель токсичности** $ЛД_{50}$. Он показывает среднюю смертельную дозу препарата в миллиграммах действующего вещества на 1 кг живого веса, вызывающую гибель 50 % подопытных животных.

Персистентность химического вещества в биосфере – это его устойчивость к разложению и трансформации, способность противостоять разлагающему действию физических, химических и биологических (биохимических и микробиологических) процессов в объектах окружающей среды.

В табл. 6.8 приведена классификация химических веществ антропогенного происхождения по степени опасности для контроля загрязнения и прогноза состояния почв.

Для обоснования предельно допустимого уровня загрязнения почв необходимы основные показатели количества и качества биологической продукции; транслокационный показатель вредности, характеризующий переход загрязняющего вещества из почвы в растения; миграционные (водный, воздушный), характеризующие переход токсиканта в воды и воздушную среду; общесанитарный показатель, по которому можно судить о влиянии загрязняющего вещества на самоочищающую способность почвы и почвенный микробиоценоз; токсикологический, обуславливающий поступление токсиканта в организм человека. По результатам экспериментальных, как правило полевых, исследований устанавливают пороговые концентрации по всем показателям вредности, а затем определяют самый чувствительный, лимитирующий показатель, и по нему – предельно допустимый уровень загрязнения почв.

Предельно допустимая концентрация химического вещества в почве – это такое максимальное количество вещества, которое гарантирует отсутствие отрицательного прямого или опосредованного, через контактирующие с почвой среды, воздействия на здоровье человека, его потомство и санитарные условия жизни. Это такая концентрация вещества, которая при длительном воздействии на почву и произрастающие на ней растения не вызывает каких-либо патологических изменений или аномалий в ходе биологических процессов и не приводит к накоплению токсичных элементов в сельскохозяйственных культурах и, следовательно, не может нарушить биологический оптимум.

Под пороговой концентрацией загрязняющего вещества в почве по **токсикологическому показателю вредности** понимают такое его максимальное количество, при котором поступление

этого вещества в организм человека при непосредственном контакте с почвой, а также по одному или нескольким путям миграции не оказывает прямого или отдаленного действия на здоровье человека.

Под пороговой концентрацией загрязняющего вещества в почве по *миграционно-воздушному показателю вредности* понимают такое его максимальное количество, при котором среднесуточное поступление вещества из почвы в атмосферный воздух не приводит к превышению установленной для него среднесуточной ПДК в атмосферном воздухе.

Под пороговой концентрацией загрязняющего вещества в почве по *миграционно-водному показателю вредности* понимают такое его максимальное количество, при котором поступление вещества из почвы в грунтовые воды и открытые водоемы с поверхностным стоком не создает концентраций, превышающих ПДК для воды водоемов.

Под пороговой концентрацией загрязняющего вещества в почве по *транслокационному показателю вредности* понимают такое его максимальное количество, при котором накопление этого вещества фитомассой товарных частей к моменту сбора урожая не превышает установленных для продуктов питания допустимых уровней.

Под пороговой концентрацией загрязняющего вещества в почве по *общесанитарному показателю вредности* понимают такое его максимальное количество, которое на 5-7-е сутки вызывает как изменение общей численности почвенных микроорганизмов, так и численности микроорганизмов основных физиологических групп не более чем на 50 %.

В табл. 6.9-6.11 представлены перечни предельно допустимых концентраций (ПДК) неорганических и органических химических веществ в почвах, а также перечень ориентировочно-допустимых концентраций (ОДК) пестицидов в почвах в соответствии с «МУ 2.1.7.730-99. Гигиенические требования к качеству почвы населенных мест» и «Порядком определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами // Письмо Минприроды от 27 декабря 1993 года № 04-25/61-5678» [2; 19].

Таблица 6.9

Предельно допустимые концентрации (ПДК) неорганических химических веществ в почве и допустимые уровни их содержания по показателям вредности [2]

Вещество	Форма со- держания	ПДК, мг/кг почвы с учетом фона	Уровни показателей вредности (K1 – K4), мг/кг				Класс опас- ности
			Транслока- ционный (K1)	Миграционный		Обще- санитар- ный (K4)	
				Вод- ный (K2)	Воздуш- ный (K3)		
1	2	3	4	5	6	7	8
Медь	Подвижная	3	3,5	72	-	3	2
Хром	Подвижная	6	6	6	6	6	2
Никель	Подвижная	4	6,7	14	-	4	2
Цинк	Подвижная	23	23	200	-	37	1
Кобальт	Подвижная	5	25	>1000	-	5	2
Фтор	Водорас- творимая	10	10	10	-	25	1
Сурьма	Валовая	4,5	4,5	4,5	-	50	2
Марганец	Валовая	1500	3500	15000	-	1500	3
Ванадий	Валовая	150	170	350	-	150	3
Марганец + ванадий	Валовая	1000 + 100	1500+ 150	2000+ 200	-	1000+100	3
Свинец	Валовая	32	35	260	-	32	1
Мышьяк	Валовая	2	2	15	-	10	1
Ртуть	"	2,1	2,1	33,3	2,5	5	1
Свинец + ртуть	"	20+1	20+1	30+2	-	30+2	1
Хлористый калий	"	560	1000	560	1000	5000	3
Нитраты	"	130	180	130	-	225	2
Сернистые соеди- нения (S): Элемен- тарная сера	"	160	180	380	-	160	3
Серо- водород	"	0,4	160	140	0,4	160	3
Серная кислота	"	160	180	380	-	160	1
Отходы флотации угля	"	3000	9000	3000	6000	3000	2

1	2	3	4	5	6	7	8
Ком- плексные гранули- рованные удобрения НРК (64:0:15)	"	120	800	120	800	800	3
Жидкие комплекс- ные удобре- ния НРК (10:4:0)	"	80	>800	80	8000	800	3

Таблица 6.10

**Предельно допустимые концентрации органических соединений
в почвах [19]**

Наименование вещества	Величина ПДК, мг/кг поч- вы	Наименование вещества	Величина ПДК, мг/кг почвы
Агелон	0,15	Изопропилбензол	0,5
Акрекс	1,0	Изопропилбензол+	
Актеллик	0,5	альфаметилстирол	0,5
Актеллик	0,1(*)	Иодофенфос	0,5
Альфаметилстирол	0,5	Карбофос	2,0
Атразин	0,5	Кельтан	1,0
Ацетальдегид	10,0	Ксилолы (орто-, мета- пара-)	
Базудин	0,1		0,3
Байлетон+метаболит	0,03	Купроцин	1,0
Байфидан	0,02	Линурон	1,0
Банвел Д	0,25	Мезоранил	0,1
Бенз(а)пирен	0,02	Метатион	1,0
Бензин	0,1	Метафос	0,1
Бензол	0,3	Мирал	0,03
Бетанол	0,25	Монурон	0,3
Валексон	1,0	Отходы флотации угля	3000,0
Гардона	1,4	Пиримор	0,3
ГХЦГ (линдан)	0,1	Политриазин	0,1
ГХЦГ (гексахлоран)	0,1	Полихлоркамфен	0,5
ГХБД (гексахлорбутадиен)	0,5	Полихлорпинен	0,5
Гептахлор	0,05	Прометрин	0,5
Гетерофос	0,05	Пропанид	1,5

Наименование вещества	Величина ПДК, мг/кг поч- вы	Наименование вещества	Величина ПДК, мг/кг почвы
Глифосат	0,5	Ридомил	0,05
Далапон	0,5	Ринкорд	0,02
2,4-Д-дихлорфеноксиуксусная кислота	0,1	Ронит	0,8
2,4-Д-дихлорфенол	0,05	Севин	0,05
2,4-Д-аминная соль	0,05	Семерон	0,1
Бутиловый эфир группы 2,4-Д	0,25 0,15	Симазин	0,2
Кротиловый эфир группы 2,4-Д	0,15 0,15	Сумицидин	0,02
Октиловый эфир группы 2,4-Д	0,4	Стирол	0,1
Малолетучие эфиры группы 2,4-Д	0,6	Толуол	0,3
2М-4ХП		Фенурон	1,8
2М-4ХМ	0,1	Фозалон	0,5
ДДТ и его метаболиты	0,01	Фосфамид	0,3
(суммарные количества)	0,5	Формальдегид	7,0
Децис	0,5	Фталофос	0,1
Дилор	0,2	Фурадан	0,01
Диурон	0,2	Фурфуrol	3,0
Дурсбан	0,05	Хлорофос	0,5
Зенкор		Хлорамп	0,05
Изатрин		Циклофос	0,03
		Цинеб	0,2
		Энтам	0,9

Примечание. * – рекомендуется для почв с pH 5,5.

Таблица 6.11

**Ориентировочно допустимые концентрации пестицидов
в почвах [19]**

Наименование вещества	Величина ОДК, мг/кг почвы	Наименование вещества	Величина ОДК, мг/кг почвы
Абат	0,6	Пирамин	0,7
Амбуш	0,05	Пликтран	0,1
Амибен	0,5	Плондрел	0,15
Антио	0,2	Поликарбацин	0,6
Арезин	0,7	Полихлорбифенилы	
Байлетон	0,4	(суммарно)	0,06
Байтекс	0,4	Препарат А-1	0,5
Бенлат	0,1	Промед	0,01
Биферан	0,5	Рамдон	0,2

Наименование вещества	Величина ОДК, мг/кг почвы	Наименование вещества	Величина ОДК, мг/кг почвы
БМК	0,1	Реглон	0,2
Бромофос	0,2	Ровраль	0,15
Бронокот	0,5	Сангор	0,04
Гексахлорбензол	0,03	Сапроль	0,03
Геметрел	0,5	Солан	0,6
Гербан	0,7	Стомп	0,15
Гидрел	0,5	Сульфазин	0,1
Дактал	0,1	Сутан	0,6
ДДВФ	0,1	Тепоран	0,4
Декстрел	0,5	Тербацил	0,4
Дигидрел	0,5	Тиллам	0,6
Дифенамид	0,25	Тиодан	0,1
Дропп	0,05	Топсин-М	0,4
Зеллек	0,15	Тетрахлорбифенилы	0,06
Кампозан	0,5	Трефлан	0,1
Каптан	1,0	Триаллат	0,05
Карагард	0,4	Трихлорбифенилы	0,03
Которан	0,03	ТХАН	0,2
Ленацил	1,0	ТХМ	0,1
Лонтрел	0,1	Фталан	0,3
Метазин	0,1	Хлорат магния	1,0
Метоксихлор	1,6	Хостаквик	0,2
Морфонол	0,15	Цианокс	0,4
Нитропирин + 6 ХПК	0,2	Цидиал	0,4
Нитрофор	0,2	Этафос	0,1
Офунак	0,05	Эупарен	0,2
Пентахлорбифенилы	0,1	Ялан	0,9

Таблица 6.12

**Критерии оценки степени загрязнения почв
неорганическими веществами [2]**

Содержание в почве (мг/кг)	Категория загрязнения почвы		
	1 класс опасности	2 класс опасности	3 класс опасности
$> K_{\max}$	очень сильная	очень сильная	сильная
от ПДК до K_{\max}	очень сильная	сильная	средняя
от 2 фоновых значений до ПДК	слабая	слабая	слабая

Примечание: K_{\max} – максимальное значение допустимого уровня содержания элемента по одному из четырех показателей вредности (транслокационному, миграционному водному, миграционному воздушному или общесанитарному).

В табл. 6.12 и 6.13 представлены критерии отнесения почв к той или иной категории загрязнения в зависимости от класса опасности загрязняющих веществ (МУ 2.1.7.730-99. Гигиенические требования к качеству почвы населенных мест).

Существует градация эколого-токсикологической оценки почв по содержанию валовых форм тяжелых металлов и мышьяка в зависимости от кислотности и гранулометрического состава [14] – табл. 6.14-6.16. Данная градация включает пять групп. Первая группа (допустимый уровень загрязнения) соответствует концентрациям элементов в почвах ниже 0,5 ПДК (ОДК), а численное значение верхней границы второй группы (низкий уровень загрязнения) соответствует ПДК (ОДК) данных элементов.

Таблица 6.13

Критерии оценки степени загрязнения почв органическими веществами [2]

Содержание в почве (мг/кг)	Категория загрязнения почвы		
	1 класс опасности	2 класс опасности	3 класс опасности
> 5 ПДК	очень сильная	очень сильная	сильная
от 2 до 5 ПДК	очень сильная	сильная	средняя
от 1 до 2 ПДК	слабая	слабая	слабая

Таблица 6.14

Группировка песчаных и супесчаных почв для эколого-токсикологической оценки по содержанию валовых форм тяжелых металлов и мышьяка, мг/кг

Элемент	Группы				
	1	2	3	4	5
As	< 1,0	1,0-2,0*	2,1-4,0	4,1-6,0	> 6,0
Hg	< 1,0	1,0-2,1*	2,2-4,2	4,3-6,2	> 6,2
Pb	< 16,0	16,0-32,0*	32,1-64,0	64,1-96,0	> 96,0
Zn	< 27,0	27,1-55,0*	55,1-110	110,1-165	> 165
Cd	< 0,25	0,25-0,5*	0,6-1,0	1,1-1,5	> 1,5
Cu	< 16,0	16,1-33,0*	33,1-165	165,1-330	> 330
Ni	< 10,0	10,1-20,0*	20,1-100	100,1-200	> 200
Cr ³⁺	< 50,0	50,0-100*	101,0-500	501-1000	> 1000

Примечание: * – ПДК (ОДК) элемента в почвах.

Таблица 6.15

**Группировка суглинистых и глинистых почв с pH менее 5,5
для эколого-токсикологической оценки по содержанию валовых
форм тяжелых металлов и мышьяка, мг/кг**

Элемент	Группы				
	1	2	3	4	5
As	< 2,5	2,5-5,0*	5,1-10,0	10,1-15,0	> 15
Pb	< 32	32-65*	66-130	131-195	> 195
Zn	< 55	55-100*	111-220	221-330	> 330
Cd	< 0,5	0,5-1,0*	1,1-2,0	2,1-3,0	> 3
Cu	< 33	33-66*	67-330	331-660	> 660
Ni	< 20	20-40*	41-200	201-400	> 400

Примечание: * – ПДК (ОДК) элемента в почвах.

Таблица 6.16

**Группировка суглинистых и глинистых почв с pH более 5,5
для эколого-токсикологической оценки по содержанию валовых
форм тяжелых металлов и мышьяка, мг/кг**

Элемент	Группы				
	1	2	3	4	5
As	< 5	5-10*	11-20	21-30	> 30
Pb	< 65	65-130*	131-260	261-390	> 390
Zn	< 110	110-220*	221-400	401-660	> 660
Cd	< 1,0	1,0-2,0*	2,1-4,0	4,1-6,0	> 6
Cu	< 66	66-132*	133-660	661-1320	> 1320
Ni	< 40	40-80*	81-400	401-800	> 800

Примечание: * – ПДК (ОДК) элемента в почвах.

Почвы, отнесенные к третьей группе (средний уровень загрязнения), свидетельствуют о неудовлетворительной экологической ситуации на данной территории. Четвертая группа (высокий уровень загрязнения) характеризует почвы, относимые к зоне чрезвычайной экологической ситуации, а пятая (очень высокий уровень загрязнения) – к зоне экологического бедствия [8].

Почвы, отнесенные к первым трем группам эколого-токсикологической оценки, пригодны для возделывания сельскохозяйственных культур; на почвах третьей группы необходим контроль за содержанием металлов во всей получаемой продукции. На почвах, отнесенных к четвертой и пятой группам, возможно воз-

делывание только технических культур по специальным технологиям.

