

В. А. БЕЛИНСКИЙ и В. А. ПОБИЯХО

АЭРОЛОГИЯ

Д о п у щ е н о
Министерством высшего
и среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для гидрометеорологических техникумов



ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
Ленинград • 1962

ВВЕДЕНИЕ

Погода оказывает большое влияние на хозяйственную деятельность человека. Иногда также поведение, настроение и здоровье людей зависит от погоды. Однако постоянное наблюдение метеорологических явлений отнюдь не означает того, что изучение управляющих ими законов и их прогноз не представляют труда.

Для описания, объяснения и прогноза процессов, происходящих в атмосфере, наблюдения играют гораздо большую роль, чем в любой другой науке. В самом деле, изучение атмосферы основывается на анализе карт, диаграмм, разрезов и т. п., составленных по данным наблюдений всей метеорологической сети. Эта сеть весьма обширна; она покрывает весь земной шар и насчитывает тысячи станций.

Совсем недавно метеорологи располагали только данными наблюдений, производимых у земной поверхности. Но для понимания метеорологических процессов и прогноза погоды необходимо полное представление о состоянии всей толщи атмосферы от земной поверхности до очень больших высот. Это и привело к возникновению и развитию новой ветви метеорологии — аэрологии.

§ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ И СОДЕРЖАНИЕ АЭРОЛОГИИ

Наука о физических процессах и явлениях, происходящих в земной атмосфере, называется метеорологией. В настоящей время метеорология развивается весьма бурно; она превратилась в целый цикл наук. Наиболее обширные из них следующие: динамическая метеорология, синоптическая метеорология, климатология, аэрология.

Аэрология занимается наблюдениями и исследованиями физических явлений и процессов, происходящих в свободной атмосфере. К свободной атмосфере можно отнести всю толщу атмосферы, за исключением нижнего сравнительно тонкого слоя воздуха. Существенной частью аэрологии является учение о методах исследования свободной атмосферы. Настоящая книга и посвящена методам и приборам для аэрологических наблюдений.

§ 2 КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОБОДНОЙ АТМОСФЕРЫ

Все существующие методы исследования свободной атмосферы можно разделить на три группы:

- 1) прямые методы, или методы непосредственного зондирования;
- 2) контролируемые косвенные методы, или методы волнового зондирования;
- 3) неконтролируемые косвенные методы, основанные на изучении геофизических явлений, происходящих в высоких слоях атмосферы.

1. Методы непосредственного зондирования

Методы непосредственного зондирования связаны с подъемом в высокие слои атмосферы для производства наблюдений или наблюдателя с приборами, или автоматических приборов, записывающих результаты наблюдений либо передающих по радио сигналы, принимаемые наземными наблюдателями, или специальными мишеней.

Подъем наблюдателей может производиться с помощью различных средств: свободного аэростата, стратостата, привязного аэростата (аэростата наблюдений), самолета, планера, вертолета, дирижабля, ракеты, искусственных спутников Земли, космического корабля. Кроме того, исследование отдельных явлений и процессов, происходящих в атмосфере, возможно также и на высокогорных обсерваториях и станциях.

Самопишущие или передающие по радио приборы можно поднимать на воздушных змеях, привязных аэростатах, шарах-зондах, самолетах, вертолетах, летающих моделях, дрейфующих на одном уровне шарах, автостратостатах, ракетах, искусственных спутниках Земли, космических кораблях.

Специальные мишени в атмосфере используют для определения по их перемещению скорости и направления ветра, а также нижней границы облаков. Кроме того, для определения нижней границы облаков выпускают трассирующие пули, сигнальные ракеты, производят бестеодолитные наблюдения за шарами-пилотами.

Для определения скорости и направления ветра в атмосферу посылают мишени в виде:

а) шаров-пилотов, свободно поднимающихся в атмосферу и смещающихся вместе с воздушным потоком; за их перемещением следят с помощью оптических аэрологических теодолитов;

б) радиопилотов, представляющих собой шары-пилоты, несущие металлические мишени; их перемещение прослеживается посредством радиолокаторов;

в) радиопередатчиков или передатчиков-ответчиков (активных мишеней), подвешенных к свободно летящим шарам-пилотам; за ними следят с помощью радиопеленгаторов или радиотеодолитов;

г) металлической фольги, сбрасываемой на большой высоте иносносимой воздушными течениями в тех слоях, которые проходит медленно опускающаяся фольга;

д) дымовых облаков, образуемых на большой высоте с помощью разрыва снарядов или выбрасываемых из ракет гранат.

Достоинством группы методов непосредственного зондирования атмосферы является прежде всего надежность получаемых результатов наблюдений, возможность систематического повторения этих наблюдений. К их недостаткам следует отнести сравнительно небольшую высоту, достигаемую при этих способах подъема, за исключением ракет, искусственных спутников и космических кораблей.

Некоторые из перечисленных методов непосредственного зондирования не нашли широкого применения, другие методы, давшие в прошлом ценные материалы для метеорологии, в настоящее время уже не используются; и только небольшая часть их получила распространение. Изучению таких методов и посвящена большая часть нашей книги.

