

Значительными преимуществами перед другими методами обладает метод радиозонда, предложенный и осуществленный впервые в Советском Союзе и потому имеющий право на название Советского метода исследования атмосферы. Метод радиозонда можно применять во всех условиях погоды, он дает результаты исследования немедленно после выпуска прибора

П. А. Молчанов (1938 г.)

Уже в первом десятилетии после Великой Октябрьской социалистической революции советскими специалистами по динамической метеорологии был выполнен ряд первоклассных исследований, выдвинувших их на первые позиции в мировой науке.

И. А. Кибель (1967 г.)

## Раздел I

# Общие сведения о воздушной оболочке Земли

### Глава 1. Состав и уравнение состояния атмосферного воздуха

Состав воздуха вблизи земной поверхности. Состав воздуха в более высоких слоях атмосферы. Уравнение состояния сухого воздуха. Уравнение состояния влажного воздуха. Характеристики влажности воздуха и связь между ними

### Глава 2. Строение атмосферы

Основные сведения о Земле как планете. Принципы деления атмосферы на слои. Краткие сведения о методах исследования атмосферы. Тропосфера, стратосфера и мезосфера. Понятие о воздушных массах и фронтах. Атмосферный озон

### Глава 3. Статика атмосферы

Силы, действующие в атмосфере в состоянии равновесия. Основное уравнение статики атмосферы. Барометрические формулы. Барическая ступень. Вертикальный масштаб атмо-

сферы. Геопотенциал. Абсолютная и относительная высота изобарических поверхностей. Суточный ход давления

### Глава 4. Термодинамика атмосферы

Первое начало термодинамики применительно к атмосфере. Адиабатический процесс. Сухоадиабатический градиент. Потенциальная температура. Критерии устойчивости атмосферы на основе метода частицы. Изменение потенциальной температуры с высотой при различных видах стратификации атмосферы. Адиабатические процессы во влажном насыщенном воздухе. Влажноадиабатические процессы. Уравнение первого начала термодинамики для влажноадиабатического процесса. Термодинамические графики. Анализ состояния атмосферы с помощью термодинамических графиков. Стратификация атмосферы по отношению к влажноадиабатическому и сухоадиабатическому движению частицы. Метод слоя

## Глава I Состав и уравнение состояния атмосферного воздуха

### 1 Состав воздуха вблизи земной поверхности

Атмосфера представляет собой механическую смесь нескольких газов. Назовем *сухим воздухом* такую смесь, в состав которой не входит водяной пар. Состав сухого воздуха вблизи поверхности Земли характеризуется данными, приведенными в табл. 1.1. На долю основных газов ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $Ar$ ), как показывает таблица, приходится около 99,96 %, а на долю остальных — всего лишь около 0,04 %.

Таблица 1.1. Состав сухого воздуха вблизи земной поверхности

Газ	Объемное <sup>1</sup> , % содержание	Относительная молекулярная мас- са (по углеродной шкале)	Плотность по отношению к воздуху
Азот ( $N_2$ )	78,084	28,0134	0,967
Кислород ( $O_2$ )	20,946	31,9988	1,105
Аргон ( $Ar$ )	0,934	39,948	1,379
Углекислый газ ( $CO_2$ )	0,033	44,00995	1,529
Неон ( $Ne$ )	$1,818 \cdot 10^{-3}$	20,183	0,695
Гелий ( $He$ )	$5,239 \cdot 10^{-4}$	4,0026	0,138
Криптон ( $Kr$ )	$1,14 \cdot 10^{-4}$	83,800	2,868
Водород ( $H_2$ )	$5 \cdot 10^{-5}$	2,01594	0,070
Ксенон ( $Xe$ )	$8,7 \cdot 10^{-6}$	131,300	4,524
Озон ( $O_3$ )	$10^{-6}—10^{-5}$	47,9982	1,624
Сухой воздух		28,9645	1,000

<sup>1</sup> Объемное содержание — это выраженное в процентах отношение объема  $v_i$ , занимаемого  $i$ -й газовой составляющей, к общему объему смеси при условии приведения их к одинаковому давлению и температуре.

В состав атмосферы всегда входят три переменные, крайне важные составные части — водяной пар, озон и углекислый газ. Значение этих газов определяется прежде всего тем, что они

очень сильно поглощают лучистую энергию и тем самым оказывают существенное влияние на температурный режим поверхности Земли и атмосферы.

Углекислый газ является одной из важнейших составных частей питания растений. Он поступает в атмосферу в процессе горения, дыхания и гниения, расходуется же в процессе усвоения его растениями.