В табл. 6.17 представлена группировка почв по содержанию подвижных форм тяжелых металлов, извлекаемых ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4,8.

Таблица 6.17

**Группировка почв для эколого-токсикологической оценки
по содержанию подвижных форм тяжелых металлов
и мышьяка, мг/кг**

Элемент	Группы				
	1	2	3	4	5
Pb	< 3,0	3,0-6,0*	6,1-12,0	12,1-18,0	>18,0
Zn	< 10,0	10,0-23,0*	24,0-46,0	47,0-69,0	>69,0
Cu	< 1,5	1,5-3,0*	3,1-15,0	15,1-30,0	>30,0
Ni	< 2,0	2,0-4,0*	4,1-20,0	20,1-40,0	>40,0
Cr ³⁺	< 3,0	3,0-6,0*	6,1-30,0	30,1-60,0	>60,0
Co	< 2,5	2,5-5,0*	5,1-25,0	25,1-50,0	>50,0

Примечание: * – ПДК (ОДК) элемента в почвах.

В Гигиенических нормативах ГН 2.1.7.2511-09 [15] приведены значения ориентировочных допустимых концентраций (ОДК) химических веществ в почве – табл. 6.18.

Степень химического загрязнения почв регламентируется Санитарно-эпидемиологическими требованиями к качеству почвы (СанПиН 2.1.7.1287-03 с изменениями от 25 апреля 2007 г.) – табл. 6.19.

В условиях нефтяного загрязнения в соответствии с «Инструкцией по определению и возмещению вреда (ущерба), причиненного в результате деградации, загрязнения и захламления земель» (1998 г.) [6], определены следующие уровни загрязнения почв тяжелыми нефтепродуктами (нефть, мазут, смазочные масла и др.):

- допустимый (< 1000 мг/кг);
- низкий (1000-2000 мг/кг);
- средний (2000-3000 мг/кг);
- высокий (3000-5000 мг/кг);
- очень высокий (более 5000 мг/кг).

**Ориентировочные допустимые концентрации (ОДК)
химических веществ в почве (валовое содержание) [15]**

Наименование вещества	Формула	Группа почв	Величина ОДК (мг/кг) с учетом фона (кларка)
Аверсектин С (смесь 8 авермектинов А1а, А2а, В1а, В2а, А1в, А2в, В1в, В2в) / по авермектину В1а/	$C_{48}H_{72}O_{14}$	Для всех типов почв	0,1
Кадмий	Cd	а) песчаные и супесчаные	0,5
		б) кислые (суглинистые и глинистые), pH KCl < 5,5	1,0
		в) близкие к нейтральным, нейтральные (суглинистые и глинистые), pH KCl > 5,5	2,0
Медь	Cu	а) песчаные и супесчаные	33
		б) кислые (суглинистые и глинистые), pH KCl < 5,5	66
		в) близкие к нейтральным, нейтральные (суглинистые и глинистые), pH KCl > 5,5	132
Мышьяк	As	а) песчаные и супесчаные	2
		б) кислые (суглинистые и глинистые), pH KCl < 5,5	5
		в) близкие к нейтральным, нейтральные (суглинистые и глинистые), pH KCl > 5,5	10
Никель	Ni	а) песчаные и супесчаные	20
		б) кислые (суглинистые и глинистые), pH KCl < 5,5	40
		в) близкие к нейтральным, нейтральные (суглинистые и глинистые), pH KCl > 5,5	80
Свинец	Pb	а) песчаные и супесчаные	32
		б) кислые (суглинистые и глинистые), pH KCl < 5,5	65
		в) близкие к нейтральным, нейтральные (суглинистые и глинистые), pH KCl > 5,5	130
Цинк	Zn	а) песчаные и супесчаные	55
		б) кислые (суглинистые и глинистые), pH KCl < 5,5	110
		в) близкие к нейтральным, нейтральные (суглинистые и глинистые), pH KCl > 5,5	220

Оценка степени химического загрязнения почвы [21]

Категории загрязнения	Сум. показатель загрязнения (Zc)	Содержание в почве (мг/кг)					
		I класс опасности		II класс опасности		III класс опасности	
		Орг. соединения	Неорг. соединения	Орг. соединения	Неорг. соединения	Орг. соединения	Неорг. соединения
Чистая	-	от фона до ПДК	от фона до ПДК	от фона до ПДК	от фона до ПДК	от фона до ПДК	от фона до ПДК
Допустимая	< 16	от 1 до 2 ПДК	от 2 фоновых значений до ПДК	от 1 до 2 ПДК	от 2 фоновых значений до ПДК	от 1 до 2 ПДК	от 2 фоновых значений до ПДК
Умеренно опасная	16 – 32					от 2 до 5 ПДК	от ПДК до K_{\max}
Опасная	32 – 128	от 2 до 5 ПДК	от ПДК до K_{\max}	от 2 до 5 ПДК	от ПДК до K_{\max}	> 5 ПДК	> K_{\max}
Чрезвычайно опасная	> 128	> 5 ПДК	> K_{\max}	> 5 ПДК	> K_{\max}		

В настоящее время в России отсутствуют ПДК для суммарного содержания нефтепродуктов в почвах. На практике часто пользуются примерным значением ОДК – 1000 мг/кг. На основании обобщения данных экспериментальных исследований в разных природных зонах [20] и зарубежного опыта нормирования, а также изучения скорости самоочищения почв в зависимости от почвенно-климатических условий рекомендованы следующие уровни ОДК нефти и нефтепродуктов в почвах России (цит. по [4]) – табл. 6.20. При этом ориентировочным допустимым уровнем содержания нефти и нефтепродуктов в почвах считают нижний допустимый уровень загрязнения, при котором в данных природных условиях почва в течение одного года восстанавливает свою продуктивность, а негативные последствия для почвенного биоценоза могут быть самопроизвольно ликвидированы.

**Ориентировочные допустимые концентрации (ОДК) нефти
и нефтепродуктов в почвах различных природных зон России,
валовое содержание, мг/кг [20]**

Вещество	Ландшафтно-геохимический район, почвы	Величина ОДК с учетом фона, мг/кг	Агрегатное состояние вещества в почвах	Класс опасности	Особенности действия на биоту почв
1	2	3	4	5	6
Нефтепродукты легкие: бензины, керосин, дизельное топливо	1. Мерзлотно-тундрово-таежный район. Почвы: тундровые глеевые, тундровые болотные 2. Таежно-лесные районы. Почвы: средне- и южно-таежные подзолы и дерново-подзолистые 3. Лесостепные и степные районы. Почвы: серые лесные, черноземы, каштановые 4. Полупустынные и пустынные районы. Почвы: полупустынные бурые, пустынно-песчаные	2000 4000 8000 8000	В парообразном и жидком состоянии в порах почв. В сорбированном на органических и минеральных частицах почв. В свободном состоянии на поверхности почв	3	Кратковременное сильное наркотическое действие, ингибирование микробиологической активности почв и фотосинтетической активности растений
Нефти и нефтепродукты тяжелые: нефть, мазут, смазочные масла	1. Мерзлотно-тундрово-таежный район. Почвы: тундровые глеевые, тундровые болотные 2. Таежно-лесные районы. Почвы: средне- и южно-таежные подзолы и дерново-подзолистые 3. Лесостепные и степные районы. Почвы: серые лесные, черноземы, каштановые 4. Полупустынные и пустынные районы. Почвы: полупустынные бурые, пустынно-песчаные	700 2000 4000 2000	В парообразном и жидком состоянии в порах почв. В сорбированном на органических и минеральных частицах почв. Медленное разложение в почве	3	Замедленное, но устойчивое негативное влияние на биоту почв. Замедление фотосинтетической активности растений. Ухудшение водно-физических свойств почв

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение понятию «загрязнение».
2. Перечислите основные виды загрязнений окружающей среды.
3. Какие бывают виды загрязняющих веществ?
4. Какие вещества называют ксенобиотиками?
5. Какие вещества относят к канцерогенам, тератогенам и мутагенам?
6. Что такое персистентность химического вещества в биосфере?
7. Что понимают под нормированием качества окружающей среды?
8. Дайте определение предельно допустимой концентрации вещества (ПДК).
9. Перечислите показатели вредности, по которым устанавливаются значения ПДК для различных сред.
10. Дайте определение предельно допустимого сброса (ПДС) и предельно допустимого выброса (ПДВ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 6

1. Баяева Ю.И., Черных Н.А. Судебная экология: учебное пособие: в 6 т. – Т.1: Исследование экологического состояния объектов почвенно-геологического происхождения. – 2-е изд., стер. – М.: Изд-во РУДН, 2018. – 252 с.
2. Гигиенические требования к качеству почвы населенных мест. МУ 2.1.7.730-99.
3. Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест. СанПиН 2.1.6.1032-01.
4. Другов Ю.С., Родин А.А. Экологические анализы при разливах нефти и нефтепродуктов: практическое руководство. – Санкт-Петербург, 2000. – 248 с.
5. Загрязнение природной среды // Российская геологическая энциклопедия: в 3 т. / гл. ред. Е.А. Козловский, А.А. Ледовских. – М.–СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. – Т. 1. А-И. – С. 553.
6. Инструкция по определению и возмещению вреда (ущерба), причиненного в результате деградации, загрязнения и захламления земель. Госкомитет РФ по охране окружающей среды. Госкомитет РФ по ресурсам и землеустройству. – М., 1998. – 35 с.
7. Источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. Гигиенические и технические требования и правила выбора. ГОСТ 2761-84.
8. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. – М.: Минприроды РФ, 1992. – 58 с.

9. Методические рекомендации по выявлению деградированных и загрязненных земель // Письмо Роскомзема от 27.03.1995 N 3-15/582. – URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=6629>.
10. Мотузова Г.В., Карпова Е.А. Химическое загрязнение биосферы и его экологические последствия: учебник. – М.: Изд-во МГУ, 2013. – 304 с.
11. О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации [Электронный ресурс]: Федеральный закон от 21.07.2014 № 219-ФЗ (ред. от 29.12.2015). – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
12. Об охране окружающей среды: Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ.
13. Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды [Электронный ресурс]: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 08.07.2015. № 1316-р. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
14. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) тяжелых металлов и мышьяка в почвах с различными физико-химическими свойствами (валовое содержание, мг/кг). ГН 2.1.7.020-94 (Дополнение № 1 к перечню ПДК и ОДК № 6229-91) – С изменениями и дополнениями на 2 февраля 2008 г.
15. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2511-09.
16. Охрана природы (ССОП). Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. ГОСТ 17.4.1.02-83. (Переиздание – август 2008 г.).
17. Перельман А.И. Химический состав Земли. – М.: Знание, 1975. – 64 с.
18. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Сан-ПиН 2.1.4.1074-01 (с изменениями от 7 апреля 2009 г., от 25 февраля 2010 г., от 28 июня 2010 г.).
19. Порядок определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами // Письмо Минприроды от 27 декабря 1993 года № 04-25/61-5678.
20. Почва, очистка населенных мест, бытовые и промышленные отходы. Ориентировочные допустимые концентрации (ОДК) нефти и нефтепродуктов в почвах. Федеральные санитарные правила и гигиенические нормативы. Проект. Издание официальное. – М., 2000.
21. Почва, очистка населенных мест, бытовые и промышленные отходы. Санитарная охрана почвы. Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы. Санитарно-эпидемиологические правила и

нормативы. СанПиН 2.1.7.1287-03 (с изменениями от 25 апреля 2007 г.).

22. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.1315-03.
23. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Гигиенические нормативы ГН 2.2.5.3532-18.
24. Пурмаль А.П. Антропогенная токсикация планеты. Ч. 1, 2 // Соровский образовательный журнал. – 1998. – № 9.
25. Рамад Ф. Основы прикладной экологии: Воздействие человека на биосферу. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 544 с.
26. Реймерс Н.Ф. Экология: Теории, законы, правила, принципы и гипотезы. – М.: Изд-во «Россия молодая», 1994. – 367 с.
27. Руководство по контролю загрязнения атмосферы – РД 52.04.186-89.
28. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. ГОСТ 12.1.005-88 (ред. От 20 июня 2000 г.).
29. Требования к качеству воды нецентрализованного водоснабжения. Санитарная охрана источников. СанПиН 2.1.4.1175-02.
30. Химия окружающей среды: учебное пособие / С.Л. Белопухов, Н.К. Сюняев, М.В. Тютюнькова. – М.: Изд-во «Проспект», 2016. – 240 с.
31. Черных Н.А., Сидоренко С.Н. Экологический мониторинг токсикантов в биосфере. – М.: Изд-во РУДН, 2003. – 430 с.
32. Экологическая энциклопедия: в 6 т. / гл. ред. В.И. Данилов-Данильян. – М.: ООО «Изд-во “Энциклопедия”», 2010. – Т. 2. Г-И. – 448 с.
33. Экологический энциклопедический словарь / гл. ред. А.С. Монин. – М.: Издательский дом «Ноосфера», 1999. – 930 с.



URL: <https://pixabay.com/ru/>

Глава 7. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ ПРОИЗВОДСТВА И ПОТРЕБЛЕНИЯ



Безопасное обращение с отходами – одна из наиболее актуальных современных экологических проблем, связанных с потенциальной опасностью отходов для здоровья людей и состояния окружающей природной среды. Решение вопросов, возникающих при накоплении, переработке и утилизации отходов производства и потребления, представляется весьма важной задачей, так как их негативное воздействие на экосистемы усиливается с каждым годом.

7.1. Виды отходов и их классификация

Отходы – вещества (или смеси веществ), признанные непригодными для дальнейшего использования в рамках имеющихся технологий или после бытового использования продукции. Практически любое вещество теоретически может быть использовано тем или иным образом, естественным ограничением при этом яв-

ляется экономическая целесообразность. Сегодня отходы и мусор рассматриваются как сырье, которое можно перерабатывать и повторно использовать. Однако в процессе сбора и переработки различных отходов возникает множество проблем. Так, твердые коммунальные отходы весьма разнообразны, что представляет определенные трудности для их раздельного сбора. Радиохимические заводы, атомные электростанции, научные исследовательские центры производят наиболее опасные отходы (радиоактивные), которые не только представляют собой серьезную экологическую проблему, но и могут привести к экологической катастрофе. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) относит к опасным и медицинские отходы, неправильное обращение с которыми также ведет к серьезным негативным последствиям для человека и окружающей среды. Базельская конвенция о контроле за трансграничной перевозкой опасных отходов и их удалением, принятая 22 марта 1989 года [3; 15], определила 45 типов опасных отходов, и медицинские первые в списке.

7.1.1. Основные понятия

В Федеральном законе от 24.06.1998 № 89-ФЗ (ред. от 31.12.2017) «Об отходах производства и потребления» [17] и в «Комплексной стратегии обращения с твердыми коммунальными (бытовыми) отходами в Российской Федерации», утвержденной приказом Минприроды РФ № 298 от 14.08.2013 г. [8], даны следующие определения основным понятиям, используемым при обращении с отходами:

Отходы производства и потребления (далее – отходы) – вещества или предметы, которые образованы в процессе производства, выполнения работ, оказания услуг или в процессе потребления, которые удаляются, предназначены для удаления или подлежат удалению.

Вид отходов – совокупность отходов, которые имеют общие признаки в соответствии с системой классификации отходов.

