



4. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

Атмосфера – газообразная оболочка Земли, состоящая из смеси газов и коллоидных примесей (капелек, кристаллов, пыли). Толщина воздушной оболочки составляет до 36 000 км. Ее масса равна $G_{\text{атм}} = 5,27 \cdot 10^{18}$ кг, т.е. несколько меньше одной миллионной массы $G_{\text{атм}} = 0,000001 \cdot G_{\text{земли}}$ самой Земли ($G_{\text{земли}} = 5,98 \cdot 10^{24}$ кг). Вследствие уменьшения плотности воздуха с высотой 50 % массы атмосферы заключены в слое до высоты 5,5 км, 90 % - до высоты 16,3 км и 99% – до высоты 31,2 км.

По своему составу атмосфера разделяется на два слоя. *Гомосфера* - располагается на высотах до 94 км и представляет собой однородную по своему составу газовую смесь, находящуюся в молекулярном состоянии. *Гетеросфера* отличается тем, что состав воздуха начинает меняться, а с высоты примерно 100 км начинается процесс распада (диссоциации) молекул на атомы, сопровождающийся образованием заряженных ионов.

В авиации, метеорологии принято делить атмосферу не только на гомосферу и гетеросферу, но и в соответствии с вертикальным распределением температур на пять основных и четыре промежуточных слоя. В 1962 г. на конгрессе Всемирной метеорологической организации была установлена следующая слоистая структура атмосферы и названия слоёв (табл. 1.13, рис. 1.11):

Таблица 1.13

Основные и промежуточные слои атмосферы

Высота, км	Основные слои Промежуточные слои	Содержание массы атмосферного воздуха, %
0 ... 11 11	Тропосфера Тропопауза	80
11 ... 51 51	Стратосфера Стратопауза	19,75
51 ... 86 86	Мезосфера Мезопауза	0,25
86 ... 800 800	Термосфера Термопауза	0,005
800 ... 3000	Экзосфера	$1 \cdot 10^{-18}$

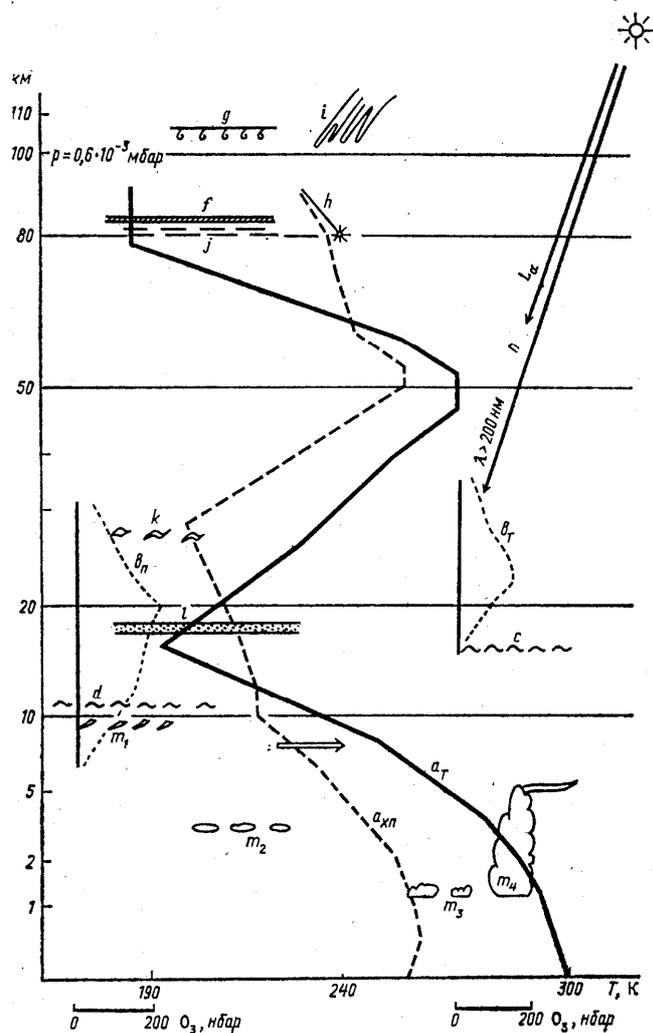


Рис. 1.11. Строение атмосферы: *a* — распределение средней температуры (*a_т* — в тропической зоне, *a_{хп}* — в холодной полярной зоне); *b_т* и *b_п* — распределение озона в тропической и полярной зонах (шкалы в нбар под осью абсцисс); *c* — тропопауза тропическая; *d* — тропопауза полярная; *e* — струйное течение; *f* — мезопауза; *g* — турбопауза; *h* — яркие метеоры; *i* — полярные сияния; *j* — серебристые облака; *k* — перламутровые облака; *l* — слой стратосферного аэрозоля; *m₁*, *m₂*, *m₃*, *m₄* — тропосферные облака (перистые, высококучевые, кучевые, кучево-дождевые); *n* — поток солнечной ультрафиолетовой радиации

4.1. ТРОПОСФЕРА

Свойства тропосферы. Это самый нижний из основных слоёв атмосферы. Характерной особенностью служит убывание температуры с высотой (в среднем 6,5 К/км). В тропосфере сконцентрировано 80 % массы всей атмосферы и 90 % водяных паров. Высота тропосферы составляет от 8 до 16 км и зависит от географической широты местности и времени года. Примерно между 30 ° ю.ш., т.е. над половиной земной поверхности, верхняя граница тропосферы лежит на высоте около 16,3 км, а вне этого пояса — на высоте 8,5

... 10 км (рис. 1.12). Летом толщина тропосферы увеличивается, зимой, наоборот, является минимальной.

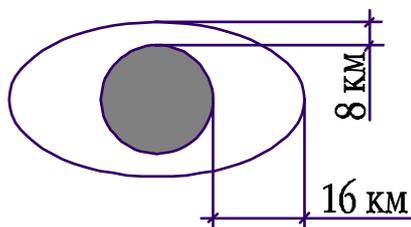


Рис. 1.12 Схема высотной границы тропосферы

В тропосфере происходит преобразование тепловой энергии в кинетическую. Тепло сообщается воздуху и перераспределяется в нём за счёт следующих явлений: 1) лучистого теплообмена (через длинноволновое излучение Земли, поглощаемое водяным паром, углекислым газом, озоном); 2) вертикального перемешивания (турбулентности) воздуха, благодаря которому температура убывает с высотой

на 1/3 медленнее, чем при отсутствии перемешивания; 3) фазовых превращений воды (конденсация, сублимация водяного пара, замерзание, таяние и испарение воды); 4) горизонтального и вертикального переноса воздушных масс.

Для тропосферы характерна сложная схема воздухообмена между различными географическими районами и широтами, в том числе с образованием крупномасштабных вихревых возмущений – циклонов и антициклонов, а также устойчивых воздушных «рек» в верхней части (*тропосферные струйные течения*), в которых скорость ветра превышает 100 км/ч, а иногда может достигать 800 ... 900 км/ч. Самое крупное устойчивое образование располагается в районе 30 ° с.ш. и ю.ш, называется тропосферным восходящим течением. Перемещение воздушных масс в тропосфере зависит от внешних космических условий (величины излучения, выпадения плазмы и т.п.) и состояния оптических свойств атмосферы (альбедо, облака, аэрозоли и т.п.). В теплых и холодных течениях тропосферы, близ их границ – фронтов – образуются облака и осадки.

Тропосферу условно делят на *нижнюю* (до 2,5 км), *среднюю* (2,5 ... 6 км) и *верхнюю* (6 ... 11 км). Вся она отличается разнообразием и изменчивостью погоды. Наиболее примечательна нижняя часть: наблюдаются большой суточный ход температуры и влажности воздуха, ветра, больше всего продуктов конденсации водяного пара. В нижней части дополнительно выделяют – уже по динамическому признаку – *планетарный пограничный слой* толщиной 1 ... 1,5 км, где скорость течений ослаблена трением о земную поверхность. В нем идет интенсивный обмен количеством движения, теплом и водяным паром между атмосферой и поверхностью Земли и океана. Наконец, соприкасающийся с Землёй слой толщиной около 100 м называют *приземным слоем*, в нём очень велики вертикальные градиенты температуры, скорости ветра и влажности.

Свойства тропопаузы. Характеризуется прекращением свойственного тропосфере падения температуры воздуха с высотой и её стабилизации на



определённом уровне. Служит в качестве верхней границы для тропосферной облачности, водяных паров и аэрозоля. При полётах самолётов воспринимается как верхняя кромка приземной «дымки», покрывающей Землю. Представляет собой буферный слой от нескольких сотен метров до нескольких километров, затрудняющий обмен воздуха между тропосферой и стратосферой. На границы и состояние тропопаузы существенно влияют динамические процессы в верхней тропосфере. При соприкосновении тропосферных высокоскоростных струйных течений (расположенных в тропосфере на 1...1,5 км ниже) с тропопаузой в ней наблюдаются значительная возмущённость, неустойчивость воздуха, резкая смена температуры, ветра и видимости, влияющие на условия полёта.

Различают *тропическую* ($h_T = 16 \dots 17$ км, между 32° с.ш. и ю.ш.) и *полярную* ($h_P = 8 \dots 10$ км, выше 40° с.ш. и ю.ш.) тропопаузы. Зона разрыва между ними зимой находится в обоих полушариях на $27 \dots 28^\circ$, а летом смещается ближе к полюсам: до 43° в северном и $36 \dots 38^\circ$ в южном полушарии. В зоне разрыва тропическая тропопауза обычно "наползает" на полярную либо они чередуются ото дня ко дню. При этом на высотах 10 ... 16 км встречаются горизонтальные течения с переносом воздуха из тропической тропосферы в полярную стратосферу (и наоборот). По некоторым оценкам, за год стратосфера "обменивается" с тропосферой до 20 % своей массы.

Температура тропопаузы над полюсами зимой в среднем около -65°C , летом -45°C , над экватором круглый год от -70 до -80°C . Среднее значение температуры принимают равным $-56,5^\circ\text{C}$. Стабилизация температуры происходит за счёт поглощения гамма и УФ-излучений азотом в диапазоне 0,1 ... 0,3 мкм, кислородом – 0,08 ... 0,2 мкм, озоном 0,02 ... 0,3 мкм, а также фотохимической реакции разложения окислов азота ($2\text{NO} = \text{N}_2 + \text{O}_2 + \Delta E$).

4.2. СТРАТОСФЕРА

Свойства стратосферы. Высота от 15 до 55 км, сконцентрировано 19 % массы атмосферы, состав такой же, как и у тропосферы за исключением озона (O_3): на высоте 20...30 км сконцентрировано до 80 % планетарного озона. Водяной пар почти отсутствует, поэтому стратосфера очень прозрачна.

В нижней части стратосферы температура воздуха постоянна. Стратосфера теплее над умеренными и полярными широтами (около -55°C) и значительно холоднее над тропиками (-80°C). В верхней стратосфере примерно с высоты 34 ... 36 км происходит повышение температуры со скоростью 1 ... 3 $^\circ\text{C}$. На верхней границе температура приближается к 0°C . В тропической стратосфере годовые различия температуры незначительны и наблюдается её линейный рост от весьма холодной тропопаузы ($-70 \dots -80^\circ\text{C}$) до нулевой температуры с высотным градиентом 2,2 ... 2,4 К/км. В полярной стратосфе-



ре на высотах 25 ... 29 км зимой (полярной ночью) наблюдается её резкое охлаждение по сравнению с летом: до - 75 °С на северном и - 90 °С на южном полюсах (озоновые дыры).

Источником «тепла» в стратосфере служит слой озона: он поглощает большую часть коротковолнового УФ-излучения с длиной волны менее 0,3 мкм (около 1,1 % всей солнечной энергии), пропуская к Земле более мягкое излучение с длиной 0,3 ... 0,4 мкм, являющееся дезинфектором атмосферного воздуха в тропосфере. Приобретённая озоном энергия не успевает излучаться молекулами воздуха, сильно нагревая там атмосферу.

