

горизонтальных размеров: воздушные массы, циклоны и антициклоны, фронтальные поверхности по горизонтали занимают области в сотни и тысячи километров, а по вертикали распространяются лишь на несколько километров.

## 2 Принципы деления атмосферы на слои. Краткие сведения о методах исследования атмосферы

Атмосфера по своим физическим свойствам неоднородна как по вертикали, так и по горизонтали. Изменяются такие физические величины, как температура, давление, плотность, состав и влажность воздуха, содержание твердых и жидких примесей, скорость ветра. Наиболее резко они изменяются по вертикали. Так, температура при подъеме на каждый километр понижается в среднем на  $6,5^{\circ}\text{C}$  (в тропосфере). В то же время в горизонтальном направлении на столько же температура изменяется на расстоянии 500—600 км. Таким образом, по вертикали температура изменяется примерно в  $5 \cdot 10^2$  раз быстрее, чем по горизонтали. Вследствие этого при делении атмосферы на первое место выступает неоднородность ее свойств по вертикали.

В настоящее время существуют по меньшей мере четыре признака (принципа), на основе которых атмосферу делят на слои в вертикальном направлении. Это термический режим атмосферы (распределение температуры по высоте); состав атмосферного воздуха и наличие заряженных частиц; характер взаимодействия атмосферы с земной поверхностью; влияние атмосферы на летательные аппараты.

Наиболее отчетливо различие в свойствах слоев атмосферы проявляется в характере изменения температуры воздуха с высотой. По этому признаку атмосфера делится на пять основных слоев, или сфер: *тропосферу, стратосферу, мезосферу, термосферу и экзосферу*<sup>1</sup>. В табл. 2.2 указаны средние высоты границ этих слоев и наименование переходных слоев. От этих средних могут наблюдаться значительные отклонения в зависимости от широты, времени года, метеорологической обстановки и др. Так, например, высота тропопаузы колеблется между 8 и 18 км.

По составу воздуха атмосфера делится на *гомосферу* и *гетеросферу*. В первом из этих слоев, заключенном между земной поверхностью и уровнем 95 км, относительный состав основных газов (азота, кислорода, аргона) и относительная молекулярная

<sup>1</sup> Более точно экзосфера выделяется по признаку распределения плотности (здесь она ничтожно мала). Из этой сферы молекулы и ато-

мы могут выбрасываться в межпланетную среду и навсегда покидать Землю.

Таблица 2.2. Основные и переходные слои (сферы)

Слой	Средняя высота верхней и нижней границ, км	Переходный слой
Тропосфера	0—11	Тропапауза
Стратосфера	11—50	Стратопауза
Мезосфера	50—90	Мезопауза
Термосфера	90—450	Термопауза
Экзосфера	Выше 450	

масса воздуха практически не изменяются с высотой ( $\mu = \mu_0 = 28,9645$  кг/кмоль). В гетеросфере (слой выше 95 км) наряду с молекулярным азотом  $N_2$  и кислородом  $O_2$  появляются атомные кислород  $O$  и азот  $N$ . Поэтому относительная молекулярная масса воздуха в гетеросфере уменьшается с высотой. По этому же признаку в атмосфере выделяют *озоносферу* (20—55 км), в которой сосредоточена основная масса озона.

Начиная с высоты 50—60 км в атмосфере резко увеличивается содержание заряженных частиц (ионов и электронов). Вследствие этого слой атмосферы, расположенный выше указанного уровня называется *ионосферой*. Внешняя часть атмосферы, где взаимные столкновения частиц редки и преобладающая часть заряжена, составляет радиационный пояс Земли. В пределах радиационного пояса заряженные частицы совершают сложные колебательные движения вдоль силовых линий магнитного поля Земли и обладают значительными энергиями. Граница радиационного пояса со стороны освещенной Солнцем части Земли в плоскости геомагнитного экватора лежит на расстоянии 10—12 радиусов Земли (считая от центра Земли). В неосвещенной части она несколько ближе к Земле (9—10 радиусов).

По признаку взаимодействия атмосферы с земной поверхностью атмосферу делят на *пограничный слой* (иногда называемый также *слоем трения*) и *свободную атмосферу*. В пограничном слое (высотой до 1—1,5 км) на характер движения большое влияние оказывают земная поверхность и силы турбулентного трения. В этом слое хорошо выражены суточные изменения метеорологических величин (см. главу 10).

Внутри пограничного слоя выделяется *приземный слой атмосферы* (высотой 50—100 м), в пределах которого метеорологические величины (например, температура и скорость ветра) резко изменяются с высотой (см. главу 9). В свободной атмосфере (выше 1—1,5 км) в первом (достаточно грубом) приближении силами турбулентного трения можно пренебречь.

