Введение

Атмосферный воздух является самой важной жизнеобеспечивающей природной средой и представляет собой смесь газов и аэрозолей приземного слоя атмосферы, сложившейся в ходе эволюции Земли, деятельности человека.

В настоящее время из всех форм деградации природной среды России именно загрязненность атмосферы вредными веществами является наиболее опасной. Особенности экологической обстановки в отдельных регионах Российской Федерации и возникающие экологические проблемы обусловлены местными природными условиями и характером воздействия на них промышленности, транспорта, коммунального и сельского хозяйства. Степень загрязнения воздуха зависит, как правило, от степени урбанизированности и промышленного развития территории (специфика предприятий, их мощность, размещение, применяемые технологии), а также от климатических условий, которые определяют потенциал загрязнения атмосферы.

Атмосфера оказывает интенсивное воздействие не только на человека и биоту, но и на гидросферу, почвенно-растительный покров, геологическую среду, здания, сооружения и другие техногенные объекты. Поэтому охрана атмосферного воздуха и озонового слоя является наиболее приоритетной проблемой экологии и ей уделяется пристальное внимание во всех развитых странах.

В связи с этим основное внимание в данной книге уделено комплексной экологической оценке качества воздушной среды России, степени загрязнения атмосферы на территории нашей страны, важнейшим экологическим функциям атмосферы — воздушной оболочки земного шара. Кроме основных методов управления качеством атмосферного воздуха проанализирован природный потенциал самоочищения атмосферы на территории России, дана характеристика антропогенного загрязнения воздушной среды России, выявлены основные антропогенные источники загрязнения атмосферы, определены основные экологические последствия загрязнения атмосферы,обозначены способы решения проблем охраны атмосферы от загрязнения, рассмотрены меры и мероприятия по улучшению качества воздуха, снижению негативного антропогенного воздействия.

Так как пособие является составным произведением, при его подготовке были использованы различные литературные источники, периодическая печать, статистические пособия, картографические материалы, а также ресурсы глобальной информационной сети Интернет (в тексте приведены ссылки). Мы не претендуем на авторство данных источников информации.

Глава 1
Структура, свойства и состав атмосферы

1.1. Основные свойства атмосферы и атмосферного воздуха

Структура и состав атмосферы

Атмосфера имеет слоистое строение и состоит из нескольких сфер, между которыми располагаются переходные слои-паузы (рис. 1.1.1). В сферах изменяется количество воздуха и температура.

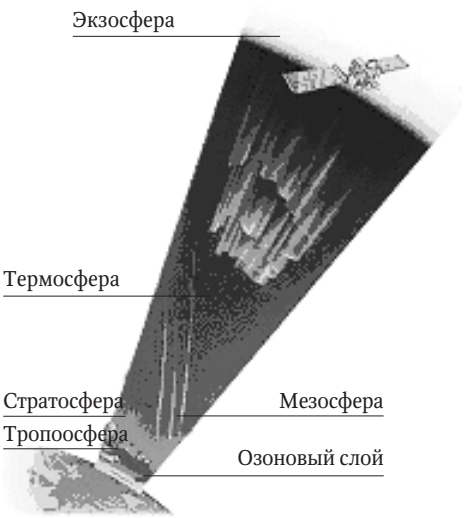

Рис. 1.1.1. Структура атмосферы

Слои атмосферы:
— тропосфера;
— озоновый слой;
— стратосфера;
— мезосфера;
— термосфера;
— экзосфера.

Тропосфера — наиболее плотный слой воздуха, прилегающий к земной поверхности. Толщина ее в средних широтах составляет 10–12 км над уровнем моря, на полюсах — 7–10 км, над экватором — 16–18 км. В тропосфере сосредоточено более 4/5 массы земной атмосферы. Из-за неравномерности нагрева земной поверхности в ней образуются мощные вертикальные токи воздуха, отмечается неустойчивость температуры, относительной влажности, давления и т. д. Температура воздуха в тропосфере по высоте уменьшается на 0,6 °С на каждые 100 метров и колеблется от +40 до –50 °С.

Стратосфера находится выше тропосферы, имеет протяженность около 40 км. Воздух в ней разрежен, влажность невысокая. Температура воздуха от границы тропосферы до высоты 30 км постоянная (около –50 °С), а затем начинает повышаться и на высоте 50 км достигает –10 °С. Под воздействием космического излучения и коротковолновой части ультрафиолетового излучения Солнца молекулы воздуха ионизируются, в результате чего образуется озон. Озоновый слой находится на высоте 25–40 км.

Мезосфера лежит выше стратосферы. Количество озона уменьшается, поэтому средняя температура значительно ниже. На высоте примерно 80 км она равна –70 °С. В этом слое наблюдаются серебристые облака.

Ионосфера подразделяется на мезосферу и термосферу, имеет вертикальную протяженность в сотни километров; воздух в ней находится в ионизированном состоянии.

Экзосфера наиболее удалена от Земли (от 800 до 1600 км). В ней обнаруживаются газы атмосферы и происходит утечка атомов, в оСновном водорода и гелия, в мировое пространство.

Состав воздуха в нижних слоях атмосферы приведен в табл. 1.1.1.

Таблица 1.1.1.

Состав воздуха в нижних слоях атмосферы

Компоненты	Содержание, %	
	по массе	по объему
Азот	75,52	78,09
Кислород	23,15	20,94
Аргон	1,28	0,93
Диоксид углерода	0,046	0,0330
Неон	$1{,}2 \cdot 10^{-3}$	$1{,}8 \cdot 10^{-3}$
Гелий	$7{,}2 \cdot 10^{-5}$	$5{,}2 \cdot 10^{-4}$
Криптон	$3{,}3 \cdot 10^{-4}$	$1{,}0 \cdot 10^{-4}$
Ксенон	$3{,}9 \cdot 10^{-5}$	$8{,}0 \cdot 10^{-6}$
Оксид азота	$2{,}5 \cdot 10^{-3}$	$2{,}5 \cdot 10^{-4}$
Водород	$3{,}5 \cdot 10^{-6}$	$5{,}0 \cdot 10^{-5}$
Метан	$0{,}8 \cdot 10^{-4}$	$1{,}5 \cdot 10^{-4}$
Диоксид азота	$8{,}0 \cdot 10^{-5}$	$1{,}5 \cdot 10^{-4}$
Озон	10^{-6}–10^{-5}	$2{,}0 \cdot 10^{-6}$
Диоксид серы	—	$2{,}0 \cdot 10^{-8}$
Оксид углерода	—	$1{,}0 \cdot 10^{-5}$
Аммиак	—	$1{,}0 \cdot 10^{-6}$

Современная атмосфера имеет, по-видимому, вторичное происхождение и формировалась в течение длительной геологической истории под влиянием ряда факторов: выделения газов из литосферы в результате вулканической деятельности; химических реакций между компонентами атмосферы и породами, слагающими литосферу; захвата межпланетной среды, например метеорного вещества; диссоциации (расщепления) молекул под влиянием солнечного ультрафиолетового излучения и ионизационных процессов.

Формирование атмосферы происходило и в результате геохимических процессов, а также в связи с деятельностью растений и живых организмов.

Строение современной атмосферы имеет четко выраженную слоистую структуру, которая определяется особенностями вертикального распределения температуры, давления и плотности. Данные структурные параметры атмосферы обладают значительной пространственно-временной изменчивостью (широтной, годовой, сезонной, суточной и др.).

Помимо этого, слоистая структура атмосферы проявляет значительную неоднородность по высоте и химическому составу. Если на высотах до 90 км, где существует интенсивное перемешивание атмосферы, относительный состав постоянных компонент атмосферы остается практически постоянным, поэтому

этот слой атмосферы получил название гомосферы, то выше 90 км — в гетеросфере — под влиянием диссоциации молекул атмосферных газов ультрафиолетовым излучением Солнца происходит сильное изменение химического состава атмосферы с высотой, что приводит к распаду молекул на атомы, и в атмосфере появляются свободные атомы и новые более сложные молекулы.

В гетеросфере становятся существенными ионизационные процессы. В результате диссоциации и ионизации происходят многочисленные фотохимические реакции, определяющие изменение состава атмосферы с высотой. Кроме того, слоистую структуру атмосферы формируют слои озона, аэрозольные слои земного и космического происхождения и слоистое вертикальное распределение электронов и ионов, что выражается в существовании D-, E- и F-слоев ионосферы.

Одной из важнейших характеристик атмосферы является атмосферное давление, которое характеризуется как давление, оказываемое атмосферой на все находящиеся в ней предметы, и определяется весом вышележащего воздуха. С высотой атмосферное давление убывает. Зависимость атмосферного давления от высоты выражается барометрической формулой.

Для идеальной атмосферы, имеющей постоянную температуру T, и состоящей из однородного газа, находящегося в однородном поле тяжести (во всех точках его объема ускорение свободного падения g одинаково), барометрическая формула имеет следующий вид:

$$p = p_o \exp\left[-g_m (h - h_o)/RT\right],$$

где p — атмосферное давление в слое расположенном на высоте;

h, p_o — давление на нулевом уровне ($h = h_o$);

m — молекулярная масса газа;

R — газовая постоянная;

T — абсолютная температура.

Из барометрической формулы следует, что концентрация молекул n (или плотность газа) убывает с высотой по тому же закону:

$$n = n_o \exp\left[-mg (h - h_o)/kT\right],$$

где m — масса молекулы;

k — постоянная Больцмана.

Барометрическая формула показывает, что плотность газа уменьшается с высотой по экспоненциальному закону. Величина $mg (h-h_o)/kT$, определяющая быстроту спада плотности, представляет собой отношение потенциальной энергии частиц к их средней кинетической энергии, пропорциональной kT. Чем выше температура T, тем медленнее убывает плотность с высотой. С другой стороны, возрастание силы тяжести mg (при неизменной температуре) приводит к значительно большему уплотнению нижних слоев атмосферы и увеличению перепада (градиента) плотности. Действующая на частицы сила тяжести mg может изменяться за счет двух величин: ускорения g и массы частиц m. Следовательно, в смеси газов, находящейся в поле тяжести, молекулы различной массы по-разному распределяются по высоте.

Однако реальное распределение давления и плотности воздуха в атмосфере не следует барометрической формуле, так как в пределах атмосферы температура и ускорение свободного падения меняются с высотой и географической широтой. Кроме того, атмосферное давление увеличивается с концентрацией в атмосфере паров воды.

На практике барометрическая формула используется при барометрическом нивелировании для определения разности высот D_h в метрах между двумя точками по измеряемому в этих точках давлению (p^1 и p^2). Поскольку атмосферное давление зависит от погоды, интервал времени между измерениями должен быть минимальным, а пункты измерения — располагаться не слишком далеко друг от друга. В этом случае барометрическая формула может быть записана в следующем виде:

$$D_h = 18400\ (1 + a_t)\ \lg\ (p^1/p^2),$$

где t — средняя температура слоя воздуха между точками измерения;

a — температурный коэффициент объемного расширения воздуха.

Погрешность измерения высоты по этой формуле не превышает 0,1–0,5 %.

Измеряется атмосферное давление барометром. Атмосферное давление выражают в паскалях (Па), в миллибарах (мбар), в ньютонах на кв. м (Н/м^2) или высотой столба ртути в барометре в мм, приведенной к 0 °С и нормальной (на уровне моря и широте 45°) величине ускорения силы тяжести.

За нормальное атмосферное давление принимают 760 мм рт. ст. = 1013,25 мбар = 101325 Н/м^2 = 1013,25 МПа.

На земной поверхности атмосферное давление изменяется от места к месту и во времени. Особенно важны непериодические изменения атмосферного давления, связанные с возникновением, развитием и разрушением медленно движущихся областей высокого давления — антициклонов — и относительно быстро перемещающихся огромных вихрей — циклонов, в которых господствует пониженное давление.

Крайние изменения атмосферного давления относительно нормального невелики и составляют не более 10 %. За всю историю наблюдений были зафиксированы такие крайние значения атмосферного давления (на уровне моря): 808,7 и 684,0 мм рт. ст.

Однако, несмотря на большую изменчивость, распределение средних месячных значений атмосферного давления на поверхности земного шара каждый год примерно одно и то же.

Среднегодовое атмосферное давление понижено у экватора и имеет минимум под 10° северной широты. Далее атмосферное давление повышается и достигает максимума под 30–35° северной и южной широты; затем атмосферное давление снова понижается, достигая минимума под 60–65°, а к полюсам опять повышается. На это широтное распределение атмосферного давления существенное влияние оказывает время года и характер распределения материков и океанов. Над холодными материками зимой возникают области высокого атмосферного давления.

Таким образом, широтное распределение атмосферного давления нарушается, и поле давления распадается на ряд областей высокого и низкого давлений, которые называются центрами действия атмосферы.

С высотой горизонтальное распределение давления становится более простым, приближаясь к широтному. Начиная с высоты около 5 км атмосферное давление на всем земном шаре понижается от экватора к полюсам.

В суточном ходе атмосферного давления обнаруживаются 2 максимума: в 9–10 часов и 21–22 часа, и 2 минимума: 3–4 часа и 15–16 часов. Особенно правильный суточный ход оно имеет в тропических странах, где дневные колебания достигают 2,4 мм рт. ст. С увеличением широты амплитуда изменения атмосферного давления уменьшается, но вместе с тем становятся более сильными непериодические изменения атмосферного давления.

Особо важное значение для практической экологии, хозяйственной деятельности человека и оценки состояния атмосферы имеют ее оптические, акустические и электрические свойства.

Распространение электромагнитного излучения оптического и радиодиапазонов в атмосфере связано с возникновением различных явлений, обусловленных поглощением, рассеянием, дифракцией, рефракцией и интерференцией света, а также отражением и преломлением электромагнитных волн радиодиапазона.

Хорошо известны явления радуги и венцов, возникающие в результате рассеяния солнечного света на каплях воды. Гало и венцы наблюдаются при рассеянии света кристаллами льда.

Радуга наблюдается в тех случаях, когда солнечные лучи освещают завесу дождя, расположенную на противоположной Солнцу стороне неба. При этом центр радуги (части круга) находится в направлении прямой, проходящей через солнечный диск и глаз наблюдателя, то есть в точке, противоположной Солнцу. Дуга радуги представляет собой часть круга, описанного вокруг этой точки радиусом в 42°; последовательность цветов в ней такая же, как в солнечном спектре, при этом по наружному краю располагается красный цвет, по внутреннему — фиолетовый. Со стороны внутреннего края иногда бывают видны вторичные цветовые дуги, примыкающие к основной радуге. Видимая часть дуги радуги определяется положением Солнца; когда оно на горизонте, радуга имеет вид полукруга, с повышением Солнца видимая часть радуги уменьшается, и при высоте Солнца в 42° радуга исчезает. Радугу можно наблюдать в брызгах фонтанов, водопадов. Возможно появление лунной радуги и от искусственных источников света. Может возникать вторая радуга с угловым радиусом около 52° и обратным расположением цветов. Современная теория образования радуги была создана австрийским геофизиком Й. М. Перитером и основана на расчете явлений дифракции и интерференции, сопровождающих встречу солнечных лучей с решеткой, образуемой дождевыми каплями.

Гало (от *фр.* halo, *греч.* halos) — световое кольцо вокруг Солнца или Луны, которое образуется в результате группы оптических явлений в атмосфере; возникает вследствие преломления иотражения света ледяными кристаллами, образующими перистые облака и туманы.

Явления гало весьма разнообразны: они имеют вид радужных (в случае преломления) и белых (при отражении) полос, пятен, дуг и кругов на небесном своде. Наиболее обычные формы гало: радужные круги вокруг диска Солнца или Луны с угловым радиусом либо 22°, либо 46°; паргелии, или «ложные Солн-

ца», — яркие радужные пятна справа и слева от Солнца (Луны) на расстояниях 22°, реже 46°; околозенитная дуга — отрезок радужной дуги, касающейся верхней точки 46-градусного круга и обращенной выпуклостью к Солнцу; паргелический круг — белый горизонтальный круг, проходящий через диск светила; столб — часть белого вертикального круга, проходящего через диск светила; в сочетании с паргелическим кругом образует белый крест.

Гало следует отличать от венцов, которые внешне схожи с гало, но имеют другое, дифракционное, происхождение.