Стратосфера более устойчива, чем тропосфера: вертикальные порывы ветра в ней слабы и случайны. В нижних слоях стратосферы преобладают стабильные струйные ветра со скоростью до 500 км/час. В верхних слоях находятся постоянные муссонные течения с выраженным годовым изменением направления: зимой дуют западные, а летом восточные течения.

Свойства стратопauзы. Стратопauза служит верхней границей стратосферы, расположена на высоте 51 км. Отличительная черта – прекращается рост температуры с высотой.

4.3. МЕЗОСФЕРА

Свойства мезосферы. Высота от 55 до 80 км, содержит 0,3 % массы атмосферы, температура снова понижается в среднем до 180 К в её верхней части. На высоте 60 км в дневное время происходит частичная ионизация молекул воздуха и образуется электропроводный ионизирующийся слой, который используется для связи на КВ и УКВ диапазонах. Кроме того, именно здесь располагаются *полярные сияния*. С физической точки зрения это процесс «свечения» молекул кислорода, ионизированных при выпадении в полярные каспы солнечной плазмы, пришедшей в составе вспышек и «просочившейся» через магнитные ловушки магнитосферы в атмосферу Земли.

Мезосфера значительно холоднее стратосферы: в тропической области её температура в течение года держится на уровне - 90 °С (184 К), а в субарктической циклически изменяется от - 40 °С (231 К) зимой до 171 К (- 100 °С) летом. Этот необычный годовой ход температуры приводит к тому, что летом в сумерки на высотах 78 ... 94 км иногда появляются блестящие облака, внешне похожие на перистые. Они ярко освещаются Солнцем, находящимся за горизонтом, и обнаруживают там существование волн и даже вихрей. Эти облака называются *серебристыми* (мезосферными) и образуются путём конденсации пара в лёд при вымораживании арктической мезосферы.

Переходный слой мезопauзы на высоте в среднем 82 км отделяет мезосферу от расположенной над ней ионосферой.

4.4. ИОНОСФЕРА

Свойства ионосферы. Высота от 100 до 800 км. Образуется в результате ионизации молекул газов атмосферы за счет поглощения ими высокоэнергетического ультрафиолетового, рентгеновского излучений Солнца, а также ионизирующего действия ГКИ и СКИ. Из-за такого состава эту часть атмосферы называют *ионосферой*. На высотах 70 ... 90 км так образуется слой D ионосферы с концентрацией электронов $N_e = 10^8/\text{м}^3$. Выше 100 км располагается основной E-слой ионосферы (дневной, где N_e достигает $1,5 \cdot 10^{11}/\text{м}^3$), а еще выше - существующий и днем и ночью F-слой (с N_e до $4 \cdot 10^{11}/\text{м}^3$ на высоте ≈ 240 км в годы спокойного Солнца и с $N_e \approx 16 \cdot 10^{11}/\text{м}^3$ на высоте ≈ 320 км при большой активности Солнца). Слой F сохраняется, хотя и ослабевает ночью. Выше его N_e постепенно убывает. В ионосфере везде концентрация электронов и ионов меньше, чем концентрация других нейтральных частиц (на высоте, например, 320 км всего 1/120), и поэтому воздух ионосферы – лишь частично ионизованная плазма. Ее отличают также высокая температура и зависимость ее движения от магнитогидродинамических сил.

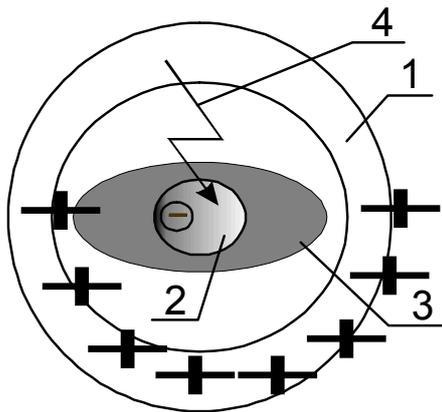


Рис. 1.13. Общая схема электрических процессов ионосферы: 1 – ионосферные токи плазмы (источник положительного заряда), 2 – поверхность Земли (источник отрицательного заряда – "масса"), 3 – атмосфера (изолятор), 4 – вертикальные токи плазмы (электрическая цепь разрядки "конденсатора")

В ионосфере происходит изменение состава воздуха за счет увеличения количества ионизированных молекул. В нижних слоях (100 ... 240 км) газовый состав образован тяжёлыми газами: азотом N_2 и кислородом O_2 , гелием He; в средней части (240 ... 500 км) преобладают атомарный кислород O и гидроксильная группа OH; в верхних слоях их концентрация падает и на первое место выходят атомы лёгких газов гелия He и водорода H_2 .

