

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. Атмосфера Земли. Состав и основные характеристики	11
1.1. Структура атмосферы и ее состав	12
1.2. Приземный слой атмосферы	16
1.3. Модели стандартной атмосферы	18
1.4. Оптические свойства атмосферы.....	21
1.4.1. Молекулярное поглощение и рассеяние.....	26
1.4.2. Аэрозольное рассеяние и ослабление	29
1.4.3. Спектральные свойства обратно рассеянного излучения.....	33
Контрольные вопросы	35
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗДЕЛУ 1	36
2. Принципы дистанционного лазерного зондирования	37
2.1. Уравнение лазерного дистанционного зондирования.....	39
2.2. Структура и состав лидара	47
2.2.1. Система формирования зондирующего излучения	47
2.2.2. Компоновка приемо-передающего тракта лидара.....	49
2.2.3. Приемная система лидара	53
2.3. Оценка работоспособности лидарной системы	59
2.3.1. Типы шумов в приемном канале лидара	59
2.3.2. Отношение сигнал/шум.....	61
Контрольные вопросы	64
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗДЕЛУ 2	65
3. Применение лидаров для определения аэрозольного состава атмосферы.....	66
3.1. Свойства атмосферного аэрозоля.....	66
3.2. Методы определения оптических характеристик атмосферы из лидарных сигналов	68
3.2.1. Метод логарифмической производной.....	70
3.2.2. Метод асимптотического сигнала	71
3.2.3. Метод интегрального накопления.....	72
3.2.4. Метод Клетта – Фернальда	73
3.2.5. Рамановский метод	77
3.3. Определение формы и природы частиц с помощью лидара	81

3.3.1. Степень деполяризации лидарного сигнала для аэрозолей различного типа	83
3.3.2. Особенности поляризационного лидара	85
3.4. Многоволновой аэрозольный лидар	87
3.5. Одноволновой аэрозольный лидар. Облакомер	94
Контрольные вопросы	105
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗДЕЛУ 3	106
4. Применение лидаров для зондирования химического состава атмосферы	107
4.1. Метод дифференциального поглощения	107
4.2. Выбор рабочих длин волн в методе дифференциального поглощения	112
4.2.1. Классический двухволновой метод дифференциального поглощения	112
4.2.2. Многоволновой метод дифференциального поглощения	117
4.3. Лидары дифференциального поглощения видимого и УФ диапазона	121
4.3.1. Лидар RIVM	124
4.3.2. Лидар NPL	126
4.3.3. Лидар химического анализа МЛК	127
4.4. Лидары дифференциального поглощения ИК-диапазона	131
4.4.1. Особенности лидаров в ИК-диапазоне. Прямое и гетеродинное детектирование	132
4.4.2. Излучатель для ИК-лидара дифференциального поглощения с гетеродинным приемом	134
4.4.3. Схема гетеродинного лидара ИК-диапазона	137
4.5. Методика проверки чувствительности лидаров дифференциального поглощения	143
Контрольные вопросы	146
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗДЕЛУ 4	147
5. Применение лидаров для измерения скорости ветра	149
5.1. Методы измерения скорости ветра с помощью лидаров	149
5.1.1. Лидарный корреляционный метод	150
5.1.2. Лидарный доплеровский метод на основе когерентного детектирования	151

5.2. Отношение сигнал/шум при когерентном детектировании	154
5.3. Серийные когерентные доплеровские лидары.....	158
5.4. Доплеровский лидар непрерывного типа	164
5.5. Доплеровский лидар импульсного типа	174
5.5.1. Испытания импульсного ветрового лидара.....	180
5.6. Измерение поля скоростей и естественных опасных ветровых явлений импульсным доплеровским лидаром	183
5.6.1. Детектирование горизонтального и вертикального сдвига ветра.....	184
5.6.2. Детектирование вихревых следов за самолетом.....	188
5.7. Доплеровский лидар не когерентного (прямого) детектирования.....	194
5.8. Перспективы развития систем на основе импульсных доплеровских лидаров	204
Контрольные вопросы	208
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗДЕЛУ 5	209
6. Особенности сертификации и метрологического обеспечения атмосферных лидарных измерителей	211
6.1. Сертификация типа средства измерения	211
6.2. Особенности метрологического обеспечения атмосферных лидаров	215
6.3. Метод подтверждения первичных параметров облакомеров и других атмосферных профилометров обратного рассеяния	222
6.4. Подходы к метрологическому обеспечению ветровых лидаров.....	232
Контрольные вопросы	240
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К РАЗДЕЛУ 6	241
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	243