Венцы — светлые туманные кольца на небесном своде вокруг диска Солнца или Луны, реже — вокруг ярких звезд и земных источников света. Появляются при прохождении перед светилом полупрозрачных облаков или тумана иотличаются от гало меньшим радиусом колец (не более 5°). Венцы образуются вследствие явлений дифракционного рассеяния лучей светила на водяных каплях, образующих облако или туман.

Следует отметить, что явления радуги, гало или венцов могут играть значительную роль при изучении и качественной или количественной оценке состояния атмосферы. Так, интенсивность свечения гало или радуги и ее отдельных цветовых составляющих может характеризовать степень антропогенного загрязнения атмосферы. На основании теории венцов можно по наблюдаемым угловым радиусам отдельных колец или разделяющих их темных промежутков определять поперечники капель в облаках и распознавать облака, состоящие из водяных или ледяных частиц. Радиусы колец зависят от длины волны лучей, что приводит к окрашенности венцов, причем наружный край кольца приобретает красноватый цвет. При наличии в атмосфере капель разнообразных размеров кольца венца, налагаясь друг на друга, образуют общее белое сияние вокруг диска светила, называемое околосолнечным ореолом.

В результате проявления оптических свойств в атмосфере возникает ряд других явлений. Рассеянием света обусловлены видимая сплюснутость небесного свода и голубой цвет неба. Явление рефракции света приводит к образованию миражей. Оптическая нестабильность атмосферы — важный фактор, ограничивающий возможность астрономических наблюдений. Условия распространения света в атмосфере определяют видимость предметов. Прозрачность атмосферы на различных длинах волн определяет дальность распространения излучения лазеров, что важно при применении лазеров для связи и для дистанционного зондирования атмосферы при помощи лидаров. Рефракция и распространение радиоволн обусловливает возможности радиовещания и радиоприема.

Интерес к оптическим явлениям вызван, прежде всего, тем, что данные явления являются предвестниками предсказания погоды, позволяют в большинстве случаев без сложных приборов визуально оценить степень загрязнения атмосферы, объяснить многие природные явления, например цвет неба иоблаков, зори, ложные солнца и многое другое.

Впервые правильное объяснение синего цвета неба дал известный английский физик лорд Рэлей (Дж. У. Стретт). По его теории, цветные лучи, образующие солнечный спектр, рассеиваются молекулами воздуха пропорционально $л^{-4}$ (где л — длина световой волны). Синие лучи рассеиваются примерно

в 16 раз сильнее, чем красные. Поэтому цвет неба (рассеянный солнечный) синий, а цвет Солнца (прямой солнечный свет), когда оно низко над горизонтом и лучи его проходят большой путь в атмосфере, красный. При этом рассеянный свет должен быть сильно поляризован, а под углом 90° от направления на Солнце поляризация должна быть полной.

Значительный вклад в развитие атмосферной оптики внесли российские ученые, такие как Л. И. Мандельштам, В. В. Шулейкин, В. А. Фок, К. С. Шифрин, В. Г. Фесенков, В. А. Амбарцумян, К. Я. Кондратьев и др., а из зарубежных ученых — А. Эйнштейн, М. Смолуховский, Г. Ми, Д. Стреттон, С. Чандрасекар, Л. Каплан, Г. Ямамото и др.

Основное значение при распространении света в атмосфере имеют явления рассеяния света и не только на молекулах газов — компонентов атмосферы, но и на мельчайших частицах — аэрозолях. Атмосферный воздух, даже самый чистый, высоко в горах, в Арктике и Антарктике всегда засорен органической и минеральной пылью, частицами дыма, капельками воды или растворов. Эти частицы очень малы (радиус около 0,1 нм), их масса ничтожна, поэтому они так медленно падают на Землю, что малейший ток воздуха снова вздымает их вверх. Так как воздух непрерывно перемешивается, то в атмосфере всегда парит как бы сеть из мельчайших пылинок и капель, особенно густая в нижних приземных слоях. Это и есть атмосферный аэрозоль, который является главной причиной мутности воздуха. Он уменьшает дальность видимости в реальной атмосфере, по сравнению с идеальной, приблизительно в 20 раз.

Кроме аэрозоля, большую роль в оптических явлениях в атмосфере играют водяной пар, углекислый газ и озон, хотя они составляют всего несколько процентов от объема газов, составляющих атмосферу. Только эти газы поглощают солнечное и земное излучение и сами излучают радиацию.

Значительное развитие получила теория рассеяния света, которая имеет огромное значение в атмосферной оптике. Расчеты в соответствии с этой теорией показывают, что характер рассеяния зависит ототношения радиуса частицы *а* к длине волны. Малые частицы ($\lambda/л<<1$) рассеивают свет пропорционально $л^{-4}$, то есть ведут себя так же, как молекулы в теории Рэлея, но чем больше частицы, тем слабее зависимость рассеяния от длины волны.

Большие частицы ($\lambda/л<<1$) рассеивают свет нейтрально — все волны одинаково. Это, в частности, относится к каплям облаков, радиусы которых в 10–20 раз больше длины волны видимого света. Именно поэтому облака имеют белый цвет. По этой же причине небо становится белесоватым, если воздух пыльный или содержит капельки воды.

Видимость предметов в атмосфере обусловлена, прежде всего, прозрачностью воздуха, а также их отражательными свойствами. Отражение диффузно, то есть рассеяно во все стороны (за исключением отражения от поверхности спокойной воды), и для разных поверхностей происходит по-разному, в результате чего (для несамосветящихся тел) возникает яркостный контраст предмета с фоном. Если контраст больше некоторого порогового значения, то предмет виден, если меньше, то предмет теряется наобщем фоне. Дальность видимости предмета зависит от прозрачности воздуха и от освещенности (в сумерки и днем порог различия неодинаков).

Видимость (прозрачность атмосферы) входит в число основных метеорологических элементов, наблюдения над которыми ведут метеорологические станции. Исследование условий, влияющих на горизонтальную и наклонную видимости (на фоне неба или Земли) является важной прикладной задачей атмосферной оптики.

Большое значение имеет изучение условий распространения в атмосфере невидимых инфракрасных волн длиной 3–50 мкм, которые обусловливают лучистую передачу тепла (механизм ее состоит в поглощении и последующем переизлучении).

Очень важны прямые измерения в свободной атмосфере, которые могут быть выполнены с самолетов или искусственных спутников Земли (ИСЗ). Наибольший интерес вызывает разработка методов зондирования атмосферы с ИСЗ для определения температуры земной поверхности или облаков по инфракрасному излучению, приходящему на спутник. Разработаны также методы определения вертикальных профилей температуры и влажности по характеру приходящего излучения.

Не менее важными, чем оптические свойства атмосферы, являются ее электрические свойства. Научное направление, которое изучает совокупность электрических явлений и процессов в атмосфере, а также ее электрические свойства, называется атмосферным электричеством.

При исследовании атмосферного электричества изучают электрическое поле в атмосфере, ее ионизацию и проводимость, электрические токи в ней, объемные заряды, заряды облаков и оСадков, грозовые разряды и многое другое. Все проявления атмосферного электричества тесно связаны между собой, и на их развитие сильно влияют метеорологические факторы — облака, осадки, метели и т. п. К области атмосферного электричества обычно относят процессы, происходящие в тропосфере и стратосфере.

Начало атмосферному электричеству как науке было положено в XVIII веке американским ученым Б. Франклином, экспериментально установившим электрическую природу молнии, и русским ученым М. В. Ломоносовым — автором первой гипотезы, объясняющей электризацию грозовых облаков.

Атмосферное электричество распределено весьма неравномерно и зависит от глобальных и локальных факторов. Районы, где отсутствуют скопления аэрозолей и источники сильной ионизации, рассматриваются как зоны «хорошей», или «ненарушенной», погоды, здесь преобладают глобальные факторы. В зонах «нарушенной» погоды (в районах гроз, пыльных бурь, осадков и др.) преобладают локальные факторы.

Атмосфера Земли имеет свое постоянное электрическое поле. В тропосфере все облака и осадки, туманы, пыль обычно электрически заряжены; даже в чистой атмосфере постоянно существует электрическое поле.

Исследования в зонах «хорошей» погоды, начатые в XIX веке, показали, что у земной поверхности существует стационарное электрическое поле с напряженностью E, в среднем равной около 130 В/м. Земля при этом имеет отрицательный заряд, равный около $3 \cdot 10^5$ Кл, а атмосфера в целом заряжена положительно. Однако при осадках, и особенно грозах, метелях, пылевых бурях и т. п., напряженность поля может резко менять направление и величину, достигая иногда 1000 В/м.

Наибольшие значения E имеет в средних широтах, а к полюсам и экватору убывает. В зонах «хорошей» погоды E с высотой в целом уменьшается, например над океанами. Вблизи земной поверхности, в так называемом слое перемешивания толщиной 300–3000 м, где скапливаются аэрозоли, E может с высотой возрастать. Выше слоя перемешивания E убывает с высотой по экспоненциальному закону и на высоте 10 км не превышает нескольких В/м. Это убывание E связано с тем, что в атмосфере содержатся положительные объемные заряды, плотность которых также быстро убывает с высотой. Разность потенциалов между Землей и ионосферой составляет 200–250 кВ.

Напряженность электрического поля E меняется во времени. Наряду с локальными суточными и годовыми вариациями E отмечаются синхронные для всех пунктов суточные и годовые вариации E — так называемые унитарные вариации. Унитарные вариации связаны с изменением электрического заряда Земли в целом, локальные — с изменениями величины и распределения по высоте объемных электрических зарядов в атмосфере в данном районе.

Электрическое состояние атмосферы в значительной степени определяется ее электрической проводимостью l, которая создается ионами, находящимися в атмосфере. Наличие ионов в атмосфере и является причиной потери заряда изолированным заряженным телом при соприкосновении с воздухом (явление, открытое в конце XVIII века французским физиком Ш. Кулоном). Электрическая проводимость l зависит от количества ионов, содержащихся в единице объема (их концентрации), и их подвижности. Основной вклад вносят легкие ионы, обладающие наибольшей подвижностью $u > 10^{-5}$ м^2 с$^{-1}$ В$^{-1}$.

Электрическая проводимость атмосферы очень мала и может сравниться с проводимостью хороших изоляторов. У земной поверхности в среднем $l = (1–2) \cdot 10^{-18}$ Ом$^{-1}$ · м$^{-1}$ и увеличивается с высотой примерно по экспоненциальному закону; на высоте около 30 км достигает значений, почти в 150 раз больших, чем у земной поверхности.

Основными источниками ионизации атмосферы являются:

1) космические лучи, действующие во всей толще атмосферы;

2) излучение радиоактивных веществ, находящихся в Земле и воздухе;

3) ультрафиолетовое и корпускулярное излучения Солнца, ионизирующее действие которых заметно проявляется на высотах более 50–60 км.

Концентрация легких ионов возрастает с увеличением интенсивности ионизации и уменьшением концентрации частиц в атмосфере, поэтому концентрация легких ионов растет с высотой. Этот факт в сочетании с увеличением подвижности ионов при уменьшении плотности воздуха объясняет характер изменения l и E с изменением высоты.

Движение ионов под действием сил электрического поля создает в атмосфере вертикальный электрический ток проводимости $i_п = E^l$ со средней плотностью, равной около $(2–3) \cdot 10^{-12}$ А/м^2. Таким образом, в зонах «хорошей» погоды сила тока на всю поверхность Земли составляет около 1800 А. Время, в течение которого заряд Земли за счет токов проводимости атмосферы уменьшился бы до $1/e = 0{,}37$ от своего первоначального значения, равно около 500 с. Так как заряд Земли в среднем не меняется, то, очевидно, что существуют «генераторы» атмосферного электричества, заряжающие Землю. Помимо токов

проводимости в атмосфере текут значительные электрические диффузионные и конвективные токи.

«Генераторами» атмосферного электричества в зонах нарушенной погоды являются пылевые бури и извержения вулканов, метели и разбрызгивание воды прибоем и водопадами, облака и осадки, пар и дым промышленных источников и др. Для всех перечисленных явлений электризация может проявляться весьма бурно: извержение вулканов, песчаные бури и даже метели приводят иногда к образованию молний, однако наибольший вклад в электризацию атмосферы вносят облака и осадки.

По мере укрупнения частиц в облаке, увеличения его толщины, усиления осадков из него растет его электризация. Так, в слоистых и слоисто-кучевых облаках плотность объемных зарядов $r = 3 \cdot 10^{-12}$ Кл/км^3, что приблизительно в 10 раз превышает их плотность в чистой атмосфере, а в грозовых облаках r доходит до $3 \cdot 10^{-8}$ Кл/м^3. Облака могут быть заряжены положительно в верхней части и отрицательно в нижней, но могут иметь и противоположную полярность, а также преимущественный заряд одного знака.

Плотность токов осадков на Землю из слоисто-дождевых облаков $i_{ос} = 10^{-12}$ А/м^2, в то время как из грозовых $i_{ос} = 10^{-9}$ А/м^2. Полная сила тока, текущего на Землю от одного грозового облака, в средних широтах равна около (0,01–0,1) А, а ближе к экватору до (0,5–1,0) А. Сила токов, текущих в самих этих облаках, в 10–100 раз больше силы токов, притекающих к Земле. Таким образом, гроза в электрическом отношении подобна короткозамкнутому генератору.

При высоких значениях электрического поля у земной поверхности порядка 500–1000 Вт/м начинается электрический разряд с оСтрых вытянутых предметов (травы, деревьев, мачт, труб и т. д.), который иногда становится видимым. Возникающие при метелях, ливнях, особенно в горах, токи коронирования способствуют обмену зарядами между Землей и атмосферой.

Таким образом, электрическое поле Земли и ток Земли — атмосфера в зонах «хорошей» погоды — поддерживаются процессами в зонах нарушенной погоды. На земном шаре одновременно образуется около 1800 гроз, суммарная сила тока от них, заряжающего Землю отрицательным зарядом, доходит до 1000 А.

Облака слоистых форм, хотя и менее активные, чем грозовые, но зато покрывающие около половины земной поверхности, также вносят существенный вклад в поддержание электрического поля Земли.

Исследования атмосферного электричества позволяют выяснить природу процессов, ведущих к колоссальной электризации грозовых облаков, в целях прогноза и управления ими; выяснить роль электрических сил в образовании облаков и осадков; они дадут возможность снижения электризации самолетов и увеличения безопасности полетов, а также помогут раскрыть тайну образования шаровой молнии.

Огромное значение для всего живого имеет атмосферный воздух, который является естественной смесью газов, главным образом азота и кислорода. Состав атмосферного воздуха был рассмотрен ранее, однако следует отметить, что из всех компонентов воздуха наиболее постоянны по содержанию азот, кислород и инертные газы.

Содержание в воздухе углекислого газа, окислов азота, сернистых соединений существенно колеблется: возрастает вблизи городов и промышленных предприятий.

Содержание воды в воздухе непостоянно и может содержать от 0,00002 до 3 % по объему. В воздухе всегда находится большое число мелких твердых частичек — аэрозолей: от нескольких миллионов в 1 м^3 чистого комнатного воздуха до 100–300 млн в 1 м^3 воздуха больших городов.

Воздух проникает в почву, составляя от 10 до 23–28 % ее объема.

Почвенный воздух, благодаря биологическим процессам в почве, существенно отличается от обычного по составу; он содержит (по объему): 78–80 % кислорода, 0,1–20,0 % азота и 0,1–15,0 % углекислого газа.

Для объективной оценки состояния атмосферы необходимо знание физических свойств воздуха. Масса 1 л воздуха при 5 °С, на уровне моря и давлении 1013,25 Па равна 1,2928 г.

Для большинства практических целей воздух можно рассматривать как идеальный газ; в частности, парциальное давление каждого газа, входящего в состав воздуха, не зависит от присутствия других компонентов воздуха.

Критическая температура — 140,7 °С, критическое давление — 3,7 МН/м^2 (37,2 ат). Перечисленные свойства воздуха даны при нормальном давлении (1013,25 Па).

