

УДК 551.50-551.58

P88

Автор:

Русин Игорь Николаевич — доктор географических наук, профессор кафедры климатологии и мониторинга окружающей среды Санкт-Петербургского государственного университета (СПбГУ)

Рецензенты:

Угрюмов Александр Иванович — доктор географических наук, профессор, заслуженный метеоролог РФ;

Головина Елена Георгиевна — доцент кафедры метеорологии, климатологии и охраны атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ)

Русин И. Н.

P88 Основы учения об атмосфере : учебное пособие. — Санкт-Петербург : СпецЛит, 2018. — 271 с. — ISBN 978-5-299-00877-7.

Учебное пособие предназначено для ознакомления студентов с основными положениями метеорологии и климатологии. В нем при минимальном объеме содержится тот материал, который в соответствии с программой и духом времени должен знать каждый студент, получающий образование по направлениям: гидрометеорология, география, экология и природопользование. Представлены важнейшие карты, вертикальные распределения, графики и схемы, интерпретация которых должна быть известна студентам. В конце пособия приведены алфавитный указатель терминов, список формул, назначение и смысл которых необходимо уметь объяснять. Для контроля знаний в конце каждой главы помещены вопросы, задачи, материал для тестов.

Пособие предназначено в первую очередь для студентов младших курсов бакалавриата по естественно-научным направлениям, а также может быть полезно широкому кругу читателей для ознакомления с основами науки об атмосфере.

The aim of this edition is to introduce students to the essentials of meteorology and climatology. The material given in the textdook had been written according to the course of study in hydrometeorology, geography, ecology and the exploitation of the natural resources. The charts, maps, figures vertical distributions of the various meteorological values are presented. At the end of the book the glossary, term index. Questions and tests are available. The textbook should be used by the first and second year students in enviromental study and earth sciences.

The book may also be used by any researchers who are intererested in the scientific fields mentioned above.

УДК 551.50-551.58

*Одобрено учебно-методической комиссией Института наук
о Земле Санкт-Петербургского государственного университета*

ISBN 978-5-299-00877-7

© ООО «Издательство „СпецЛит“», 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Введение	7
Глава 1. Метеорологические характеристики и наблюдения . . .	11
Глава 2. Состав атмосферы. Характеристики влажности воздуха . .	22
Глава 3. Атмосферное давление	34
Глава 4. Основы термодинамики атмосферы	45
Глава 5. Водяной пар в атмосфере	57
Глава 6. Облака, дождь, снег	67
Глава 7. Солнечная радиация	80
Глава 8. Солнечная радиация и атмосфера.	91
Глава 9. Излучение Земли и атмосферы	104
Глава 10. Тепловой режим подстилающей поверхности	116
Глава 11. Турбулентный теплообмен и температура воздуха . . .	129
Глава 12. Причины движения воздуха	140
Глава 13. Местные ветры	150
Глава 14. Основы анализа погоды	162
Глава 15. Сведения об общей циркуляции атмосферы	178
Глава 16. Понятие о климате. Типы климатов Земли	191
Глава 17. Микроклимат, местный и региональный климат.	201
Глава 18. Изменения климата	215
Заключение	233
<i>Приложение 1.</i> Важнейшие уравнения и формулы	237
<i>Приложение 2.</i> Значения основных постоянных величин	238
<i>Приложение 3.</i> Примерные вопросы для аттестации	239
<i>Приложение 4.</i> Задачи для контроля знаний	243
<i>Приложение 5.</i> Ответы к контрольным заданиям по главам	246
<i>Приложение 6.</i> Вопросы для создания тестов по дисциплине «Основы учения об атмосфере»	247
Обозначения важнейших переменных	263
Алфавитный указатель терминов	264
Литература	270