ВВЕДЕНИЕ

Атмосфера Земли является основной средой существования человека и его жизнедеятельности, поэтому естественно, что информация о ее состоянии, свойствах и характеристиках и их распределении в пространстве и времени, а также прогноз об их изменениях в будущем представляет абсолютную необходимость и требует постоянного мониторинга. При этом огромные масштабы атмосферы и высокая подвижность ее составляющих делают малоинформативными контактные методы измерения параметров в конкретных точках на поверхности земли или на подвижных платформах, движущихся в воздушных потоках.

Более того, и с практической точки зрения большинство пользователей нуждается не в точечной информации о характеристиках атмосферы для некоторых заранее определенных локальных позиций, а в осредненных параметрах для пространственных объемов, масштаб которых зависит от конкретных задач, но в любом случае имеет размеры не менее сотен метров и располагается в любых направлениях на дистанциях в десятки километров.

Получение информации такого рода с помощью контактных методов труднодостижимо и с любой точки зрения нерационально.

Наиболее подходящими для подобных задач являются дистанционные методы зондирования атмосферы, позволяющие практически одновременно получать информацию о состоянии атмосферы на дистанциях от нескольких метров до десятков километров при достаточном для большинства практических задач пространственном разрешении.

Впервые возможность использования электромагнитного излучения в зондировании атмосферы для локализации места выпадения и определения типа осадков (дождь, снег, град), а также для прогнозирования их эволюции в пространстве была обнаружена при работе военных радиолокаторов в конце Второй мировой войны, а уже в 1950 году появилось «радарное оборудование для обнаружения облаков и столкновений».

В ходе дальнейшего развития этой технологии возможности метеорадаров были расширены для получения информации об опасных метеоявлениях (грозовые фронты, ураганы), а также интенсивности и направлении ветра, однако, только при достаточной отражательной способности атмосферы (снег, дождь, туман, плотная облачность).

Обычно в метеорологических радарх используют электромагнитное излучение трех длин волн диапазонов: X (3,2 см), C (5,3 см) и S (10 см). Также имеются специальные метеорадары Ka-диапазона (0,8 см).

Диапазон S используется в условиях интенсивных осадков, однако требует использования очень больших антенн. 3-сантиметровый радар X-диапазона используется на менее длинных дистанциях и особенно эффективен в условиях плотных облачных фронтов, например в зимних условиях с низкой облачностью, а метеорологический радар Ka-диапазона может работать только на очень коротких дистанциях и при наличии в атмосфере совсем мелких частиц, таких как морось и туман.

Лазерные метеорадары (лидары) существенно расширяют погодный диапазон, в котором с их помощью возможно получение информации не только о стандартных метеопараметрах, измеряемых метеорадарами радиодиапазона, но и о характеристиках мельчайших конденсированных частиц в атмосфере (аэрозолей), и даже о природе газовых составляющих атмосферы. Причем метеорологические лидары позволяют осуществлять мониторинг атмосферы в хорошую погоду даже при максимальных значениях метеорологической дальности видимости (МДВ), что абсолютно невозможно с помощью метеорадаров.

Наибольшее распространение получили лидарные системы анализа атмосферы на предмет распределения аэрозольного и химического составов воздуха, а также скорости и направления ветра. Исследование аэрозольно-газового состава воздуха особенно важно в задачах экологического мониторинга зон, связанных с опасными производствами и глобальным переносом загрязняющих веществ, в том числе парниковых газов. Подобные задачи решаются с помощью многодлинноволновых аэрозольных лидарных комплексов для исследования

структуры аэрозоля и лидарами дифференциального поглощения для определения концентрации химических соединений.

Параметры атмосферы, такие как скорость и направление ветра, видимость, плотность и высотность облачных слоев, изменяются как во временном, так и в пространственном масштабах. Это может приводить к формированию опасных метеорологических явлений. В задачах управления воздушным движением и обеспечения безопасности авиаперевозок, особенно в районах аэропортов, необходимо измерять параметры атмосферы с высокими временным и пространственным разрешениями. Распределения ветровых полей на различных высотах, а также данные о видимости и параметрах облачности могут быть получены когерентными доплеровскими лидарами.