Температура на нижней границе 165 К, максимальная температура достигается на высоте 800 км и составляет 2273 К. Под температурой в данном случае понимается ее термодинамическое определение – мера кинетической энергии. Скорость ионизированных частиц в ионосфере достигает значения нескольких километров в секунду, однако плотность их незначительна и не обеспечивает разогрев любого тела, попадающего в эти высоты.

Электрические процессы ионосферы. Ионосфера является мощным электропроводным слоем, окружающим атмосферу, в котором осуществляется преобразование солнечной плазменной энергии в крупномасштабные го-



горизонтальные и вертикальные токи объемных электрических зарядов, оказывающих воздействие на климат и состояние биосферы. В силу высокой проводимости ионосфера непрозрачна для большинства длин волн электромагнитного спектра. В ней имеются всего три окна "прозрачности", пропускающие к поверхности Земли электромагнитную энергию: *низкочастотное* – электромагнитное излучение (ЭМИ) с частотой менее 5 Гц, *радиочастотное* – ЭМИ с длинами волн 0,8 мм ... 30 м, *оптическое* – с длинами волн 0,29 ... 10 мкм. Все остальные ЭМИ из космоса не проникают и поэтому могут появляться в результате процессов на Земле. Часть из них достаточно хорошо отражается ионосферой обратно на Землю, что используется в радиосвязи. Часть частот 730 ... 2300 Гц – достаточно быстро поглощается газами атмосферы, а небольшая часть 7 ... 100 Гц в виде многократного "эха" грозовой активности может распространяться на тысячи километров, лишь слабо затухая.

Кроме магнитного, Земля обладает и электростатическим полем, причём поверхность Земли заряжена отрицательно, а ионосфера положительно. У поверхности напряжённость составляет 0,4 мВ/м, и с высотой она спадает. Напряжённость поля меняется как циклически, так и аperiodически в результате магнитных бурь и погодных изменений (под грозовым облаком она может достигать значений 10^4 В/м). В итоге по линии "ионосфера – кора Земли" имеется волновод, создающий глобальное перераспределение электрических токов и зарядов (рис. 1.13). Если при этом учесть, что нижний слой атмосферы – тропосфера – фактически выполняет роль изолятора (электрически нейтральные газы), то получаем глобальный "конденсатор". В зависимости от знака и величины заряда солнечной плазмы, проникающей в ионосферу, происходит периодическая "зарядка" и "разрядка" обкладок "конденсатора". Там, где вместе с зарядом плазма проникает в тропосферу (либо из космоса, либо из ядра Земли), возникают циклоны и антициклоны. Грозовые фронты символически служат проявлением "пробоя" конденсатора, когда накопленный электростатический заряд через систему молний перетекает через слабое звено в изоляторе – тропосферу.

4.5. ЭКЗОСФЕРА

Свойства экзосферы. Высота от 800 до 3000 км. Состав изменяется от тропосферного к межпланетному с концентрацией до 1000 атомов на 1 км^3 . Количество ионизированных молекул атмосферы сходит на нет, и резко возрастает количество межпланетного нейтрального газа и плазмы. На высотах 1000 ... 2000 км преобладают ионы гелия, азота, водорода, электроны и протоны; на высотах 2000 ... 2500 км концентрация гелия падает, а водорода растёт; на верхней границе 2500 ... 3000 км преобладают ионы водорода. На

верхней границе экзосфера соприкасается с внутренним радиационным поясом.

Из экзосферы происходит утечка атмосферы, которую в основном покидает ионизированный водород. Фактически он формирует некоторое подобие земной короны, которая простирается до верхней границы атмосферы (36 000 км).