THE CONTENTS

The foreword	5
Introduction	7
Chapter 1. Meteorological characteristics and observations	11
Chapter 2. The composition of the atmosphere. The characteristics of humidity	22
Chapter 3. Atmospheric pressure	34
Chapter 4. Fundamentals of thermodynamics of the atmosphere	45
Chapter 5. Water vapor in the atmosphere	57
Chapter 6. Clouds, rains, snows	67
Chapter 7. Solar radiation	80
Chapter 8. Solar radiation and the atmosphere	91
Chapter 9. Radiation from the Earth and atmosphere	104
Chapter 10. The thermal regime of the earth surface	116
Chapter 11. Turbulent heat transfer and air temperature	129
Chapter 12. Causes of air movement	140
Chapter 13. Local winds	150
Chapter 14. Framework for the analysis of weather	162
Chapter 15. Information about the general circulation of the atmo- sphere	178
Chapter 16. Concept about a climate. Types of climates of the Earth	191
Chapter 17. Microclimate, climate of a locality and climate of a region	201
Chapter 18. Climate changes	215
The conclusion	233
<i>Appendix 1.</i> The Major equations and formulas	237
<i>Appendix 2.</i> Values of the basic constants	238
<i>Appendix 3.</i> Sample questions for certification	239
<i>Appendix 4.</i> Tasks for control of knowledge.	243
<i>Appendix 5.</i> Answers to tasks by chapters	246
<i>Appendix 6.</i> Questions to develop tests for this course with answers	247
Designation of most important variables	263
Index	264
Bibliography	270

ПРЕДИСЛОВИЕ

Достижения метеорологии сегодня доступны каждому. Достоверный прогноз погоды на неделю стал реальностью, а ведь выдающиеся ученые еще в середине XX в. относили проблему предсказания погоды к числу труднейших. Сейчас для ее повседневного решения создана высокотехнологичная отрасль хозяйственной деятельности человека — служба погоды. Запускаются искусственные спутники, создаются специальные радиолокационные системы, постоянно проводятся различные метеорологические наблюдения, которые обрабатывают самые мощные из существующих компьютеров, — все это элементы уникальной системы непрерывного сбора, обработки и использования данных о состоянии одной из географических оболочек — атмосферы. По мнению автора, эта система является прототипом будущей единой службы географического мониторинга.

На пороге XXI в. человечество осознало, что изменения климата могут быть фактором, угрожающим населению Земли. Решение задач контроля, прогноза и управления геосферой и, в первую очередь, климатом — вот что будет основной заботой будущих геофизиков, гидрометеорологов, географов, экологов и специалистов по природопользованию.

Лекции, положенные в основу этой книги, автор читал в течение многих лет во втором семестре всем студентам первого курса географического факультета Санкт-Петербургского государственного университета независимо от направления их обучения и будущей специальности. Широкий состав слушателей и сжатые сроки жестко ограничивали объем излагаемого материала и уровень использования физико-математического аппарата, который студенты еще только начинали изучать. Это позволяет надеяться, что сведения об атмосфере, изложенные в данной книге, доступны для всех интересующихся лиц, имеющих среднее образование.

Для того чтобы облегчить усвоение студентами всех направлений необходимого минимума знаний из метеорологии и климатологии, автор счел необходимым составить текст так, чтобы в нем был отражен именно этот необходимый минимум. Для того чтобы улучшить условия подготовки к экзамену, в конце книги приведен ряд приложений. Во-первых, это вопросы типа «что такое?», касающиеся основных терминов, применявшихся при изучении дисциплины. Перечень таких терминов приведен в виде алфавитного указателя. Во-вторых, это список важнейших формул,

применяемых в метеорологии и климатологии. По мнению автора, не следует требовать, чтобы эти формулы студент воспроизводил по памяти. Гораздо полезнее, чтобы он правильно выбрал нужную формулу из списка, объяснил ее назначение и смысл, раскрыл принятые обозначения. В-третьих, чтобы воспитать умение применять полученные знания для объяснения окружающих природных явлений, отобраны контрольные вопросы, задачи и задания для тестирования. Графические материалы, приведенные в тексте, рекомендуется внимательно рассматривать, чтобы запомнить важнейшие карты, вертикальные распределения, графики и схемы и уметь указать на их особенности.

Автор надеется, что выполненная работа поможет будущим специалистам успешно освоить основы нашей важной и интересной науки. Возможно, что принятый методический подход и приведенные в приложениях дополнительные материалы окажутся полезными и для преподавателей.

ВВЕДЕНИЕ

Современный воздух образовался в ходе эволюции нашей планеты. Как сформировался его современный состав? Какие величины описывают его физические свойства? Как изменяются значения этих величин по вертикали, горизонтали и во времени? Ответы на эти вопросы должны быть известны каждому, кто хочет посвятить себя изучению Земли. Они были получены ценой самоотверженного труда выдающихся ученых разных стран.

