

Глава 2 Строение атмосферы

1 Основные сведения о Земле как планете

Земля представляет собой одну из девяти больших планет, входящих в состав Солнечной системы. Солнце — звезда средней величины — служит единственным источником энергии, благодаря которой существует жизнь на Земле.

Земля вращается вокруг Солнца по эллиптической орбите со средней скоростью 29,8 км/с, одновременно вращаясь вокруг своей оси с запада на восток. Плоскость вращения Земли вокруг Солнца носит название *плоскости эклиптики*. Земная ось наклонена к плоскости эклиптики под углом $66^{\circ}34'$. Благодаря вращению Земли вокруг Солнца и наклону земной оси по отношению к плоскости эклиптики происходит смена времен года.

В астрономии введено понятие о звездных (зв.) и солнечных (солн.) сутках. Год содержит около 365,25 солн. сут. Это означает, что за один год Земля совершает 365,25 оборота вокруг своей оси по отношению к Солнцу. Кроме того, пройдя за год всю орбиту, Земля сделает еще один оборот вокруг своей оси по отношению к неподвижным звездам. Поэтому один год равен 365,25 солн. сут, или 366,25 зв. сут. Отсюда 1 зв. сут. равны $365,25/366,25$ солн. сут. *Угловая скорость суточного вращения Земли* определяется как скорость вращения по отношению к неподвижным звездам:

$$\omega = \frac{2\pi}{1 \text{ зв. сут}} = \frac{2\pi}{1 \text{ солн. сут}} \cdot \frac{366,25}{365,25} = \frac{2\pi \cdot 366,25}{86\,400 \cdot 365,25} = 7,292 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1},$$

так как 1 солн. сут равны $24 \times 60 \times 60 \text{ с} = 86\,400 \text{ с}$.

Приведем для сравнения значения периода (Π) вращения вокруг своей оси и периода (τ) обращения вокруг Солнца (в земных сутках) для некоторых планет солнечной системы и Солнца:

Планета . . .	Меркурий	Венера	Земля	Марс	Юпитер	Солнце
Π	59	— 244	1	1,02	0,41	25—30
τ	88	225	365	687	4339	—

В последние десятилетия было обнаружено, что угловая скорость суточного вращения Земли и продолжительность суток несколько изменяются в течение года. Тщательная обработка астро-

номических наблюдений на нескольких обсерваториях за продолжительностью звездных суток, которые оцениваются при помощи независимых хранителей времени (ныне кварцевых часов, калибруемых по атомным стандартам частоты), позволила обнаружить годовые колебания длины суток с амплитудой порядка $5 \cdot 10^{-4}$ с (относительные колебания порядка 10^{-8}), а затем и более короткопериодные колебания (с периодами 0,85; 0,60; 0,50; 0,48; 0,33; 0,25; 0,20 и 0,18 года).

Такие изменения скорости вращения Земли обусловлены колебаниями в течение года скорости воздушных течений, горизонтальный масштаб которых сравним с размерами материков, океанов и всего полушария.

Совокупность таких воздушных течений носит название *общей циркуляции атмосферы*. При движении воздуха относительно поверхности Земли возникает сила трения, которая может или ускорять, или замедлять вращение твердой оболочки Земли. Согласно оценкам, момент количества относительного движения атмосферы (до уровня 100 гПа) меняется в течение года от $16,0 \cdot 10^{25}$ кг \times \times м²/с в январе до $11,8 \cdot 10^{25}$ кг \cdot м²/с в июле (главным образом из-за того, что момент количества движения в январе в южном полушарии, равный $6,5 \cdot 10^{25}$ кг \cdot м²/с, вдвое больше, чем в июле в северном полушарии). Этими колебаниями скорости ветра объясняется примерно $\frac{2}{3}$ наблюдаемых изменений продолжительности суток в течение года. Возможно, оставшуюся $\frac{1}{3}$ можно объяснить сезонными колебаниями сильных ветров в стратосфере. Известную роль в изменении угловой скорости вращения Земли играет также сезонное перераспределение масс воздуха между материками и океанами. Зимой избыточные массы воздуха скапливаются над материками, а летом — над океанами. Поскольку материки и океаны распределены по земному шару неравномерно, перераспределение масс воздуха между ними приводит к изменению момента вращения Земли, а вместе с этим и угловой скорости.