Удельная теплоемкость при постоянном давлении $C_p = 10{,}045 \cdot 10^3$ Дж/(кг·Кл) в интервале 0–100 °С, а при постоянном объеме $C_v = 8{,}3710 \cdot 10^3$ Дж/(кг·Кл) в интервале 0–1500 °С. Коэффициент теплопроводности — 0,024276 Вт/(м·Кл) при 0 °С и 0,030136 Вт/(м·Кл) при температуре +100 °С; коэффициент теплового расширения — 0,003670 в диапазоне температур 0–100 °С; вязкость — 0,000171 МН · с/м^2 (спз) при 0 °С и 0,000181 МН · с/м^2 при +20 °С; степень сжимаемости $z = pV/p^oV^o$ — 1,00060 при 0 °С, 1,09218 при +25 °С и 1,18376 при +50 °С; показатель преломления — 1,00029; диэлектрическая проницаемость — 1,000059 (0 °С); скорость звука в воздухе — 330 м/с при 0 °С.

Растворимость в воде (в см^3 на 1 л воды) — 29,18 (0 °С) и 18,68 (+20 °С). Поскольку растворимость кислорода в воде несколько выше, чем азота, соотношение этих газов при растворении в воде изменяется и составляет соответственно 35 и 65 %.

Воздух превращается в жидкость при –192 °С и нормальном давлении. Жидкий воздух — голубоватая жидкость с плотностью 0,96 г/см^3. Свободно испаряющийся при нормальном давлении жидкий воздух имеет температуру около –190 °С. Состав его непостоянен, так как азот (и аргон) улетучивается быстрее кислорода. Фракционное испарение жидкого воздуха используют для получения чистого азота и кислорода, аргона и других инертных газов. Жидкий воздух хранят и транспортируют в сосудах дьюара или в резервуарах специальной конструкции — танках. Сжатый воздух хранят в стальных баллонах при 15 МН/м^2 (150 ат).

Огромное значение для жизнедеятельности человека имеют физиолого-гигиенические свойства воздуха. Колебания содержания азота и кислорода в атмосферном воздухе незначительны и неоказывают существенного влияния на организм человека. Для нормальной жизнедеятельности человека важен процентный состав воздуха, в частности парциальное давление кислорода. Парциальное давление кислорода воздуха над уровнем моря составляет 21331,5 Н/м^2 (160 мм рт. ст.), при уменьшении его до 18665,1 Н/м^2

(140 мм рт. ст.) появляются первые признаки кислородной недостаточности, которые легко компенсируются у здоровых людей учащением и углублением дыхания, ускорением кровотока, увеличением количества эритроцитов и т. д. При уменьшении парциального давления до 14665,4 Н/м^2 (110 мм рт. ст.) компенсация становится недостаточной и появляются признаки гипоксии, а уменьшение его до 6666,1–7999,3 Н/м^2 (50–60 мм рт. ст.) опасно для жизни. Повышение парциального давления кислорода, вплоть до дыхания чистым кислородом (парциальное давление 101325 Н/м^2–760 мм рт. ст.), переносится здоровыми людьми без отрицательных последствий.

При обычном парциальном давлении азот инертен. Увеличение его парциального давления до 0,8–1,2 МН/м^2 (8–12 ат) приводит к проявлению наркотического действия. Значительное увеличение процентного содержания азота в воздухе (до 93 % и более) вследствие уменьшения парциального давления кислорода может привести к аноксемии, и даже к смерти.

Содержание углекислого газа — физиологического возбудителя дыхательного центра — в атмосферном воздухе, составляет обычно 0,03–0,04 % по объему. Некоторое повышение его концентрации в воздухе промышленных центров несущественно для организма. При высоких концентрациях углекислого газа и снижении парциального давления кислорода может наступить асфиксия. При содержании в воздухе 14–15 % углекислого газа может наступить смерть от паралича дыхательного центра.

Увеличение концентрации углекислого газа в воздухе помещений происходит в основном за счет дыхания и жизнедеятельности людей (взрослый человек в покое при 18–20 °С выделяет около 20 л углекислого газа в час). Поэтому содержание в воздухе углекислого газа, с одной стороны, и органических соединений, микроорганизмов, пыли и т. п. — с другой, увеличиваются одновременно; концентрация углекислого газа в воздухе помещений является санитарным показателем чистоты воздуха. Содержание углекислого газа в воздухе жилых помещений не должно превышать 0,1 %.

Находящиеся в незначительном количестве в атмосферном воздухе инертные газы — аргон, гелий, неон, криптон, ксенон — при нормальном давлении индифферентны для организма. Обнаруживаемые в атмосферном воздухе в ничтожных концентрациях радиоактивные газы — радон и его изотопы — актинон и торон, имеющие малый период полураспада — не оказывают неблагоприятного воздействия на человека.

В атмосферном воздухе обычно обнаруживаются различные микроорганизмы (бактерии, грибки и др.). Однако патогенные микроорганизмы встречаются в воздухе крайне редко, в связи с чем передача инфекционных заболеваний через атмосферный воздух может происходить в исключительных случаях, например при применении бактериологического оружия, в закрытых помещениях при наличии больных, выделяющих в воздух патогенные микроорганизмы вместе с мельчайшими капельками слюны при кашле, чихании, разговоре. В зависимости от устойчивости микроорганизмов они могут передаваться через воздух как воздушно-капельным, так и воздушно-пылевым путями (наиболее устойчивые, например, возбудители туберкулеза, дифтерии).

Для жизнедеятельности человека большое значение имеют температура, влажность, движение воздуха. Для обычно одетого человека, выполняющего легкую работу, оптимальная температура воздуха — +18–20 °С. Чем тяжелее работа, тем ниже должна быть температура воздуха. Благодаря совершенным механизмам терморегуляции, человек легко переносит изменения температуры и может приспособиться к различным климатическим условиям.

Оптимальная для человека относительная влажность воздуха — 40–60 %. Сухой воздух при всех условиях переносится хорошо. Повышенная влажность воздуха действует неблагоприятно; при высокой температуре она способствует перегреванию, а при низкой температуре — переохлаждению организма. Движение воздуха вызывает увеличение теплоотдачи организма. Поэтому при высокой температуре (до +37 °С) ветер способствует предохранению человека от перегревания, а при низкой — переохлаждению организма. Особенно неблагоприятна для человека комбинация ветра с низкой температурой и высокой влажностью.

В практической деятельности человека большое значение имеют технологические свойства воздуха. Благодаря содержащемуся в воздухе кислороду он используется как химический агент в различных процессах. Сюда относятся: горение топлива, выплавка металлов из руд (доменный и мартеновский процессы), промышленное получение многих химических соединений (серной и азотной кислот, фталевого ангидрида, окиси этилена, уксусной кислоты, ацетона, фенола и др.); ценность воздуха как химического агента существенно повышается при увеличении содержания в нем кислорода. Воздух является важнейшим промышленным сырьем для получения кислорода, азота, инертных газов. Физические свойства воздуха используют в тепло- и звукоизоляционных материалах, в электроизоляционных устройствах; упругие свойства воздуха — в пневматических шинах; сжатый воздух служит рабочим телом для совершения механической работы (пневматические машины, струйные и распылительные аппараты, перфораторы и т. д.).

В практической деятельности человека широко используется искусственная атмосфера с искусственным воздухом (с другим соотношением газов, чем с земной атмосферой). Искусственный воздух впервые был использован в медицине при заболеваниях, сопровождающихся кислородной недостаточностью (40–60 % кислорода в смеси собычным воздухом или 95 % кислорода и 5 % углекислого газа). Подобные искусственные газовые смеси применяются в высотной авиации, горно-спасательном деле.

Особое значение имеет искусственный воздух в водолазном деле. Обычный воздух непригоден для работы при давлениях, существенно превышающих нормальное: в этих условиях воздух оказывает наркотическое действие, а повышение растворимости азота в крови и тканях тела делает опасным быстрый подъем водолаза на поверхность. Выделение пузырьков азота из крови может вызвать кессонную болезнь и смерть. Поэтому в последние 10–15 лет испытываются для работ на больших глубинах (в условиях высоких давлений) безазотные газовые смеси, содержащие главным образом гелий (до 96,4 %) и кислород (2–4 %) под давлением 0,7–2 МН/м^2 (7–20 ат). Такие смеси устраняют опасность кессонной болезни,

однако создают определенный дискомфорт из-за высокой теплопроводности гелия; отмечено существенное изменение тембра голоса в такой атмосфере.

Проблема искусственного воздуха решается также при создании обитаемых космических кораблей. Современные космические корабли оборудованы специальной системой, поддерживающей состав воздуха близкий к обычному: парциальное давление кислорода — 20–40 Кн/м^2, объемная концентрация углекислого газа — 0,5–1,0 %. Американские космические корабли имеют чисто кислородную атмосферу при давлении около 0,3 ат.

1.2. Взаимодействие веществ в атмосфере

Атмосфера Земли — ее газовая оболочка — простирается более чем на 1500 км от поверхности планеты. Основная часть вещества атмосферы (около 80 %) сосредоточена в тропосфере, верхняя граница которой расположена на высоте около 17 км на экваторе, к полюсам она снижается до 8–10 км.

Атмосферный воздух — это сложная смесь газов. На 99,9 % он состоит из азота N_2, кислорода O_2 и благородных газов (аргона Ar и др.) (рис. 1.2.1).

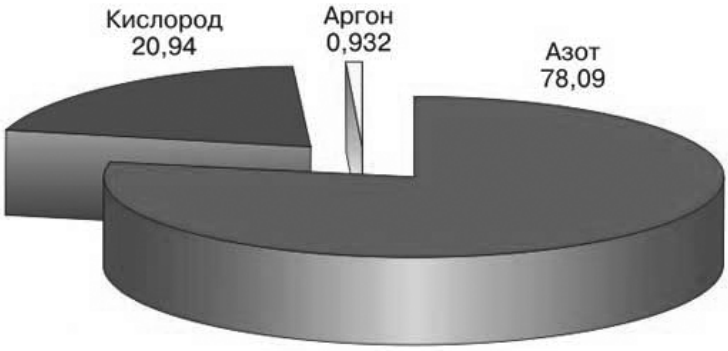

Рис. 1.2.1. Состав атмосферного воздуха

Содержание этих газов в воздухе практически постоянно. Кроме того, в состав воздуха входят диоксид углерода (от 0,02 до 0,04 %) и водяной пар (его содержание местами достигает 3 %). В воздухе могут находиться в следовых количествах также метан CH_4, водород H_2, аммиак NH_3, сероводород H_2S, оксиды азота NO и NO_2, озон O_3 и другие газы. Они образуются, например, при извержении вулканов, в результате биологических процессов, на промышленных предприятиях. Кроме того, в нижних слоях атмосферы есть большое количество взвешенных твердых и жидких частиц, образующих аэрозоли — пыль, дым, туман.

Состав и свойства атмосферы меняются с высотой. Ее давление и плотность уменьшаются при удалении от Земли, однако до высоты 100 км соотношение азота, кислорода и благородных газов меняется мало. На расстоянии до 12 км от поверхности Земли в атмосфере находится слой облаков — скоплений капелек воды или кристалликов льда. Начиная с высоты 10 км, под действием ультрафиолетового излучения Солнца молекулы кислорода диссоциируют на атомы:

$$O_2 = O + O,$$

и O_2 превращается в озон O_3 — одну из форм существования кислорода:

$$O + O_2 = O_3.$$

Максимальное содержание озона наблюдается на высоте 25–30 км. Эту область атмосферы называют озоновым слоем. Если весь озоновый слой поместить в нормальные условия (температура — 0 °С и давление — 1 атм), то его толщина составила бы несколько миллиметров. На большой высоте давление газов очень мало и концентрация озона в слое толщиной несколько километров очень низка, но даже настолько разреженный озон поглощает около 97 % ультрафиолетового излучения Солнца, опасного для живых существ. Без озонового слоя существование жизни на поверхности Земли было бы невозможно.

Выше 40 км в атмосфере постепенно увеличивается содержание атомарного кислорода, а на высоте 150 км кислород практически полностью диссоциирован. Диссоциация азота начинается на уровне 200 км от поверхности Земли. Самые высокие слои атмосферы состоят из легких атомов водорода и гелия, которые медленно уходят из поля притяжения Земли и рассеиваются в космическое пространство.

Первичная атмосфера Земли возникла еще в период образования планеты из газопылевого облака. По-видимому, первоначально атмосфера состояла из диоксида углерода CO_2 и азота N_2 с некоторым количеством водорода и паров воды. Эволюции в сторону современной кислородной атмосферы не было до тех пор, пока не начала развиваться жизнь.

Около 2 млрд лет назад в атмосфере стало заметно увеличиваться содержание кислорода. Это было связано с жизнедеятельностью одноклеточных сине-зеленых водорослей, обитавших в океане. Древнейшие жизненные процессы протекали в водной среде при наличии свободного кислорода. Возможно, что его присутствие было не повсеместным, а лишь на отдельных участках. При реакции фотосинтеза кислород стал выделяться в качестве метаболита:

$$6CO_2 + 6H_2O = C_6H_{12}O_6 + 6O_2.$$

Сине-зеленые водоросли нормально развиваются при отсутствии кислорода, для них он токсичен. Широкому распространению этих одноклеточных в древнем океане способствовало то, что сначала кислород связывался в виде оксидов железа и сульфатов. Поэтому, хотя фотосинтезирующие организмы появились около 4 млрд лет назад, содержание свободного кислорода в океане и в атмосфере длительное время не увеличивалось. Считают, что в оксидах

железа связано примерно 56 % всего выделившегося в результате фотосинтеза кислорода, в сульфатах — 39 % и только 5 % находится в свободном состоянии и распределено между атмосферой и океаном.

С течением времени в атмосфере установилось постоянное содержание кислорода. Сейчас практически весь кислород, образующийся в ходе фотосинтеза, расходуется на дыхание, горение и гниение органических веществ. В результате этих процессов выделяются вода и диоксид углерода. Они вновь могут быть использованы в фотосинтезе. Таким образом, обмен газов между атмосферой и живыми организмами идет по кругу.

Роль диоксида углерода не ограничивается участием в фотосинтезе, от содержания этого газа в атмосфере зависят температурные и климатические условия на поверхности Земли. Атмосфера, вообще, играет важную роль в формировании климата, поскольку она существенно влияет на распределение солнечной энергии на планете (табл. 1.2.1).

Таблица 1.2.1

Распределение солнечной энергии, падающей на Землю

Отражается в космическое пространство	Поглощается и переходит в тепловую энергию	Расходуется на круговорот воды	Расходуется на движение воздуха (ветер)	Расходуется на фотосинтез
30 %	47 %	23 %	0,2 %	0,02 %

Почти вся достигшая Земли солнечная энергия в конечном счете возвращается обратно в космическое пространство в виде тепловой энергии, но это происходит не сразу. Атмосфера прозрачна для основной части солнечного излучения — видимого света. Однако тепловое (инфракрасное) излучение Земли поглощается молекулами диоксида углерода CO_2, воды H_2O, метана CH_4, другими органическими молекулами. Облака также хорошо поглощают тепловое излучение, исходящее от земной поверхности. Это излучение вновь возвращается на поверхность Земли. Таким образом, земная атмосфера — это ловушка для энергии, которая помогает сохранить тепло на Земле. Наличие атмосферы приводит к повышению средней температуры на нашей планете и смягчает различия между дневными и ночными температурами. Это явление называют парниковым эффектом. Если бы парникового эффекта не было, средняя температура на нашей планете составляла бы не +15 °С, как сейчас, а –25 °С.

Атмосфера — самый маленький из геологических резервуаров Земли, она составляет менее 10^{-5} % ее массы. Именно ограниченные размеры делают атмосферу такой чувствительной к загрязнению. Кроме того, за счет вращения Земли и перепада температуры с высотой атмосфера очень быстро перемешивается.

В последние десятилетия деятельность человека стала оказывать существенное влияние на состав атмосферы. Одной из экологических проблем, имеющих глобальный характер, является резкое возрастание содержания в атмосфере диоксида углерода (рис. 1.2.2).

Наиболее существенная часть диоксида углерода техногенного происхождения образуется при использовании топлива для получения различных видов

Рис. 1.2.2. Динамика изменения содержания в атмосфере диоксида углерода

энергии. Изобретение паровой машины положило начало крупномасштабному сжиганию угля. С появлением двигателя внутреннего сгорания в качестве топлива стали использовать огромное количество нефти и нефтепродуктов, к этому добавилось сжигание природного газа метана CH_4. Немалое количество диоксида углерода выделяется в промышленных процессах, например в металлургии и при производстве некоторых строительных материалов, включающих обжиг известняка:

$$CaCO_3 = CaO + CO_2$$

Нередко деятельность человека становится причиной возникновения природных катастроф, в частности лесных пожаров, которые также увеличивают содержание диоксида углерода в атмосфере. Они же приводят к истреблению огромного количества растений, которые усваивают диоксид углерода в процессе фотосинтеза. Кроме того, человек уничтожил уже около 25 % растительности суши в результате распашки земель, строительства городов и дорог, вырубки лесов.