Паспорт отходов – документ, удостоверяющий принадлежность отходов к отходам соответствующего вида и класса опасности, содержащий сведения об их составе.

Обращение с отходами – деятельность по сбору, накоплению, транспортировке, обработке, утилизации, обезвреживанию, размещению отходов.

Раздельный сбор отходов – сбор отходов, предусматривающий разделение по видам и составу в целях дальнейшей утилизации (использования).

Размещение отходов – хранение и захоронение отходов.

Хранение отходов – складирование отходов в специализированных объектах сроком более чем одиннадцать месяцев в целях утилизации, обезвреживания, захоронения.

Утилизация отходов – использование отходов для производства товаров (продукции), выполнения работ, оказания услуг, включая повторное применение отходов, в том числе повторное применение отходов по прямому назначению (*рециклинг*), их возврат в производственный цикл после соответствующей подготовки (регенерация), а также извлечение полезных компонентов для их повторного применения (*рекуперация*).

Захоронение отходов – изоляция отходов, не подлежащих дальнейшей утилизации, в специальных хранилищах в целях предотвращения попадания вредных веществ в окружающую среду.

Обезвреживание отходов – уменьшение массы отходов, изменение их состава, физических и химических свойств (включая сжигание и (или) обеззараживание на специализированных установках) в целях снижения негативного воздействия отходов на здоровье человека и окружающую среду.

Объекты размещения отходов – специально оборудованные сооружения, предназначенные для размещения отходов (полигон, шламохранилище, в том числе шламовый амбар, хвостохранилище, отвал горных пород и др.) и включающие в себя объекты хранения отходов и объекты захоронения отходов.

Трансграничное перемещение отходов – перемещение отходов с территории, находящейся под юрисдикцией одного государства, на территорию (через территорию), находящуюся под юрисдикцией другого государства, или в район, не находящийся под юрисдикцией какого-либо государства, при условии, что такое перемещение отходов затрагивает интересы не менее чем двух государств.

7.1.2. Классификация отходов

Классификация отходов, образующихся в результате деятельности человека, необходима как средство установления определенных связей между ними с целью определения оптимальных путей использования или обезвреживания отходов. Классификация

отходов проводится по разным показателям, но самым главным из них является степень опасности для здоровья человека. Вредными отходами, например, считаются инфекционные, токсичные и радиоактивные. Их сбор и ликвидация регламентируются специальными санитарными правилами. Отходы в зависимости от свойств и происхождения можно классифицировать следующим образом:

по состоянию: твердые, жидкие и газообразные;

по составу: органические и неорганические;

по месту возникновения: бытовые (коммунальные), промышленные и сельскохозяйственные.

Кроме того, отходы разделяют также на *сжигаемые* и *несжигаемые*. Особую группу представляют отходы в виде энергии, называемые *энергетическими* (тепло, шум, радиоактивное излучение и т.п.).

Большая номенклатура отходов, образующихся на предприятиях различных отраслей экономики, затрудняет их классификацию, учет, сбор и переработку. В настоящее время и у нас в стране, и за рубежом отсутствует общепринятая унифицированная научная классификация твердых отходов промышленности, охватывающая все их многообразие. Существующие классификации твердых отходов, как правило, односторонни.

Различные подходы к классификации отходов основываются на следующих классификационных признаках:

- место образования отходов (отрасль промышленности);
- стадия производственного цикла;
- вид отхода;
- степень ущерба окружающей среде и здоровью человека;
- направление использования;
- эффективность использования;
- величина запаса и объемы образования;
- степень изученности и разработанности технологий утилизации.

Отходы возникают как в результате производственной деятельности, так и при потреблении. В соответствии с этим они подразделяются на *отходы производства* и *отходы потребления*. Классификация твердых отходов определена требованиями ГОСТ-25916-83 «Ресурсы материалы вторичные. Термины и определения» [5].

➤ **Отходами производства** принято считать остатки сырья, материалов, полуфабрикатов, образовавшиеся при производстве

продукции или выполнении работ и утратившие полностью или частично потребительские свойства; вновь образующиеся в процессе производства попутные вещества, не находящие применения. К отходам производства относятся вмещающие и вскрышные породы, образующиеся при добыче полезных ископаемых, побочные и попутные продукты, отходы сельского хозяйства и др.

Отходы производства после предварительной обработки, а иногда и без нее могут быть использованы в сфере производства или потребления, в частности для производства побочных продуктов.

Побочные продукты образуются наряду с основными продуктами производства, но не являются целью производственного процесса. Они в большинстве случаев бывают товарными, их производство планируется предприятием.

Производственные отходы являются следствием несовершенства технологических процессов, неудовлетворительно организованного производства, а также несовершенного экономического механизма. К ним относят отходы, образующиеся в процессе добычи и обогащения полезных ископаемых, механической и физико-химической переработки сырья, а также вещества, улавливаемые при очистке отходящих технологических газов и сточных вод.

Основными поставщиками производственных отходов являются следующие отрасли:

- ❖ Энергетика. Сжигая твердое топливо, отрасль в большом количестве поставляет шлаки.

- ❖ Черная, цветная металлургия, которая оставляет формовочную землю, то есть массу, содержащую коксовые остатки, шлаки.

- ❖ Угледобывающая. В процессе добычи полезных ископаемых образуются отвалы, углеродсодержащие массы.

- ❖ Деревообрабатывающая, оставляющая опилки, стружки.

- ❖ Химическая. В результате работы химических предприятий образуются твердые и жидкие отходы, содержащие вредные вещества.

➤ **Отходы потребления** – различного рода изделия, комплектующие детали и материалы, которые по тем или иным причинам не пригодны для дальнейшего использования. Эти отходы можно разделить на отходы промышленного и бытового потребления. К первым относятся, например, металлолом, вышедшее из

стройка оборудования, изделия технического назначения из резины, пластмасс, стекла и др. Бытовыми (коммунальными) отходами являются пищевые отходы, изношенные изделия бытового назначения (одежда, обувь и пр.), различного рода использованные изделия (упаковки, стеклянная и другие виды тары), бытовые сточные воды и др.

Все виды отходов производства и потребления по возможности использования можно разделить на *вторичные материальные ресурсы* (ВМР), которые уже перерабатываются или переработка которых планируется, и на отходы, которые на данном этапе развития экономики перерабатывать нецелесообразно и которые неизбежно образуют *безвозвратные потери*.

Утилизируемые отходы перерабатываются на месте их образования или на других предприятиях, имеющих соответствующую технологию. Некоторые *неутилизируемые отходы* в силу потери потребительских свойств в настоящее время не могут найти применения в современном производстве. Эти отходы подлежат захоронению, если не представляют опасности для окружающей среды. При этом опасные по санитарно-гигиеническим показателям отходы обязательно предварительно обезвреживают.

В соответствии с принятым в России Федеральным классификационным каталогом отходов [10; 11] все отходы разделены на четыре группы:

- 1) отходы органического природного происхождения (животного и растительного);
- 2) отходы минерального происхождения;
- 3) отходы химического происхождения;
- 4) коммунальные отходы.

Каждый отход обозначается специальным тринадцатизначным кодом, который определяет вид отходов, характеризующий его классификационные признаки:

- первые восемь цифр используются для кодирования происхождения отхода;
- девятая и десятая цифры используются для кодирования агрегатного состояния и физической формы (0 – данные не установлены, 1 – твердый, 2 – жидкий, 3 – пастообразный, 4 – шлам, 5 – гель, коллоид, 6 – эмульсия, 7 – суспензия, 8 – сыпучий, 9 – гранулят, 10 – порошкообразный, 11 – пылеобразный, 12 – волокно, 13 – готовое изделие, потерявшее потребительские свойства, 99 – иное);

– одиннадцатая и двенадцатая цифры используются для кодирования опасных свойств и их комбинаций (0 – данные не установлены, 1 – токсичность (т), 2 – взрывоопасность (в), 3 – пожароопасность (п), 4 – высокая реакционная способность (р), 5 – содержание возбудителей инфекционных болезней (и), 6 – т+в, 7 – т+п, 8 – т+р, 9 – в+п, 10 – в+р, 11 – в+и, 12 – п+р, 13 – п+и, 14 – р+и, 15 – т+в+п, 16 – т+в+р, 17 – т+п+р, 18 – в+п+р, 19 – в+п+и, 20 – п+р+и, 21 – т+в+п+р, 22 – в+п+р+и, 99 – опасные свойства отсутствуют);

– тринадцатая цифра используется для кодирования класса опасности для окружающей природной среды (0 – класс опасности не установлен, 1 – I класс опасности, 2 – II класс опасности, 3 – III класс опасности, 4 – IV класс опасности, 5 – V опасности) [21].

Все промышленные отходы можно разделить на два вида: *нетоксичные и токсичные*. В своей основной массе твердые отходы нетоксичны. Примерами токсичных отходов могут служить шламы гальванических цехов и травильных ванн.

Отходы можно также классифицировать на *металлические и неметаллические*, а также *комбинированные*. Неметаллические отходы подразделяются на химически инертные (отвалы породы, зола и т. д.) и химически активные (резина, пластмассы и т. д.). К числу комбинированных отходов относится всевозможный промышленный и строительный мусор.

Отходы делят на две группы – основные и побочные.

Основные отходы – отходы материалов, использованных непосредственно для изготовления товарной продукции. Это металлические, металлосодержащие (окалина, шламы, шлаки и пр.) и неметаллические (древесина, пластмассы, резина, клеи, текстиль, стекло и др.) отходы.

Побочные отходы – отходы технологических материалов и веществ, использованных или образующихся при проведении технологических процессов. Побочные отходы могут быть *твердыми* (зола, абразивы, огнеупоры), *жидкими* (смазочно-охлаждающие жидкости, минеральные масла и другие нефтепродукты, отходы гальванопроизводства) и *газообразными* (отходящие газы).

Следует отметить, что классификация отходов должна обеспечить получение данных, необходимых для разработки организационно-технических мероприятий по уменьшению количества отходов и их утилизации в рамках определенных промышленных

узлов. С практической точки зрения, следует отметить, что если известна конечная ступень технологии переработки и утилизации производственных отходов, то их следует классифицировать, основываясь, в первую очередь, на этой технологии.

В соответствии со ст. 4.1 Федерального закона № 89 «Об отходах производства и потребления» от 24 июня 1998 г. (89-ФЗ, ред. от 31.12.2017) [17] в зависимости от степени негативного воздействия на окружающую среду отходы подразделяют в соответствии с критериями, установленными Федеральным органом исполнительной власти, осуществляющим государственное регулирование в области охраны окружающей среды, на пять классов опасности:

- I класс – чрезвычайно опасные отходы;
- II класс – высокоопасные отходы;
- III класс – умеренно опасные отходы;
- IV класс – малоопасные отходы;
- V класс – практически неопасные отходы.

Опасные отходы – отходы, которые либо содержат вредные вещества, содержащие возбудителей инфекционных болезней или обладающие опасными свойствами: токсичностью, взрывоопасностью, пожароопасностью, высокой реакционной способностью; либо могут представлять непосредственную или потенциальную опасность для окружающей природной среды и здоровья человека самостоятельно или при вступлении в контакт с другими веществами [20].

Классификация отходов потребления подразделяет их на несколько классов опасности, каждому из которых должен быть применен свой метод утилизации.

Согласно ст. 20 89-ФЗ [17] *государственный кадастр отходов* (ГКО) включает в себя *федеральный классификационный каталог отходов* (ФККО), *государственный реестр объектов размещения отходов* (ГРОРО), а также *банк данных об отходах и о технологиях утилизации и обезвреживания отходов различных видов* (БДО). Государственный кадастр отходов ведется по единой для Российской Федерации системе.

В соответствии с п. 6 Порядка ведения Государственного кадастра отходов (ГКО), утвержденного приказом Минприроды России от 30 сентября 2011 г. № 792 [9], ФККО включает перечень видов отходов, находящихся в обращении в РФ и систематизированных по совокупности классификационных признаков: проис-

хождению, условиям образования (принадлежности к определенному производству, технологии), химическому и/или компонентному составу, агрегатному состоянию и физической форме.

Согласно п. 7 Порядка [9] для классификации отходов в ФККО используется вид отходов. При этом указано также, что наименование конкретного вида отходов при включении в ФККО присваивается на основе его происхождения, химического и (или) компонентного состава, агрегатного состояния и физической формы.

7.2. Твердые коммунальные отходы

В соответствии с Комплексной стратегией обращения с твердыми коммунальными (бытовыми) отходами в Российской Федерации, утвержденной приказом Минприроды РФ № 298 от 14.08.2013 г. [8], *твердые бытовые отходы* (ТБО) – это отходы, которые образуются в многоквартирных и индивидуальных жилых домах в результате потребления товаров (продукции) физическими лицами и включают также товары (продукцию), использованные физическими лицами в целях удовлетворения личных потребностей и утратившие свои потребительские свойства.

В последние годы к отходам потребления относят не только отходы от домовладений (твердые бытовые отходы – ТБО), но и отходы, образующиеся в офисах, торговых предприятиях, мелких промышленных объектах, школах, больницах, других муниципальных учреждениях. Для указанных отходов часто используется термин «муниципальные отходы». Муниципальные отходы имеют различное происхождение и различные свойства, однако их объединяет то, что ответственность за их утилизацию ложится на муниципальные власти.

К *твердым коммунальным отходам* (ТКО) относятся как бытовые отходы (ТБО), так и отходы, образующиеся в процессе деятельности юридических лиц, индивидуальных предпринимателей и подобные по составу отходам, образующимся в жилых помещениях в процессе потребления физическими лицами.

Это отходы потребления, образующиеся в домовладениях, уличный и дворовый смет, а также отходы производств, обеспечивающих жизнедеятельность человека в населенных местах.

К коммунальным отходам относятся отходы из жилищ; отходы потребления на производстве, подобные коммунальным; отходы сплошного комбинированного состава в виде изделий, обо-

рудования, устройств; отходы от водоподготовки, обработки сточных вод и использования воды; жидкие отходы очистных сооружений; медицинские отходы.

В настоящее время переработка твердых коммунальных отходов (ТКО) представляет собой острейшую глобальную проблему современности, решение которой требует разработку и применение новых способов и технологий. Это обусловлено тем, что применяемые ранее методы утилизации отходов – сжигание и захоронение на свалках – показали свою нежизнеспособность и, более того, успели привести ряд стран на грань экологической катастрофы. Ведь многие компоненты мусора, в частности пластик и резина, разлагаются естественным путем довольно долго, а при их сжигании образуется множество вредных веществ, которые, попадая в атмосферу, наносят тем самым серьезный вред здоровью человека.

Ежегодно в России образуется около 60 млн т твердых коммунальных отходов (далее – ТКО), что составляет около 400 кг отходов на 1 человека в год. В хозяйственный оборот вовлекается не более 10 % собираемых ТКО, остальной их объем направляется на захоронение [8]. Столь низкий процент утилизации (использования) ТКО связан как с отсутствием средств объективного учета количества образующихся отходов, так и с недостаточным развитием инфраструктуры по их утилизации. При этом система сбора и анализа статистической информации о ТКО охватывает не все источники их образования.