XVI в. Г. Галилей впервые заявил, что воздух имеет вес. Он же сконструировал первый термометр. Э. Торричелли изобрел барометр, взвесил атмосферу и инициировал систематическую регистрацию атмосферного давления.

XVII в. Б. Кастелли в Италии и Р. Гук в Англии сконструировали дождемеры. Р. Декарт придумал барометру бумажную шкалу, разделенную линиями. Б. Паскаль показал, что давление различно в разных местах и на разных высотах, указал на связь давления с погодой и на необходимость регистрации всех метеорологических характеристик одновременно и в одном месте. О. Герике впервые предсказал выпадение сильного дождя по наблюдениям за давлением воздуха по барометру. Возникла идея полезности создания метеорологических станций. В Лондонском королевском обществе Э. Галлей обнаружил влияние температуры на показания барометра, а Р. Гук и Р. Бойль предприняли попытку создать единую систему регистрации метеорологических наблюдений в разных местах страны. Одним из первых систематически стал записывать наблюдения за погодой в Оксфорде, а затем в Лондоне философ и естествоиспытатель Дж. Локк.

XVIII в. Во Франции А. Лавуазье доказал, что воздух — это смесь двух газов, один из которых, необходимый для дыхания, он назвал кислородом. В Швейцарии О. Соссюр сконструировал волосяной гигрометр, начал изучение зависимости метеорологических характеристик от высоты и указал, что температура воздуха убывает с высотой на $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Курфюрст пфальцский Карл Теодор, меценат и ценитель науки и искусства, учредил в Мангейме Метеорологическое общество и финансировал его деятельность по созданию первой сети метеорологических наблюдений, работавшей по единой инструкции, выдававшей наблюдателям одинаковые комплекты приборов и публиковавшей результаты метеорологических на-

блюдений. Впервые на воздушном шаре, взяв с собой метеорологические приборы, Ж. Шарль провел исследование атмосферы до высоты 3500 м.

XIX в. Дж. Лесли в 1831 г. предложил психрометрический метод измерения влажности. Но только в 1880 г. Р. Ассман создал аспирационный психрометр с постоянной вентиляцией. Р. Робинсон разработал чашечный анемометр, до настоящего времени являющийся лучшим датчиком скорости ветра для массовых наблюдений. Английский метеоролог-любитель Л. Говард разработал первую классификацию облаков. Созданы службы погоды различных государств (Англия — 1840 г., США — 1842 г., Испания — 1847 г., Пруссия — 1847 г., Россия — 1849 г., Голландия — 1854 г., Франция — 1856 г., Италия — 1860 г.). В 1873 г. состоялся первый Международный метеорологический конгресс в Вене, на котором была сделана попытка унификации системы метеорологических наблюдений. В 1882—1883 гг. был проведен первый межгосударственный метеорологический эксперимент — Международный полярный год. В 1846 г. Л. Лумис в США опубликовал первые карты погоды за несколько дней февраля 1842 г., на которые были нанесены линии равных значений (изолинии) — отклонения давления и температуры от нормы, направление ветра и области ясной и пасмурной погоды, а также дождя. В 1849 г. Дж. Генри в США организовал сбор в Вашингтоне по телеграфу упрощенных сведений о состоянии погоды (ясно/пасмурно). По этим данным составлялась карта, которая ежедневно выставлялась для всеобщего обозрения.

В 1821 г. У. Редфилд в США во время поездки заметил, что шторм, прошедший накануне, повалил деревья в противоположных направлениях у его дома и на значительном расстоянии к западу. Он собирал данные об этом шторме в течение 10 лет, потом нанес их на прозрачную бумагу и убедился, что направление ветра в разных пунктах при шторме достаточно близко совпадает с окружностями. Так был доказан вихревой характер движения воздуха при шторме и возникло понятие «циклон». Позже Редфилд на примере другого урагана убедился, что ветер направлен внутрь шторма под углом до 30—35°. Объект и термин «антициклон» ввел Ф. Гальтон, который отметил, что движение воздуха в нем противоположно циклоническому, ветер слаб и направлен от центральной области. В конце XIX в. Л. Тейсеран де Бор, знаменитый французский воздухоплаватель, открывший существование стратосферы, исследуя причины аномально холодной зимы во Франции 1879 г., пришел к выводу об определяющей роли положения Азорского и Сибирского антициклонов и ввел понятие «центры действия атмосферы». Это был первый шаг к развитию долгосрочного прогноза.