Современный состав воздуха атмосферы Земли установился по крайней мере несколько сотен миллионов лет назад. Сформировавшийся в природе круговорот атмосферных газов способствовал тому, что газовый состав атмосферы оставался неизменным до тех пор, пока резко не возросла производственная деятельность человека, в первую очередь добыча и последующее сжигание основных видов топлива (каменного угля, нефти и природного газа). В текущем столетии отмечается увеличение содержания  $\text{CO}_2$  по всему земному шару. За последние 70—80 лет количество углекислого газа в атмосфере, по оценкам многих ученых, увеличилось примерно на 10—12 % — от 0,029 % в 1900 г. до 0,033 % в 1980 г.

Помимо  $\text{CO}_2$  под влиянием деятельности человека увеличивается в глобальном масштабе содержание других газообразных примесей, сведения о которых приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Средние данные о газовых примесях

Газ	Объемное содержание, %	Газ	Объемное содержание, %
Метан ( $\text{CH}_4$ )	$1,5 \cdot 10^{-4}$	Закись азота ( $\text{N}_2\text{O}$ )	$5 \cdot 10^{-5}$
Окись углерода ( $\text{CO}$ )	от 0 до следов	Двуокись азота ( $\text{NO}_2$ )	от 0 до $2 \cdot 10^{-6}$
Сернистый газ ( $\text{SO}_2$ )	от 0 до $10^{-4}$	Радон (Rn)	$6 \cdot 10^{-18}$
		Иод ( $\text{I}_2$ )	от 0 до $10^{-6}$

Пока не отмечено изменение содержания в атмосфере основных газов —  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ , Ar. Однако на сжигание топлива расходуется значительная масса кислорода (по состоянию на 1969 г. около 13 млрд. т в год). Если наметившиеся в последние десятилетия темпы роста добычи топлива (10 %) сохранятся, то за 50 лет (с 1971 по 2020 г.) будет израсходовано около 0,77 % того количества свободного кислорода, который содержится в атмосфере и гидросфере в настоящее время.

В состав атмосферного воздуха входят также многочисленные взвешенные в нем твердые и жидкие примеси — так называемые *аэрозоли*. Они имеют естественное и искусственное (антропогенное) происхождение.

С 1910 г. по настоящее время масса твердых примесей в атмосфере северного полушария увеличилась примерно в 1,5 раза. Эти данные справедливы и для атмосферы в целом. В крупных городах (прежде всего Японии, США, Западной Европы) содержание газообразных и твердых примесей значительно больше, чем в среднем по атмосфере. Оно нередко превышает допустимую норму. Загрязнение окружающей среды твердыми и газообразными примесями вредно сказывается на растительности, урожае сельскохозяйственных культур, продуктивности животных, на здоровье людей и на деятельности промышленных предприятий таких отраслей, как полупроводниковая, оптическая, фотохимическая. Наблюдения в Лондоне показали, что существует довольно тесная связь между уровнем загрязнения воздушного бассейна и количеством заболевших и умирающих в этот период людей.

Содержание водяного пара в атмосфере колеблется в широких пределах; оно близко к нулю при очень низких температурах и может достигать 4 % при высоких температурах. С учетом различного содержания водяного пара в воздухе в нем несколько изменяется содержание других газов.

## 2 Состав воздуха в более высоких слоях атмосферы

Изучение состава воздуха на различных высотах начато свыше 180 лет назад, когда Дальтоном был сформулирован (в 1802 г.) закон, согласно которому каждый газ распределяется в пространстве независимо от присутствия других газов.

Если перемешивание воздуха по вертикали отсутствует, то распределение давления  $i$ -го газа может быть рассчитано с помощью барометрической формулы, согласно которой давление более тяжелых газов должно убывать с высотой быстрее, чем более легких газов. Следовательно, на больших высотах должны преобладать легкие газы. В этом состоит идея *гравитационного разделения газов*, обнаружению которого посвящено большое количество исследований.

Однако чем тщательнее проводился эксперимент, тем все более очевидным становился факт отсутствия разделения газов в пределах нижних 90—95 км (*гомосфера*).

Новый период в изучении строения верхних слоев наступил около 25 лет назад, когда для исследования свойств атмосферы (в том числе состава воздуха) были применены ракеты, а затем искусственные спутники Земли. В табл. 1.3 приведены данные о содержании основных газов ( $N_2$ ,  $O_2$  и  $Ar$ ) по результатам взятия проб воздуха (на ракетах) в средних широтах Европейской части СССР преимущественно весной и летом в утренние часы. Эта таб-