

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 перемешивания 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-

Таблица 1.3. Содержание (%) основных газов в воздухе по измерениям на ракетах

Высота, км	Газ			Высота, км	Газ		
	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Ar		N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Ar
65	80	19,0	0,91	82-85	77	21,3	0,82
75-80	78	21,0	0,93	85	78	21,0	0,88
80	78	21,4	0,88	95	77	21,5	0,76

лица показывает, что систематического (в одну сторону) изменения состава воздуха с высотой не наблюдается.

Таким образом, можно считать твердо установленным факт постоянства состава воздуха до высоты около 95 км. Постоянство состава атмосферного воздуха как по вертикали, так и по горизонтали поддерживается его перемешиванием.

Долгое время распространению представления о полностью перемешанной атмосфере препятствовало то, что в стратосфере термическая стратификация сильно устойчивая, а это, как будет показано в главе 4, затрудняет перемешивание воздуха по вертикали. Но в свободной атмосфере главную роль в возникновении перемешивания играет динамический фактор — изменение скорости ветра с высотой. Немаловажное значение для выравнивания состава атмосферы имеет горизонтальное крупномасштабное перемешивание.

Выше 95 км состав атмосферы существенно изменяется. Известную роль в этом изменении играет, по-видимому, процесс гравитационного разделения газов. Согласно теории, время установления 80 %-ного разделения молекулярного азота и атомного кислорода на высоте 250 км составляет 17 ч, на высоте 300 км — 8 ч, на высоте 350 км — 3,7 ч.

Анализ результатов измерений состава воздуха с помощью радиочастотного масс-спектрометра показал, что гравитационное разделение ночью начинается на высотах 105—110 км. Рисунок 1.1 иллюстрирует изменение с высотой отношения количества молекул аргона  $n(\text{Ar})$  к количеству молекул азота  $n(\text{N}_2)$ . Видно, что это отношение с увеличением высоты уменьшается (Ar тяжелее N<sub>2</sub>, см. табл. 1.1).

Основным процессом, под влиянием которого происходит изменение состава воздуха выше 100 км, является диссоциация кислорода под воздействием солнечной радиации с длиной волны меньше 0,24 мкм. В табл. 1.4 приведены сведения об изменении с высотой числа частиц в 1 см<sup>3</sup> азота (N<sub>2</sub>), молекулярного (O<sub>2</sub>) и атомного (O) кислорода в слое 100—210 км, а также температуры воздуха и относительной молекулярной массы  $\mu$ . Около 200 км концентрация атомного кислорода становится сравнимой с концентрацией азота;

Таблица 1.4. Число частиц ( $10^{-10} n$ ) некоторых газов в  $1 \text{ см}^3$  воздуха

Газ	Высота, км											
	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210
$\text{N}_2$	740	170	48	17	7,6	3,6	1,9	1,1	0,73	0,50	0,33	0,23
$\text{O}_2$	180	40	11	3,8	1,6	0,73	0,35	0,21	0,13	0,08	0,05	0,03
O	68	21	7,9	3,5	1,9	1,1	0,65	0,44	0,32	0,25	0,19	0,15
TK	215	235	325	395	490	600	715	785	825	860	895	925
$\mu$	27,9	27,6	27,2	26,9	26,5	26,1	25,8	25,5	25,1	24,9	24,4	24,1
кг/кмоль												

концентрация же молекулярного кислорода составляет лишь малую часть концентрации атомного кислорода.

Сведения о составе воздуха выше 200 км получены лишь косвенным путем — на основе измерений состава заряженных частиц (ионов). Результаты исследования заряженных частиц в ионосфере сводятся к следующему. Основным ионом слоя *D* (примерно с вы-

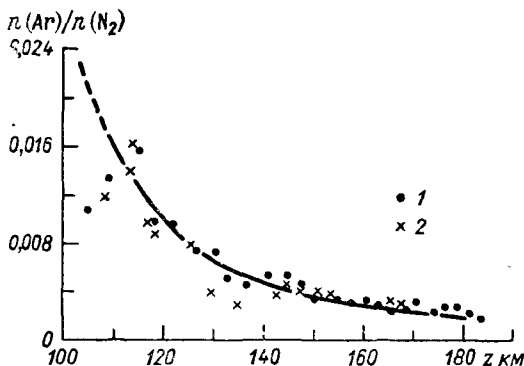


Рис. 1.1. Изменение отношения концентраций Ar и  $\text{N}_2$  с высотой при подъеме (1) и спуске (2) ракеты.