Первые регулярные штормовые оповещения стал с 1860 г. издавать Голландский метеорологический институт под руководством Х. Бейс-Балло. Первые регулярные прогнозы бурь у побережья Англии стал в 1861 г. выпускать вице-адмирал Р. Фицрой. Он заставил ученых и общество обратить внимание на метеорологические прогнозы и пожертвовал для этого своей жизнью. (После пяти лет прогностической деятельности, вызывавшей непрерывные насмешки прессы, находясь в депрессии после неудачного прогноза, он покончил жизнь самоубийством.)

В XIX в. стали появляться и первые обобщения метеорологических наблюдений, которые положили начало изучению климата. В 1817 г. А. Гумбольдт составил первую карту распределения годовых изотерм для Северного полушария Земли. За этим последовало много работ с описанием температурного режима стран и регионов. В результате ученые серьезно задумались над проблемой качества метеорологических данных. Климатология ввела в науку и наблюдения железную дисциплину, без которой работа не всегда грамотных наблюдателей в условиях плохой связи не дала бы полезных результатов. Для интерпретации полученных данных А. И. Воейков впервые применил идею расчета теплового баланса территорий.

Установленные законы связи биологических и геологических факторов с климатом позволили Ч. Лайелю показать, что климат Земли колебался в геологическом прошлом от потеплений к ледниковым периодам. Были сформулированы почти все известные гипотезы о причинах изменений климата. В частности, гипотеза о роли углекислого газа в регулировке температуры Земли впервые была высказана шведским физиком, химиком и астрономом С. Аррениусом. В 1843 г. С. Швабе открыл 11-летний цикл солнечной активности, связь которого с изменениями характеристик климата известна, но до сих пор остается непонятной. Накопление данных о климате стимулировало развитие работ по систематизации. В 1884 г. появилась классификация климатов земного шара В. Кеппена, над которой он работал всю жизнь и которая в настоящее время является наиболее распространенной.

В XIX в. быстро развивались физика и математика. Были сформулированы математические модели термодинамических процессов, теплопередачи и гидродинамики. На их основе получены описания некоторых метеорологических явлений в простейших случаях, т. е. был намечен путь к описанию эволюции атмосферы. Но принцип, провозглашенный Д. Менделеевым: «Знать — значит предвидеть!», применительно к прогнозу состояния атмосферы был реализован только в последней четверти XX в.

Большая часть материала, изложенного в данном тексте, получена во второй половине XX в. Тогда уже существовала система сбора, обработки и анализа метеорологических наблюдений, близкая к современной. Были сформулированы адекватные физико-математические модели динамики атмосферы, имелись достаточно мощные компьютеры для реализации этих моделей. История метеорологии XX в. слишком богата событиями, чтобы уместиться на нескольких страницах. Можно утверждать, что именно тогда была решена задача краткосрочного прогноза погоды, веками недоступная для человечества. Но в период разработки современной технологии прогноза погоды климатологи обратили внимание общественности на опасные тенденции воздействия индустрии на климат. Так перед нашей наукой встала еще более сложная проблема: понять, как формируется климат Земли и ее отдельных регионов, почему он изменяется и что нужно предпринять, чтобы эти изменения не привели к опасным для людей последствиям. Именно на этом пути ждут метеорологов и климатологов XXI в. новые открытия.

ГЛАВА 1

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И НАБЛЮДЕНИЯ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПОНЯТИЙ

Атмосфера — это газовая оболочка, удерживаемая действием силы притяжения небесного тела, в нашем случае — планеты Земля.

Погода — это состояние атмосферы в данном месте и данный момент времени.

Метеорология — это наука об атмосфере. Она относится к геофизическим наукам, поскольку изучает законы физических процессов, происходящих в воздушной оболочке Земли. Основная задача метеорологии — прогноз погоды. Основным источником данных — наблюдения за погодой на Земле.

Климат в традиционном для метеорологии представлении — это множество статистических оценок состояния атмосферы и его типичных изменений в течение нескольких десятилетий в заданном районе. Введение этого понятия обусловлено потребностью людей знать, в каких пределах может находиться изменчивое состояние атмосферы в районе их проживания в определенный промежуток времени. Марк Твен дал простое и очень точное определение того, чем климат отличается от погоды: «Климат — это то, на что мы надеемся, а погода — это то, что мы получаем». Состояние погоды может быть и близким, и далеким от климата района.