На сегодняшний день любой завод по переработке мусора, цена которого достаточно невысока, способен производить следующие основные типы ценного сырья: цветные и черные металлы, стекло, бумагу, полимерные отходы, пригодные к переработке, топливо, тепло и электроэнергию, вещества, используемые в химической промышленности. Заводы по переработке твердых коммунальных отходов работают по определенной схеме, позволяющей максимально эффективно получать синтез-газ и твердое сырье из твердых бытовых отходов [1]:

- ❖ сортировка мусора;
- ❖ переработка подготовленных твердых коммунальных отходов в газификаторе для получения из них синтез-газа, пиролизного масла и побочных химических соединений;
- ❖ очистка синтез-газа и иных продуктов пиролиза от соединений хлора, фтора и серы;

❖ сжигание предварительно очищенного от примесей синтез-газа в специальных котлах-утилизаторах для получения водяного пара, горячей воды или электроэнергии;

❖ реализация продуктов пиролиза конечным потребителям.

В настоящее время сжигание ТКО является наиболее распространенным способом уничтожения твердых бытовых отходов, который применяется на практике более ста лет. Сжигание бытового мусора позволяет добиться существенного снижения объема и массы мусора и получить в процессе утилизации дополнительные энергетические ресурсы, которые могут быть использованы для производства электроэнергии. Однако в процессе сжигания отходов в атмосферу могут выделяться большие количества вредных веществ, поэтому сегодня, когда требования к нормам выброса газовой составляющей мусоросжигательных заводов резко ужесточились, подобные предприятия становятся нерентабельными.

В этой связи большую актуальность имеют такие технологии переработки твердых бытовых отходов, которые позволяют не только утилизировать мусор, но и вторично использовать полезные компоненты, содержащиеся в нем.

Компостирование мусора – это способ утилизации ТКО, основанный на естественных процессах трансформации мусора. В результате такой переработки отходы превращаются в компост. Для реализации подобной технологической схемы исходный мусор обязательно должен быть очищен от крупных предметов, а также металлов, керамики, пластмассы, стекла и резины, поскольку содержание подобных веществ в компосте просто недопустимо. Но, даже несмотря на это, современные технологии компостирования не позволяют полностью освободиться от многих загрязняющих веществ, и поэтому компост из ТКО на практике малопригоден для применения в сельском хозяйстве, однако может быть использован для получения биогаза.

Санитарная земляная засыпка – вид обезвреживания ТКО, который неразрывно связан с получением биогаза и дальнейшим использованием его в качестве экологически чистого топлива. По данной методике бытовой мусор засыпают слоем грунта толщиной примерно 0,6–0,8 метров. Полигоны утилизации мусора данного типа снабжены вентиляционными трубами, газодувами и емкостями, предназначенными для сбора биогаза. Присутствие в толщах мусора органических компонентов и наличие пор создает предпосылки для развития микробиологических процессов, в результате

чего образуется биогаз. Таким образом, свалки являются наиболее крупными системами по производству биогаза.

К более современным методам переработки ТКО относится термическая переработка мусора, то есть процесс, при котором предварительно размельченный мусор подвергается термическому разложению. Преимущество, которым обладает данная технология по сравнению с традиционным сжиганием отходов, заключается, в первую очередь в том, что она более эффективна с точки зрения предотвращения загрязнений окружающей среды. С помощью термической переработки можно перерабатывать любые состав-ляющие отходов, поскольку при данном способе в мусоре не оста-ется биологически активных веществ и последующее подземное складирование отходов не наносит вреда окружающей среде. Так-же при данном способе образуется много тепловой энергии, кото-рую можно использовать для различных целей.

К новейшим способам утилизации ТКО относится их плаз-менная переработка, которая, по существу, представляет собой газификацию мусора. Данный способ является наиболее перспек-тивным, поскольку технологическая схема подобного производст-ва не предъявляет каких-либо жестких требований к исходному сырью и позволяет получить вторичную энергию в виде нагретого водяного пара или горячей воды с подачей их конечному потреби-телю, и также вторичной продукции в виде гранулированного шлака или керамической плитки. По сути, это и есть оптимальный вариант комплексной переработки мусора, представляющий собой полную экологически безопасную утилизацию отходов с получе-нием тепловой энергии и различных полезных продуктов из само-го «бросового» сырья – бытового мусора.

В августе 2013 г. Минприроды РФ утверждена Комплексная стратегия обращения с твердыми коммунальными (бытовыми) от-ходами в Российской Федерации [8], которая представляет собой систему целей, задач, принципов, приоритетов и направлений дей-ствий, которые должны реализовываться в федеральных и регио-нальных нормативных правовых актах, актах органов местного самоуправления, федеральных целевых, межотраслевых и отрас-левых программах, региональных программах, инвестиционных проектах и комплексах внепрограммных мероприятий, направлен-ных на создание и обеспечение экологически безопасного и эконо-мически эффективного обращения с ТКО.

Реализация направлений действий, предусмотренных комплексной стратегией, должна обеспечить:

- сокращение образования ТКО;
- кратное увеличение объемов ТКО, вовлекаемых в хозяйственный оборот в качестве дополнительных материальных и энергетических ресурсов;
- сокращение объемов ТКО, направляемых на захоронение;
- уменьшение негативного воздействия отходов на окружающую среду и здоровье населения.

Главной целью комплексной стратегии является предотвращение вредного воздействия ТКО на здоровье человека и окружающую среду, а также вовлечение компонентов, содержащихся в отходах (органических веществ, металлолома, бумаги, стеклянной и пластиковой тары и др.), в хозяйственный оборот в качестве дополнительных источников сырья и материалов для производства товаров (продукции), выполнения работ, оказания услуг или для получения энергии.

7.3. Радиоактивные отходы

В соответствии с Федеральным законом № 170 «Об использовании атомной энергии» (170-ФЗ от 21 ноября 1995 г.) [16] **радиоактивные отходы** (РАО) – это не подлежащие дальнейшему использованию материалы и вещества, а также оборудование, изделия (в том числе отработавшие источники ионизирующего излучения), содержание радионуклидов в которых превышает уровни, установленные в соответствии с критериями, установленными Правительством Российской Федерации. Абзац приведен в редакции, введенной в действие с 15 июля 2011 г. Федеральным законом «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ [19].

В соответствии со статьей 4 Федерального закона № 170 [16] радиоактивные отходы подразделяются на следующие виды:

Удаляемые радиоактивные отходы – радиоактивные отходы, для которых риски, связанные с радиационным воздействием, иные риски, а также затраты, связанные с извлечением таких радиоактивных отходов из пункта хранения радиоактивных отходов, последующим обращением с ними, в том числе захоронением, не превышают риски и затраты, связанные с захоронением таких радиоактивных отходов в месте их нахождения;

Особые радиоактивные отходы – радиоактивные отходы, для которых риски, связанные с радиационным воздействием, иные риски, а также затраты, связанные с извлечением таких радиоактивных отходов из пункта хранения радиоактивных отходов, последующим обращением с ними, в том числе захоронением, превышают риски и затраты, связанные с захоронением таких радиоактивных отходов в месте их нахождения.

Удаляемые радиоактивные отходы с целью их захоронения классифицируются по следующим признакам:

- ❖ в зависимости от периода полураспада содержащихся в радиоактивных отходах радионуклидов:
 - долгоживущие радиоактивные отходы;
 - короткоживущие радиоактивные отходы;
- ❖ в зависимости от удельной активности:
 - высокоактивные радиоактивные отходы;
 - среднеактивные радиоактивные отходы;
 - низкоактивные радиоактивные отходы;
 - очень низкоактивные радиоактивные отходы;
- ❖ в зависимости от агрегатного состояния:
 - жидкие радиоактивные отходы;
 - твердые радиоактивные отходы;
 - газообразные радиоактивные отходы;
- ❖ в зависимости от содержания ядерных материалов:
 - радиоактивные отходы, содержащие ядерные материалы;
 - радиоактивные отходы, не содержащие ядерных материалов;
- ❖ отработавшие закрытые источники ионизирующего излучения;
- ❖ радиоактивные отходы, образовавшиеся при добыче и переработке урановых руд;
- ❖ радиоактивные отходы, образовавшиеся при осуществлении не связанных с использованием атомной энергии видов деятельности по добыче и переработке минерального и органического сырья с повышенным содержанием природных радионуклидов.

Согласно Санитарным правилам обращения с радиоактивными отходами (СПОРО-2002) [12] отходы, содержащие техногенные радионуклиды, относятся к РАО, если сумма отношений удельных активностей (для газообразных отходов сумма отношений объемных активностей) техногенных радионуклидов в отхо-

дах к их предельным значениям, приведенным в приложении 5 к «Основным санитарным правилам обеспечения радиационной безопасности» (ОСПОРБ-99/2010) [13], превышает 1. При невозможности определения суммы отношений удельных активностей радионуклидов в отходах к их предельным значениям отходы, содержащие техногенные радионуклиды, относятся к РАО, если удельная активность радионуклидов в отходах превышает:

– для твердых отходов:

1 Бк/г – для альфа-излучающих радионуклидов;

100 Бк/г – для бета-излучающих радионуклидов;

– для жидких отходов:

0,05 Бк/г – для альфа-излучающих радионуклидов,

0,5 Бк/г – для бета-излучающих радионуклидов.

Отходы с повышенным содержанием природных радионуклидов относятся к РАО в случае, если выполняются следующие условия:

– для твердых отходов:

$A_{Ra} + 1,3A_{Th} + 0,09A_K > 10$ Бк/г,

– для жидких отходов:

$A_U + 2,14A_{Th} > 0,13$ Бк/г,

где:

A_{Ra} – удельная активность ^{226}Ra , Бк/г;

A_{Th} – удельная активность ^{232}Th , Бк/г;

A_K – удельная активность ^{40}K , Бк/г;

A_U – удельная активность ^{238}U , Бк/г.

Предполагается, что радионуклиды ^{226}Ra и ^{238}U в отходах находятся в радиоактивном равновесии со своими дочерними радионуклидами.

Радиоактивные отходы образуются [12]:

➤ при эксплуатации и выводе из эксплуатации объектов ядерного топливного цикла и других радиационных объектов;

➤ при использовании радиоактивных веществ и радионуклидных источников в производственных, научных и медицинских организациях;

➤ при реабилитации территорий, загрязненных радиоактивными веществами;

➤ при радиационных авариях;

➤ при обращении с материалами и изделиями с повышенным содержанием природных радионуклидов;

➤ при осуществлении видов деятельности, приводящих к концентрированию природных радионуклидов в образующихся отходах.

По *агрегатному состоянию* РАО подразделяются на следующие виды:

- жидкие отходы – не подлежащие дальнейшему использованию органические и неорганические жидкости, пульпы и шламы;

- твердые отходы – отработавшие свой ресурс радионуклидные источники, не предназначенные для дальнейшего использования материалы, изделия, оборудование, биологические объекты, грунт, а также отвержденные жидкие РАО;

- газообразные отходы – не подлежащие использованию газообразные смеси, содержащие радиоактивные газы и (или) аэрозоли, образующиеся при производственных процессах.

По *удельной активности твердые РАО*, содержащие техногенные радионуклиды, за исключением отработавших закрытых радионуклидных источников, подразделяются на четыре категории:

- 1) очень низкоактивные;
- 2) низкоактивные;
- 3) среднеактивные;
- 4) высокоактивные.

По *удельной активности жидкие РАО* подразделяются на три категории:

- 1) низкоактивные;
- 2) среднеактивные;
- 3) высокоактивные.

В табл. 7.1 [12] приведена классификация жидких и твердых радиоактивных отходов по удельной активности. В случае, когда по приведенным в таблице характеристикам РАО относятся к разным категориям, для них устанавливается наиболее высокое из полученных значений категории отходов.

Твердые РАО, содержащие природные радионуклиды, относятся к *очень низкоактивным* отходам, жидкие РАО, содержащие природные радионуклиды, относятся к *низкоактивным* отходам. Отработавшие закрытые радионуклидные источники, не подлежащие дальнейшему использованию, рассматриваются как отдельная категория РАО.

Таблица 7.1

Классификация жидких и твердых радиоактивных отходов

Категория отходов	Удельная активность, кБк/кг			
	третий	бета-излучающие радионуклиды (исключая тритий)	альфа-излучающие радионуклиды (исключая трансурановые)	транс-урановые радионуклиды
Твердые РАО				
Очень низко-активные	до 10^7	до 10^3	до 10^2	до 10
Низко-активные	от 10^7 до 10^8	от 10^3 до 10^4	от 10^2 до 10^3	от 10 до 10^2
Средне-активные	от 10^8 до 10^{11}	от 10^4 до 10^7	от 10^3 до 10^6	от 10^2 до 10^5
Высоко-активные	более 10^{11}	более 10^7	более 10^6	более 10^5
Жидкие РАО				
Низко-активные	до 10^4	до 10^3	до 10^2	до 10
Средне-активные	от 10^4 до 10^8	от 10^3 до 10^7	от 10^2 до 10^6	от 10 до 10^5
Высоко-активные	более 10^8	более 10^7	более 10^6	более 10^5

Таблица 7.2

Классификация твердых РАО по уровню поверхностного радиоактивного загрязнения [12]

Категория РАО	Уровень поверхностного радиоактивного загрязнения, част/(см·мин)	
	бета-излучающие радионуклиды	альфа-излучающие радионуклиды
Очень низкоактивные	от 500 до 10^3	от 50 до 10^2
Низкоактивные	от 10^3 до 10^4	от 10^2 до 10^3
Среднеактивные	от 10^4 до 10^7	от 10^3 до 10^6
Высокоактивные	более 10^7	более 10^6

Для предварительной сортировки твердых РАО рекомендуется использование критериев по уровню радиоактивного загрязнения (табл. 7.2) и по мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения на расстоянии 0,1 м от поверхности при соблюдении условий измерения в соответствии с утвержденными методиками:

– очень низкоактивные РАО – от 0,001 мЗв/ч до 0,03 мЗв/ч;

- низкоактивные РАО – от 0,03 мЗв/ч до 0,3 мЗв/ч;
- среднеактивные РАО – от 0,3 мЗв/ч до 10 мЗв/ч;
- высокоактивные РАО – более 10 мЗв/ч.

Необходимо подчеркнуть, что при обращении с РАО, помимо их агрегатного состояния и удельной активности, должны учитываться и другие их физические и химические характеристики, в частности взрыво- и огнеопасность, органические или неорганические и т.п.

В последние десятилетия проблема утилизации радиоактивных отходов является одной из наиболее актуальных в плане безопасности окружающей среды, ведь объемы радиоактивных отходов в настоящее время насчитывают многие тысячи тонн в год. И все они требуют соответствующего обращения. Часто ошибочно считают синонимами два понятия: «радиоактивные отходы» и «отработавшее ядерное топливо». Необходимо различать эти понятия. *Радиоактивные отходы* – это материалы, использование которых не предусматривается. *Отработавшее ядерное топливо* представляет собой тепловыделяющие элементы, содержащие остатки ядерного топлива и множество продуктов деления, в основном ^{137}Cs и ^{90}Sr , широко применяемые в промышленности, сельском хозяйстве, медицине и научной деятельности. Поэтому оно является ценным ресурсом, в результате переработки которого получают свежее ядерное топливо и изотопные источники.

Радиоактивные элементы, содержащиеся в ядерных отходах, излучают ионизирующую радиацию. Ионизация означает, что в результате излучения происходит перераспределение электрического заряда в клетках. Такое перераспределение вызывает ряд химических реакций в органических тканях, что может привести как к мутагенезу, так и к массовой гибели клеток. Определенные дозы ионизирующей радиации оказывают интенсивное пагубное воздействие на организм человека, который спустя время не в состоянии с ней справиться. Наиболее опасными последствиями являются канцерогенные и мутагенные эффекты, которые отрицательно сказываются на будущем поколении. Кроме того, радиоактивное воздействие приводит к нарушению обмена веществ в организме и ослаблению иммунной системы. Вероятность возникновения болезни зависит от уровня радиоактивности и продолжительности радиационного воздействия на человека. При этом все виды радиоактивных отходов – от низкорadioактивных до высокоradioактивных – наносят вред здоровью человека [1].