соты 90 км) является положительный ион окиси азота ( $\text{NO}^+$ ); днем в этом слое, вероятно, образуется заметное количество ионов молекулярного кислорода  $\text{O}_2^+$ . В слое 100—150 км ионосфера состоит из ионов трех родов: атомного ( $\text{O}^+$ ) и молекулярного ( $\text{O}_2^+$ ) кислорода, окиси азота ( $\text{NO}^+$ ). Выше 150 км быстро растет относительное количество ионов  $\text{O}^+$ , которые становятся преобладающими на высотах более 200 км. Начиная с высоты 250—300 км, в составе ионосферы появляются ионы атомного азота ( $\text{N}^+$ ), концентрация которых на высоте 800—900 км достигает 7—9 % концентрации ионов  $\text{O}^+$ . Число ионов в слое 100—1000 км заключено в интервале  $10^5$ — $10^6$  частиц в  $1 \text{ см}^3$ .

Несмотря на большое самостоятельное значение процесса ионизации, на долю ионов приходится на высотах до 800—900 км лишь

небольшая часть общего количества газовых частиц: на высоте 300 км — около 0,1 %, на высоте 800 км — меньше 10 %. Только выше 2000—3000 км большинство газовых частиц (по всей вероятности, водородных атомов) ионизовано. Такая сильно разреженная (около 1000 частиц в 1 см<sup>3</sup>) ионосфера простирается до высоты 20—30 тыс. км, где она постепенно переходит в межпланетный газ с числом частиц около 100 в 1 см<sup>3</sup>.

Количество ионов атомного азота в слое 400—800 км не превышает 10 % количества ионов O<sup>+</sup>, поэтому нет оснований предполагать, что и количество нейтральных атомов азота составляет значительную часть от числа атомов кислорода. Процесс же гравитационного разделения препятствует появлению в больших количествах тяжелых молекул азота. Остается, таким образом, последнее предположение: преобладающий газ в слое 300—1000 км — атомный кислород (O) с небольшой примесью атомов азота. Относительная молекулярная масса атомного кислорода почти в 2 раза меньше относительной молекулярной массы воздуха ниже уровня 100 км. Вследствие этого относительная молекулярная масса воздуха выше 100 км уменьшается и на больших высотах приближается к 16 кг/кмоль, что иллюстрируют следующие данные:

z км...	225	250	275	300	325	350	375	400	450	500
μ кг/кмоль...	21,28	20,15	19,22	18,50	17,92	17,47	17,12	16,84	16,43	16,1

Подчеркнем, что здесь рассмотрен относительный (процентный) состав воздуха. Абсолютное же содержание всех атмосферных газов убывает с высотой.

### 3 Уравнение состояния сухого воздуха

Состояние каждого из атмосферных газов характеризуется значениями трех величин: температуры, давления и плотности (или удельного объема). Эти величины всегда связаны между собой некоторым уравнением, которое носит название *уравнения состояния газа*.

Для каждого газа существует так называемая *критическая температура*  $T_{кр}$ . Если температура газа выше критической ( $T > T_{кр}$ ), то ни при каком давлении газ не может быть переведен в жидкое или твердое состояние, т. е. при  $T > T_{кр}$  возможно только газообразное состояние вещества. Приводим значения критических температур атмосферных газов:

Газ . . . . .	He	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
$T_{кр}$ °С . .	—268	—240	—147	—119	31	374

Из этих данных следует, что критические температуры всех атмосферных газов, кроме углекислого газа и водяного пара, очень