Диоксид углерода, участвуя в природном круговороте, частично растворяется в океане, превращается в карбонаты. Однако природные процессы уже не в состоянии снизить содержание этого вещества до прежнего уровня, когда вмешательство человека было незначительным.

Небольшой рост концентрации диоксида углерода в атмосфере не представляет опасности для жизни человека, но вызывает повышение температуры воздуха благодаря усилению парникового эффекта. Это может привести к глобальным изменениям климата с весьма серьезными последствиями (таяние льдов Антарктиды и Гренландии, повышение уровня Мирового океана, затопление прибрежных территорий и т. д.).

Параллельно с ростом концентрации диоксида углерода увеличивается расходование кислорода. Свободный кислород накопился в атмосфере

только за счет того, что образование органических веществ в результате фотосинтеза происходило быстрее, чем их окисление в результате дыхания, горения и гниения. Избыточное количество органических веществ оказалось в недрах Земли в виде каменного угля, нефти и природного газа. Теперь на сжигание этих веществ используется дополнительное количество кислорода. Пока оно составляет лишь несколько процентов от количества кислорода, выделяемого растениями суши. Тем не менее нельзя исключить в будущем возможность снижения содержания кислорода в атмосферном воздухе.

Опасность для окружающей среды и здоровья людей представляют и многие региональные экологические проблемы, связанные с загрязнением атмосферы. Отходы предприятий и транспорта существенно нарушают природные атмосферные процессы в индустриальных районах. Один из сильнейших загрязнителей атмосферы — диоксид серы SO_2, составляющий более 95 % промышленных выбросов газообразных соединений серы. Наибольшее количество диоксида серы образуется при сжигании каменного угля и нефти, в которых постоянно присутствуют серосодержащие соединения. Много диоксида серы попадает в атмосферу при обжиге сульфидных руд для производства серной кислоты и некоторых металлов:

$$4FeS_2 + 11O_2 = 8SO_2 + 2Fe_2O_3.$$

Растворяясь в атмосферной влаге, диоксид серы образует гидрат $SO_2 \cdot H_2O$, представляющий собой кислоту средней силы. Часть диоксида серы в воздухе окисляется до триоксида серы SO_3:

$$SO_2 + O_2 = 2SO_3.$$

Протеканию этой реакции способствует действие ультрафиолетового излучения Солнца. Триоксид серы при взаимодействии с водой дает сильную серную кислоту, которая, как и диоксид серы, растворяется в атмосферной влаге. Результатом этих процессов являются кислотные дожди, время от времени выпадающие на поверхность Земли не только в окрестностях промышленных предприятий, но и в соседних с ними районах.

Над дымовыми трубами некоторых химических предприятий можно увидеть рыжий «лисий хвост», он появляется в результате выбросов оксида азота NO, который окисляется кислородом воздуха до ярко окрашенного диоксида азота NO_2:

$$NO + O_2 = 2NO_2.$$

Этот оксид реагирует с водой с образованием сильной азотной кислоты HNO_3, которая также может входить в состав кислотных дождей:

$$3NO_2 + H_2O = 2HNO_3 + NO.$$

Кислотные дожди поражают растительность, губят живые организмы водоемов и почвы, вызывают заболевания людей. Кислоты разрушают металлы. Они реагируют также с карбонатом кальция $CaCO_3$, входящим в состав известняка, мела, мрамора:

$$CaCO_3 + H_2SO_4 = CaSO_4 + H_2O + CO_2.$$

Сульфат кальция $CaSO_4$, более растворимый, чем карбонат кальция $CaCO_3$, вымывается водой, а новые слои карбоната кальция вновь подвергаются действию кислотных дождей. Это приводит, в частности, к постепенному разрушению многих памятников архитектуры.

В крупных городах загрязнение воздуха часто приводит к возникновению смога. Термин «смог» — производное от английских слов smoke (‘дым’) и fog (‘туман’). В состав смога входят дым, туман, пыль и различные вредные для здоровья газообразные вещества (монооксид углерода, озон, оксиды серы и азота). Смог поражает, прежде всего, слизистые оболочки глаз и дыхательных путей человека и животных. Он приводит к нарушению дыхания и даже может вызвать гибель людей. В 1952 г. в Лондоне образование смога привело к повышению смертности среди жителей вдвое по сравнению с обычной. Считают, что его жертвами стали 4 тыс. человек.

Смог образуется в результате загрязнения воздуха выбросами углеводородов, диоксида азота и других продуктов сгорания топлива в автомобильных двигателях, на тепловых станциях и заводах. При окислении топлива в условиях недостатка кислорода образуется ядовитый оксид углерода CO (угарный газ), в большой степени определяющий вредное действие смога на здоровье людей. Существенными компонентами смога являются оксиды азота. Они образуются, в частности, при работе автомобильных двигателей. В камере сгорания при температуре +2800 °C и давлении 10 ат азот начинает реагировать с кислородом с образованием оксида азота NO. В атмосфере оксид азота окисляется до диоксида азота NO_2. При высокой концентрации оксиды азота могут поражать центральную нервную систему человека. Под действием солнечного света диоксид азота распадается на оксид азота и атомарный кислород, который превращает кислород O_2 в озон O_3. Накапливаясь в нижних слоях атмосферы, это вещество оказывает вредное воздействие на организм: вызывает кашель, головокружение, усталость. Озон — сильнейший окислитель: при его содержании в воздухе (по объему) всего лишь $1 \cdot 10^{-5}$ % он разъедает резину, разрушает металлы, вступает в реакции с углеводородами, образуя опасные для человека вещества.

Чтобы предотвратить ухудшение состояния атмосферы, нужно сокращать газовые и пылевые выбросы промышленных предприятий, тепловых электростанций, автомобильных двигателей и других загрязнителей атмосферы либо предварительно удалять из них вредные вещества. С этой целью используют как физические, так и химические методы отделения опасных примесей.

Для очистки газовых выбросов от пыли и сажи их фильтруют. Для улавливания летучих органических соединений используют поглотители, например активированный уголь. Химическую очистку ведут, пропуская газы через рас-

творы различных реагентов. Например, диоксид серы, сероводород, галогеноводороды поглощаются веществами, имеющими основные свойства:

$$SO_2 + Ca(OH)_2 = CaSO_3 + H_2O.$$

Используют также окисление или восстановление загрязняющих веществ до безвредных продуктов:

$$2H_2S + O_2 = 2S + 2H_2O,$$
$$NO_2 + 4H_2 = N_2 + 4H_2O.$$

Часто эти процессы проводят в присутствии катализаторов.

Для сокращения выбросов вредных веществ с выхлопными газами автомобилей их двигатели постоянно совершенствуют, в частности подбирают оптимальные условия сжигания топлива. На пути выхлопных газов устанавливаются каталитические конверторы, способствующие превращению вредных веществ в менее опасные продукты:

$2NO + CO = N_2 + 2CO_2$,
$CO + O_2 = 2CO_2$,
углеводороды + O_2 : $CO_2 + H_2O$.

Затраты на очистку выхлопных газов автомобилей, дымовых выбросов промышленных предприятий и электростанций вызывают удорожание товаров и энергии, однако загрязнение воздуха также приводит к расходам, связанным с разрушением конструкций, ухудшению здоровья людей и т. д. Так что за право дышать чистым воздухом человечеству приходится платить немалую цену.

1.3. Важнейшие экологические функции атмосферы

Атмосфера (от. *др.-греч.* ἀτμός — ‘пар’ и σφαῖρα — ‘шар’) — воздушная оболочка Земли, вращающаяся вместе с нею. Атмосфера — окружающая Землю газовая среда. Ее масса — около $5{,}5 \cdot 10^{15}$ т, или менее одной миллионной всей массы Земли. Толщина нижнего слоя атмосферы (тропосферы), содержащего около 80 % ее массы, — от 8 км в полярных широтах до 18 км в экваториальном поясе. В стратосфере, расположенной на высоте до 55 км над поверхностью, находится до 20 % массы атмосферы. Сухой воздух у поверхности Земли содержит по объему 73 % азота и 21 % кислорода, малые дозы аргона и углекислого газа.

Атмосфера, со всех сторон окружающая земной шар, выполняет важнейшие функции, связанные с жизненными процессами, направленными на поддержание живых организмов. Атмосфера является важнейшим условием появления и развития жизни на Земле.

Атмосфера задерживает свыше половины энергии солнечного излучения, достигающего наружной ее границы. Коротковолновое и гамма-излучение, которые могли бы быть губительными для жизни на Земле, целиком поглощаются

атмосферой (точнее, находящейся в ее верхних слоях ионосферой, а также слоем озона) и до поверхности Земли не доходят. Атмосфера защищает поверхность Земли и от падения метеоритов. Между атмосферой и поверхностью Земли происходит постоянный тепло-, влаго- и газообмен, изменяется атмосферное давление, совершается циркуляция воздуха, что имеет большое значение для погоды.

В связи с наличием в атмосфере водяного пара и углекислого газа она почти не пропускает теплового излучения, создавая так называемый парниковый эффект. Увеличение содержания углекислого газа в атмосфере в результате человеческой деятельности, процессов горения, в которых сжигается кислород и образуются углекислый газ и другие газы, приводит к усилению «парникового эффекта», может вызвать повышение средней температуры, угрожает таянием полярных льдов.

Атмосфера регулирует и такие важнейшие параметры в жизни всего живого, как температура, влажность, давление. Самой общей характеристикой состояния атмосферы является климат. Формирование климата планеты определяется притоком солнечной энергии, особенностями строения подстилающей поверхности, интенсивностью механизмов тепло-, влаго- и массообмена между различными регионами Земли.

Влияние климата на здоровье человека, да и всех живых организмов, проявляется, прежде всего, в их тепловом состоянии, обусловленном теплообменом с окружающей средой. На процессы терморегуляции живых организмов существенное влияние оказывают температура и влажность воздуха, ветер. Например, внезапные изменения ветрового режима, атмосферного давления и температуры рассматриваются как причины ухудшения состояния здоровья у большинства людей, так называемая метеозависимость.

Циклы кислорода, углерода, азота, воды обязательно проходят атмосферную стадию. Атмосфера — это гигантский резервуар, где различные вещества накапливаются, а главное — благодаря такому ее свойству, как динамичность, распределяются с господствующими ветрами по всему земному шару. Это позволяет обеспечить интенсивность и скорость круговорота веществ в природе и поддерживать целостность природы Земли.

Для всего живого на Земле важны основные физические и химические свойства атмосферы как части природной среды. Давление атмосферы считается нормальным при величине у поверхности Земли 760,1 мм рт. ст. В пределах земного шара существуют постоянные области высокого и низкого давления, что обеспечивает динамику атмосферы и формирование системы господствующих ветров. Это обеспечивает вертикальное и горизонтальное перемешивание воздуха, рассеивание и ассимиляцию загрязняющих веществ. Когда загрязнители смешиваются с достаточно большими объемами воздуха, их концентрация понижается вплоть до порогового уровня, ниже которого их отрицательное воздействие не наблюдается.

Давление атмосферы мы не замечаем, хотя на каждого человека давит примерно около 12 т воздуха. Для нас ощутимы лишь отклонения давления при подъеме на высоту (понижение), при погружении в воду (повышение). В абсолютном вакууме гибель живого наступает мгновенно. Однако исчезновение или резкое уменьшение атмосферного давления нашей планете не угрожает.

Прозрачность атмосферы имеет очень важное средообразующее значение. Именно от нее зависит проницаемость атмосферы для солнечных излучений видимых частей спектра. Количество (интенсивность) солнечной энергии определяет интенсивность фотосинтеза — единственного природного процесса фиксации солнечной энергии на Земле. Установлено влияние прозрачности на тепловой баланс Земли. Современные изменения прозрачности атмосферы в значительной мере определяются антропогенным влиянием, что уже привело к возникновению ряда проблем.

Весьма существенное значение имеет состояние газового баланса в атмосфере. Атмосфера в пределах тропосферы (до высоты 15–16 км), где заключено более 90 % всей ее массы, состоит по объему из азота (78,09 %), кислорода (20,96 %), аргона (0,93 %), углекислого газа (0,03 %); она содержит также весьма малые доли инертных газов и озона.

Атмосферный азот является гигантским источником первичного «сырья» как для деятельности азотфиксирующих микроорганизмов и водорослей, так и для промышленности азотистых удобрений.

Без кислорода невозможно дыхание, а значит, энергетика многоклеточных животных. Вместе с тем кислород — это продукт жизнедеятельности, выделяемый фотосинтезирующими организмами. Накопление в ходе эволюции атмосферы и биосферы всего 1 % кислорода создало условия для бурного развития современных форм жизни. При этом образовался озоновый экран — защита от космических лучей высоких энергий. Однако происходит катастрофическое уменьшение кислорода в атмосфере. За последние 10 лет количество его уменьшилось настолько, насколько уменьшилось за предыдущие 10 тыс. лет сокращения.

К серьезным последствиям может привести резкое сокращение кислорода в атмосфере. Его потеря вызвала бы неизбежную замену аэробных форм жизни анаэробными.

Углекислого газа (диоксида углерода) в атмосфере значительно меньше, чем кислорода и азота. Однако именно его увеличение за счет антропогенной деятельности сегодня волнует человечество. По данным Национальной исследовательской лаборатории США в г. Боулдере, штат Колорадо, в настоящее время количество CO_2 в атмосфере Земли увеличивается на 10 % каждые 20 лет. Имеется много прогностических моделей будущего количества CO_2 в атмосфере. Выводы их различаются количественно, но факт роста CO_2 в атмосфере в нынешнем столетии признается всеми. Эти изменения, касающиеся ничтожной (по масштабам атмосферы) величины нетоксичного газа, вызывают глобальную экологическую проблему, связанную с изменением климата Земли. Повышение доли углекислого газа всего на 0,1 % вызывает затруднение дыхания у животных, сказывается на здоровье человека.

В слое атмосферы от поверхности Земли до 70 км присутствует озон (O_3) — трехатомный кислород, возникающий в результате расщепления молекул обычного кислорода и перераспределения его атомов. Название газу дал в 1840 г. швейцарский химик Шойбен. Прямой перевод с греческого означает ‘пахнущий’. Озон называют атмосферным щитом всего живого, с ним связывают синеву неба и сохранение благодатного тепла планеты. Однако ученые отмечают, что сам по себе озон, содержащийся в приземных слоях воздуха в высокой

концентрации, например на предприятиях химической промышленности, при высоковольтных испытаниях, электросварке становится типичным промышленным ядом. В этом вопросе уже существует общее мнение, что при концентрации в количестве 1–10 мг на 1 м^3 озон действительно вызывает изменения в организме. Изучение медико-биологического действия озона становится сегодня серьезной научной проблемой, прежде всего потому, что расширяется его промышленное применение.