Способы утилизации РАО зависят от категории и класса подобных отходов – низкоактивные, среднеактивные и высокоактивные. Наиболее простой является утилизация первых двух классов. В зависимости от своего химического состава радиоактивные отходы делятся на короткоживущие (с малым периодом полураспада) и долгоживущие (с большим периодом полураспада). В первом случае самым простым способом утилизации будет временное хранение радиоактивных материалов на специальных площадках в герметических контейнерах. После определенного промежутка времени, когда происходит распад опасных веществ, оставшиеся материалы уже не представляют опасности и могут быть утилизированы как обычный мусор. Именно так поступают с большей частью технических и медицинских источников радиоактивного излучения, которые содержат только короткоживущие изотопы с периодом полураспада, составляющим несколько лет. В качестве контейнеров для временного хранения в этом случае обычно используют стандартные металлические бочки объемом 200 литров. При этом низко и среднеактивные отходы заливают цементом или битумом для предотвращения их попадания за пределы емкости.

Процедура утилизации отходов атомных электростанций гораздо более сложная и требует повышенного внимания. Такая процедура производится только на специальных заводах, которых в настоящее время в мире немного. Здесь при помощи специальных технологий химической обработки производится извлечение большей части радиоактивных веществ для их повторного применения. Наиболее современные способы с использованием ионообменных мембран позволяют вновь использовать до 95 % всех радиоактивных материалов. Однако полностью дезактивировать их пока невозможно. Поэтому на следующей стадии утилизации производится подготовка отходов к длительному хранению. А учитывая тот факт, что отходы АЭС имеют длительный период полураспада, такое хранение можно назвать практически «вечным». Долговременное хранение РАО требует консервации отходов в форме, которая не будет вступать в реакции и разрушаться на протяжении длительного времени. Одним из способов достижения подобного состояния является витрификация (или остеклование) – процесс включения отходов высокого уровня активности в боросиликатное стекло. Остекловывание предназначено для фиксации радионуклидов в неподвижном состоянии в нерастворимой, стабильной матрице, готовой для захоронения.

7.4. Медицинские отходы

Медицинские отходы – материалы, вещества, изделия, утратившие частично или полностью свои первоначальные потребительские свойства в ходе осуществления медицинских манипуляций, проводимых при лечении или обследовании людей в медицинских учреждениях.

Медицинские отходы требуют к себе постоянного внимания, что обусловлено наличием в них возбудителей различных инфекционных заболеваний, токсических, а нередко и радиоактивных веществ. Длительность выживания патогенных микроорганизмов в таких отходах достаточно велика. Так, если в 1 г бытовых отходов может содержаться 0,1-1 млрд микроорганизмов, то в медицинских это число возрастает до 200-300 млрд [20].

Все лечебно-профилактические учреждения (ЛПУ) в результате своей деятельности образуют различные по фракционному составу и степени опасности отходы, поэтому в каждом из них должна быть организована система сбора, временного хранения, обработки и транспортировки отходов.

Структура отходов многопрофильных ЛПУ:

- пищевые отходы 28 %;
- лекарственные средства и препараты 0,1 %;
- бумага, картон 23 %;
- металл, в том числе цветной 0,1 %;
- полимерные материалы 5 %;
- гипс, строительные материалы 0,9 %;
- стекло 0,6 %;
- биологические материалы 0,2 %;
- текстиль 42 %;
- резина 0,1 %.

В соответствии с Санитарно-эпидемиологическими требованиями к обращению с медицинскими отходами [14] медицинские отходы в зависимости от степени их эпидемиологической, токсикологической и радиационной опасности, а также негативного воздействия на среду обитания подразделяются на пять классов опасности (табл. 7.3):

класс А – эпидемиологически безопасные отходы, приближенные по составу к твердым бытовым (коммунальным) отходам;

класс Б – эпидемиологически опасные отходы;

класс В – чрезвычайно эпидемиологически опасные отходы;

класс Г – токсикологически опасные отходы 1-4 классов опасности;

класс Д – радиоактивные отходы.

Таблица 7.3

Классификация медицинских отходов [14]

Класс опасности	Характеристика морфологического состава
Класс А (эпидемиологически безопасные отходы, по составу приближенные к твердым бытовым (коммунальным) отходам)	Отходы, не имеющие контакта с биологическими жидкостями пациентов, инфекционными больными. Канцелярские принадлежности, упаковка, мебель, инвентарь, потерявшие потребительские свойства. Смет от уборки территории и т.д. Пищевые отходы центральных пищеблоков, а также всех подразделений организации, осуществляющей медицинскую и/или фармацевтическую деятельность, кроме инфекционных, в том числе фтизиатрических
Класс Б (эпидемиологически опасные отходы)	Инфицированные и потенциально инфицированные отходы. Материалы и инструменты, предметы, загрязненные кровью и/или другими биологическими жидкостями. Патологоанатомические отходы. Органические операционные отходы (органы, ткани и т.д.). Пищевые отходы из инфекционных отделений. Отходы из микробиологических, клинико-диагностических лабораторий, фармацевтических, иммунобиологических производств, работающих с микроорганизмами 3-4 групп патогенности. Биологические отходы вивариев. Живые вакцины, непригодные к использованию
Класс В (чрезвычайно эпидемиологически опасные отходы)	Материалы, контактировавшие с больными инфекционными болезнями, которые могут привести к возникновению чрезвычайных ситуаций в области санитарно-эпидемиологического благополучия населения и требуют проведения мероприятий по санитарной охране территории. Отходы лабораторий, фармацевтических и иммунобиологических производств, работающих с микроорганизмами 1-2 групп патогенности. Отходы лечебно-диагностических подразделений фтизиатрических стационаров (диспансеров), загрязненные мокротой пациентов, отходы микробиологических лабораторий, осуществляющих работы с возбудителями туберкулеза
Класс Г (токсикологически опасные отходы 1-4 классов опасности)	Лекарственные (в том числе цитостатики), диагностические, дезинфицирующие средства, не подлежащие использованию. Ртутьсодержащие предметы, приборы и оборудование. Отходы сырья и продукции фармацевтических производств. Отходы от эксплуатации оборудования, транспорта, систем освещения и др.
Класс Д (радиоактивные отходы)	Все виды отходов в любом агрегатном состоянии, в которых содержание радионуклидов превышает допустимые уровни, установленные нормами радиационной безопасности

Сбор отходов **класса А** осуществляется в многоразовые емкости или одноразовые пакеты. *Цвет пакетов может быть любой, за исключением желтого и красного.* Одноразовые пакеты располагаются на специальных тележках или внутри многоразовых контейнеров. Многоразовая тара после опорожнения подлежит мытью и дезинфекции. Порядок мытья и дезинфекции многоразовой тары определяется в соответствии со схемой обращения отходов в каждой конкретной организации. Транспортирование отходов класса А организуется с учетом схемы санитарной очистки, принятой для данной территории, в соответствии с требованиями санитарного законодательства к содержанию территорий населенных мест и обращению с отходами производства и потребления.

Отходы **класса Б** подлежат обязательному обеззараживанию (дезинфекции)/обезвреживанию. Выбор метода обеззараживания (обезвреживания) определяется возможностями организации, осуществляющей медицинскую и/или фармацевтическую деятельность, и выполняется при разработке схемы обращения с медицинскими отходами. В случае отсутствия в организации, осуществляющей медицинскую и/или фармацевтическую деятельность, участка по обеззараживанию/обезвреживанию отходов класса Б или централизованной системы обезвреживания медицинских отходов, принятой на административной территории, отходы класса Б обеззараживаются персоналом данной организации в местах их образования химическими/физическими методами. Отходы класса Б собираются в одноразовую мягкую (пакеты) или твердую (непрокальваемую) *упаковку (контейнеры) желтого цвета или имеющие желтую маркировку.*

В случае применения аппаратных методов обеззараживания в организации, осуществляющей медицинскую и/или фармацевтическую деятельность, на рабочих местах допускается сбор отходов класса Б в общие емкости (контейнеры, пакеты) использованных шприцев в неразобранном виде с предварительным отделением игл (для отделения игл необходимо использовать иглосъемники, иглодеструкторы, иглоотсекатели), перчаток, перевязочного материала и т.д.

Работа по обращению с медицинскими отходами **класса В** организуется в соответствии с требованиями к работе с возбудителями 1-2 групп патогенности, к санитарной охране территории и профилактике туберкулеза. Отходы класса В подлежат обязатель-

ному обеззараживанию (дезинфекции) физическими методами (термические, микроволновые, радиационные и др.). Применение химических методов дезинфекции допускается только для обеззараживания пищевых отходов и выделений больных, а также при организации первичных противоэпидемических мероприятий в очагах. Выбор метода обеззараживания (дезинфекции) осуществляется при разработке схемы сбора и удаления отходов. Вывоз необеззараженных отходов класса В за пределы территории организации не допускается. Отходы класса В собирают в одноразовую мягкую (пакеты) или твердую (непрокальваемую) *упаковку (контейнеры) красного цвета или имеющую красную маркировку.*

После аппаратных способов обеззараживания с применением физических методов и изменения внешнего вида отходов, исключающего возможность их повторного применения, отходы классов Б и В могут накапливаться, временно храниться, транспортироваться, уничтожаться и захораниваться совместно с отходами класса А. Упаковка обеззараженных медицинских отходов классов Б и В должна иметь маркировку, свидетельствующую о проведенном обеззараживании отходов.

Использованные ртутьсодержащие приборы, лампы (люминесцентные и другие), оборудование, относящиеся к медицинским отходам *класса Г*, собираются в маркированные емкости с плотноприлегающими крышками *любого цвета (кроме желтого и красного)*, которые хранятся в специально выделенных помещениях. Сбор, временное хранение отходов цитостатиков и генотоксических препаратов и всех видов отходов, образующихся в результате приготовления их растворов (флаконы, ампулы и др.), относящихся к медицинским отходам класса Г, без дезактивации запрещается. Отходы подлежат немедленной дезактивации на месте образования с применением специальных средств. Также необходимо провести дезактивацию рабочего места. Работы с такими отходами должны производиться с применением специальных средств индивидуальной защиты и осуществляться в вытяжном шкафу. Лекарственные, диагностические, дезинфицирующие средства, не подлежащие использованию, собираются в одноразовую маркированную упаковку любого цвета (кроме желтого и красного).

Сбор и временное хранение отходов класса Г осуществляется в маркированные емкости в соответствии с требованиями нормативных документов в зависимости от класса опасности отходов.

Сбор, хранение, удаление отходов **класса Д** производится в соответствии с требованиями законодательства Российской Федерации к обращению с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений, нормами радиационной безопасности.

7.5. Основные экологические проблемы, возникающие при обращении с отходами

В 2017 г. на территории Российской Федерации удельный показатель общего объема образования отходов на единицу ВВП составил 98,3 т на 1 млн рублей. С 2006 г. для страны характерна устойчивая тенденция увеличения объемов образования отходов производства и потребления (табл. 7.4). При этом общее количество образовавшихся отходов к 2017 г. значительно выросло (на 76,8 %), а количество опасных отходов (I – IV классов опасности) снизилось (на 22,9 %) [6].

Основную долю в общем количестве отходов по России составляют отходы V и IV классов опасности (практически неопасные и малоопасные): в 2017 г. количество таких отходов составило 98,27 % и 1,45 % от общего объема образования отходов соответственно. Количество отходов III класса опасности составило 0,275 %, II класса опасности – 0,004 %, I класса опасности – 0,0003 % от общего объема образования отходов. Больше всего отходов образовалось при добыче и переработке полезных ископаемых – 89-93 % от общего количества. Доля отходов обрабатывающих производств в общем объеме образования отходов составляла около 4,4-10 % от общего количества отходов; на сельское, лесное хозяйство, охоту, рыболовство и рыбоводство приходилось около 1 %.

Таблица 7.4

Динамика образования отходов производства и потребления в России, млн т

Показатель	Годы								
	2006	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Отходов, всего	3519	3735	4303	5008	5153	5168	5060	5441	6221
в т.ч. опасных	140	114	120	114	117	124	110	98	108

**Структура объема образования отходов по классам опасности
в федеральных округах Российской Федерации (2017 г.) [6]**

Федеральные округа	Доля классов опасности отходов, %			
	I и II классы опасности	III класс опасности	IV класс опасности	V класс опасности
Центральный федеральный округ	0,013	3,767	7,157	89,063
Северо-Западный федеральный округ	0,002	0,329	2,584	97,085
Южный федеральный округ	0,036	2,543	27,132	70,288
Северо-Кавказский федеральный округ	0,124	2,358	21,103	76,415
Приволжский федеральный округ	0,016	1,684	6,111	92,189
Уральский федеральный округ	0,014	0,573	11,419	87,995
Сибирский федеральный округ	0,003	0,029	0,197	99,772
Дальневосточный федеральный округ	0,0003	0,0250	0,7197	99,2550
Российская Федерация в целом	0,004	0,275	1,453	98,268

Следует отметить, что максимальные объемы образования отходов в последние годы приходятся на Сибирский федеральный округ (в 2017 г. около 71 % от общего количества в стране) – табл. 7.5. Это связано, главным образом, с добычей угля и образованием при этом большого количества вскрышных пород, относящихся к отходам V класса опасности.

По данным Росприроднадзора, количество утилизированных отходов производства и потребления в 2017 г. составило около 52 % от общего количества образованных отходов. По степени утилизации лидирующие позиции занимали отходы добычи полезных ископаемых (до 93 % от общего количества утилизированных отходов). Намного ниже доля утилизированных отходов обрабатывающих производств – 4 %, а суммарный вклад остальных видов деятельности (сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство; обеспечение электрической энергией, газом и паром; водоснабжение, водоотведение, организация сбора и утилизации отходов; строительство и др.) – 3 %.

В наибольшей степени подверглись утилизации отходы V класса опасности – около 98 % от общего объема утилизированных отходов. Для отходов IV класса опасности данная величина составила 1,4 %; III класса – 0,3 %; I и II классов – 0,007 %.

При этом процессам обезвреживания в 2017 г. подверглись только 0,3 % образованных отходов.

Данные табл. 7.6 показывают динамику объемов утилизации и обезвреживания отходов по классам опасности.

Таблица 7.6

Утилизация и обезвреживание отходов производства и потребления по классам опасности в 2010-2017 гг., млн т [6]

Класс опасности	2010	2013	2014	2015	2016	2017
I	0,10	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01
II	0,43	0,44	0,37	0,35	0,35	0,29
III	11,9	17,1	17,4	19,5	18,5	16,0
IV	71,1	84,5	86,0	73,9	67,6	52,6
V	1654,6	1941,5	2253,4	2591,3	3157,2	3195,6

Согласно требованиям в области охраны окружающей среды при обращении с отходами производства и потребления, изложенным в статье 51 Федерального закона «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 31.12.2017) [18], отходы производства и потребления, радиоактивные отходы подлежат сбору, накоплению, утилизации, обезвреживанию, транспортировке, хранению и захоронению, условия и способы которых должны быть безопасными для окружающей среды и регулироваться законодательством Российской Федерации.

Запрещается:

- сброс отходов производства и потребления, в том числе радиоактивных отходов, в поверхностные и подземные водные объекты, на водосборные площади, в недра и на почву;

- размещение отходов I–IV классов опасности и радиоактивных отходов на территориях, прилегающих к городским и сельским поселениям, в лесопарковых, курортных, лечебно-оздоровительных, рекреационных зонах, на путях миграции животных, вблизи нерестилищ и в иных местах, в которых может быть создана опасность для окружающей среды, естественных экологических систем и здоровья человека;

– захоронение отходов I–IV классов опасности и радиоактивных отходов на водосборных площадях подземных водных объектов, используемых в качестве источников водоснабжения, в бальнеологических целях, для извлечения ценных минеральных ресурсов;

– ввоз отходов I–IV классов опасности в Российскую Федерацию в целях их захоронения и обезвреживания;

– ввоз радиоактивных отходов в Российскую Федерацию в целях их хранения, переработки или захоронения, за исключением случаев, установленных настоящим Федеральным законом и Федеральным законом «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» № 190-ФЗ от 11.07.2011 г. [19];

– захоронение в объектах размещения отходов производства и потребления продукции, утратившей свои потребительские свойства и содержащей озоноразрушающие вещества, без рекуперации данных веществ из указанной продукции в целях их восстановления для дальнейшей рециркуляции (рециклирования) или уничтожения.

Организация упорядоченного обращения отходов производства и потребления, то есть их сбора, удаления, обезвреживания, переработки, использования, уничтожения и т.п., превратилась в последние годы в одну из наиболее острых экологических проблем. Указанная острота определяется в первую очередь:

➤ двойственным характером этой проблемы, то есть необходимостью решать задачи как охраны окружающей среды, так и задачи ресурсосбережения, переработки и вторичного (повторного) использования отходов;

➤ перманентным и кумулятивным накоплением слаборазлагающихся отходов в окружающей среде, что требует постоянного отвода под места их захоронения все новых земельных участков, а также рекультивации нарушенных (загрязненных, деградировавших) площадей на закрывающихся полигонах и свалках отходов;

➤ территориальными особенностями рассматриваемой проблемы, связанными с тем, что основной объем промышленных отходов концентрируется в относительно небольшом числе регионов, то есть в местах добычи полезных ископаемых, а также в районах металлургических, химических, нефтехимических, деревообрабатывающих, целлюлозно-бумажных и некоторых других про-

изводств. Кроме того, многие виды отходов (в частности ТКО) образуются преимущественно в городах, но вывозятся и накапливаются на окраинах поселений или прилегающих территориях.

Сконцентрированные в отвалах, терриконах, несанкционированных свалках отходы являются источником загрязнения атмосферного воздуха, подземных и поверхностных вод, почв и растительности.

Изменение структуры производства и потребления приводит не только к росту количества образующихся отходов, но и усложняет их состав. Норма накопления отходов изменяется, отражая состояние снабжения населения товарами, и в то же время она в значительной мере зависит от местных условий.

Согласно сложившейся практике, опасные отходы, образовавшиеся в процессе производственной деятельности и не подлежащие переработке, вывозятся для захоронения на полигоны токсичных отходов. Твердые коммунальные отходы (ТКО), образующиеся в процессе жизнедеятельности населения, считаются безопасными в обращении и вывозятся на свалки бытовых отходов. При этом не учитывается тот факт, что все большую часть в потоке коммунальных отходов составляют компоненты, представляющие значительную опасность для окружающей среды и населения. Попадая на полигон, такие компоненты становятся потенциальным источником загрязнения, представляющим реальную угрозу природной среде и человеку. Через отходы, размещенные на полигоне, просачивается 1/3 – 1/4 годового количества осадков. Вода вымывает содержащиеся в отходах токсичные вещества. Фильтрат содержит широкий спектр компонентов-загрязнителей, таких как фенолы, роданиды, синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), тяжелые металлы и др. Уровень загрязнений в фильтрате в большинстве случаев в 10–20 раз превышает показатели, характерные для бытовых сточных вод. Так, содержание взвешенных веществ может колебаться от 800 мг/л до 1600 мг/л, меди – от 0,1 мг/л до 9 мг/л, никеля – до 0,8 мг/л, свинца – до 0,37 мг/л [2].

Значительное негативное воздействие полигон оказывает на водные объекты, находящиеся на прилегающей территории. Данное воздействие может проявляться в случае попадания фильтрата, скапливающегося в основании полигона, в грунтовые и поверхностные воды. Под воздействием фильтрата замещаются первичные породы в зоне водонасыщения, изменяются их физико-механиче-

ские свойства. Интенсивное локальное загрязнение на участках выхода фильтрата испытывают и почвы.

Опасность, исходящая от полигонов захоронения отходов, не ограничивается временем их активной эксплуатации, а сохраняется еще длительное время. Иногда их пагубное влияние через 20–30 лет после закрытия только начинается. Поэтому сегодня в мире большое внимание уделяется предотвращению попадания опасных компонентов коммунальных отходов на свалки.

Перечень ряда опасных отходов, содержащихся в потоке ТКО, представлен в табл. 7.7 [4].

Многие вещества, входящие в состав отходов, обладают эффектом усиления действия одного вещества в присутствии другого. В результате вредное воздействие отходов суммируется. Суммарная концентрация таких веществ, как правило, превышает предельно допустимую концентрацию каждого вещества в отдельности в десятки и сотни раз.

Таблица 7.7

Ряд опасных компонентов, входящих в состав ТКО

Вид отходов	Основные опасные компоненты	Опасные свойства
Отработанные элементы питания (батареи и аккумуляторы)	Свинец, ртуть, кадмий	Токсичность
Остатки минеральных масел	Углеводороды	Токсичность, пожароопасность
Краски и лаки	Углеводороды, тяжелые металлы	Токсичность, пожароопасность
Ртутные лампы и термометры	Ртуть	Токсичность
Остатки лекарственных и косметических средств	Масла, эфиры, пигменты, галогены, тяжелые металлы	Токсичность, пожароопасность, высокая реакционная способность
Средства защиты растений	Пестициды, инсектициды	Токсичность
Остатки чистящих и моющих средств	Кислоты, щелочи, углеводороды, пигменты	Токсичность, пожароопасность
Обработанная древесина	Инсектициды, фунгициды	Токсичность, пожароопасность

Токсичные вещества проникают в подземные воды с образованием в водоносных горизонтах питьевого водоснабжения обширных и контрастных гидрохимических полей разнообразных токсических веществ.

При хранении все отходы претерпевают изменения, обусловленные как внутренними физико-химическими процессами, так и влиянием внешних условий. В результате этих превращений образуются сотни новых, зачастую не существовавших ранее в природе веществ, часто являющихся ядовитыми, что позволяет рассматривать свалки и полигоны как своеобразные «химические реакторы», производящие токсичные вещества.

Преобладание удаления ТКО посредством захоронения и нарушение экологических и санитарно-эпидемиологических требований при их размещении ведет к следующим основным проблемам, связанным с негативным воздействием на окружающую среду и среду обитания:

- захламление земель;
- загрязнение природных вод (подземных и поверхностных), почвенного покрова и атмосферного воздуха токсичными веществами, мигрирующими из тела полигона;
- «биологическое загрязнение» территорий, прилегающих к полигонам;
- негативное воздействие полигонов на все компоненты экосистем при их горении.

Значимое негативное воздействие на окружающую среду оказывают стихийные, относительно мелкие, но многочисленные и трудно контролируемые свалки отходов.

Проблема экологически безопасного обращения с твердыми коммунальными отходами является чрезвычайно сложной, так как она относится ко всем сферам жизни общества. Решить проблему утилизации и добиться снижения образования отходов невозможно путем простого ужесточения экологических стандартов или внедрения новых технологий. Необходимость учета социальных, экономических и технологических вопросов привела к разработке концепции комплексного управления отходами [7].

Основа концепции комплексного управления отходами состоит в том, что твердые коммунальные отходы (ТКО) состоят из различных компонентов, которые не должны смешиваться между собой, что позволит утилизировать их наиболее экономичными и экологически приемлемыми способами.

Опыт многих стран показывает, что при разработке эффективной системы управления отходами необходимо придерживаться определенной иерархии. В первую очередь должны приниматься меры по сокращению количества образующихся отходов; про-

водиться мероприятия по их вторичному использованию и переработке оставшейся части, и в самую последнюю очередь – мероприятия по утилизации или захоронению тех отходов, возникновения которых не удалось избежать и которые не поддаются переработке во вторсырье. Под сокращением понимается не только уменьшение общего количества отходов, но и уменьшение их токсичности и других вредных свойств. Вторичная переработка не только уменьшает площадь, занимаемую полигонами, но и позволяет вовлечь отходы во вторичный оборот, улучшает эффективность мусоросжигания путем удаления из общего потока отходов несгораемых материалов. В настоящее время разработаны и широко применяются в зарубежных странах эффективные с экологической точки зрения технологии переработки и обезвреживания практически всех опасных отходов. Захоронение на полигонах продолжает оставаться необходимым для отходов, не поддающихся вторичной переработке, несгораемых или сгорающих с выделением токсичных веществ.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляют собой отходы производства и потребления?
2. Какой федеральный закон является основным в сфере обращения с отходами в РФ?
3. В чем суть следующих понятий: «обращение с отходами», «утилизация отходов», «рециклинг отходов»?
4. Объекты размещения отходов. Перечислите их и дайте краткую характеристику.
5. Отходы производства. Перечислите основные виды и дайте их характеристику.
6. Отходы потребления. Перечислите основные виды и дайте их характеристику.
7. Основные классификации отходов производства и потребления. Какие критерии положены в их основу?
8. Какие отходы относят к опасным отходам? Приведите классификацию отходов по степени опасности.
9. Что представляет собой федеральный классификационный каталог отходов (ФККО)?
10. Какие отходы относят к твердым коммунальным отходам (ТКО)?
11. Экологические проблемы, возникающие при обращении с ТКО.
12. Радиоактивные отходы. Классификация радиоактивных отходов.

13. Особенности обращения с радиоактивными отходами.
14. Экологические проблемы, возникающие при обращении с радиоактивными отходами.
15. Какие отходы относят к медицинским? Приведите классификацию медицинских отходов по степени опасности.
16. Особенности обращения с медицинскими отходами.
17. Экологические проблемы, возникающие при обращении с медицинскими отходами.
18. Обозначьте основные проблемы образования и утилизации отходов в Российской Федерации в настоящее время.
19. В чем суть Концепции комплексного управления твердыми коммунальными отходами (ТКО)?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 7

1. Алимкулов С.О., Алматова У.И., Эгамбердиев И.Б. Отходы – глобальная экологическая проблема. Современные методы утилизации отходов // Молодой ученый. – 2014. – № 21.
2. Аналитический вестник № 23(622) «О реализации Федерального закона «Об отходах производства и потребления». – М., 2016.
3. Базельская конвенция «О контроле за трансграничной перевозкой опасных отходов и их удалением», принята 22 марта 1989 г.
4. Бельдеева, Л. Н. Экологически безопасное обращение с отходами / Л. Н. Бельдеева, Ю. С. Лазуткина, Л. Ф. Комарова; под общ. ред. Л. Ф. Комаровой; лт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2013.
5. ГОСТ-25916-83 «Ресурсы материалы вторичные. Термины и определения».
6. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году». – М.: Минприроды России; НПП «Кадастр», 2018. – 888 с.
7. Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2016 году» / под ред. А.О. Кульбачевского. – М.: ДПиООС; НИИПИ ИГСП, 2017.
8. Комплексная стратегия обращения с твердыми коммунальными (бытовыми) отходами в Российской Федерации, утвержденная приказом Минприроды РФ № 298 от 14.08.2013 г.
9. Порядок ведения Государственного кадастра отходов, утвержденного приказом Минприроды России № 792 от 30 сентября 2011 г.
10. Приказ Росприроднадзора от 20.07.2017 № 359 «О внесении изменений в Федеральный классификационный каталог отходов, утвержденный приказом Росприроднадзора от 22.05.2017 № 242».

11. Приказ Росприроднадзора от 28.11.2017 № 566 «О внесении изменений в Федеральный классификационный каталог отходов, утвержденный приказом Росприроднадзора от 22.05.2017 № 242».
12. Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами (СПОРО-2002) (Санитарные правила СП 2.6.6.1168-02, СПОРО-2002).
13. Санитарные правила 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010)».
14. Санитарно-эпидемиологические требования к обращению с медицинскими отходами (Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.1.7.2790-10).
15. Федеральный закон от 25.11.1994 г. № 49-ФЗ «О ратификации Базельской конвенции».
16. Федеральный закон от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии».
17. Федеральный закон от 24.06.1998 № 89-ФЗ (ред. от 31.12.2017) «Об отходах производства и потребления» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2018).
18. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды».
19. Федеральный закон от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
20. Экологическая безопасность: отходы производства и потребления – электронное мультимедийное уч. пособие / под. ред. К.Ф. Цейтина. – М.: Изд-во «Эльф ИПР», 2016.
21. URL: http://libraryno.ru/category/bezopasnost_zhiznedejatnosti_v_tehnosfere/http://libraryno.ru/sist_zash_sr_ob/ 3.2. Классификация отходов.



URL: <https://pixabay.com/ru/>

Глава 8. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ЭКОСИСТЕМ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ И ХИМИЧЕСКИХ МЕЛИОРАНТОВ



Сельскохозяйственное производство относится к числу основных факторов воздействия на окружающую среду, что обусловлено вовлечением в данную отрасль значительных территорий в большинстве стран мира. С каждым годом увеличивается степень использования земель, интенсивность механизации и мелиорации. Серьезную экологическую проблему представляет также утилизация отходов животноводческих комплексов.

Источником загрязнения окружающей среды нередко становится использование средств химизации земледелия, в частности применение минеральных и органических удобрений, пестицидов, а также мелиорантов. Удобрения, как источник питания и увеличения урожайности, изучают давно, а как фактор, влияющий на состояние экосистем, – сравнительно недавно, отчасти поэтому данный вопрос еще недостаточно изучен.

Отмечая решающую роль агрохимических средств в повышении эффективности сельского хозяйства, нельзя не признать и негативные последствия их использования, такие как загрязнение природных вод соединениями азота, фосфора, калия и другими элементами, входящими в состав удобрений и мелиорантов, и связанный с этим процесс эвтрофикации водоемов; загрязнение почв элементами-примесями, содержащимися в удобрениях и мелиорантах; нарушение физико-химических и биологических свойств почвы; снижение качества получаемой продукции и др.

8.1. Удобрения

Удобрения – вещества, предназначенные для обеспечения растений элементами питания с целью увеличения их урожайности, а также для повышения плодородия почв. На рис. 8.1 приведена общая классификация удобрений.

Минеральные удобрения могут быть *простыми*, содержащими один питательный элемент (азотные, калийные, фосфорные), и *комплексными*, содержащими два и более элементов питания. Микроудобрения включают в себя необходимые для нормального роста и развития растений микроэлементы (Zn, Cu, B, Mn, Mo, Co и др.).



Рис. 8.1. Основные виды удобрений

Необходимо отметить, что помимо основных питательных элементов в удобрениях часто в виде примесей присутствуют и другие элементы (например, тяжелые металлы).

На рис. 8.2 и 8.3 приведены данные по объемам применения минеральных и органических удобрений на территории Российской Федерации в период с 2010 по 2017 год [3].

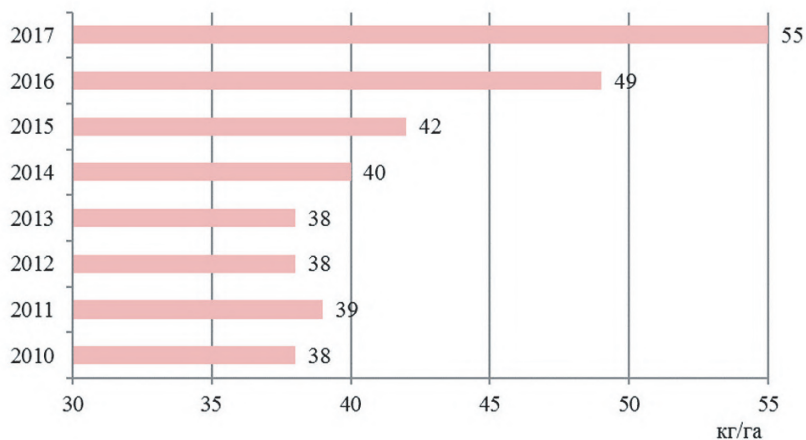


Рис. 8.2. Динамика внесения минеральных удобрений в РФ по годам (2010-2017 гг.)

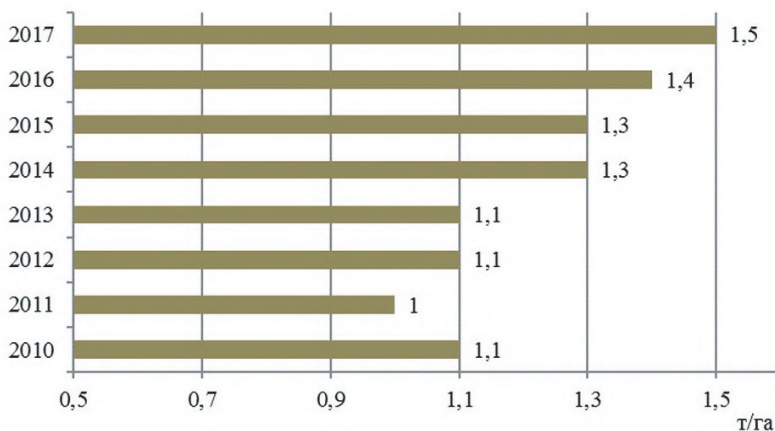


Рис. 8.3. Динамика внесения органических удобрений в РФ по годам (2010-2017 гг.)

Азотные удобрения. Азот играет важную роль в растительных организмах, являясь неотъемлемым элементом всех простых и сложных белков. Входит в состав нуклеиновых кислот (ДНК и РНК) – носителей наследственных свойств живых организмов и играющих большую роль в обмене веществ; в состав хлорофилла, ферментов, гормонов и большинства витаминов. При недостаточном снабжении растений азотом происходит нарушение всех систем их жизнеобеспечения.

Таким образом, азот является незаменимым элементом питания растений, чем и обусловлена необходимость применения азотных удобрений в сельском хозяйстве. Однако при нарушении технологии использования удобрений они оказывают негативное воздействие на окружающую среду, загрязняя все ее компоненты – почву, природные воды, атмосферу, растения. Потери азота из почв довольно значительны и определяются свойствами почвы, природно-климатическими условиями, гидрологическим режимом, формой и дозой удобрения, видом сельскохозяйственной культуры и т.д. Так, потери азота при улетучивании газообразных соединений составляют в среднем 15-25 % от внесенного. В Нечерноземной зоне РФ из почв вымывается в среднем 10-15 кг/га нитратного азота; при этом из супесчаных почв – 20-25 кг/га, а из суглинистых – до 10 кг/га [5].

Основные формы азотных удобрений:

- ❖ нитратные (NaNO_3 – натриевая селитра; $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ – кальциевая селитра);
- ❖ аммонийные ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – сульфат аммония);
- ❖ аммонийно-нитратные (NH_4NO_3 – аммиачная селитра);
- ❖ амидные ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ – мочеви́на, карбамид);
- ❖ аммиачные (NH_3 – безводный жидкий аммиак; $\text{NH}_3 + \text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ – аммиачная вода, водный аммиак).

Фосфорные удобрения. Фосфор, как и азот, является обязательной составной частью живой клетки растений, входя в состав нуклеиновых кислот. Оба эти элемента накапливаются больше всего в репродуктивных органах и в тех органах, где интенсивно идут процессы синтеза органических веществ. Фосфор содержится также в веществах, определяющих направление и скорость биохимических процессов в растениях, – в витаминах, гормонах, ферментах. Велика роль фосфора в процессах дыхания растений и синтеза углеводов – крахмала, сахаров [1].

Потери фосфора из удобрений в окружающую среду, по сравнению с азотом, намного меньше, что обусловлено его малой подвижностью в почве. В связи с этим данный элемент не представляет такой экологической опасности, как азот. При этом потери фосфора чаще всего происходят в результате эрозии почвы. В результате поверхностного смыва почвы с каждого гектара уносится до 10 кг фосфора, при вымывании из почвы потери не превышают 1 кг/га.

Основные формы фосфорных удобрений:

- ❖ водорастворимые: смесь $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ и CaSO_4 – суперфосфат простой; $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – суперфосфат двойной;

- ❖ труднорастворимые фосфаты: $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ – фосфоритная мука; $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ – вивианит;

- ❖ цитрат-растворимые фосфаты: $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – преципитат; термофосфаты (*получают сплавлением природных фосфатов с различными добавками – содой, поташом и сульфатами натрия и калия*); $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaO}$ – томасшлак; обесфторенный фосфат (*получают при гидротермической обработке – спеканием или прокаливанием фосфатного сырья в присутствии паров воды и кремнезема*); полифосфат кальция (*получают нагреванием двойного суперфосфата при 185-300 °С в течение 30 мин*).

Калийные удобрения. Калий наряду с азотом и фосфором относится к главным элементам питания растений. Формы калия в растениях имеют специфические особенности. Если азот и фосфор в растениях содержатся преимущественно в составе органических соединений (чаще всего малоподвижных и нерастворимых в воде), то калий находится в составе исключительно подвижных соединений в ионной форме. До сих пор неизвестно ни одного органического соединения, в состав которого входил бы данный элемент. Калий содержится в основном в цитоплазме и вакуолях клеток; в ядрах и пластидах он отсутствует. Считают, что около 80 % общего содержания калия в растениях находится в клеточном соке. Физиологическая роль калия в жизни растений весьма разнообразна – он способствует нормальному течению фотосинтеза; передвижению углеводов (сахаров, крахмала) и их накоплению в репродуктивных органах; синтезу белков и др.

Потери калия при применении удобрений более значительны, чем фосфора, что обусловлено его высокой подвижностью в почвах. Среднее вымывание калия из пахотных суглинистых почв

Нечерноземной зоны РФ с атмосферными осадками составляет около 7 кг/га, а из песчаных почв – около 12 кг/га [6].

Основные формы калийных удобрений:

- ❖ хлористый калий – KCl ;
- ❖ сернокислый калий – K_2SO_4 ;
- ❖ 40 %-ная калийная соль (*получают механическим смешиванием хлористого калия с тонкоразмолотым сильвинитом или каинитом*);

- ❖ сильвинит – осадочная горная порода, состоящая из чередующихся слоев галита и сильвина – $nNaCl + mKCl$;

- ❖ каинит – двойная соль магния и калия $KCl \cdot MgSO_4 \cdot 3H_2O$;

- ❖ калимагнезия – $K_2SO_4 \cdot MgSO_4$.

Комплексные удобрения. В зависимости от содержания компонентов различают *двойные* ($P + K$; $N + P$; $N + K$) и *тройные* ($N + P + K$) комплексные удобрения. По способу производства эти удобрения подразделяют на сложные, сложно-смешанные (комбинированные) и смешанные, а по агрегатному состоянию – на твердые и жидкие.

Сложные удобрения представляют собой одинарные соли, содержащие несколько элементов питания (например KNO_3 , $(NH_4)_2HPO_4$ и др.). Они не содержат примесей (балласта) и поэтому отличаются высокой концентрацией элементов питания.

Сложно-смешанные (комбинированные) удобрения, содержащие несколько элементов питания, получают в едином технологическом процессе при взаимодействии азотной, фосфорной и серной кислот с аммиаком, природными фосфатами, солями калия, аммония и др.

Смешанные удобрения получают путем механического смешивания двух или более простых удобрений [13].

В табл. 8.1 приведены основные виды комплексных удобрений.

Органические удобрения (навоз, птичий помет, торф, различные компосты, сидераты, сапропели и др.) представляют собой разной степени разложения органические вещества растительного и животного происхождения. Количественный и качественный состав органических удобрений зависят от их происхождения, условий накопления и хранения. Эти удобрения, как правило, содержат широкий спектр питательных элементов, поэтому их называют *полными* удобрениями. Органические удобрения обычно малотранспортабельны, их применяют на местах (или вблизи) получения и поэтому называют *местными*.

Таблица 8.1

Классификация основных форм комплексных удобрений [7]

Удобрение	Содержание, % N – P ₂ O ₅ – K ₂ O	Удобрение	Содержание, % N – P ₂ O ₅ – K ₂ O
<i>Сложные</i>		<i>Комбинированные</i>	
Аммофос	(11-12) – (46-60) – 0	Азофоска	20 – 11 – 11
Диаммофос	(10-21) – (46-63) – 0	Нитрофоска	(12-16) – (10-16) – (12-16)
Полифосфаты аммония	(13-16) – (38-61) – 0	Нитрофос	19 – 20 – 0
Калийная селитра	13 – 0 – 46	Нитроаммофоска	17,5 – 17,5 – 17,5
<i>Жидкие комплексные удобрения</i>		Нитроаммофос	(23-24) – (23-24) – 0
Водные растворы или суспензии	С различным соотношением питательных веществ	Карбоаммофоска	20 – 20 – 20
		Карбоаммофос	(20-21) – (20-21) – 0

Органические удобрения – важнейший фактор регулирования многих показателей плодородия почв: содержания органического вещества, подвижных форм азота, фосфора, калия, кальция и других макро- и микроэлементов, кислотности, поглощательной способности, биологической активности, водно-воздушного и температурного режимов и др.

Нетрадиционные удобрения. Помимо традиционных видов удобрений широкое применение в сельском хозяйстве находят сапропели (донные отложения пресноводных водоемов), осадки сточных вод (ОСВ), древесная зола, костная мука, лигнин и др. Для восполнения дефицита микроэлементов в качестве микроудобрений иногда используют отходы ряда промышленных предприятий: пиритные огарки, различные шлаки и т.д. Данные виды удобрений содержат достаточно большое количество питательных веществ, однако во многих из них в качестве примесей присутствуют элементы и вещества, представляющие опасность для нормального функционирования экосистем.

8.2. Химические мелиоранты

По данным Минсельхоза, в рамках проведения мониторинга пахотных угодий по степени кислотности почв в Российской Федерации в 2017 г. было обследовано 91,2 млн га пашни, из которых кислые почвы, требующие первоочередного известкования, занимают 33,1 млн га, или 36,3 %, из них 2,8 % – сильно и очень

сильнокислые почвы. По данным факультета почвоведения МГУ, в России 51,5 млн га земель всех сельскохозяйственных угодий (28,1 % от их общей площади) относятся к кислым, а 22,9 млн га (12,5 % от их общей площади) – к солонцеватым [3]. В связи с этим наиболее распространенными приемами мелиорации земель являются известкование кислых и гипсование солонцов и солонцеватых почв с целью улучшения их физико-химических и биологических свойств. По данным Росстата, в 2017 г. в России произвестковано 0,2 млн га кислых почв сельскохозяйственных угодий, проведено гипсование 5 тыс. га солонцовых почв (табл. 8.2).

При **известковании кислых почв** происходит вытеснение катионов водорода из почвенного поглощающего комплекса (ППК), а образующаяся при этом угольная кислота (H_2CO_3) распадается на воду и углекислый газ:



Таблица 8.2

Проведение работ по мелиорации земель РФ крупными сельскохозяйственными организациями в 2000-2017 гг. [3]

Вид мелиорации	2000	2010	2014	2015	2016	2017
Произвестковано кислых почв, млн га	0,4	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
Внесено известняковой муки и других известковых материалов:						
- всего, млн т	2,8	2,0	2,3	2,1	1,9	2,1
- на один гектар, т	6,8	9,0	9,0	8,6	8,5	8,6
Проведено гипсование солонцовых почв, тыс. га	9,2	0,1	1,5	1,1	3,7	5,0
Внесено гипса, фосфогипса и других гипсосодержащих пород:						
- всего, тыс. т	86	0,7	10,0	3,2	15,2	27
- на один гектар, т	9,3	7,6	6,7	2,8	4,2	5,4

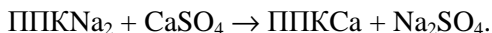
Для известкования кислых почв используют твердые (известняки, доломитовая мука, мергель) и мягкие известковые породы (известковые туфы, жженая известь, гашеная известь, озерная известь – гажка), а также отходы промышленности, обогащенные кальцием (сланцевая зола, дефека́т, шлаки). В известняках, состоящих в основном из карбоната кальция, может содержаться до 50 % оксида кальция. Из известняков получают ценный мелио-

рант – гашеную известь (пушонку). Известковые туфы содержат 70-90 % карбоната кальция, озерная известь (гажа) – 70-90 %, торфотуф – от 10 до 70 % [9].

В качестве известковых мелиорантов, помимо традиционных материалов, используют содержащие кальций отходы различных производств [8]:

- золу горючих сланцев, угольные золы, торфяную золу;
- отходы металлургической промышленности (доменные, мартеновские, электроплавильные шлаки, шлак магниевое литья и др.);
- отходы производства строительных материалов (отходы производства известнякового щебня, карьерные отходы, мраморную крошку, цементную пыль и др.);
- отходы свеклосахарного производства (дефекационная и фильтпресная грязь);
- отходы других производств: бумажной, кожевенной, содовой, асбестовой и др.

При *мелиорации солонцов и солонцеватых почв* (почв, содержащих большие количества обменного натрия) происходит вытеснение поглощенного натрия из почвенного поглощающего комплекса почвы кальцием:



Традиционным мелиорантом солонцовых почв является гипс – $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Сырьем для получения гипса служат как природные гипсосодержащие материалы (гипсовый камень, глиногипс, гаж), так и промышленные отходы (фосфогипс, дефека, шламы различных производств).

8.3. Применение удобрений и химических мелиорантов как источник загрязнения окружающей среды

Основные причины загрязнения природной среды удобрениями заключаются в следующем [6]:

- несовершенство технологии транспортировки, хранения, смешения и внесения удобрений;
- нарушение агрономической технологии их применения в севообороте и под отдельные культуры;
- водная и ветровая (дефляция) эрозия почв;
- несоответствие качества и свойств минеральных удобрений;

➤ интенсивное использование различных промышленных, городских и бытовых отходов в качестве удобрений без систематического и тщательного контроля их химического состава.

Одним из видов негативного действия удобрений на окружающую среду является нарушение разработанных технологий их применения. Так, при использовании неоправданно высоких доз азотных удобрений происходит накопление нитратов в почве, сельскохозяйственной продукции, поверхностных и грунтовых водах. Повышенные концентрации нитратов отрицательно влияют на организм животных и человека, нарушая перенос кислорода гемоглобином крови. Кроме того, нитраты являются предшественниками нитрозаминов – веществ, относящихся к сильнейшим канцерогенам. При поступлении больших количеств нитратов в природные воды происходит загрязнение источников питьевого водоснабжения. Следствием попадания избыточного количества питательных элементов в водоемы является их эвтрофикация, приводящая к деградации водных экосистем и гибели значительной части гидробионтов. Основным элементом, определяющим процесс эвтрофикации, считается фосфор, который даже в малых количествах вызывает значительное увеличение биологической продуктивности водоема.