В связи с запуском ИСЗ особо остро встал вопрос о влиянии атмосферы на полет ИСЗ и время их существования. Условия по-

лета ИСЗ и других тел существенно различны на высотах больше и меньше 150 км. Исходя из этого признака, атмосферу делят на *плотные слои* (или *собственно атмосферу*) и *околоземное космическое пространство*, нижняя граница которого располагается на высоте около 150 км. Сопrotивление плотных слоев атмосферы настолько велико, что в пределах этих слоев летательный аппарат с выключенной двигательной установкой не может совершить хотя бы один оборот вокруг Земли (потеряет скорость или сгорит). В то же время на высотах больше 150 км время существования ИСЗ превышает время, необходимое для совершения одного оборота (при этом тем больше, чем выше орбита). На основании этого полеты ИСЗ называют космическими, хотя орбиты большинства запущенных до настоящего времени ИСЗ лежат в пределах атмосферы.

Упомянем также деление атмосферы на *нижнюю* и *верхнюю*. Первая из них совпадает с тропосферой, вторая охватывает все слои, расположенные выше тропопаузы.

Для получения сведений о физических свойствах и строении атмосферы используются различные методы исследования. Все они разделяются на *прямые* и *косвенные*. В последние десятилетия основное внимание уделяется развитию прямых методов исследования атмосферы. К ним относятся методы исследования атмосферы с помощью радиозондов, аэростатов, шаров-пилотов, самолетов, ракет, ИСЗ и космических кораблей. Наиболее широко для получения сведений о свойствах атмосферы до высоты 20—25 км (в более редких случаях до 35—40 км) используется метод радиозондирования. Радиозонд обладает тем существенным достоинством, что сведения о значениях температуры, давления, влажности и скорости ветра на различных высотах получают практически одновременно с подъемом радиозонда. Для более тщательного исследования пограничного слоя, облаков, туманов, атмосферных примесей, потоков лучистой энергии, электрического поля атмосферы и других явлений применяются методы зондирования атмосферы (вертикального и горизонтального) с помощью самолетов и аэростатов.

Новая эпоха в исследовании верхних слоев атмосферы открылась в связи с освоением методов зондирования атмосферы с помощью ракет и особенно ИСЗ, пилотируемых космических кораблей и автоматических станций. Ракеты, используемые для исследования атмосферы, делятся на метеорологические, геофизические и космические. Наиболее полные данные о температуре, давлении и плотности до высоты 60—80 км получены с помощью метеорологических ракет, подъемы которых производятся систематически в нескольких точках земного шара, в том числе с кораблей в океанах. Геофизические ракеты широко используются для исследования состава воздуха до высоты 400—500 км, излучения Солнца, магнитного и электрического полей Земли.

Уникальный материал об облачности, оптических характеристиках земной поверхности и атмосферы, полях температуры и влажности получен за последние 10—15 лет с помощью метеорологических ИСЗ и пилотируемых космических кораблей. Эти данные используются метеорологическими службами разных стран для анализа состояния атмосферы и при составлении прогнозов погоды.

Из косвенных методов, с помощью которых за последние 70—80 лет были получены сведения о верхних слоях атмосферы, назовем методы, основанные на наблюдениях за прожекторным лучом, аномальным распространением звука, движением следов метеоров, перламутровыми и серебристыми облаками, за распространением электромагнитных волн, а также методы, базирующиеся на спектральных исследованиях ультрафиолетовой радиации, излучения ночного неба и полярных сияний.

### 3 Тропосфера, стратосфера и мезосфера

Характерной особенностью *тропосферы* является падение температуры с высотой. Среднее значение вертикального градиента температуры в тропосфере около  $0,65^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$  с возможными отклонениями средних (за сезон для данного географического района) значений до  $0,3^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$  в ту и другую сторону. Значения же вертикального градиента в фиксированный момент времени в разных точках могут изменяться в широких пределах — от положительных значений порядка десятков градусов на 100 м до таких же отрицательных значений. В тропосфере образуются туманы и все наиболее важные виды облаков, формируются осадки, грозовая деятельность. В ней сосредоточена основная масса атмосферы — от 75 % в умеренных и высоких широтах до 90 % в низких. Тропосферу принято делить на несколько слоев: а) *нижнюю* или *пограничный слой атмосферы*, от земной поверхности до высоты 1—1,5 км; б) *среднюю* — от 1—1,5 до 6—8 км; в) *верхнюю* — от 6—8 км до тропопаузы.

Уже первые подъемы шаров-зондов в конце прошлого столетия показали, что характерное для тропосферы падение температуры на некоторой высоте прекращается. Сначала падение температуры замедляется, а затем переходит в изотермическое распределение.

Слой атмосферы, характеризующийся замедленным падением ( $\gamma < 0,2^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ ), постоянством или ростом температуры с высотой, носит название *стратосферы*. Границы стратосферы в среднем располагаются на высотах 11 и 50 км; переходный слой от тропосферы к стратосфере называют *тропопаузой*. Среднее (стандартное) значение температуры на этом уровне составляет  $-56,5^{\circ}\text{C}$  (рис. 2.1).