2. Контролируемые косвенные методы

За последние годы были разработаны контролируемые косвенные методы исследования атмосферы, или методы волнового зондирования. К ним относятся прежде всего такие методы:

а) исследование отражения и поглощения радиоволн в ионосфере; б) исследование распространения ультракоротких радиоволн в тропосфере; в) изучение тайфунов, областей гроз, дождя и облаков при помощи микроволновых радиолокаторов; г) проекторное зондирование атмосферы; д) исследование аномального распространения звука и другие акустические методы.

Большая часть этих методов обладает тем достоинством, что ими можно пользоваться непрерывно, пополняя обширный материал наблюдений. Для их производства требуются только наземные установки, обладающие, правда, довольно сложным устройством. Общий недостаток всех косвенных методов состоит в том, что при этом, как правило, измеряют не основные параметры, характеризующие состояние атмосферы (плотность, давление, температуру, состав воздуха, а другие характеристики, например степень ионизации воздуха, диэлектрическую проницаемость, оптическую плотность среды, скорость звука. Указанные методы не дают возможности измерить локальное значение какой-либо характеристики (в фиксированной точке), а позволяют получить лишь некоторое представление о слое в целом. Вычисление основ-

ных параметров состояния атмосферы на базе косвенных методов связано с необходимостью введения дополнительных гипотез.

Широкое использование методов волнового зондирования атмосферы требует глубоких знаний специальных разделов физики (радиофизики, оптики, акустики и др.). В метеорологии пока используются лишь результаты измерений, полученных указанными методами. Однако за последние годы аэрологи начали получать и установки, связанные с развитием этих методов. В качестве примера здесь можно назвать хотя бы микроволновые панорамные радиолокаторы, широко применяемые для изучения тропических ураганов, зон осадков, гроз, облаков и др. Некоторые из таких методов кратко рассмотрены в этой книге.

3. Косвенные методы, основанные на изучении геофизических явлений

Ценную информацию о состоянии высоких слоев атмосферы дают косвенные методы, основанные на изучении геофизических явлений, происходящих в высоких слоях атмосферы. Критическое изучение явлений, зависящих от состояния этих слоев, позволяет судить об имеющихся там условиях, т. е. о температуре, давлении, плотности слоев, особенностях состава, электрическом состоянии и т. п.

К таким явлениям относятся: аномальное распространение звука, метеоры, полярные сияния, свечение ночного неба, спектроскопические и спектрофотометрические исследования солнца, колебания атмосферного давления, серебристые облака, сумеречные явления, вариации элементов земного магнетизма и некоторые другие.

Однако указанные методы, так же как и контролируемые методы волнового зондирования, не дают непосредственно основных характеристик состояния атмосферы. Значения этих характеристик находят лишь на основании результатов наблюдений и дополнительных гипотез и теорий. Тщательное сопоставление результатов, полученных разными методами, дало возможность построить кривые распределения давления, плотности и температуры по высоте. Впоследствии это распределение указанных параметров было подтверждено на основании непосредственных измерений, произведенных на ракетах.

Рассмотрим кратко косвенные методы и далее не будем к ним возвращаться. Полное их изложение должно быть содержанием отдельной книги. Предварительно приведем сводку результатов, полученных разными методами.

На основании огромного количества наблюдений за геофизическими явлениями в атмосфере, волнового зондирования атмосферы и измерений, произведенных на ракетах и искусственных

спутниках, удалось составить достаточно хорошее представление о средних условиях в значительной толще атмосферы. Удалось также подметить некоторые широтные и сезонные изменения состояния атмосферы. Эти же наблюдения подтвердили наличие периодических и непериодических возмущений, происходящих в высоких слоях атмосферы.

В соответствии с соглашением, принятым Международным союзом геодезии и геофизики в 1951 г., в настоящее время атмосфера разделяют на следующие основные слои (рис. 1).

1. *Тропосфера*— нижний слой атмосферы, где температура в среднем убывает довольно равномерно с высотой. Тропосфера простирается до 17—18 км на экваторе и до 8—10 км на полюсах.

2. *Стратосфера* — область изотермии. Она простирается до 40 км. Стратосфера отделена от тропосферы сравнительно тонким переходным слоем — *тропопаузой*. Обычно тропосферу и стратосферу считают нижними слоями атмосферы, а остальные зоны атмосферы — ее верхними слоями.

3. *Мезосфера*—слой, характеризующийся в нижней части (от 40 до 60 км) ростом температуры с высотой, а в верхней (от 60 до 80 км) падением температуры. Мезосфера отделена от стратосферы *стратопоузой*.

4. *Термосфера* (от 80 до ~ 800 км) — область атмосферы, в которой наблюдается регулярный рост температуры с высотой; от мезосферы она отделена *мезопоузой*.