Одним из наиболее важных достижений в этой области является разработка и практическая реализация уникальных мобильных многодлинноволновых лидарных комплексов, позволяющих одновременно на единой платформе проводить комплексные исследования различных параметров атмосферы. В книге приведены наиболее интересные результаты этих исследований.

Однако дальность действия этих приборов ограничена как раз МДВ, т. е. они могут обеспечивать эффективный мониторинг атмосферы только в благоприятных погодных условиях.

Несмотря на очевидную взаимодополняемость метеолокаторов оптического и радиодиапазона, до последнего времени имеется немного сведений о реализации комплексных многоспектральных локационных систем на единой платформе, способных определять основные характеристики атмосферы в любых погодных условиях.

Приведенное в монографии описание лидарно-радарного трехдиапазонного метеокомплекса «ЛиРа» в известной мере дополняет этот пробел.

Еще одной серьезной проблемой до последнего времени было отсутствие официальной сертификации метеолокаторов в качестве средств измерения. Все такие приборы сертифицировались только как средства индикации, позволяю-

щие получать качественную информацию о разнообразных погодных явлениях, на основании которой ответственное решение оставалось за оператором.

В учебном пособии представлены результаты работы авторов и в этом направлении, итогом которой впервые стала сертификация некоторых типов лидаров в качестве средства измерения. Еще более важно, что разработанный подход открывает возможность сертификации не только лидаров, но в дальнейшем и метеорологических радаров, по крайней мере, некоторого типа.

В целом, в настоящей работе представлены описания и примеры реализации современных лидарных технологий, применяемых для мониторинга атмосферы, некоторые из которых до сих пор вообще широко не обсуждались. Во многом это определяется большим собственным практическим опытом авторов (преподавателей кафедры лазерной техники БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова и научных сотрудников АО «Лазерные Системы»), полученным в результате участия в исследованиях, реальных разработках и испытаниях метеорологических комплексов различного назначения.

Цель издания – дать читателю целостное представление о применениях лазеров: от определения подходов к решению реальных задач, оценок условий эксплуатации, выбора технологий, формирования структуры систем для исследования атмосферы и требований к их функциональным характеристикам до технической реализации лазерных комплексов, оценки технологических параметров и описания конкретных примеров. При этом мы старались опираться на собственные, но достаточно апробированные результаты в предметной области.

Объединение описаний лидаров для изучения атмосферы в одной книге представляется особенно полезным в учебном пособии для широкого набора специальностей, где читателю с единых позиций дается максимально полное представление о возможностях такой техники, достоинствах и преимуществах применения лидаров для решения конкретных задач исследования атмосферы.

Авторы признательны рецензентам д. т. н., профессору В. П. Вейко и д. физ.-мат. н., профессору Г. Г. Щукину за внимательное отношение и ценные замечания и предложения.

Авторы искренне благодарны всем коллегам за постоянное интересное творческое сотрудничество, а также внимание, терпение и поддержку во время нашей работы над книгой.

Настоящее учебное пособие адресовано в первую очередь студентам высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки группы специальностей «Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии», и может быть использовано при подготовке бакалавров и магистров по специальностям «Фотоника и оптоинформатика», «Лазерная техника» и других близких специальностей.

Целью издания является рассмотрение основ оптического дистанционного зондирования и проектирования лидарных систем и комплексов в аспекте учебно-образовательного процесса.

Учебное пособие состоит из шести глав, каждая из которых отражает следующую логическую ступень в разработке лидарных комплексов, начиная с физических свойств атмосферы и основ дистанционного зондирования до конкретных технических реализаций и методов сертификации готовых изделий. Учебное пособие носит преимущественно прикладной характер и будет полезно в рамках освоения инженерно-технических дисциплин.

1. АТМОСФЕРА ЗЕМЛИ.

СОСТАВ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Атмосфера Земли является основной средой существования человека и его жизнедеятельности, естественно, что она также является основным предметом дистанционных лидарных исследований. Особенности ее состава и динамики определяют специфику применения дистанционных оптических средств зондирования. Математическая модель переноса оптической энергии через аэрозольно-газовую среду, которой является атмосфера, должна учитывать основные эффекты взаимодействия, характерные для каждой части атмосферы.