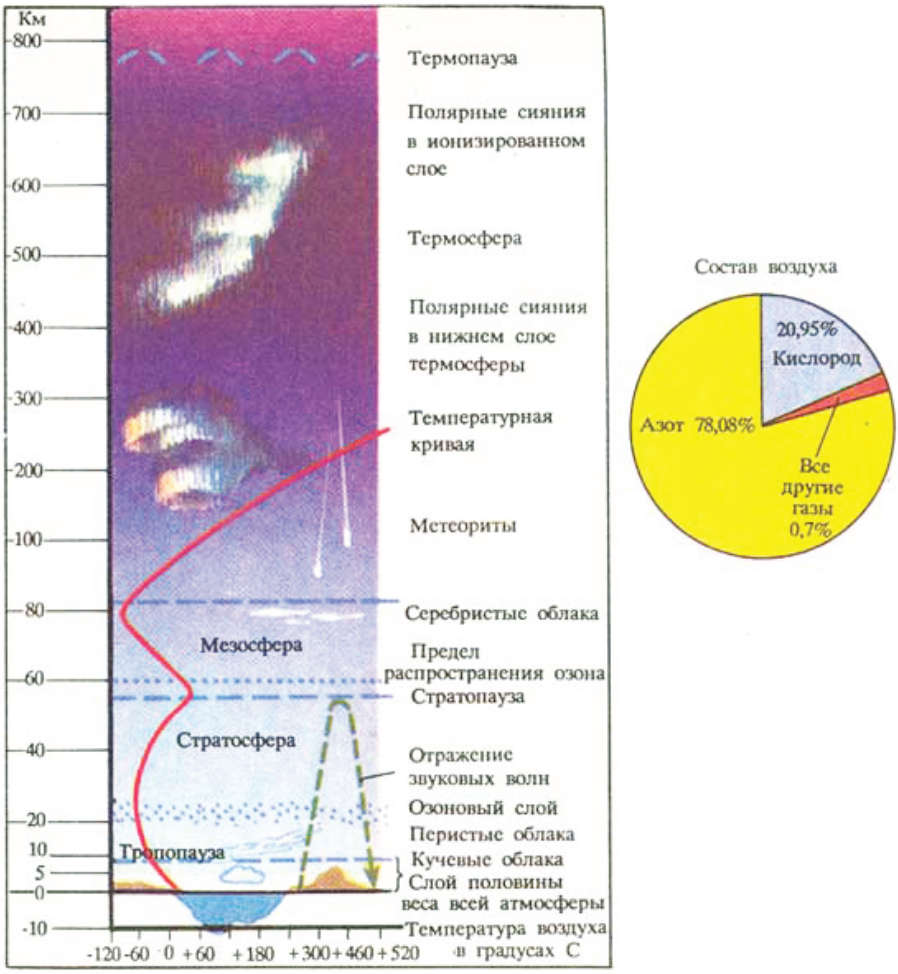

Рис. 1.3.1. Строение атмосферы

Опоясывающая Землю атмосфера состоит, как известно, из множества различных слоев (см. рис. 1.3.1).

Каждый из таких слоев выполняет важные задачи, направленные на обеспечение полезных свойств живых организмов. В ходе исследования атмосферных

слоев выяснилось, что каждый из них способен возвращать обратно вещества или лучи, достигшие его границ, либо в космическое пространство, либо к земной поверхности. Например, тропосфера, расположенная в 13–15 км от поверхности Земли, уплотняет массы водяного пора, поднимающиеся с земной поверхности, и возвращает их обратно на Землю в виде дождя. Озоновый слой атмосферы, то есть озоносфера, расположенная на высоте 25 км от Земли, отражая идущие из космического пространства радиацию и вредные ультрафиолетовые лучи, возвращает их обратно, не позволяя пробиться к земной поверхности.

Рассматривая различные экологические функции атмосферы Земли, можно сделать однозначный вывод, что жизнь на Земле без этой воздушной оболочки была бы невозможна.

1.4. Критерии и показатели качества атмосферного воздуха

Качество атмосферного воздуха является важнейшей его характеристикой, от которой зависит жизнь людей, животных и растений, всех экосистем, долговечность зданий, сооружений и всего, что создано человеком и природой.

Качеством атмосферного воздуха называется совокупность свойств воздушной среды, определяющая степень воздействия физических, химических и биологических факторов на людей, растительный и животный мир, а также на материалы, конструкции и окружающую среду в целом, способная удовлетворять определенные потребности в зависимости от ее назначения.

Атмосферный воздух как объект окружающей среды отличается от водной среды, почвы и грунтов. Если гидросфера может состоять из поверхностных и подземных вод, из отдельных водоемов, которые практически могут быть не связаны между собой, то атмосфера состоит из одного бассейна, который определяет жизнь на Земле. Поэтому, как уже отмечалось, для атмосферы и ее загрязнения нет государственных границ, любое локальное загрязнение на ограниченном пространстве может в короткое время распространиться на огромные пространства и стать глобальным, что делает атмосферу более уязвимой в результате хозяйственной деятельности человека. Кроме того, если воду человек употребляет периодически, то воздухом дышит непрерывно на протяжении всей жизни. Таким образом, качество воздуха является одним из важнейших показателей, для обеспечения которого необходимо нести огромные расходы.

В настоящее время для оценки качества атмосферного воздуха используют такие показатели, как единичный, комплексный показатели загрязнения, средний уровень загрязнения атмосферы по городам и средний уровень загрязнения атмосферы по отраслям промышленности.

Единичным показателем загрязнения атмосферы называют показатель загрязнения атмосферы одним загрязняющим веществом.

Комплексным показателем называют показатель загрязнения атмосферы несколькими загрязняющими веществами.

Средним уровнем загрязнения атмосферы по городам называют уровень загрязнения атмосферы по осредненным показателям, применяемый для сравнительной оценки загрязнения атмосферы в городах.

Средним уровнем загрязнения по отраслям промышленности называют уровень загрязнения атмосферы по осредненным показателям, применяемый для сравнительной оценки загрязнения атмосферы в городах с предприятиями данной отрасли промышленности.

Одним из важнейших критериев качества атмосферного воздуха являются предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздушной среде.

Ученым нашей страны принадлежит приоритет в разработке предельно допустимых концентраций вредных веществ. Еще в 1949 г. профессор В. А. Рязанов сформулировал основные критерии вредности атмосферных загрязнений:

1. Допустимой может быть признана только такая концентрация того или иного вещества в атмосферном воздухе, которая не оказывает на человека прямого или косвенного вредного и неприятного действия, не снижает его работоспособности, не влияет на самочувствие и настроение.

2. Привыкание к вредным веществам должно рассматриваться как неблагоприятный момент и доказательство недопустимости изучаемой концентрации.

3. Недопустимы такие концентрации вредных веществ, которые неблагоприятно влияют на растительность, климат местности, прозрачность атмосферы и бытовые условия жизни населения.

Однако в ГОСТ 17.2.1.04–77 дано следующее определение ПДК вредного вещества в атмосферном воздухе: «ПДК — это есть максимальная концентрация вредного вещества в атмосфере, отнесенная к определенному времени осреднения, которая при периодическом воздействии или на протяжении всей жизни человека не оказывает на него вредного действия, включая отдаленные последствия, и на окружающую среду в целом».

Решение вопроса о допустимом содержании атмосферных загрязнений основывается на представлении о наличии порогов в действии загрязнений. При научном обосновании ПДК вредных веществ в атмосферном воздухе используют принцип лимитирующего показателя (нормирование по наиболее чувствительному показателю). Так, если запах ощущается при концентрациях, не оказывающих вредного влияния на организм человека и внешнюю среду, нормирование осуществляют с учетом порога обоняния. Если вещество оказывает на окружающую среду вредное воздействие в меньших концентрациях, то при гигиеническом нормировании учитывают порог действия этого вещества на внешнюю среду.

Для каждого вещества, загрязняющего атмосферный воздух, в нашей стране установлены два норматива ПДК:

1. Максимальная разовая предельно допустимая концентрация за двадцатиминутный период измерения (осреднения) — $ПДК_{м.р.}$ (максимальная разовая), мг/м^3.

2. Среднесуточная предельно допустимая концентрация — это концентрация вредного вещества, осредненная за суточный период измерения — $ПДК_{с.с.}$ (среднесуточная), мг/м^3.

Максимальная разовая ПДК устанавливается для предупреждения рефлекторных реакций у человека (ощущение запаха, изменение биоэлектрической активности головного мозга, световой чувствительности глаз и др.) при кратковременном воздействии атмосферных загрязнений (до 20 минут), а среднесу-

точная — с целью предупреждения их резорбтивного (общетоксического, канцерогенного, мутагенного и др.) влияния.

Максимальная разовая ПДК атмосферных загрязнений устанавливается в процессе наблюдений над людьми, которые кратковременно (5–20 мин) вдыхают воздух с малыми концентрациями изучаемого вещества. Максимальная концентрация, используемая в наблюдениях, не должна превышать ПДК, установленную для воздуха производственных помещений. Это служит гарантией безопасности для человека при таких исследованиях.

Вначале определяют пороговую концентрацию по запаху. Затем устанавливают пороговые и подпороговые концентрации по раздражающему действию на рецептивные зоны органов дыхания. Для выявления рефлекторных реакций применяют метод изменения темновой адаптации глаза, хронорефлексометрию, электроэнцефалографию и др.

Чтобы установить среднесуточные ПДК атмосферных загрязнений, проводят токсикологический эксперимент с целью изучения резорбтивного действия конкретного вредного вещества. В эксперименте моделируются условия контакта человека с изучаемым веществом. Опыты проводятся на белых крысах, морских свинках и других лабораторных животных. В специальных камерах животные подвергаются круглосуточному ингаляционному воздействию конкретного химического вещества в течение 3–4 месяцев. Для изучения состояния органов и систем организма используют разнообразные физиологические, биохимические, гистохимические, морфологические и другие показатели.

Большое значение придается изменениям высшей нервной деятельности животных под влиянием вдыхания токсических веществ. Для суждения о функциональном состоянии коры больших полушарий используют методы изучения условно-рефлекторной деятельности, соотношения хроноксий мышц-антагонистов, скрытого времени рефлекса. В некоторых экспериментах проводится изучение активности холиэстеразы и других ферментов, соотношения белковых фракций и содержания SH-групп в крови, содержания витаминов С, B_1, B_2 в органах и тканях, а также многих других высокочувствительных показателей. В последние годы получили широкое распространение методы изучения эмбриотоксического, гонадотоксического, аллергенного, бластомогенного действия атмосферных загрязнений.

В результате экспериментов установлено, что при длительном действии малых концентраций атмосферных загрязнений в организме животных прежде всего развиваются неспецифические изменения со стороны центральной нервной системы, системы крови, ферментных систем и др.

В современных условиях атмосферный воздух населенных мест одновременно загрязняется многими веществами. В связи с этим возникает необходимость изучения комбинированного действия атмосферных загрязнений. Если смесь вызывает эффект, равный пороговому при изолированном действии, и ее концентрация, выраженная в долях от индивидуальных порогов, равна единице, то характер комбинированного действия оценивается как проявление аддитивности (суммирования). Обнаружение порогового эффекта при концентрации смеси меньше единицы свидетельствует о потенцировании эффекта при комбинированном действии, а при суммарной концентрации, превышающей единицу, — проявлении антагонизма.

Гигиенические критерии качества атмосферного воздуха определяются нормативами, положенными в основу предупредительного санитарного надзора за охраной атмосферного воздуха, дают возможность надежно прогнозировать вероятность загрязнения воздуха в населенных пунктах в районах расположения промышленных объектов. Гигиенические нормативы ПДК вредных веществ в атмосферном воздухе в настоящее время установлены для более 2000 веществ и комбинаций атмосферных загрязнений.

ПДК некоторых вредных веществ в атмосферном воздухе приведены в табл. 1.4.1.

Таблица 1.4.1

ПДК некоторых вредных веществ в атмосферном воздухе

Наименование вещества	**Предельно допустимые концентрации, мг/м^3**	
	максимальная разовая	**среднесуточная**
Азота(IV)оксид	0,085	0,04
Аммиак	0,2	0,04
Ацетон	0,35	0,35
Бензол	1,5	0,1
Бензин	5,0	1,50
Дихлорэтан	3,0	1,0
Метанол	1,0	0,5
Серы(IV)оксид	0,5	0,05
Сероводород	0,008	0,008
Толуол	0,6	0,6
Уксусная кислота	0,2	0,06
Углерода(II)оксид	5	3
Фенол	0,01	0,03
Формальдегид	0,035	0,012
Хлор	0,1	0,03

Нормативы ПДК включают в себя не только концентрацию, но и экспозицию загрязнителей, и Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) в зависимости от наблюдаемых эффектов определила четыре уровня:

уровень 1 — концентрации и время экспозиции ниже или равно величинам, при которых на современном уровне знаний никакой прямой или косвенный эффект не может быть обнаружен;

уровень 2 — величины, при которых наблюдается раздражение органов чувств, вредное воздействие на растительность, уменьшение видимости атмосферы или другие неблагоприятные воздействия на окружающую среду;

уровень 3 — величины, при которых у человека возможны либо расстройство жизненно важных физиологических функций, либо изменения, которые влекут за собой хронические заболевания или преждевременную смерть;

уровень 4 — величины, при которых возможны острые заболевания или преждевременная смерть в самых уязвимых группах населения.

В отдельных странах, таких как США или Россия, приняты пороговые величины максимально допустимых концентраций для производственных помещений. Эти величины значительно различаются в разных странах: так, для хлорэтилена

в США эта величина равна 1300 мг/м^3, а в России — 30 мг/м^3; для оксида углерода в США допустимая величина равна 55 мг/м^3, в России — 20 мг/м^3.

Это свидетельствует о том, что перед принятием и внедрением подобных норм необходимы широкие научные исследования. При этом условия производственных помещений и нормативы качества атмосферного воздуха должны учитывать опасность загрязнителей не только для человека, но и для окружающей среды в целом.

Для регулирования качества атмосферного воздуха введен показатель — предельно допустимый выброс (ПДВ), которым называют научно-технический норматив, устанавливаемый из условия, чтобы содержание загрязняющих веществ в приземном слое воздуха от источника или их совокупности не превышало нормативов качества воздуха для населения, животного и растительного мира, а также окружающей среды.

ПДВ, измеряемый в г/с, определяется как произведение коэффициента метеорологического разбавления $К_р$ (м^3/с) на значение ПДК (г/м^3) веществ в выбрасываемом газе:

$$ПДВ = К_р \cdot ПДК$$

При расчете ПДВ и $К_р$ учитывают ряд параметров:

1) характеристику источника выброса (одиночная дымовая труба или группа труб, объем и температура выбрасываемых газов, приземные или наземные источники и т. п.);

2) свойства выбрасываемой вредной примеси (осаждение и сорбция ее на поверхности земли, период полураспада и период полувыведения примеси из атмосферы и др.);

3) метеорологические параметры атмосферы (скорость и направление ветра, повторяемость штилей, туманы и др.);

4) топографические особенности района (возвышенность или низина, водоемы, растительность, застройка).

Таким образом, ПДВ есть научно обоснованная техническая норма выброса вредных веществ из промышленных источников в атмосферу, правильный ее расчет требует знания указанных параметров источников, свойств выбрасываемых вредных веществ и атмосферных условий.

Значения ПДВ и материалы по их обоснованию согласуются с органами, осуществляющими государственный контроль за охраной атмосферы и утверждаются в установленном порядке.

Выбросы вредных веществ могут иметь организованный и неорганизованный характер. При этом организованным промышленным выбросом называют выброс, поступающий в атмосферу через специально сооруженные газоходы, воздуховоды и трубы. Неорганизованным считается промышленный выброс, поступающий в атмосферу в виде ненаправленных потоков газа в результате нарушения герметичности оборудования, отсутствия или неудовлетворительной работы оборудования по отсосу газа в местах загрузки, выгрузки или хранения продукта.

ПДВ устанавливают для каждого источника загрязнений атмосферного воздуха, неорганизованных выбросов и совокупности мелких одиночных источников.

Суммируя ПДВ отдельных источников, устанавливают их значения для предприятий, производственных объектов и комплексов. ПДВ пересматриваются не реже одного раза в пять лет.

Обычно на предприятиях процессу нормирования выбросов должна предшествовать работа по инвентаризации вредных выбросов, проводимой предприятиями и специализированными организациями под контролем головных ведомственных организаций. Затем с целью определения степени загрязнения атмосферы выбросами должен проводиться расчет рассеивания с использованием ЭВМ по единым специальным программам. Следующим этапом является разработка мероприятий по уменьшению выбросов и оценке их экологической эффективности с учетом развития предприятия, а также по регулированию выбросов при наступлении кратковременных периодов неблагоприятных метеорологических условий. Последний этап работы — организация контроля за соблюдением установленных значений нормативов допустимых выбросов. На этом этапе важная роль принадлежит выбору метода и средств определения загрязнений в воздухе.

Если концентрация вредных веществ, например, в городе превышает ПДК, а последнюю по объективным причинам обеспечить невозможно, ГОСТом вводится поэтапное снижение выбросов, обеспечивающее соблюдение ПДВ или полное их предотвращение. Для каждого этапа при этом устанавливают временно согласованные выбросы вредных веществ (ВСВ). ВСВ рассчитывают по тем же методам, что и ПДВ. При этом помимо роста объемов производства учитывают также физико-географические и климатические условия местности, расположение производственных объектов, жилых застроек, селитебитных территорий (земельные участки, занятые городами и населенными пунктами городского типа, а также предназначенные для городского строительства) и др. Значения ВСВ для предприятий, производственных объектов и комплексов устанавливаются и пересматриваются в том же порядке, как и ПДВ. При установлении ПДВ учитывают значения фоновых концентраций вредных веществ в воздухе ($C_ф$, мг/м^3), в том числе от автотранспорта города, населенного пункта, то есть вместо С принимают $C + C_ф$.

Нормы концентрации вредных веществ в воздухе для растительного и животного мира учитывают в расчетах ПДВ (ВСВ), если они являются более жесткими, чем ПДК. Работы по установлению ПДВ (для предприятий, городов, населенных пунктов) выполняет головная организация по установлению ПДВ (ВСВ). Ею определяется порядок проведения и участники работ; выдается карта-схема населенного пункта, а также перечень предприятий и производственных объектов, подлежащих учету; по данным ведомственных проектов по определению ПДВ выполняется расчет суммарного загрязнения атмосферы от всех объектов населенного пункта; на картах-схемах наносятся в виде изолиний суммарные концентрации вредных веществ в воздухе (с учетом фона и выбросов от всех предприятий, в т.ч. от автотранспорта), по которым определяется ожидаемое загрязнение атмосферы при неблагоприятных метеорологических условиях.

В установленном порядке рассматриваются возникающие разногласия при установлении ПДВ (ВСВ), планы мероприятий по снижению загрязнения атмосферы, разработанные предприятиями. Головная организация на основе предложений ведомств по ПДВ (ВСВ) проводит окончательные расчеты загряз-

нения атмосферы от всех действующих и строящихся предприятий и объектов и устанавливает ПДВ (ВСВ) для каждого предприятия, источника и вредного вещества, разрабатывает комплексный план мероприятий по снижению загрязнений атмосферы по населенному пункту, обобщает результаты контроля и расчетов и оформляет их.

Контроль за соблюдением ПДВ (ВСВ) организуют предприятия, для которых они установлены. Основой контроля должны быть прямые методы измерения концентрации вредных веществ и объемов газовоздушной смеси после газоочистных установок или в местах непосредственного выделения вредных веществ в атмосферу. Для большей достоверности используют также балансовые, технологические, физические, химикоаналитические, комплексные и другие методы.

В соответствии с ГОСТ 17.2.3.02–78 «Охрана природы. Атмосфера. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями» установлен порядок установления, наблюдения и контроля за выбросами вредных веществ промышленными предприятиями.

При контроле за соблюдением ПДВ (ВСВ) выбросы вредных веществ определяют за период 20 мин., к которому относятся максимальные разовые ПДК, а также в среднем за сутки, месяц и год.

Если продолжительность выбрасывания вредных веществ в атмосферу меньше 20 мин., контроль производят по полному выбросу вредного вещества за это время.

При неблагоприятных метеорологических условиях в кратковременные периоды загрязнения атмосферы, опасного для здоровья населения, предприятия должны обеспечить снижение выбросов вредных веществ, вплоть до частичной или полной остановки предприятия.

В случае превышения ПДВ (ВСВ) в результате аварии, предприятие сообщает об этом органам, осуществляющим государственный контроль за охраной атмосферы, принимает меры по уменьшению выбросов, вплоть до остановки предприятия и ликвидации последствий загрязнения атмосферы.

Эффективность поэтапного снижения выбросов вредных веществ оценивают по степени фактического загрязнения атмосферы, определяемого в соответствии с нормативно допустимыми.

В период пусконаладочных работ госинспекция газоочистки проверяет соответствие газоочистного и пылеулавливающего оборудования проекту. Эксплуатация технологического оборудования без очистки газов категорически запрещается. Эффективность работы установок оценивают по методике ВНИИ газа по следующим показателям: количеству газа, проходящего через аппарат ($м^3/ч$), химическому составу газа (%), абсолютной влажности газа и сухого воздуха ($г/м^3$), запыленности газа до и после аппарата ($г/м^3$) и фракционной эффективности улавливания загрязняющего вещества.

По полученным данным о количестве и составе газовых выбросов в атмосферу составляют технические паспорта на установку, участок, предприятие, что позволяет установить наиболее опасные для загрязнения атмосферы объекты и наметить мероприятия для снижения вредных выбросов.

В техническом паспорте на выбросы вредных веществ в атмосферу указывают: источник, место и причины выбросов, их число, состав, максимальную

расчетную концентрацию в приземном слое населенных пунктов после рассеивания в атмосфере.

ПДК, установленные в настоящее время в разных странах, практически неоднозначны и несопоставимы, поэтому непригодны для решения международных экологических проблем, эффективного глобального мониторинга, корректной оценки междуведомственных природоохранных мероприятий, поэтому весьма важным является международное сотрудничество по координации и сближению нормативной документации различных стран.

К важным экологическим нормативам регулирующих хозяйственную деятельность предприятий относятся также безопасная средняя концентрация веществ, действующих на человека на длительном отрезке времени; критерии опасности длительного загрязнения воздуха для живых организмов и внешней среды и др.

При отсутствии корректно определенных ПДК для некоторых веществ вводится понятие временного ориентировочного безопасного уровня воздействия (ОБУВ). ОБУВ является временным гигиеническим нормативом для загрязняющего атмосферу вещества, который устанавливается расчетным методом для целей проектирования промышленных объектов. ОБУВ устанавливается на основе расчетов по физико-химическим свойствам или интерполяцией и экстраполяцией в рядах, близких по строению соединений по показателям острой опасности.

Одним из новых критериев по обеспечению качества окружающей среды, в том числе атмосферного воздуха, является оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС). ОВОС — это процедура учета экологических требований в соответствии с законодательством РФ при подготовке и принятии решений о социально-экономическом развитии общества. ОВОС организуется и осуществляется с целью выявления и принятия необходимых и достаточных мер по предупреждению возможных неприемлемых для общества экологических и связанных с ними социальных, экономических и других последствий реализации хозяйственной или иной деятельности. ОВОС, как правило, проводится на стадии подготовки предпроектных предложений, концепций, программ (в том числе инвестиционных), планов отраслевого и территориального социально-экономического развития, схем комплексного использования и охраны природных ресурсов, градостроительной документации, документации по созданию новой техники, технологии, материалов и веществ, технико-экономических обоснований.

1.5. Нормирование качества воздуха

Под качеством атмосферного воздуха понимают совокупность свойств атмосферы, определяющую степень воздействия физических, химических и биологических факторов на людей, растительный и животный мир, а также на материалы, конструкции и окружающую среду в целом.

Нормативами качества воздуха определены допустимые пределы содержания вредных веществ как в производственной (предназначенной для размещения промышленных предприятий, опытных производств научно-исследовательских институтов и т. п.), так и в селитебной зоне (предназначенной для размещения жилого фонда, общественных зданий и сооружений) населенных

пунктов. Основные термины и определения, касающиеся показателей загрязнения атмосферы, программ наблюдения, поведения примесей в атмосферном воздухе определены ГОСТом 17.2.1.03–84 «Охрана природы. Атмосфера. Термины и определения контроля загрязнения».

Предельно допустимая концентрация вредного вещества в воздухе рабочей зоны (ПДК$_{рз}$) — концентрация, которая при ежедневной (кроме выходных дней) работе в течение 8 часов, или при другой продолжительности, но не более 41 часа в неделю, на протяжении всего рабочего стажа не должна вызывать заболевания или отклонения в состоянии здоровья, обнаруживаемые современными методами исследования, в процессе работы или в отдаленные сроки жизни настоящего и последующего поколений. Рабочей зоной следует считать пространство высотой до 2 м над уровнем пола или площади, на которой находятся места постоянного или временного пребывания рабочих.

Как следует из определения, ПДК$_{рз}$ представляет собой норматив, ограничивающий воздействие вредного вещества на взрослую работоспособную часть населения в течение периода времени, установленного трудовым законодательством. Совершенно недопустимо сравнивать уровни загрязнения селитебной зоны с установленными ПДК$_{рз}$, а также говорить о ПДК в воздухе вообще, не уточняя, о каком нормативе идет речь.

Предельно допустимая концентрация максимальная разовая (ПДК$_{мр}$) — концентрация вредного вещества в воздухе населенных мест, не вызывающая при вдыхании в течение 20 минут рефлекторных (в т. ч., субсенсорных) реакций в организме человека.

Понятие ПДК$_{мр}$ используется при установлении научно-технических нормативов — предельно допустимых выбросов загрязняющих веществ. В результате рассеяния примесей в воздухе при неблагоприятных метеорологических условиях на границе санитарно-защитной зоны предприятия концентрация вредного вещества в любой момент времени не должна превышать ПДК$_{мр}$.

Предельно допустимая концентрация среднесуточная (ПДК$_{сс}$) — это концентрация вредного вещества в воздухе населенных мест, которая не должна оказывать на человека прямого или косвенного воздействия при неограниченно долгом (годы) вдыхании. Таким образом, ПДК$_{сс}$ рассчитана на все группы населения и на неопределенно долгий период воздействия и, следовательно, является самым жестким санитарно-гигиеническим нормативом, устанавливающим концентрацию вредного вещества в воздушной среде. Именно величина ПДК$_{сс}$ может выступать в качестве «эталона» для оценки благополучия воздушной среды в селитебной зоне.

Соотношение различных видов ПДК в воздухе для некоторых веществ приведено в табл. 1.5.1.

Таблица 1.5.1

Соотношение различных видов ПДК в воздухе для некоторых веществ

Вещество	**ПДК$_{сс}$, мг/м^3**	**ПДК$_{мр}$, мг/м^3**	**ПДК$_{рз}$, мг/м^3**
Азота оксид (II)	0,06	0,6	30
Кобальта сульфат	0,0004	0,001	0,005
4-хлоранилин	0,01	0,04	0,30

В табл. 1.5.2 приведены рекомендации ВОЗ по содержанию в воздухе некоторых неканцерогенных веществ.

Таблица 1.5.2

Рекомендации ВОЗ по содержанию в воздухе некоторых неканцерогенных веществ

Вещество	**Среднее значение концентрации**	**Период усреднения**
Азота диоксид	400 мкг/м^3 150 мкг/м^3	1 ч 24 ч
Ванадий	1 мкг/м^3	24 ч
Дихлорметан (метиленхлорид)	3 мг/м^3	24 ч
1,2-дихлорэтан	0,7 мг/м^3	24 ч
Кадмий	1–5 нг/м^3 10–20 нг/м^3	1 год (сельские районы) 1 год (города)
Марганец	1 мкг/м^3	1 год *
Озон	150–200 мкг/м^3 100–120 мкг/м^3	1 ч 8 ч
Ртуть	1 мкг/м^3**	1 год
Свинец	0,5–1,0 мкг/м^3	1 год
Сероводород	150 мкг/м^3	24 ч
Сероуглерод	100 мкг/м^3	24 ч
Серы диоксид	500 мкг/м^3 350 мкг/м^3	10 мин 1 ч
Стирол	800 мкг/м^3	24 ч
Тетрахлорэтилен	5 мг/м^3	24 ч
Толуол	8 мг/м^3	24 ч
Трихлорэтилен	1 мг/м^3	24 ч
Углерода монооксид	100 мг/м^3*** 60 мг/м^3*** 30 мг/м^3*** 10 мг/м^3	15 мин 30 мин 1 ч 8 ч
Формальдегид	100 мкг/м^3	30 м

* Раздражает дыхательные пути; настоящий уровень информации не позволяет разработать рекомендации для более короткого периода времени.

** Значение для воздуха помещений; для атмосферного воздуха рекомендации не разработаны вследствие многочисленности путей поступления в организм из внешней среды.

*** При данной концентрации экспозиция не должна превышать указанное время и не повторяться в течение 8 часов.

В табл. 1.5.3 приведены таблицы ПДК$_{мр}$ и ПДК$_{сс}$ для многих загрязняющих веществ, а также некоторые международные нормативы и стандарты качества атмосферного воздуха.

Таблица 1.5.3

Предельно допустимые концентрации в атмосферном воздухе населенных мест

Вещество	$ПДК_{мр}^{I}$, мг/м³	$ПДК_{сс}^{II}$, мг/м³	ОБУВ
Азота диоксид	0,085	0,04	–
Азота оксид (II)	0,4	0,06	–
Азотная кислота	0,4	0,15	–
Акролеин	0,03	0,03	–
Аммиак	0,2	0,04	–
Анилин	0,05	0,03	–
Ацетальдегид	0,01	0,01	–
Ацетилен	–	–	1,5
Ацетон	0,35	0,35	–
Барий металлический	–	–	0,004
Белок пыли белково-витаминного концентрата (БВК)	–	0,001	–
Бенз(а)пирен	–	1 нг/м³	–
Бензин нефтяной малосернистый (в пересчете на углерод)	5	1,5	–
Бензин сланцевой (в пересчете на углерод)	0,05	0,05	–
Бензол	1,5	0,1	–
Бериллий и его соединения (в пересчете на бериллий)	–	–	0,00001
Борная кислота	–	0,02	–
Бром	–	0,04	–
Бромоводород	0,1	0,1	–
1,3-бутадиен	3	1	–
Бутан	200	–	–
Ванадия (V) оксид	–	0,002	–
Взвешенные вещества (недифференцированная по составу пыль, содержащаяся в воздухе населенных пунктов)[III]	0,5	0,15	–
Винилацетат	0,15	0,15	–
Газообразные соединения фтора (в пересчете на фтор)	0,02	0,005	–
Гексан	60	–	–
Гексахлорбензол	–	–	0,013
Гексахлорциклогексан (гексахлоран)	0,03	0,03	–
Диборан	–	–	0,05
Диметиламин	0,005	0,005	–
Диметиланилин	0,0055	0,0055	–
Диметилформамид	0,03	0,03	–
м-динитробензол	–	–	0,01
о-динитробензол	–	–	0,01
п-динитробензол	–	–	0,01
Дихлорэтан	3	1	–
Диэтиловый эфир	1	0,6	–

Вещество	ПДК$_{мр}^{I}$, мг/м^3	ПДК$_{сс}^{II}$, мг/м^3	ОБУВ
Диэтилртуть (в пересчете на ртуть)	—	0,0003	—
Железа оксид (в пересчете на железо)^{IV}	—	—	0,04
Железа сульфат (в пересчете на железо)^{IV}	—	0,007	—
Железа хлорид (в пересчете на железо)^{IV}	—	0,004	—
Изопропилбензол	0,014	0,014	—
Йод	—	0,03	—
Кадмия нитрат (в пересчете на кадмий)	—	0,0003	—
Капролактам (пары, аэрозоль)	0,06	0,06	—
Карбамид (мочевина)	—	0,2	—
Карбонат таллия (в пересчете на таллий)	—	0,0004	—
Кобальт металлический	—	0,001	—
Ксилол	0,2	0,2	—
Магния оксид	0,4	0,05	—
Марганец и его соединения (в пересчете на марганец)	0,01	0,001	—
Меди оксид (в пересчете на медь)	—	0,002	—
Меди сульфат (в пересчете на медь)	0,003	0,004	—
Меди хлорид (в пересчете на медь)	—	0,002	—
Метан	—	—	50
Метанол	1	0,5	—
Метилметакрилат	0,1	0,01	—
Мышьяк в неорганических соединениях (в пересчете на мышьяк)	—	0,003	—
Пенициллин	0,05	0,0025	—
Пентакарбонил железа	—	—	0,001
Пентан	100	—	—
Плохо растворимые неорганические фториды (в пересчете на фтор)	0,2	0,03	—
Пропанол	0,3	0,3	—
Пыль древесная	—	—	0,1
Пыль меховая (шерстяная, пуховая)	—	—	0,03
Пыль неорганическая, содержащая SiO_2 20% — 70% (шамот, цемент и др.)	0,3	0,1	—
Пыль неорганическая, содержащая SiO_2 выше 70%(динас и др.)	0,15	0,05	—
Пыль неорганическая, содержащая SiO_2 ниже 20% (доломит и др.)	0,5	0,15	—
Пыль стекловолокна	—	—	0,06
Пыль хлопковая	0,5	0,05	—
Растворимые соли бария (ацетат, нитрат, хлорид)	—	—	0,004
Растворимые соли никеля (в пересчете на никель)	0,002	0,0002	—
Ртуть металлическая	—	0,0003^{V}	—
Сажа	0,15	0,05	—

Вещество	$ПДК_{мр}^{I}$, мг/м³	$ПДК_{сс}^{II}$, мг/м³	ОБУВ
Свинец и его неорганические соединения (в пересчете на свинец)	0,001	0,0003	—
Свинец и его соединения, кроме тетраэтилсвинца (в пересчете на свинец)	—	0,0003	—
Сера элементарная	—	—	0,07
Серная кислота	0,3	0,1	—
Сероводород	0,008	—	—
Сероуглерод	0,03	0,005	—
Серы диоксид	0,5	0,05	—
Синильная кислота	—	0,01	—
Скипидар	2	1	—
Смесь водорастворимых соединений ртути (в пересчете на ртуть)	—	—	0,0008
Смесь плохо растворимых в воде соединений ртути (в пересчете на ртуть)	—	—	0,0009
Смесь плохо растворимых и растворимых в воде соединений ртути (в пересчете на ртуть)	—	—	0,001
Стирол	0,04	0,002	—
Сурьма	—	—	0,01
Тетраэтилсвинец	—	—	0,000003
Титана диоксид	—	—	0,5
Толуол	0,6	0,6	—
Уксусная кислота	0,2	0,06	—
Фенол	0,01	0,003	—
Формальдегид	0,035	0,003	—
Фосген	—	—	0,003
Хлор	0,1	0,03	—
Хлороводород	0,2	0,2	—
Хорошо растворимые неорганические фториды (в пересчете на фтор)	0,03	0,01	—
Хром (VI) (в пересчете на оксид хрома (VI))	0,0015	0,0015	—
Циклопентадиены	—	—	0,05
Цинка оксид (в пересчете на цинк)	—	0,05	—
Четыреххлористый углерод	4	0,7	—
Эпихлоргидрин	0,2	0,2	—
Этанол	5	5	—
Этилбензол	0,02	0,02	—
Этилен	3	3	—
Этиленоксид	0,3	0,03	—
Этилхлорид	—	0,2	—

$I_{мр}$ — максимальная разовая.