5. *Экзосфера*— область рассеяния, расположенная выше 800 км. Здесь плотность воздуха столь ничтожна, что путь свободного пробега молекул составляет сотни и даже тысячи километров, а скорость движения молекул достигает нескольких километров в секунду. Таким образом, молекулы, находящиеся в экзосфере, могут покидать земную атмосферу и уходить из области земного притяжения, как бы расплескиваться в мировое пространство. Такими молекулами являются прежде всего молекулы самых легких газов — водорода и гелия.

Высота и толщина промежуточных слоев атмосферы (тропопаузы, стратопоузы, мезопоузы) меняются в зависимости от широты места и со временем.

В тропосфере сосредоточено более 79% массы атмосферы. Стратосфера составляет около 20% всей массы атмосферы, мезосфера— около 0,25%, термосфера — менее 0,005%, экзосфера — около $10^{-8}\%$.

Помимо указанных слоев, выделенных на основании особенностей распределения температуры по высоте, в атмосфере существуют также слои повышенной ионизации, имеющие решающее значение для процессов распространения радиоволн. Это слои *D*, *E*, *F*₁ и *F*₂, образующие *ионосферу*. Слой *E* расположен в среднем на высоте около 100 км, слой *F*₁ — на высоте около 250 км и слой *F*₂ — на высоте около 350 км. Слой *D* появляется

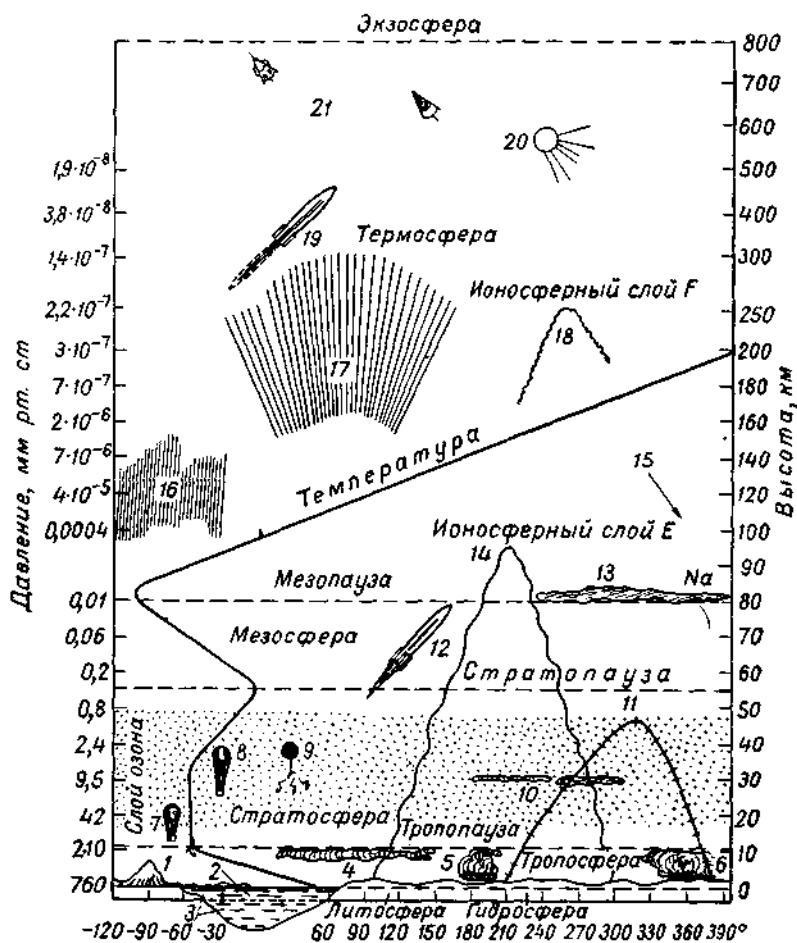


Рис. 1. Строение атмосферы.

1 — Джомолунгма (Эверест), 2 — уровень моря, 3 — наибольшая глубина океана, 4 — перистые облака, 5 — облака конвекции, 6 — облака нижнего яруса, 7 — свободный аэростат, 8 — стратостат, 9 — радиозонд, 10 — перламутровые облака, 11 — отражение звуковых волн, 12 — метеорологическая ракета, 13 — серебристые облака, 14 — отражение средних радиоволн, 15 — метеоры, 16, 17 — полярные сияния, 18 — отражение коротких радиоволн, 19 — геофизическая ракета, 20 — искусственные спутники Земли, 21 — космические корабли.

иногда на высоте 60—80 км. Для противопоставления ионосфере нижние слои атмосферы называют *нейтросферой*.

Наконец, атмосферу делят на две части, исходя из состава воздуха на различных высотах. Нижние слои атмосферы до высоты 100 км с составом воздуха, мало меняющимся с высотой (кроме углекислого газа, озона и водяного пара), называют *гомо-*

сферой. Выше лежащие слои атмосферы называют *гетеросферой*. Здесь состав воздуха сильно меняется с высотой вследствие диссоциации молекул на атомы.

Ниже мы рассмотрим кратко основные выводы, получаемые различными косвенными методами, представляющие собой вклад в изучение различных слоев атмосферы.