Климатология — это наука о климате, т. е. совокупности атмосферных условий, свойственных различным географическим районам земного шара. Климат является одной из физико-географических характеристик района, а климатология относится к географическим наукам. Основная задача климатологии — контроль за изменениями климата регионов Земли. Основным источником данных — архивы накопленных метеорологических данных.

Однако, накапливая знания об изменениях климата, таких как ледниковые периоды или современное глобальное потепление, ученые пришли к необходимости рассматривать глобальный климат. В этом случае принимают во внимание не только атмосферные процессы, но и циркуляцию океанских вод, состояние ледников, извержения вулканов и многое другое. Глобальный климат учитывает состояние всех геосфер, которые могут повлиять на термический режим и увлажнение.

Благодаря регулярным метеорологическим наблюдениям, получено большое количество ценных сведений об атмосфере. В частности, показано, что вертикальное распределение температуры в атмосфере всегда позволяет разделить ее на устойчиво существующие слои. Названия этих слоев приведены на рис. 1. Их следует запомнить, так как они применяются в различных областях человеческой деятельности.

Нижняя, прилегающая к земной поверхности часть атмосферы называется тропосферой. В ней температура убывает с увеличением высоты, причем уменьшение температуры по вертикали составляет в среднем 6°C на 1 км. Высота тропосферы изменяется от 8—10 км в полярных широтах до 16—18 км у экватора. Плотность воздуха быстро убывает с высотой, поэтому в тропосфере сосредоточено около 80 % всей массы атмосферы.

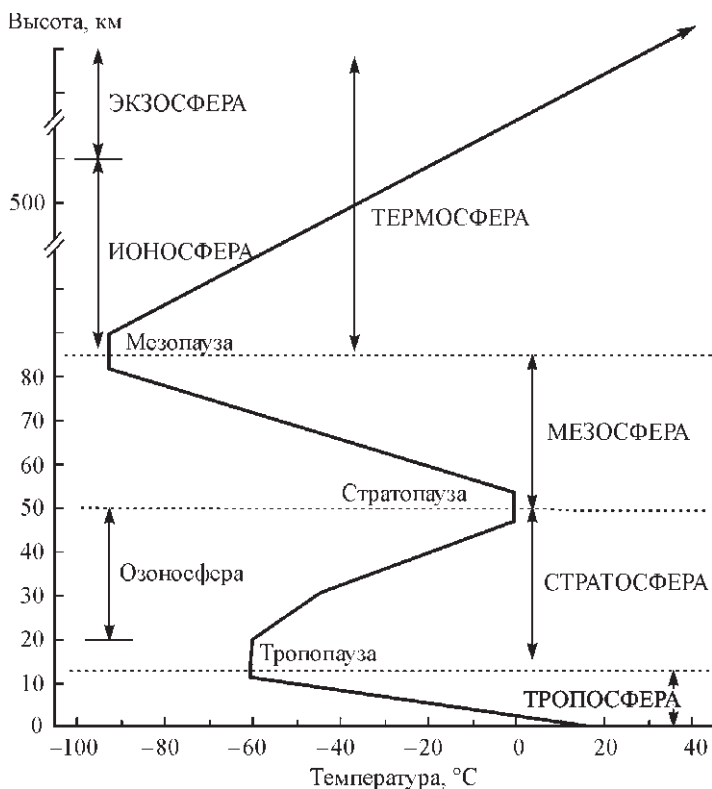


Рис. 1. Важнейшие наименования вертикальных слоев атмосферы и характер изменения температуры с высотой в этих слоях

Игорь Николаевич РУСИН

ОСНОВЫ УЧЕНИЯ ОБ АТМОСФЕРЕ

Учебное пособие

Редактор *Крайнова О. С.*
Корректор *Терентьева А. Н.*
Компьютерная верстка *Тархановой А. П.*

Подписано в печать 15.08.2018. Формат 60 × 88 ¹/₁₆.
Печ. л. 17.0. Тираж 500 экз. Заказ №

ООО «Издательство „СпецЛит“»
190103, Санкт-Петербург, 10-я Красноармейская ул., 15
Тел./факс: (812) 495-36-09, 495-36-12
<http://www.speclit.spb.ru>

Отпечатано в АО «Т 8 Издательские технологии».
109316, Москва, Волгоградский пр., д. 42, корп. 5, к. 6