$II_{сс}$ — среднесуточная.

III — ПДК не распространяется на аэрозоли неорганических и органических соединений (металлы и их соли, полимеры, биологические, лекарственные препараты и др.), для которых устанавливаются соответствующие ПДК.

IV — при совместном присутствии контроль проводится по ПДК хлорида железа.

V — то же — для всех неорганических соединений ртути (в пересчете на ртуть).

Предложен ряд комплексных показателей загрязнения атмосферы (совместно несколькими загрязняющими веществами). Наиболее распространенным и рекомендованным методической документацией Госкомэкологии является комплексный индекс загрязнения атмосферы (ИЗА). Его рассчитывают как сумму нормированных по $ПДК_{сс}$ и приведенных к концентрации диоксида серы средних содержаний различных веществ:

$$Y_n = \sum_{i=1}^{n} Y_i = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{q_{cpi}}{ПДК_{cci}} \right)^{c_i},$$

где Y_i — единичный индекс загрязнения для i-го вещества;

q_{cpi} — средняя концентрация i-го вещества;

$ПДК_{cci}$ — $ПДК_{сс}$ для i-го вещества;

c_i — безразмерная константа приведения степени вредности i-го вещества к вредности диоксида серы, зависящая от того, к какому классу опасности (см. ниже) принадлежит загрязняющее вещество.

Классы опасности	1	2	3	4
Константа c_i	1,7	1,3	1,0	0,9

Для сопоставления данных о загрязненности несколькими веществами атмосферы разных городов или районов города комплексные индексы загрязнения атмосферы должны быть рассчитаны для одинакового количества (n) примесей. При составлении ежегодного списка городов с наибольшим уровнем загрязнения атмосферы для расчета комплексного индекса Y_n используют значения единичных индексов Y_i тех пяти веществ, у которых эти значения наибольшие.

В последнее время растет число публикаций, описывающих эффекты действия загрязняющих веществ на биоту, в том числе атмосферных примесей на растительность. Так, установлено, что хвойные породы деревьев, лишайники чувствительнее прочих видов реагируют на присутствие в воздухе кислых газов, в первую очередь сернистого ангидрида. Исследователи предлагают установить предельно допустимые концентрации для диких видов с тем, чтобы использовать эти нормативы при оценке ущерба и ограничении воздействия на особо охраняемые природные объекты. Однако широкое применение чувствительность растений нашла лишь в биологическом мониторинге; экологическое нормирование состояния атмосферного воздуха на практике фактически не реализовано.

Глава 2

Оценка состояния атмосферного воздуха

2.1. Характеристика состояния атмосферы

Атмосфера (от *греч.* atmos — ‘пар’ и sphaira — ‘шар’) — газообразная оболочка Земли, которая вращается вместе с Землей как единое целое.

Наличие атмосферы является одним из необходимых условий существования жизни на Земле. Атмосфера регулирует климат Земли; суточные колебания температуры на планете без атмосферы достигали бы 200 °С. В настоящее время средняя температура Земли, благодаря существованию атмосферы, составляет +14 °С. Атмосфера пропускает тепловое излучение Солнца и сохраняет тепло, в ней образуются облака, дождь, снег, ветер. Она также выполняет роль переносчика влаги на Земле, является средой распространения звука, без воздуха на Земле царила бы немая тишина. Атмосфера служит источником кислородного дыхания, воспринимает газообразные продукты обмена веществ, оказывает влияние на теплообмен и другие функции живых организмов. Изменение физических и химических свойств атмосферы может отрицательно сказаться на здоровье людей, их работоспособности, продолжительности жизни.

Атмосфера состоит на 78,09 % из азота и на 20,95 % из кислорода, а на долю остальных компонентов: водяного пара, инертных и ряда других газов (аргона, углекислого газа, неона, гелия, метана, криптона, водорода, ксенона, озона, окиси углерода, окислов азота, аммиака, йода) приходится около 1 % объема атмосферы. Этот состав практически не изменяется до высоты в несколько десятков километров. Другие газы и аэрозоли рассматривают как атмосферные примеси или как вещества, загрязняющие атмосферу.

Азот выделяется из земной коры в результате деятельности микроорганизмов. Горные породы содержат его в 50 раз больше, чем земная атмосфера. Атмосферный азот для биологических процессов имеет сравнительно небольшое значение, так как большинством организмов он непосредственно не усваивается и в круговорот вовлекается в малых количествах.

Кислород в свободном состоянии является продуктом жизнедеятельности растительных организмов. Он является составной частью всех животных и растительных организмов, входя в состав белков, жиров и углеводов. Кислород используется всеми компонентами экосистем, обеспечивает дыхание животных и растений в атмосфере, почве, воде, участвует во всех химических реакциях в горных породах, почве и гидросфере.

В теле человека содержится 65 % кислорода. При недостатке кислорода нарушается деятельность всех органов животных и человека.

За исключением зеленых растений, с которыми атмосферный кислород находится в двустороннем взаимодействии (поглощается зелеными растениями и выделяется при фотосинтезе), всеми остальными организмами он только потребляется в разнообразных реакциях окисления.

Атмосфера делится на три основные части: нижнюю — тропосферу, среднюю — стратосферу и верхнюю — ионосферу.

Тропосфера характеризуется снижением температуры по высоте с градиентом на 6 °С/км (в отдельных слоях температура может с увеличением высоты повышаться — такое ее распределение называется инверсией температуры). Высота тропосферы изменяется от 7–10 км над полярными и до 16–18 км над экваториальными зонами. Вследствие уменьшения плотности воздуха с увеличением высоты в тропосфере сосредоточено примерно 80 % массы воздуха, а также основное количество атмосферных примесей. Она содержит практически весь водный пар, при конденсации которого образуются облака различных форм, а непосредственно у Земли — туманы. Выделяют облачность нижнюю (до высоты 1–2 км), среднюю (на высоте 2–4 км) и верхнюю (6–10 км).

Стратосфера распространяется до высоты 60 км; температура в ней по вертикали примерно постоянна. На высоте 20–30 км отмечаются слои с повышенной концентрацией озона (озоновый слой), а иногда и аэрозолей.

Ионосфера подразделяется на мезосферу и термосферу, имеет вертикальную протяженность в сотни километров; воздух в ней находится в ионизированном состоянии.

С высотой химический состав атмосферы, давление, плотность, температура и другие ее химические свойства меняются. До высоты 100 км химический состав воздуха существенно не меняется. Несколько выше атмосфера состоит, главным образом, из азота и кислорода, на высотах 90–100 км появляется атомарный кислород, а выше газы, составляющие атмосферу, находятся в атомарном состоянии.

Кислородно-азотный состав атмосферы сохраняется примерно до высоты 400–600 км. С высоты около 600 км начинает преобладать гелий. Гелиевый пояс, или, как его назвал В. И. Вернадский, «гелиевая корона Земли», простирается примерно до высоты 160 км, а далее, выше 2–3 тысяч км, преобладающим становится водород. Так, постепенно газовая оболочка, окружающая Землю, переходит в экзосферу из межзвездного газа, состоящего из 76 % (по массе) из водорода и на 23 % — из гелия.

Эти два элемента являются самыми распространенными во Вселенной. В экзосфере температура достигает более +200 °С и молекулы крайне разряженного воздуха, беспрепятственно двигаясь с огромной скоростью, уходят в межпланетное пространство.

Для атмосферы свойственно турбулентное состояние. Диффузия примесей и обмен теплом, количеством движения, влагой, обусловленные турбулентностью, значительно интенсивнее, чем обусловленные молекулярными процессами. В связи с этим рассеивание примесей в атмосфере определяется как турбулентная диффузия. Интенсивность турбулентности характеризуется коэффициентом обмена, который зависит от скорости ветра и распределения температуры воздуха по высоте.

В тропосфере выделяют пограничный слой атмосферы высотой до 1–2 км, где существенны влияние подстилающей поверхности и суточные колебания метеорологических факторов. О расположенном над ним слое воздуха говорят как о «свободной атмосфере». Скорость ветра вблизи подстилающей поверхно-

сти возрастает от нуля до величины, характерной для свободной атмосферы. Эта величина определяется горизонтальным градиентом давления. Распределение температуры воздуха у земли часто характеризуется вертикальным градиентом.

Слой воздуха высотой 50–100 м, а иногда и выше над земной поверхностью называют приземным: метеорологические факторы в нем изменяются наиболее резко. Для этого слоя характерны примерно постоянные по высоте значения потоков воздуха и количества тепла.

Упорядоченный перенос воздуха на общем фоне турбулентных движений определяется как конвективный поток в атмосфере. Возникают такие потоки вследствие перегрева или неравномерного нагрева поверхности Земли. В развитии местных метеорологических процессов, в распространении атмосферных примесей от их источников существенную роль играют локальные конвективные потоки. Конвекция над термически однородной подстилающей поверхностью отмечается обычно в теплое полугодие при малооблачной погоде и значительных сверхдиабатических градиентах температуры пограничного слоя атмосферы. К конвективным течениям относят также горно-долинные ветры и бризовую циркуляцию. При достаточно большой инверсивности «острова тепла», характерной для климата города, и слабом ветре может возникать местная циркуляция, способствующая переносу атмосферных примесей от их источников на окраине города к его центру.

2.2. Загрязнение атмосферы

В атмосферном воздухе под действием внешних и внутренних факторов постоянно протекают гидродинамические, тепловые, электромагнитные, химические и фотохимические процессы, от которых зависят температура, давление, скорость перемещения и химический состав воздуха.

Необходимость изучения химического состава атмосферного воздуха вызвана тем, что, зная его природный состав, легко установить присутствие посторонних примесей и рассматривать их как ингредиенты, загрязняющие атмосферу.

Природный химический состав атмосферного воздуха (в пересчете на сухой воздух) приведен ниже, % (об.):

Азот……78,084
Кислород……20,9476
Пары воды……3–4
Аргон……0,934
Диоксид углерода……$3{,}14 \cdot 10^{-2}$
Неон……$1{,}818 \cdot 10^{-3}$
Гелий……$524 \cdot 10^{-6}$
Криптон……$114 \cdot 10^{-6}$
Водород……$50 \cdot 10^{-6}$
Ксенон……$8{,}7 \cdot 10^{-6}$
Озон и др.: летом……$7{,}0 \cdot 10^{-6}$;
зимой……$2{,}0 \cdot 10^{-6}$

Атмосферный воздух никогда не бывает абсолютно чистым. Общее количество загрязнений, находящихся постоянно в атмосферном воздухе над планетой, составляет примерно 10 млн т, что обусловлено как производственной деятельностью человека, так и естественными процессами, протекающими в природе.

Естественное загрязнение атмосферы происходит в результате пыльных бурь, вулканической деятельности, лесных пожаров и т. д.

Источником загрязнения воздуха служит и мировой океан. Мельчайшие брызги воды, поднимаясь над поверхностью моря или океана, довольно быстро испаряются, а растворенные в них соли кальция, магния, натрия, калия и других веществ попадают в атмосферу.

При извержении вулканов в атмосферу вместе с газообразными продуктами выбрасывается большое количество пепла. В состав вулканических газов входят HCl, HF, NH_3, Cl, CO, CO_2, H_2S и др. В атмосферный воздух попадает также космическая пыль из межпланетного пространства.

Искусственное загрязнение атмосферы происходит в результате практической деятельности человека.

До 70 % всех загрязнений приходится на долю автомобильного транспорта. Автомобильные выхлопные газы представляют собой смесь примерно 200 веществ. В них содержатся углеводороды, оксид углерода, оксиды азота, альдегиды, обладающие резким запахом и раздражающим действием, и др. Вследствие неполного сгорания в двигателе автомашины часть углеводородов превращается в сажу и смолистые вещества. Особенно много сажи и смол образуется при технической неисправности мотора и в моменты, когда водитель, форсируя работу двигателя, уменьшает соотношение воздуха и горючего, стремясь получить так называемую богатую смесь.

Практически во всех отраслях промышленности имеются выбросы вредных веществ в атмосферный воздух. В атмосферу попадают аэрозольные частицы, газообразные вещества и пары (оксиды углерода, серы, азота, сероводород, сероуглерод, углеводороды, кислоты, щелочи, нитриты, нитраты, соединения свинца, железа, фтора), неприятно пахнущие вещества, радиоактивные вещества и др.

Атмосферные загрязнения не имеют никаких границ. Испытание ядерного оружия в одной стране вызывает увеличение радиоактивного заражения воздуха в ряде других стран, расположенных от нее на значительном расстоянии и даже на другом континенте. Известно, что пыль может переноситься на расстояние более 6000 км, дальность распространения выбросов промышленных предприятий достигает сотен километров. От загрязнения страдают не только страны — «производители» загрязнения, но и страны-соседи. Например, загрязненный воздух с территории США нередко оказывается над территорией Мексики, загрязнения из ФРГ распространяются на территории Норвегии, Швеции, Дании.

Наиболее существенными источниками поступлений вредных веществ в атмосферу в сельском хозяйстве являются предприятия по производству всех видов удобрений и ядохимикатов. Кроме того, а сельских районах источниками загрязнения воздуха являются животноводческие и птицеводческие фермы, промышленные комплексы по производству и переработке мяса, предприятия

по эксплуатации сельхозтехники, энергетические и теплосиловые установки. В местах значительного содержания скота и птицы в атмосферу могут поступать и распространяться на значительные расстояния такие вещества, как аммиак, сероводород и другие вредные газы. К источникам загрязнения атмосферного воздуха относятся также поля, на которые вносятся высокотоксичные пестициды, и склады, в которых они хранятся и происходит протравливание ими семян.

Искусственное загрязнение воздушного бассейна существенно изменяет природный состав атмосферного воздуха.

В результате загрязнения атмосферы изменяются климатические и микроклиматические условия. В загрязненной атмосфере снижается видимая составляющая солнечной радиации до 50 %, прямая радиация — до 15 % по сравнению с радиацией при незагрязненной атмосфере. Ультрафиолетовая радиация уменьшается на 30 %, а, как известно, она характеризуется антибактерицидным действием. Микроклиматические изменения, происходящие в городах и индустриальных центрах, характеризуются увеличением средней температуры воздуха на 2–9 °С, уменьшением видимости, увеличением осадков и облачности, изменением циркуляции воздуха.