При применении удобрений и химических мелиорантов в почвах отмечается накопление различных токсичных веществ, в том числе тяжелых металлов. Наиболее существенными по набору и концентрации примесей ТМ являются фосфорные удобрения, получаемые с использованием экстракционной ортофосфорной кислоты (аммофосы, аммофоски, нитрофосы, нитрофоски, двойные суперфосфаты). По данным J. Саго [14], простой суперфосфат содержит следующие элементы: кадмий – 50-170 мг/кг, хром – 66-243 мг/кг, кобальт – 0-90 мг/кг, медь – 4-79 мг/кг, свинец – 7-92 мг/кг, никель – 7-32 мг/кг, цинк – 50-1430 мг/кг. В фосфатном сырье из США и Сирии содержание кадмия составляет 8 мг/кг; в алжирском, марокканском и израильском – около 25 мг/кг, а в тунисском – около 30 мг/кг. Больше всего кадмия (более 70 мг/кг) в сенегальских фосфатах из Таиба. При этом содержание данного элемента в апатитах с Кольского полуострова колеблется от 0,2 до 0,6 мг/кг. Следовательно, фосфорные удобрения, произведенные из Кольских апатитов, практически не представляют опасности загрязнения почв кадмием.

Таблица 8.3

**Среднее содержание тяжелых металлов в удобрениях
и химических мелиорантах, мг/кг**

Удобрение	Элементы							
	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Cd
<i>Фосфорные удобрения</i>								
Суперфосфат простой	-	8,6	7,6	-	11,6	6,7	14,1	0,9
Суперфосфат аммонизированный	-	-	6,0	-	3,8	6,0	6,3	0,5
Суперфосфат двойной	-	24,1	21,5	-	10,1	5,2	20,3	1,3
Фосфоритная мука	-	118	137	-	39	17	198	1,2
Фосфатшлак	-	-	13,2	-	-	11	10	0,4
Фосфогипс	-	69	29,8	-	9	25	38,5	2,6
<i>Калийные удобрения</i>								
Калийная селитра	<0,3	147	12,7	21	21,3	3,3	<7,3	-
Сульфат калия	5,0	58	16,5	42	<9,3	8,0	9,0	<0,2
Калий хлористый гранулированный	<0,3	27	10,3	122	17,3	10,3	14,7	3,3
Калий хлористый негранулированный	<0,6	34	18,4	153	12,1	4,9	39,9	<1,5
<i>Азотные удобрения</i>								
Карбамид	<0,44	15	14,6	29	11,2	-	14,3	-
КАС	1	62	40,5	149	24	<1	44	-
Вода аммиачная	5	92	41,0	172	54	0,2	86	<0,4
Сульфат аммония	<1,5	64	24,7	137	27,9	0,8	46,1	<0,5
Селитра аммиачная	<0,5	13	8,8	35	8,3	0,1	14,4	<0,1
Кальциевая селитра	4	170	3,5	40	6,5	4,5	15	<0,5
<i>Сложные и комплексные удобрения</i>								
Аммофос	3,8	153	14,1	290	10,1	0,9	62,3	3,9
Азофоска	<1,3	149	117	96	37,3	10,0	137,8	3,0
Нитроаммофос	<2,8	33	10,6	116	6,2	2,2	24,4	1,8
Нитрофос	8,0	41	5,5	187	5,5	1,5	12,0	2,0
Нитроаммофосфат	9,0	65	6,0	198	10,5	8,5	37,0	3,5
<i>Органические удобрения</i>								
Навоз	-	-	22	-	7,2	4,0	112	0,20
<i>Известковые материалы (карьеры Московской области)</i>								
Известняковая мука	1-10	1-100	2-100	50-250	2-50	0,1-20	10-200	0,01-1
<i>Доломитовая мука, применяемая в Белоруссии</i>								
Доломитовая мука	-	-	8,7	-	9,8	32,2	32,1	0,54

По уровням концентраций в азотных и калийных удобрениях тяжелые металлы образуют сходные убывающие ряды: для мочевины – $\text{Fe} > \text{Ni} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cd}$; для хлористого калия – $\text{Fe} > \text{Ni} > \text{Mn} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cd}$. Достаточно полное представление о среднем содержании тяжелых металлов в различных фосфорных, калийных, азотных, сложных и комплексных удобрениях, а также в органических удобрениях и известковых материалах дают данные, представленные в табл. 8.3 [2, 11, 12]. Содержание большинства металлов в извести не превышает их концентраций в фосфорных удобрениях. Органические удобрения, как правило, характеризуются невысокими концентрациями большинства тяжелых металлов.

Некоторое количество тяжелых металлов поступает в почву с пестицидами. При проведении защитных мероприятий расход данных препаратов небольшой, в связи с чем в большинстве случаев они не представляют серьезной опасности как источник загрязнения почв металлами. Однако все же рядом исследователей отмечается значительное повышение содержания ряда ТМ при применении пестицидов.

Так, использование фунгицидов в некоторых районах ФРГ привело к увеличению концентрации меди в почвах до 273–522 мг/кг [17], в почвах Канады при этом повысилось содержание ртути до 9,4–11,5 мг/кг [16]. Превышение допустимой концентрации меди в почвах АОЗТ «Рязанские сады» произошло вследствие применения медьсодержащих препаратов для борьбы с болезнями плодовых и ягодных культур [4].

Одним из существенных источников загрязнения почв и сельскохозяйственной продукции тяжелыми металлами является использование в качестве удобрений различных видов осадков сточных вод (ОСВ), а также промышленных и бытовых отходов органического и неорганического происхождения. Содержание металлов в осадках сточных вод (табл. 8.4 и 8.5) и промышленных отходах колеблется в зависимости от вида, места и способов получения последних.

Сырьем для производства шлакоизвестковых и шлакофосфорных удобрений могут служить сталеплавильные шлаки. Шлаки представляют собой побочные продукты металлургических предприятий. Производство стали и ферросплавов в плавильных агрегатах сопровождается получением двух жидких несмешивающихся фаз: металлической и неметаллической (шлака). Источниками

шлака могут служить продукты окисления примесей чугуна (кремния, марганца, фосфора, хрома и др.), шихтовые материалы (известь, известняк, железная и марганцевая руда, окалина, боксит и др., в том числе песок и грязь, привнесенные с шихтой), а также продукты разрушения огнеупорной футеровки (облицовки) печей.

Таблица 8.4

**Среднее содержание металлов в осадках сточных вод,
мг/кг сухого вещества [10]**

Металл	Москва (Курьянов- ская станция аэрации)	С.-Петер- бург (Пушки- нская станция аэрации)	С.-Петер- бург (станция аэрации Павлово на Неве)	Сочи (после го- родских очистных сооруже- ний)	Щекино, Тульская обл. (очистные сооруже- ния АО «Щекино- азот»)
Zn	5000	960	1671	1669	52
Cd	50	26	7	6	0,9
Ni	400	130	33	100	10
Cr	4200	260	-	-	2,5
Pb	360	52	57	70	-
Cu	1100	445	276	406	3
Mn	520	825	97	760	-

Таблица 8.5

**Среднее содержание тяжелых металлов в осадках сточных вод очи-
стных сооружений Белоруси, мг/кг сухого вещества [2]**

Тип осадка	Pb	Cd	Co	Ni	Cr	Zn	Cu
Брест							
С иловых полей	225	33	262	1222	1883	8352	3783
Активный ил	147	25	-	1746	13330	6446	3161
Витебск							
С иловых полей	323	93	24	733	2785	3516	3036
Сброженный ил	244	79	22	393	1943	1500	540
Гомель							
С иловых полей	320	106	78	708	2944	4329	960
Гродно							
С иловых полей	166	17	22	649	4860	3038	3315

Тип осадка	Pb	Cd	Co	Ni	Cr	Zn	Cu
Минск							
С иловых полей	220	40	20	370	3380	2770	1900
Частично обез- воженный	140	15	15	380	1430	13340	900
Активный ил	308	116	-	2982	5423	8886	7730
Могилев							
Механически обезвоженный	148	36	170	106	516	5493	136
С иловых полей	207	27	420	435	2169	5053	256
Новополоцк							
Активный ил	95	30	400	60	320	670	410
Рогачев							
С иловых полей	79	21	22	333	3658	1834	415
Солигорск							
С иловых полей	220	10	7	43	60	140	240
Бобруйск							
Сброженный ил	94	-	34	40	-	1044	20
Осиповичи							
Сброженный ил	1120	-	39	192	-	1202	45

Таблица 8.6

**Предельно допустимое содержание ряда металлов
в осадках сточных вод, мг/кг, не более (цит. по [12])**

Страна	Металл								
	Mn	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Hg	Zn
Россия*	2000	30	-	1200	1500	400	1000	15	4000
Австрия		10	100	500	500	200	100- 500	10	2000
Бельгия	500	10	20	500	500	100	300	10	2000
Дания	-	8	6-120	40-120	300-900	20-60	485	-	3000
Канада	-	20	150	-	-	180	500	-	2000
Нидерланды	-	10	-	500	500-600	50-100	500	10	3000
Франция	500	15	20	200	1500	100	300	8	3000
Германия	-	20-30	-	1200	1200	200	1200	25	3000
Швеция	-	15	50	1000	3000	500	300	-	10000
Швейцария	-	30	100	1000	100	200	1000	10	3000

Примечание: * – СанПиН 2.1.7.573-96 «Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения».

К применению нетрадиционных форм удобрений, произведенных на основе промышленных и бытовых отходов, следует относиться очень осторожно, осуществляя постоянный контроль за содержанием металлов. Часто невысокая эффективность такого рода удобрений на фоне негативных экологических последствий делает их применение неоправданным.

В оценке осадков сточных вод (ОСВ), активных илов (АИ) и других отходов имеется большой зарубежный опыт, во многих странах установлены ограничения на содержания в них тяжелых металлов. В табл. 8.6 представлены значения предельно допустимых содержаний ТМ в осадках сточных вод, используемых в качестве удобрений в сельском хозяйстве разных стран.

В Директивах Европейского Сообщества по использованию осадков сточных вод приводятся следующие предельно допустимые концентрации тяжелых металлов в осадках [15], мг/кг:

кадмий – 20-40;

медь – 1000-1750;

никель – 300-400;

свинец – 750-1200;

цинк – 2500-4000;

ртуть – 16-25.

Многочисленные исследования накопления и распределения металлов в агроэкосистемах различных регионов мира свидетельствуют о том, что применение традиционных форм минеральных и органических удобрений, базируемое на научных разработках, не представляет опасности загрязнения почв тяжелыми металлами. Использование же в качестве удобрений промышленных и бытовых отходов требует постоянного и жесткого контроля за поступлением в природную среду многих токсичных веществ, в том числе и тяжелых металлов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляют собой удобрения? Приведите общую классификацию удобрений.
2. Дайте характеристику минеральных удобрений.
3. Дайте характеристику органических удобрений.
4. Дайте характеристику нетрадиционных видов удобрений.
5. Перечислите возможные экологические проблемы, связанные с применением азотных, калийных и фосфорных удобрений.
6. Каковы экологические последствия применения органических удобрений?
7. Чем обусловлено негативное воздействие нетрадиционных видов удобрений на состояние окружающей среды?
8. Химическая мелиорация земель. Дайте краткую характеристику используемых в сельском хозяйстве мелиорантов.
9. В чем суть известкования почв?
10. В чем суть гипсования почв?
11. Экологические последствия применения химических мелиорантов.
12. В чем состоит опасность применения осадков сточных вод в качестве удобрения?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ГЛАВЕ 8

1. Алимкулов С.О., Мурадова Д.К. Биологическая роль фосфора в жизни растений // Молодой ученый. – 2015. – № 10. – С. 44-47. – URL <https://moluch.ru/archive/90/18916/>
2. Головатый С.Е. Тяжелые металлы в агроэкосистемах. – Минск: Изд-во Республиканского унитарного предприятия «Институт почвоведения и агрохимии», 2002. – 239 с.
3. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году». – М.: Минприроды России; НПП «Кадастр», 2018. – 888 с.
4. Мажайский Ю.А., Евтюхин В.Ф., Резникова А.В. Экология агроландшафта Рязанской области. – М.: Изд-во МГУ, 2001. – 95 с.
5. Минеев В.Г. Экологические проблемы агрохимии: учебное пособие. – М.: Изд-во Московского университета, 1988. – 285 с.
6. Минеев В.Г. Агрохимия: учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГУ, Изд-во КолосС, 2004. – 720 с.
7. Мотузова Г.В., Карпова Е.А. Химическое загрязнение биосферы и его экологические последствия: учебник. – М.: Изд-во Московского университета, 2013. – 304 с.

8. Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Лозановская И.Н. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении: учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 2002. – 334 с.
9. Сельскохозяйственная экология: учебник / Н.А. Уразаев, А.А. Вакулин, А.В. Никитин и др. – М.: Колос, 2000. – 304 с.
10. Требования к качеству сточных вод и их осадков, используемых для орошения и удобрения. – М., 1995. – 36 с.
11. Черных Н.А., Овчаренко М.М. Тяжелые металлы и радионуклиды в биогеоценозах. – М.: Изд-во «Агроконсалт», 2002. – 200 с.
12. Черных Н.А., Сидоренко С.Н. Экологический мониторинг токсикантов в биосфере: монография. – М.: Изд-во РУДН, 2003. – 430 с.
13. Ягодин Б.А., Жуков Ю. И., Кобзаренко В. И. Агрохимия: учебник. – М.: Колос, 2002. – 584 с.
14. Caro J.H. Characterization of Superphosphate in Superphosphate: its History, Chemistry and Manufacture // U. S. Dept. Agr. And TVA – Washington, D.S.: 1964. – P. 102-173.
15. Contaminated land policies in some industrialized countries / by Wilma J.F., Visser MSc. // Technical Soil Protection Committee, the Hague, September, 1993. – P. 76, 98.
16. MacLean A.J. Mercury in plants and retention of mercury by soils in relation to properties and added sulfur // Can. J. Soil Sci. – 1974. – Vol. 54. – P. 287.
17. Rieder W., Schwertmann U. Kupferanreicherung in hopfengenutzen Boden der Hallertau. // Landwirtsch. Forsch, 1972. – H. 25. – S. 170.

Учебное издание

**Наталья Анатольевна Черных
Юлия Игоревна Баева**

**ХИМИЯ БИОСФЕРЫ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ
БЕЗОПАСНОСТЬ**

В двух частях

**Часть 1
ХИМИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
В УСЛОВИЯХ ТЕХНОГЕНЕЗА**

Редактор *И.Л. Панкратова*
Технический редактор *Е.В. Попова*
Компьютерная верстка *М.Н. Закиной*
Дизайн обложки *Ю.Н. Ефремовой*

Тематический план изданий
учебной и научной литературы 2019 г., № 76

Подписано в печать 21.11.2019 г. Формат 60×90/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 16,25. Тираж 500 экз. Заказ 704

Российский университет дружбы народов
115419, ГСП-1, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

Типография РУДН
115419, ГСП-1, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3, тел. (495) 952-04-41