4.6. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ АТМОСФЕРЫ У ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Строение атмосферы у планет Солнечной системы зависит от сочетания двух факторов: величины солнечного излучения и газового состава атмосферы (рис. 1.14).

Атмосфера Венеры. Чем ближе планета к Солнцу, тем выше солнечная постоянная и уровень тепловой нагрузки. Значения температур в атмосфере увеличивается в сравнении с Землёй. Пропорционально смещаются фазовые переходы: преобладают тяжёлые газы, создающие более сложную структуру тропосферы и стратосферы.

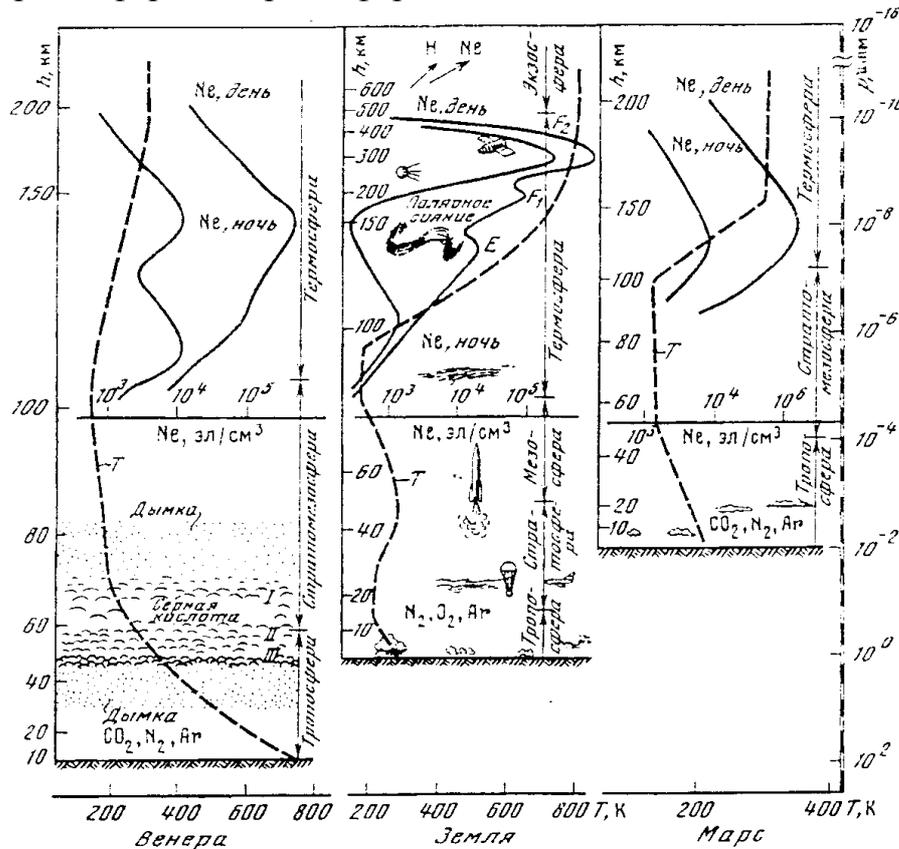


Рис. 1.14. Сравнение атмосфер Венеры, Земли и Марса. Высота над поверхностью приведены относительно шкалы давления Земли. Показаны профили температуры – T , электронной концентрации в ионосфере – Ne и структура облаков



Атмосфера Марса. Наоборот, чем дальше планета от Солнца, тем ниже солнечная постоянная и уровень тепловой нагрузки. Значения температур в атмосфере уменьшаются в сравнении с Землёй. Пропорционально смещаются фазовые переходы: преобладают "криогенные" газы, создающие более простую структуру тропосферы и стратосферы. В частности, "вымороженная" атмосфера Марса создаёт на его поверхности давление, соответствующее на Земле высоте 30 км (земная прозрачная и холодная стратосфера). "Роль" водяного пара (три фазовых состояния: пар, жидкость, лёд) принадлежит углекислому газу. Остальные "земные" газы либо утеряны планетой, либо находятся в твёрдом состоянии на её поверхности. Данные условия непригодны для человека и требуют разработки соответствующих "высотных" скафандров и СЖО.