Несмотря на большое научное значение изменения ω , при построении теории атмосферных процессов и явлений угловую скорость вращения Земли можно считать постоянной: изменения ω ничтожно малы и их влияние совершенно несравнимо с влиянием других (метеорологических) факторов.

Если бы Земля была вполне однородной или состояла из концентрических однородных слоев, то при отсутствии вращения вокруг своей оси она имела бы форму шара. Так как в действительности Земля вращается вокруг своей оси, то она деформировалась в сфероид, т. е. в малосплюснутый эллипсоид вращения. Однако истинная форма Земли несколько отлична от сфероида, что обусловлено неоднородностью земной поверхности и неравномерным распределением плотности во внутренних частях Земли. Вследствие этого теоретическая уровенная поверхность Земли, т. е. по-

верхность, в каждой точке которой сила тяжести перпендикулярна к ней, имеет особую форму; эта сложная поверхность называется *геоидом*. При решении подавляющего большинства метеорологических проблем оказывается возможным совершенно пренебречь малыми отклонениями геоида от эллипсоида вращения и, более того, пренебречь отклонением Земли от сферической формы. Данные о размерах земного сфероида (по Ф. Н. Красовскому) и Солнца приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Основные данные земного сфероида

Большая полуось (экваториальный радиус) R_0	6378,245 км
Малая полуось (полярный радиус) R_n	6356,830 км
Сжатие $(R_0 - R_n)/R_0$	1/298,3
Длина:	
меридиана	40009,153 км
экватора	40075,693 км
Поверхность	510,098 · 10 ⁶ км ²
Объем	1083,314 · 10 ⁹ км ³
Радиус шара, имеющего такой же объем	6371,210 км
Масса Земли	5,9737 · 10 ²⁴ кг
Средняя плотность Земли	5,517 г/см ³
Расстояние Земли от Солнца:	
наибольшее (около 4 июля)	152,00 · 10 ⁶ км
наименьшее (около 3 января)	147,01 · 10 ⁶ км
среднее	149,53 · 10 ⁶ км
Радиус Солнца	695 600 км

Из 510,1 млн. км² земной поверхности 70,8 % (т. е. 360,8 млн. км²) приходится на долю водной поверхности Мирового океана, причем эта доля составляет 60,7 % в северном полушарии и 80,9 % в южном. В широтных зонах по 5° площадь, занятая водой, неуклонно возрастает от 70° с. ш. до 60° ю. ш., а именно от 28,7 % на 65—70° с. ш. до 99,9 % на 55—60° ю. ш.

Вертикальная протяженность атмосферы составляет 60—70 тыс. км. Резкой верхней границы атмосферы не существует. Атмосфера постепенно переходит в межпланетную среду. Общая масса атмосферы приближенно оценивается в $5,15 \cdot 10^{18}$ кг, что составляет примерно одну миллионную массы Земли.

Толщина всей атмосферы сравнима с размерами Земли, однако большая часть массы атмосферы сосредоточена в тонком (по сравнению с радиусом Земли) слое, прилегающем к земной поверхности. Примерно 50 % всей массы атмосферы заключено в слое от земной поверхности до высоты 5 км, 75 % — до высоты 10 км, 90 % — до 16 км, 95 % — до 20 км, около 99 % — до высоты 30—35 км.

Незначительная толщина основного (по массе) слоя атмосферы по сравнению с ее горизонтальной протяженностью приводит к тому, что и вертикальные масштабы наблюдаемых в атмосфере явлений и процессов оказываются значительно меньше их

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*¹. 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

¹ 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.