Все основные эффекты, влияющие на прохождение лазерного излучения через атмосферу, могут быть условно разделены на две группы. В первую группу входят те явления, которые вызывают изменение интенсивности, поляризации или длины волны направляющегося к объекту и от объекта светового потока. Во вторую – те, которые вызывают изменения пространственной и временной когерентности зондирующего излучения, приводящие к изменению «геометрических» параметров зондирующего пучка (расширение и отклонение) и перераспределению энергии в пучке (искажение волнового фронта зондирующего пучка).

К первой группе относятся явления рассеяния и поглощения. Эти явления обуславливаются как молекулами воздуха (молекулярное рассеяние и поглощение), так и отдельными материальными частицами, взвешенными в воздухе, – аэрозолями (аэрозольное рассеяние и поглощение).

Ко второй группе – явления, связанные с турбулентностью атмосферы. Турбулентные потоки воздуха обуславливают возникновение местной флуктуации плотности атмосферы и, следовательно, изменение ее коэффициента преломления. Изменения коэффициента преломления вызывают изменение оптической длины пути луча, в результате чего в лазерном пучке может нарушиться фазовый фронт.

Вторая группа явлений вносит вклад в сигнал только при гетеродинном приеме излучения, в то время как первая группа оказывает влияние на все типы лидарных систем.

1.1. Структура атмосферы и ее состав

Строение земной атмосферы можно представить в виде деления на условные слои, которые характеризуются увеличением или уменьшением температуры с ростом высоты. Таким образом, определяют следующие основные слои: тропосферу, стратосферу, мезосферу и термосферу. Слои, где происходит смена динамики температуры, называют, соответственно, тропопаузой, стратопазой и мезопаузой. Структура атмосферы с разделением на слои и соответствующие им граничные высоты показана на рисунке 1.1.

Дистанционные исследования атмосферы с помощью лидаров проводят в основном в нижней части тропосферы, на высотах до 10–15 км. Поэтому в дальнейшем под термином «атмосфера» в лидарных исследованиях мы будем определять нижнюю часть тропосферы. Однако существуют специальные лидарные системы, позволяющие анализировать свойства атмосферы до высоты 90–100 км.

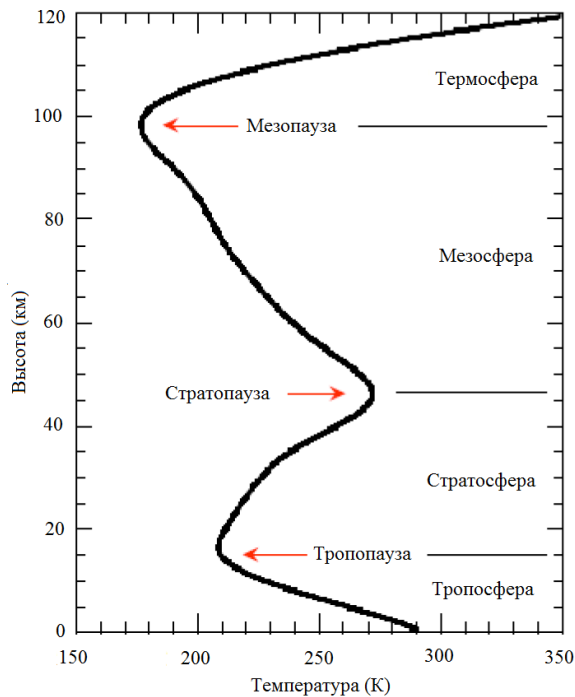


Рис. 1.1. Структура земной атмосферы

Стоит отметить, что высота тропосферы не является постоянной по широте и долготе. На полюсах высота тропосферы порядка 8–10 километров, а на экваторе – 15–20 километров.

В тропосфере также можно выделить условные слои – это приземный атмосферный слой и верхнюю тропосферу. Приземный атмосферный слой представляет собой слой воздуха, непосредственно взаимодействующий с поверхностью земли, причем как с водной, так и с поверхностью суши. Высота приземного слоя составляет порядка 1–2 км и сильно зависит от типа поверхности, времени года, суток, силы ветра и т. д. Верхняя тропосфера простирается от верхней границы приземного слоя до тропопаузы.