а) Аномальное распространение звука. Слышимость источников звука не уменьшается непрерывно с увеличением расстояния по горизонтали: после начального уменьшения и даже прекращения слышимости звука она затем возрастает и достигает максимума на расстоянии в несколько сотен километров от источника. Таким образом было установлено, что существуют две зоны слышимости — нормальная, непосредственно прилегающая к источнику звука, и аномальная, располагающаяся от источника на очень большом расстоянии и отделенная от нормальной зоны слышимости широкой *зоной молчания*. Было также установлено, что это явление вызывается наличием в верхней атмосфере теплого слоя воздуха, в котором скорость распространения звука возрастает с высотой. Известно, что скорость звука зависит от температуры, состава воздуха и не зависит от плотности. Кроме того, она существенно зависит от скорости и направления ветра в соответствующем слое. Исследования показали, что состав воздуха в рассматриваемой области не меняется с высотой и что изменение скорости звука в основном связано с ростом температуры в слое, простирающемся до высоты 50—55 км. Ветер также играет существенную роль.

Однако первоначальные исследования аномального распространения звука давали сильно завышенные значения температуры атмосферы в этом слое по сравнению с ракетными данными. Даже в работах, где тщательно учтено влияние ветра, получены также несколько завышенные данные.

б) Метеоры. Метеоры возникают в верхних слоях атмосферы при вторжении в нее из межпланетного пространства метеорных тел. Обычный метеор вызван движением частицы (метеорного тела), масса которой составляет доли грамма. Двигаясь с космической скоростью, метеорное тело сталкивается с молекулами воздуха, увеличивает их тепловые скорости, диссоциирует их (на атомы) и ионизирует молекулы и атомы газов.

Метеор порождает воздушные волны, а также магнитные и электрические явления, влияющие на распространение радиоволн. Воздействуя на атмосферу, метеорное тело в свою очередь плавится (возгорает) и распыляется потоками встречного воздуха. Метеорная частица испаряется целиком примерно за полсекунды, после чего метеор угасает.

Изучение высот возгорания и затухания метеоров, дрейфа дымовых хвостов, метеорной ионизации и других метеорных явлений, происходящих в слое 40—150 км, привело к ряду важных

выводов о строении, составе, состоянии и движении этих слоев. Уже в 1922 г. Линдеман и Добсон на основании метеорных наблюдений установили, что на высоте 50—60 км плотность воздуха во много раз больше, чем предполагали ранее на основании представления об изотермическом равновесии стратосферы при низкой температуре 220° К. Оказалось, что на высоте 50—60 км атмосфера снова становится теплой, причем температура возрастает до 320—330° К, а на высоте около 80 км температура снова падает до 220° К.

Иногда метеоры взрываются вскоре после вступления в атмосферу и образуют источник звука большой интенсивности. Однако такие взрывы почти никогда не слышны, так как возникшие звуковые волны отражаются обратно вверх. Это служит дополнительным доказательством того, что выше теплого слоя, лежащего на высоте 50—60 км, имеется новое падение температуры с высотой. Область инверсии температуры метеоры проходят не угасая, поэтому высоты погасания метеоров имеют двойной максимум выше и ниже слоя инверсии (на высоте 80 и 40 км).

Наблюдения дрейфа метеорных слоев еще в прошлом веке обнаружили быстрые горизонтальные воздушные течения в области их образования (80—110 км) со скоростями, достигающими 300 м/сек (в среднем 50—70 м/сек.).

Исследования показали, что ионизация в метеорном следе возникает сначала в тонком столбе радиусом около 10 см и длиной около 10 км. Начальная концентрация электронов в метеорном столбе составляет 10^8 — 10^{10} см⁻³. С течением времени столб расплывается и превращается в ионизированные облака. Они располагаются на высоте 80—120 км. Метеорная ионизация легко обнаруживается с помощью радиолокаторов. Поэтому радиолокационное изучение метеорной ионизации стало в настоящее время одним из основных методов исследования верхней атмосферы.

в) Полярные сияния. Регулярные наблюдения за полярными сияниями начались более сотни лет тому назад. Еще М. В. Ломоносов уделял много внимания этому замечательному явлению.

Полярными сияниями называются явления свечения высоких слоев атмосферы, наблюдаемые в полярных областях. При всем многообразии форм полярных сияний их можно разделить на два основных класса. В первый класс входят полярные сияния, имеющие лучевую структуру, например короны, лучи, драпри. Полярные сияния, относящиеся ко второму классу, не обладают лучевой структурой. К ним принадлежат однородные дуги, однородные полосы, пульсирующие поверхности. Наиболее обычными являются дуги, полосы и драпри.

Изучение спектров полярных сияний, наблюдаемых почти во всей толще атмосферы (от 80 до 1300 км), имеет исключительно большое значение для исследования верхней атмосферы. Пола-

гают, что высокие (900—1300 км) формы полярного сияния — лучи и дуги — вызваны потоками электронов, излучаемых солнцем, а драпри — протонами, проникающими до высоты 100 км.