Газовый состав и свойства атмосферного воздуха в значительной степени зависят от его загрязнения. При этом загрязнение атмосферы может быть антропогенным — обусловленным выбросами отходов от различных отраслей хозяйственной деятельности человека и естественным — вызванным природными процессами.

Современное состояние атмосферы характеризуется значительным увеличением содержания вредных веществ, вызванным все возрастающим антропогенным загрязнением атмосферного воздуха в результате хозяйственной деятельности человека, существенным снижением защитных функций озонового слоя от солнечной радиации в связи с его уменьшением, повышением температуры атмосферы в связи с ростом влияния «парникового эффекта» и рядом других изменений, имеющих значительное влияние на ее состояние и негативные последствия для окружающей среды.

Антропогенные загрязнения отличаются многообразием видов и многочисленностью источников их выброса. Если в начале XX века в промышленности использовалось 19 химических элементов, то в середине века в промышленное производство было вовлечено около 50, а в 1970-х гг. — уже практически все элементы таблицы Менделеева. Это существенно сказалось на составе промышленных выбросов и привело к качественно новому загрязнению атмосферы, в частности, аэрозолями тяжелых и редких металлов, синтетическими соединениями, не существующими и не образующимися в природе, радиоактивными, канцерогенными, бактериологическими и другими веществами.

Современное состояние атмосферы, особенно в промышленно развитых регионах, в значительной степени зависит от антропогенных воздействий, вызванных вредными выбросами промышленных, энергетических, транспортных, сельскохозяйственных и других источников. При этом вредными выбросами могут быть различные газы, аэрозоли и тепло.

Загрязнение воздуха может вызвать изменение метеорологических процессов и климата на достаточно большой площади. При возрастании масштабов

и интенсивности загрязнения воздуха некоторыми примесями возникает опасность непреднамеренного воздействия их на атмосферу. Например, увеличение в атмосфере содержания углекислого газа в результате увеличения количества сжигаемого топлива может вызвать некоторое глобальное повышение температуры атмосферы, что, в свою очередь, должно сказаться на изменении режима ветров, осадков и других метеорологических процессов.

Определенное влияние на климат оказывает увеличение количества аэрозолей в атмосфере в результате снижения солнечной радиации. Запыленность воздуха увеличивается не только из-за поступления в атмосферу промышленной пыли, но и из-за образования вторичных аэрозолей вследствие превращения газовых выбросов, значительного поступления пыли в результате распашки почв, опустынивания земель под влиянием деятельности человека.

С развитием промышленного производства возрастает выделение тепловой энергии в атмосферу. К наиболее крупным источникам теплового загрязнения относятся электростанции: при конденсации выбрасываемой ими влаги образуются искусственные облака и туманы, которые могут вызывать нежелательные последствия — нарушения метеорологического режима. Так, на Аляске и других полярных областях выделение водяного пара при сжигании топлива на электростанциях часто приводит к появлению в холодное время года ледяных туманов, затрудняющих работу близлежащих аэропортов. Конденсация большого количества влаги приводит к гололеду и обледенению проводов, снижению видимости и уменьшению продолжительности солнечного света.

К числу веществ, выделяемых естественными источниками, относятся: пыль растительного, вулканического и космического происхождения; пыль, возникающая при эрозии почвы; частицы морской соли; туман, дым и газ от лесных и степных пожаров; газы вулканического происхождения; различные продукты растительного, животного и микробиологического происхождения и др.

Естественные источники загрязнений носят либо распределенный характер, как, например, выпадение космической пыли (они практически не влияют на условия обитания), либо имеют кратковременный стихийный характер, например лесные и степные пожары, извержения вулканов и т. п. Уровень загрязнения атмосферы естественными источниками является фоновым и мало изменяется с течением времени.

Таким образом, воздействие атмосферных загрязнений на окружающую среду включает ряд эффектов, влияющих на состояние земной атмосферы и протекание атмосферных процессов. К числу наиболее распространенных эффектов следует отнести:

1. Уменьшение прозрачности атмосферы и ухудшение видимости.
2. Влияние загрязнения атмосферы на выпадение осадков.
3. Изменение метеорологических условий и климата в глобальном масштабе.
4. Уменьшение толщины озонового слоя.
5. Влияние на растительность.
6. Влияние на экосистемы и животный мир.
7. Ухудшение здоровья населения.
8. Воздействие на вещества, материалы, конструкции, здания, сооружения.

Основными, наиболее распространенными загрязнителями атмосферы антропогенного происхождения являются: диоксид серы, оксид и диоксид углерода, окислы азота, летучие органические соединения, совокупность различных твердых частиц (пыли или аэрозолей), а также углеводороды, сероводород, сероуглерод, фенол, свинец, фториды и др. В воздушный бассейн выбрасывается много других веществ, характерных для химической, фармацевтической, горно-добывающей, микробиологической и других отраслей промышленности.

Преобладающее содержание в атмосфере сернистого газа (SO_2) и окислов азота (NO_x) имеет антропогенное происхождение: SO_2 поступает в атмосферу в основном при сжигании твердого и жидкого топлива, содержащего в своем составе серу, а NO_x — при сжигании топлива при высоких температурах в транспортных двигателях, на тепловых электростанциях и некоторых промышленных объектах.

Природные источники пыли и оксида углерода (CO) значительно сильнее антропогенных.

Примеси в атмосфере в результате фотохимических, каталитических и других реакций подвержены превращениям, при этом в результате реакций между собой может наблюдаться синергический эффект, то еть эффект усиления вредного действия нового вещества. В результате самоочищения атмосферы вредные вещества могут удаляться из атмосферы, при этом время «жизни» для одних веществ определяется часами, для других — днями и годами.

Атмосферные примеси подчиняются движению воздуха. Их распространение обусловлено закономерностями турбулентной диффузии. Изменения их содержания в пространстве неравномерны и зависят от распределения источников загрязнения, метеорологических и топографических факторов.

В присутствии загрязняющих веществ уменьшается прозрачность атмосферы и ухудшается видимость. Ухудшение видимости оказывает отрицательное влияние с эстетической точки зрения, а также может привести к опасным последствиям, особенно на транспорте. Уменьшение прозрачности является косвенной характеристикой степени загрязнения атмосферы. Не все атмосферные загрязнения влияют на прозрачность атмосферы. Как правило, влияние на прозрачность атмосферы оказывают те загрязнители, которые находятся в виде аэрозоля, или в виде газа, способного образовывать аэрозоль в результате реакций в атмосфере, или представляют собой окрашенный газ. Таким образом, основными загрязнителями, влияющими на прозрачность атмосферы, являются следующие:

1. Выбросы, содержащие пыль, дым, сажу и другие твердые частицы.

2. SO_2 и другие газообразные соединения серы, которые с высокой скоростью реагируют в атмосфере, образуя частицы сульфата и серной кислоты, находящиеся в виде аэрозоля.

3. NO и NO_2, которые реагируют с образованием нитрата и HNO_3 в виде частиц, входящих в состав аэрозоля; при определенных условиях красно-бурая окраска NO_2 может послужить причиной изменения цвета дымовых выбросов и дымки в городских районах.

4. Фотохимическое загрязнение воздуха (например, образование смога), связанное с образованием в результате фотохимических реакций аэрозолей с частицами субмикронных размеров.

2.3. Классификация загрязнителей воздуха

В зависимости от источника и механизма образования различают первичные и вторичные загрязнители воздуха. Первые представляют собой химические вещества, попадающие непосредственно в воздух из стационарных или подвижных источников. Вторичные образуются в результате взаимодействия в атмосфере первичных загрязнителей между собой и с присутствующими в воздухе веществами (кислород, озон, аммиак, вода) под действием ультрафиолетового излучения. Часто вторичные загрязнители, например вещества группы пероксиацетилнитратов (ПАН), гораздо токсичнее первичных загрязнителей воздуха. Большая часть присутствующих в воздухе твердых частиц и аэрозолей является вторичными загрязнителями.

С учетом токсичности и потенциальной опасности загрязнителей, их распространенности и источников эмиссии они были разделены условно на несколько групп:

1) основные (критериальные) загрязнители атмосферы — оксид углерода, диоксид серы, оксиды азота, углеводороды, твердые частицы и фотохимические оксиданты;

2) полициклические ароматические углеводороды (ПАУ);

3) следы элементов (в основном металлы);

4) постоянные газы (диоксид углерода, фторхлорметаны и др.);

5) пестициды;

6) абразивные твердые частицы (кварц, асбест и др.);

7) разнообразные загрязнители, оказывающие многостороннее действие на организм (нитрозамины, озон, полихлорированные бифенилы (ПХБ), сульфаты, нитраты, альдегиды, кетоны и др.).

Все критериальные загрязнители относятся к первичным загрязнителям атмосферы. Оксиды азота образуются преимущественно при высокотемпературной фиксации азота и кислорода в силовых установках и двигателях внутреннего сгорания. Оксид азота образуется при электрических разрядах в атмосфере и присутствует в отработавших газах автомобилей. Ежегодно в атмосферу поступает около $5 \cdot 10^7$ т оксидов азота, из них 53 % из антропогенных источников. В конечном итоге оксиды азота превращаются в атмосфере в нитраты.

Диоксид серы образуется при сгорании топлива с высоким содержанием серы (каменный уголь, нефть). Источниками эмиссии этого токсичного газа являются стационарные источники горения, например ТЭС (85–95 %), промышленные объекты — производство рафинированной нефти, удобрений, серной кислоты и нефтехимических продуктов (5–10 %), двигатели внутреннего сгорания (2–7 %). Диоксид серы относят к главным и наиболее важным загрязнителям воздуха, опасным для животных и растений и участвующим в образовании фотохимического смога. Общая эмиссия диоксида серы в атмосферу составляет $8 \cdot 10^7$ т в год, то есть значительно превосходит поступление в атмосферу большинства других токсичных химических веществ, и постоянно возрастает пропорционально росту потребления энергии.

Оксид углерода — наиболее опасный и чрезвычайно распространенный из газообразных загрязнителей воздуха, токсичность которого обусловлена

реакцией с гемоглобином крови. Образование CO происходит при неполном сгорании различного топлива. Естественным источником CO являются лесные пожары и фотохимическое превращение органических соединений в атмосфере. Около 25% CO антропогенного происхождения. Значительное количество (в США почти 40% всех загрязнений атмосферы) оксида углерода поступает в атмосферу городов и промышленных регионов с отработавшими газами автотранспорта. Средняя концентрация CO в атмосфере (около 10^{-5}%) значительно увеличивается (до $3 \cdot 10^{-3}$%) в районах автострад и в городах в часы пик.

Предполагается, что в будущем снизится загрязнение воздуха от стационарных источников такими токсичными веществами, как пыль и оксиды серы, углерода и азота. Однако большую опасность будут представлять газы и пары органических веществ и тяжелые металлы (свинец, кадмий, бериллий и др.).

Концентрация углеводородов, выделяющихся в воздух из природных источников, немногим более 1 мг/м^3. Ежегодная эмиссия углеводородов составляет $3 \cdot 10^8$ т в год, причем 50% этого количества обусловлено работой транспорта, около 15% составляет выделение углеводородов при сгорании жидкого топлива в жилых районах и ТЭС, а 26% приходится на сгорание угля, мусора (в среднем на планете приходится уничтожать около 1 м^3 отходов в год на человека) и испарение топлива и растворителей. В «усредненном» автомобильном выхлопе содержится около 400 мг/м^3 парафиновых, 120 мг/м^3 ацетиленовых, 200 мг/м^3 ароматических и 300 мг/м^3 олефиновых углеводородов.

Содержащиеся в атмосфере твердые частицы представляют собой пыль, песок, золу, сажу, вулканическую пыль и аэрозоли органической (высокомолекулярные соединения) и неорганической природы. Часто токсичность твердых частиц обусловлена адсорбцией на их поверхности таких опасных соединений, как ПАУ или нитрозамины.

Фотооксиданты образуются в атмосфере при взаимодействии реакционноспособных углеводородов и оксидов азота под действием УФ-радиации. В конечном итоге образуются высокотоксичные вещества: пероксиацетилнитрат, пероксибензоилнитрат и др.). Уже при концентрации 0,2 мг/м^3 эти соединения обладают резким лакриматорным действием, повреждают растения и разрушают резину. Еще более токсичны пероксибутил- и пероксипропилнитраты. Соединения этой группы нестойки, особенно при повышенной температуре, и разлагаются с образованием более простых продуктов, например метилнитратов и диоксида углерода. Оксиданты загрязняют воздушный бассейн большинства крупных городов мира, поскольку их образование связано с развитием промышленности и автотранспорта.

Следующая группа загрязнителей — полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) — могут быть как первичными, так и вторичными загрязнителями атмосферы и обычно адсорбируются на твердых частицах. Многие из ПАУ отличаются выраженным канцерогенным, мутагенным и тератогенным действием и представляют серьезную угрозу для человека. Основным источником эмиссии ПАУ являются ТЭС, работающие на нефти или каменном угле, а также предприятия нефтехимической промышленности и автотранспорта. Из нескольких миллионнов известных в настоящее время химических

соединений лишь около 6000 были проверены на канцерогенную активность. В настоящее время установлено, что 1500 химических соединений, являющихся потенциальными загрязнителями атмосферы, обладают выраженными канцерогенными свойствами (ПАУ, нитрозамины, галогенуглеводороды и др.). Содержание ПАУ и других канцерогенных веществ, попадающих в атмосферу с выбросами промышленных предприятий, составляет в крупных индустриальных центрах около 80 % от общего загрязнения окружающей среды.

Следовые количества химических элементов представлены в атмосфере такими высокотоксичными загрязнителями, как мышьяк, бериллий, кадмий, свинец, магний и хром. Они обычно присутствуют в воздухе в виде неорганических солей, адсорбированных на твердых частицах. Около 60 металлов идентифицировано в продуктах сгорания угля. В дымовых газах ТЭС обнаружены ртуть, мышьяк, барий, бериллий, висмут, бром, кадмий, хлор, кобальт, медь, железо, фтор, свинец, марганец, сурьма, молибден, никель, селен, теллур, таллий, олово, титан, уран, ванадий, цинк и цирконий. Для большинства перечисленных элементов их выброс в атмосферу с дымовыми газами ТЭС составляет $^3/_4$ от абсолютного уровня загрязнения воздуха всеми источниками эмиссии этих элементов. При этом максимальное количество загрязнителей попадает в атмосферу при сжигании угля. Но долю этого источника приходится более 95 % твердых частиц, 85 % оксидов серы, 70 % оксидов азота и более 90 % следов элементов от общего количества выбросов для всех ТЭС, работающих на угле, нефти и газе.

Помимо продуктов сжигания нефти, в воздух выделяется свинец — при извержении вулканов, с отработавшими газами автомобилей и в результате различных производственных процессов. Ежегодно в воздушный бассейн в виде галогенидов попадает около $2 \cdot 10^5$ т свинца, а ежегодный прирост содержания ртути в окружающей среде промышленно развитых стран составляет 5 %. Металлическая ртуть и свинец, а также их металлорганические соединения очень токсичны. Ртуть поступает в атмосферу при извержении вулканов и с выбросами химической, электронной и приборостроительной промышленности. Особенно токсичны и опасны для человека галогенсодержащие металлорганические соединения ртути, которые образуются из металлической ртути и ее неорганических солей под действием микроорганизмов. При сгорании различного топлива только в атмосферу ФРГ ежегодно попадает 40 т ртути, которая оседает на поверхности почвы и водоемов.

Скапливаясь в атмосфере, загрязнители взаимодействуют друг с другом, гидролизуются и окисляются под действием влаги и кислорода воздуха, а также изменяют свой состав под воздействием радиации. Вследствие этого продолжительность пребывания токсичных примесей в атмосфере тесно связана с их химическими свойствами. Для диоксида серы этот период составляет 4 дня, сероводорода — два, оксида азота — пять, аммиака — семь дней, а CO и CH_4 в силу своей инертности сохраняются неизменными в течение трех лет.

Велика продолжительность пребывания в воздухе малоактивных соединений следующей группы токсичности — постоянных газов (фреоны и диоксид углерода). Сжигание большого количества топлива, а также лесные пожары являются постоянным источником увеличения содержания CO_2 в ат-