Химический состав атмосферы, в отличие от температуры и давления, относительно неизменен в зависимости от высоты. Основные компоненты атмосферы – азот ($\approx 78\%$) и кислород ($\approx 20\%$), остальные газы (аргон, углекислый газ и т. д.) составляют менее 2%. Кроме основных газовых составляющих, в атмосфере также присутствуют малые газовые составляющие, такие как аммиак ($\text{CH}_4 \approx 0.00017\%$), молекулярный водород ($\text{H}_2 \approx 0.00005\%$), оксид азота ($\text{N}_2\text{O} \approx 0.00003\%$) и другие (см. табл. 1.1).

Таблица 1.1. Средний химический состав сухого воздуха в атмосфере

Газ	Химическая формула	Процентное объемное содержание, %
Азот	N_2	78,08
Кислород	O_2	20,95
Аргон	Ar	0,93
Диоксид углерода	CO_2	0,037
Неон	Ne	0,0018
Гелий	He	0,00052
Метан	CH_4	0,00017
Криптон	Kr	0,00011
Ксенон	Xe	0,00009
Водород	H_2	0,00005
Оксид азота	N_2O	0,00003

Кроме основных и малых газовых составляющих, в атмосфере присутствуют твердые частицы различного размера и природы и вода как в жидкой, так и в твердой фазах. Эти составляющие атмосферы называются аэрозолями.

Время нахождения в атмосфере крупных аэрозольных частиц определяется скоростью их оседания. Скорость осаждения изменяется пропорционально квадрату радиуса частицы, и, следовательно, максимальный размер частиц аэрозоля является относительно размытым. Однако принято считать, что частицы с размером более 10 микрон из-за высокой скорости оседания (порядка 2–3 см/с) относятся к крупной пыли, и соответственно, этот размер можно считать верхним порогом определения аэрозоля.

Атмосферный аэрозоль образуется в результате сложной совокупности химических и физических процессов. Вследствие относительно короткого времени жизни аэрозоля его химический состав и физические характеристики очень изменчивы. Концентрация аэрозоля сильно колеблется и зависит от метеоусловий и наличия источников выбросов. В основном аэрозоль находится в нижней тропосфере, в пограничном приземном слое, высота которого сильно варьируется и лежит в пределах от нескольких сотен метров до 2–3 км.

Присутствующий в стратосфере аэрозоль в среднем состоит из 75%-ного водного раствора серной кислоты и находится в виде капель или замерзших кристаллов. Максимум концентрации аэрозольных частиц в стратосфере расположен на высотах порядка 20 км и его часто называют аэрозольным слоем Юнга.

Естественный атмосферный аэрозоль образуется в результате сложной совокупности природных процессов. В зависимости от состава или источников генерации можно выделить следующие типы природного аэрозоля:

- продукты испарения морской воды;
- поднятая ветром в атмосферу минеральная пыль;
- вулканический аэрозоль (как непосредственно выброшенный в атмосферу, так и образовавшийся за счет газофазных реакций);
- частицы биогенного происхождения (непосредственно выброшенные в атмосферу) и образовавшиеся в результате конденсации летучих органических соединений, а также химических реакций между этими соединениями;
- сажа от сжигания на суше и другие.

В настоящее время общепринятой градацией типов аэрозоля является разделение их на сельский, городской и морской, которые реализуются при метеорологической дальности видимости от 1,5 до 35 км. При дальности видимости большей 0,2 км используют модель радиационного тумана, а при дальности видимости менее 0,2 км принимают модель адвективного тумана.

Пространственная неоднородность распределения аэрозоля как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях обусловлена естественными процессами переноса и перемешивания воздушных масс в разное время суток, типом подстилающей поверхности, сменой времен года, радиационным обменом и т. д.

В качестве примера на рисунке 1.2 показана пространственная динамика распределения частиц по размерам в приземном слое атмосферы, восстановленная по результатам лазерного зондирования [1].