Спектры полярных сияний позволяют получить сведения о температуре и составе верхней атмосферы. Так, линии и полосы в спектрах полярных сияний принадлежат: 1) атомарному кислороду, 2) атомарному азоту, 3) нейтральным молекулам азота, 4) ионизированным положительно молекулам кислорода и азота и иногда 5) натрию и водороду, а также, вероятно, нейтральному и ионизированному гелию.

За последние годы, кроме визуальных фотографических и спектроскопических методов исследования полярных сияний, был разработан новый, очень эффективный радиолокационный метод. Отражения радиоволн от полярных сияний возникают вследствие ионизации атмосферы при ее бомбардировке частицами солнечного происхождения. Интенсивные полярные сияния тесно связаны с так называемыми магнитными бурями, т. е. с возмущениями магнитного поля Земли.

Изучение спектров полярных сияний позволило получить также значения температуры, хорошо согласующиеся с другими данными. Так, например, вблизи верхней границы полярных сияний получена температура порядка 500—750° К.

г) **Свечение ночного неба.** Около 60 лет тому назад было замечено, что меньше половины всего света, посылаемого ночным небом, принадлежит звездам и туманностям. Больше половины яркости ночного неба связано со свечением самой атмосферы. Спектры свечения ночного неба во многом похожи на спектры полярных сияний, но между ними есть и существенное различие. В основном собственное свечение ночного неба связано с излучением атомарного кислорода и молекулярного азота.

Исследования показали, что собственное свечение атмосферы, так же как и полярные сияния, тесно связано с магнитными бурями. Кроме того, обнаружена также связь интенсивности ночного свечения атмосферы с ультрафиолетовым излучением Солнца.

Изучение спектра собственного свечения атмосферы также дает возможность определить ее температуру. Так, например, при изучении полос спектра ночного неба, обусловленных присутствием в атмосфере ОН, на высоте около 70 км была найдена температура порядка 260° К.

д) **Озоносфера.** Уже давно было замечено, что солнечный спектр довольно резко обрывается вблизи волны 290 мкм. Это обусловлено сильным поглощением коротковолновой ультрафиолетовой радиации Солнца озоном. Озон сконцентрирован главным образом в слое 10—50 км, причем его максимальная концентрация приходится на высоту около 25 км. Толщина слоя озона, приведенная к нормальным условиям ($t = 0^\circ$, $p = 760$ мм), состав-

ляет в среднем 2,5 мм, но изменяется от 1,5 до 4,5 мм как с широтой места и временем года, так и в зависимости от условий погоды. Несмотря на то что максимальная концентрация молекул озона равна приблизительно 0,000004 концентрации остальных молекул, слой озона (называемый также *озоносферой*) в средних слоях атмосферы играет роль теплового резервуара и его присутствием объясняется повышение температуры до максимума на высоте 50—60 км. Это связано с тем, что озон сильно поглощает энергию в различных частях спектра.

Наиболее сильными и важными полосами поглощения озона является система полос Хартли, простирающаяся от 210 до 320 мкм и обрезающая коротковолновый конец солнечного спектра. Кроме этих полос, расположенных в ультрафиолетовой части спектра, есть и другие, гораздо более слабые системы полос в видимой и инфракрасной областях спектра. В ультрафиолетовой части спектра существуют еще полосы Хюггинса (от 320 до 350 мкм). Но поглощение в этих полосах невелико. В видимой области спектра (между 350 и 450 мкм) поглощение озоном отсутствует. В более длинноволновой области имеется также слабая система полос Шапю (от 450 до 650 мкм). В инфракрасной области спектра есть три системы полос с максимумом поглощения при 4,7, 9,6 и 14,1 мкм.

Содержание озона заметно изменяется. Среднее содержание его ночью больше, чем днем. В годовом ходе наибольшее содержание озона наблюдается весной и наименьшее — осенью в обоих полушариях. Годовые колебания резко выражены в высоких широтах и совершенно исчезают на экваторе. Общее количество озона на экваторе мало (около 2,0 мм). В высоких широтах оно особенно велико, достигая 4,0 мм. Содержание озона, кроме того, связано с фронтами, циклонами и другими синоптическими условиями в нижних слоях атмосферы, а также с давлением на уровне 9—16 км, потенциальной температурой и плотностью стратосферы.

е) Атмосферные колебания. Уже два столетия тому назад Лаплас, изучая суточные колебания атмосферного давления, обнаружил, что имеют место ясно выраженные синусоидальные колебания с периодом 24 часа и с двумя максимумами — в 10 и 22 часа по местному времени (т. е. полусуточные колебания).

Размах колебания составляет около 2 мм. Однако многие стороны этого явления долгое время оставались загадочными. Только за последние годы было найдено удовлетворительное их объяснение. При их изучении обнаружили также, что в высоких слоях атмосферы дуют сильные периодические ветры, достигающие скорости больше 200 км/час. Эти периодические ветры охватывают весь земной шар. Оказалось, что они возникают вследствие солнечных приливов в атмосфере. Периодические ветры распространяются до больших высот. Они проявляются также

в спокойных суточных вариациях элементов земного магнетизма и аналогичных изменениях высот и плотности ионизации ионосферных слоев.

Для объяснения почти стократного усиления амплитуды приливных колебаний необходимо, чтобы период собственных колебаний атмосферы отклонялся от 12-часового не более чем на 6 мин. Оказалось, что период собственных колебаний зависит от характера распределения температуры по высоте. Например, 12-часовой период получается, если температура распределяется по высоте так, как было указано выше, т. е. до высоты 10 км падает, затем остается постоянной до 25 км, потом растет до 50 км, вновь остается постоянной примерно до 60 км, после чего падает до 80 км.

Таким образом, почти стократное резонансное усиление амплитуд изменения давления, вызванных солнечной приливообразующей силой атмосферных приливов, подтверждает возрастание температуры до максимума на высоте 50—60 км и убывание ее до минимума на высоте около 80 км.

ж) Серебристые облака. 13 июня 1885 г. в Москве астроном В. К. Церасский впервые обнаружил ночные серебристые облака. Эти облака наблюдаются иногда ночью севернее широты 45° около периода летнего солнцестояния (в южном полушарии в декабре). Они освещены солнечными лучами и находятся почти всегда на высоте около 80 км. Серебристые облака наблюдаются более часто в период максимума солнечной активности.

Фотограмметрические измерения серебристых облаков позволили определить скорость их перемещения; она оказалась порядка нескольких десятков метров в секунду. Обнаружены циклонические движения в поле серебристых облаков, волновые движения в облаках и явления турбулентности.

Появление серебристых облаков связано с прохождением холодного фронта. Облака, похожие на серебристые, наблюдались также после извержения некоторых вулканов и при падении в 1908 г. тунгусского метеорита; по внешнему виду они похожи на конденсационные следы самолетов.

Высокая прозрачность серебристых облаков, малая скорость их осадения, отсутствие дифракционных явлений в них позволили считать величину радиуса облачных частиц равной примерно 0,1 мк. Полагают, что серебристые облака состоят из ледяных кристаллов.

Но для образования серебристых облаков путем сублимации нужны центры кристаллизации (космическая или вулканическая пыль), наличие температуры ниже точки инея и соответствующие условия освещения. Вся эта совокупность условий одновременно редко выполняется. Однако на высоте около 80 км действительно имеют место условия, благоприятные для сублимации водяного пара и образования ледяных кристаллов.

Серебристое облако средних размеров площадью 20—50 тыс. км² содержит несколько килограммов облачных элементов. Но обычные метеоры приносят столько же пыли лишь за год. Однако космические и метеорные пылинки при определенных условиях могут привести к образованию серебристых облаков. Таким образом, наблюдения за серебристыми облаками подтвердили наличие на уровне 80 км низких температур (около 200° К) и сильного ветра.

з) Сумерки. Прожекторное зондирование. Фотометрические исследования сумеречных явлений позволяют судить по оптической плотности различных слоев атмосферы о концентрации молекул на этих высотах. Однако результаты, полученные до сего времени при помощи сумеречного метода, не вполне согласуются с данными, полученными при подъемах ракет. Измерение интенсивности рассеяния вдоль луча мощного прожектора также доставляет данные о концентрации молекул до высот порядка 65 км.

и) Вариации элементов земного магнетизма. Обычно измеряют следующие три магнитные величины: горизонтальную составляющую магнитного поля Земли, вертикальную составляющую и склонение. Записи этих магнитных величин показывают, что они испытывают обычно плавные и регулярные изменения; однако в отдельные дни они могут быть более или менее сильно возмущены.

Изучение вариаций земного магнетизма показало, что некоторые из них изменяются с изменением местного времени, а другие симметричны относительно земной оси и изменяются одновременно на всем земном шаре. Особенно интенсивными могут быть возмущения, охватывающие весь земной шар (магнитные бури). Во время магнитной бури полная энергия магнитного поля внутри и вокруг земного шара возрастает. В процессе исчезновения возмущающего поля его энергия превращается в тепло, выделяемое атмосферными и земными электрическими токами, с которыми связаны магнитные возмущения.

Энергия магнитных бурь поступает от Солнца в случае типичных бурь в течение 15 час. и достигает 10^{23} эрг. Следовательно, скорость поступления энергии равна $2 \cdot 10^{18}$ эрг. сек.⁻¹. Но эта величина составляет только одну миллионную долю от полной энергии, поступающей на Землю от Солнца ($2 \cdot 10^{24}$ эрг. сек.⁻¹).

Существует тесная связь между числом солнечных пятен и магнитными бурями, а также полярными сияниями и возмущениями в ионосфере, где развивается система электрических токов.

к) Утечка гелия. Известно, что гелий непрерывно поступает в атмосферу из недр Земли, но общее его количество в атмосфере постоянно. Это может быть объяснено тем, что происходит непрерывная утечка гелия из верхних слоев атмосферы в меж-

Исследуемая область, км	Метод или объект критического изучения	Полученные сведения
0—32	Шары-зонды, радиозонды	Состав атмосферы всюду одинаковый. Температура падает с высотой (примерно на $6^{\circ}/\text{км}$) до тропопаузы, высота которой изменяется от 8—10 км в высоких широтах до 18 км у экватора. В стратосфере температура почти не меняется с высотой; струйные течения в тропосфере и стратосфере
0—30	Дымовые снаряды	Сезонные ветры
0—120 и более	Ракеты	Состав атмосферы на высоте 70 км такой же, как в тропосфере. Распределение температуры и давления по высоте до уровня 120 км такое же, как полученное ранее косвенными методами. Солнечный спектр простирается далеко за границу поглощения озоном
35—60	Аномальное распространение звука в атмосфере	Возрастание температуры в средних слоях атмосферы
70—500	Распространение радиоволн	Газы, образующие атмосферу, ионизированы. Высокая температура (около 1000°K) на уровне 250 км
40—150	Метеорные явления	Возрастание температуры в средних слоях атмосферы; падение температуры до минимума на уровне около 80 км; сезонные ветры
20—60	Спектроскопические и спектрофотометрические исследования Солнца	Наличие слоя озона с максимумом концентрации на высоте около 25 км; толщина слоя озона, приведенная к нормальным условиям, равна примерно 0,25 см
75—85	Серебристые облака	Низкие температуры (около 200°K), большие скорости ветра
50—400	Барометрические колебания	Приливы в верхних слоях атмосферы; возрастание температуры в средних слоях атмосферы, ограниченных сверху холодной областью
90—120	Вариации элементов земного магнетизма	Системы электрических токов и высокая электропроводность

Исследуемая область, км	Метод или объект критического изучения	Полученные сведения
60—500	Свечение ночного неба	Присутствие натрия на высоте 60—120 км. Выше 100 км располагается преимущественно атомарный кислород и молекулярный азот. Молекулы N_2 ионизированы излучением Солнца
80—1000	Полярные сияния	Присутствие в верхней атмосфере атомарного кислорода и азота и ионизированного молекулярного азота. Приток заряженных частиц, имеющих большую скорость
800 и выше	Диссипация атмосферных газов, утечка гелия	Существование экзосферы: высокие температуры (около $1500^\circ K$) вблизи критического уровня

планетное пространство. Такое предположение было использовано для оценки температуры самых верхних слоев атмосферы. Оказалось, что для того чтобы скорость утечки гелия сравнялась со скоростью поступления его с поверхности Земли, необходимо, чтобы температура в слое F ионосферы достигала $1500^\circ K$. При этом достаточно, чтобы температура атмосферы лишь эпизодически поднималась выше $1500^\circ K$. В остальное время температура атмосферы может быть значительно ниже.

В табл. 1 приведена краткая сводка результатов исследования атмосферы, полученных прямыми и косвенными методами.

§ 3. ИСТОРИЯ АЭРОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Высокогорные обсерватории

Изобретение ртутного барометра (Торричелли, 1643 г.) позволило проводить измерения атмосферного давления. Уже в 1647 г. француз Перье, измерив с помощью ртутного барометра давление на горе Пюи-де-Дом, установил факт уменьшения давления с высотой. Однако восхождение в горы тогда было связано с такими большими трудностями, что эта новая идея исследовать явления погоды посредством подъема в горы не скоро была использована. Лишь более чем через 100 лет швейцарский физик Соссюр (1740—1799 гг.), посвятивший всю свою жизнь исследованию гор, произвел многочисленные метеорологические наблюдения в Альпах, поднявшись в 1787 г. на Монблан. Несколько позже, в 1802 г., Гумбольдт провел обширные наблюдения в Андах.

Однако высокогорные обсерватории, ведущие наблюдения в течение всего года, были созданы гораздо позднее (1855—1900 гг.). Эти обсерватории и в наше время дают разнообразный и важный материал для исследования атмосферы. Но они не могут в полной мере характеризовать условия свободной атмосферы. Исследование свободной атмосферы возможно только с помощью летательных аппаратов. Об этом заявил М. В. Ломоносов, на конференции Петербургской академии наук 4 февраля 1754 г. в своем сообщении о работах по созданию «аэродромической машины», предназначенной для подъема в верхние слои атмосферы метеорологических приборов.

2. Свободные аэростаты

Начало исследований свободной атмосферы связано с изобретением воздушных шаров.

Сохранилось описание первого подъема на воздушном шаре, проведенного в Рязани в 1731 г. Крякутным.

М. В. Ломоносов в 1748 г. в работе «Попытка теории упругой силы воздуха» обратил внимание на свойство нагретого воздуха подниматься вверх и тем самым обосновал возможность подъема в атмосферу на шарах, наполненных теплым воздухом.

В 1783 г. братья Монгольфье произвели первый удачный полет на воздушном шаре, наполненном теплым воздухом. В том же году член Петербургской Академии наук Леонард Эйлер впервые вывел формулу, позволяющую вычислять подъемную силу воздушного шара.

Воздушные шары в XVIII и XIX вв. использовались для проведения наблюдений в свободной атмосфере. Однако метеорологическое значение ранних полетов воздушных шаров невелико вследствие того, что измеренные температуры были сильно искажены влиянием солнечной радиации. К немногим исключениям относится полет академика Захарова, совершенный им 30 апреля 1804 г. Полет происходил после захода солнца, поэтому данные измерений температуры можно было считать надежными. В этом полете производились разнообразные физические опыты, наблюдения над магнитной стрелкой и др.

Лишь гораздо позже, после изобретения Ассманом аспирационного психрометра в 1887 г., оказалось возможным производить надежные измерения температуры на воздушных шарах (аэростатах).

Многие крупные ученые пытались использовать воздушные шары для исследования свободной атмосферы, например Лавуазье, Лаплас, Бертолле, Гей-Люссак, Бю, Уэлш, Глешер, Фламарион, Тиссандье.

В России после полета академика Захарова произошел перерыв в исследованиях с помощью воздушных шаров. Они возобновились лишь в 60-х годах. При этом было обращено внимание на

улучшение методики наблюдений и на то, чтобы эти полеты были более систематическими и достигали больших высот.

Серию систематических научных полетов выполнили начиная с 1868 г. М. А. Рыкачев (впоследствии академик и директор Главной физической обсерватории), а затем преподаватель воздухоплавательной школы М. М. Поморцев, а также Д. И. Менделеев, С. И. Савинов, В. В. Кузнецов, Н. Н. Калитин и др.

Методика измерений в этих полетах была очень тщательной. Особенно большая работа была проведена М. М. Поморцевым. Результаты первых 40 полетов были обработаны и опубликованы в 1891 г. Несколько позже (в 1897 г.) была издана вторая работа, содержащая научный отчет о 80 полетах. В работах М. М. Поморцева содержится много интересных и оригинальных наблюдений и обобщений, не потерявших значения и в наши дни.

Большая серия научных исследований на воздушных шарах была проведена в Германии под руководством Ассмана, Берсона и Зюринга. Особенную ценность представляют данные берлинских полетов, совершенных в 1888—1889 гг.

Свободные аэростаты (рис. 2) весьма широко использовались для специальных исследований атмосферы в 1940 г. в Московской аэрологической обсерватории и в послевоенные годы в Центральной аэрологической обсерватории. Полеты аэростатов совершаются еще и сейчас.

Оболочка свободного аэростата изготавливается из двухслойной прорезиненной ткани с большим запасом прочности. К оболочке с помощью строп прикрепляется гондola (рис. 3), представляющая собой четырехугольную корзину, сплетенную из ивовых прутьев.

Аэростат наполняется водородом и пускается в свободный полет. Вместе с воздушным потоком аэростат смещается по горизонтали. Скорость подъема и спуска аэростата регулируется с помощью балласта и клапана. Балластом служит сухой речной песок. Свободный аэростат при подъеме на некоторой высоте уравнивается, после чего начинает медленно опускаться. Сбрасывание небольшого количества балласта заставляет его вновь подниматься. Для быстрого подъема, например при взлете, пробивании облака или инверсии, необходимо сбросить 2—3 мешка балласта (20—30 кг). Для прекращения подъема или спуска аэростата служит клапан для выпуска водорода, установленный в вершине аэростата.

Чтобы уменьшить скорость перемещения аэростата и правильно его ориентировать при посадке применяется гайдроп, т. е. длинный толстый канат, в нижнем конце которого вплетена проволока. Перед посадкой гайдроп опускают за борт аэростата, и он волочится по земле, уменьшая тем самым скорость влечения аэростата. В аэростате имеется разрывное приспособление в виде узкой полосы, идущей от верхней части к середине аэростата.

Для быстрой посадки идущего на гайдропе аэростата командир аэростата резко тянет разрывное приспособление. Оболочка разрывается и выпускает водород.

Полет свободного аэростата, как правило, очень спокойный. Поэтому в гондole аэростата можно проводить самые разнооб-



Рис. 2. Свободные аэростаты в полете.

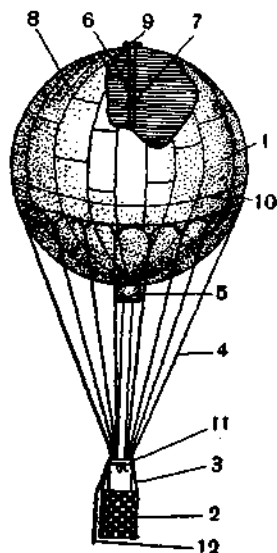


Рис. 3. Схема сферического аэростата.

1 — оболочка, 2 — корзина (гондола), 3 — гондольная стропа, 4 — стропы, 5 — аппендикс, 6 — разрывная веревка, 7 — клапанная веревка, 8 — разрывное полотнище, 9 — клапан, 10 — пояс, 11 — подвесной обруч, 12 — гайдроп.

разные исследования, например изучение микроструктуры и водности облаков, ядер конденсации, количества и размера пылинок, измерение актинометрических характеристик, разности потенциалов электрического поля, исследование вертикальных движений. Для подъема на большие высоты гондола оборудуется кислородной аппаратурой.