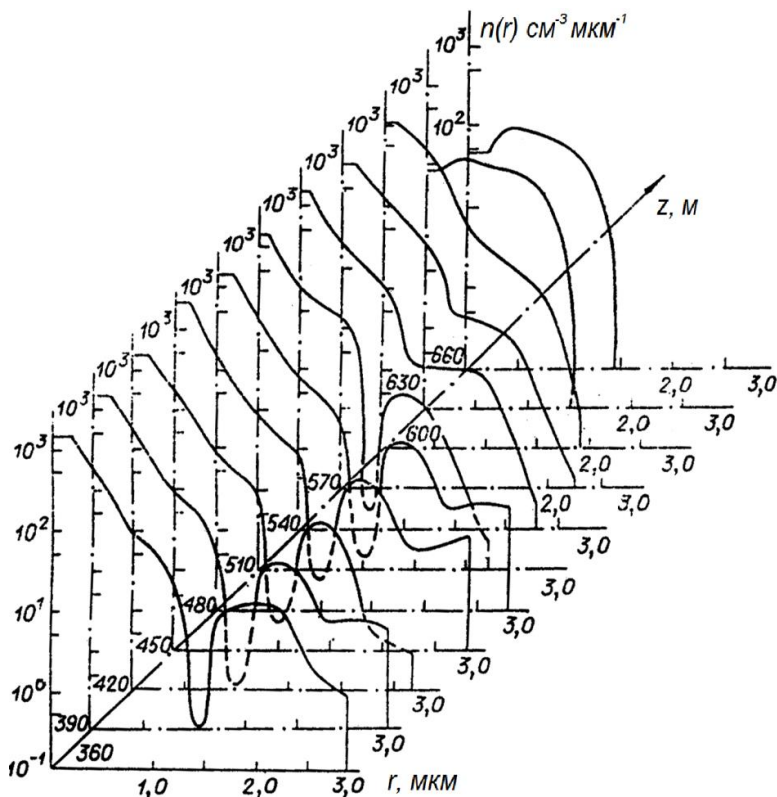


Рис. 1.2. Пространственная неоднородность распределения частиц по размерам в приземном слое атмосферы

Помимо неоднородности распределения в атмосфере, неоднородность аэрозольных частиц заключается в их несферичности и различной пространственной ориентации, что приводит к выраженной анизотропии рассеяния света.

Молекулярный и аэрозольный составы атмосферы подвержены пространственно-временным изменениям различного масштаба, связанным с высотой, течением метеорологических процессов и особенностями рельефа. Особенно динамичным слоем атмосферы является приземный слой.

1.2. Приземный слой атмосферы

Приземный слой атмосферы – это нижняя часть тропосферы, находящаяся в непосредственном контакте с земной поверхностью, в которой происходят процессы теплопереноса между земной поверхностью и воздухом и механическое взаимодействие воздушных масс с рельефом поверхности. Это приводит к перемешиванию слоев воздуха, и как следствие изменению оптических и метеорологических характеристик атмосферы.

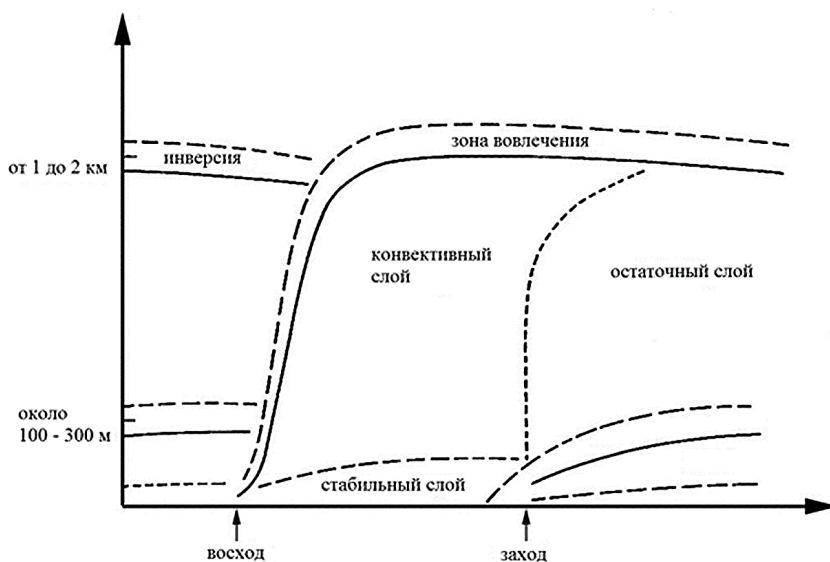


Рис. 1.3. Структура приземного слоя атмосферы

Приземный слой атмосферы быстро реагирует на изменения подстилающей поверхности и времени суток [2]. Его упрощенно можно разделить на три основных подтипа (см. рис. 1.3):

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru