

ЗАДАЧНИК ПО ОБЩЕЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

Допущено
Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для студентов
гидрометеорологических специальностей вузов

Под редакцией
д-ра физ.-мат. наук,
проф. В. Г. Морачевского



ЛЕНИНГРАД ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1984

УДК 551.5(075)

3-15

А. Г. Бройдо, С. В. Зверева, А. В. Курбатова, Т. В. Ушакова

Рецензенты: доценты Ж. В. Волошина, В. С. Навроцкая, Н. В. Емшанова, И. Д. Лоева, канд. геогр. наук Ф. Я. Ступина (кафедра общей метеорологии Одесского гидрометеорологического института), д-р геогр. наук А. Х. Филиппов, канд. геогр. наук Л. Г. Стрелочных, канд. геогр. наук Г. Н. Григорьев (кафедра метеорологии Иркутского государственного университета)

В задачник включены задачи и упражнения, охватывающие весь курс общей метеорологии. Рассматриваются основы статки, динамики и термодинамики атмосферы, атмосферная турбулентность, лучистая энергия, тепловой режим почвы, водоемов и нижнего слоя атмосферы, круговорот воды в атмосфере, основы атмосферной оптики, электричества и акустики. Во всех главах имеются вводные пояснения и указания к решению задач.

Задачник является учебным пособием по курсу общей метеорологии для гидрометеорологических институтов и университетов; может быть также использован в педагогических, сельскохозяйственных, авиационных, морских и других вузах.

The "Book of Problems in General Meteorology" contains problems and exercises, which covered the whole area of general meteorology. Problems on statics, fundamentals of dynamics and thermodynamics of the atmosphere, atmospheric radiation, turbulency, heat regime of the boundary layer, theory of the phase transition of water, fundamentals of atmospheric optics, electricity and acoustics are included. All chapters include introductory remarks and recommendations for the solution of the problems.

The Book of Problems is the training appliance on the course of general meteorology for hydrometeorological institutes and geographical faculties of the universities and also may be used in other types of High schools (pedagogical, aviation, naval, etc.).

Ленинградский
Гидрометеорологический институт
БИБЛИОТЕКА
Д-д 198304 М.д.

3 1903040000-010 20-84
069(02)-84

© Гидрометеоиздат, 1984 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемый задачник по курсу общей метеорологии составлен в соответствии с программой этого курса в гидрометеорологических институтах, на физических и географических факультетах университетов и в других вузах. Такой задачник, охватывающий все разделы курса метеорологии, издается впервые.

Задачник составлен на основе изданных в разное время задачников тех же авторов, но материал во всех главах подвергнут существенной переработке, которую авторы осуществили с учетом новых достижений в метеорологии, новых Наставлений и ГОСТов, а также в соответствии с изменениями программы курса.

Основной целью предлагаемых задач является разбор и закрепление на конкретных исходных данных основной части материала, сообщаемого студентам в лекциях и учебниках. Большинство задач сформулировано так, чтобы итогом их решения был не только численный ответ, но и разносторонний анализ его физического смысла. Поэтому во многих задачах помимо исходных данных предлагается ряд вопросов для обсуждения полученного ответа. Для этих же целей в задачник помещены не только собственно задачи, но и упражнения на построение и анализ различных графиков, характеризующих пространственное и временное распределение метеорологических величин. В задачник включен ряд задач, имеющих по 30 вариантов исходных данных, что должно способствовать индивидуализации самостоятельной работы студентов. В приложении приводятся вспомогательные таблицы, номограммы и графики, используемые при решении ряда задач.

Ввиду отсутствия в учебнике «Курс общей метеорологии» Л. Т. Матвеева, изданном в 1976 г., разделов, посвященных оптическим, электрическим и звуковым явлениям в атмосфере, вводные тексты в главах 13—21 настоящего задачника написаны несколько подробнее, чем в остальных главах, и содержат значительное количество формул, необходимых при решении предлагаемых задач.

При составлении задачника обобщен многолетний опыт проведения практических занятий, накопленный авторами и их коллегами по кафедре общей метеорологии Ленинградского гидрометеорологического института, а также использован ряд задач, предложенных в разные годы М. С. Аверкиевым, Б. М. Гальперин, Б. В. Кирюхиным, Л. Г. Качуриным, А. И. Неймарком, Н. П. Тверской, Л. П. Серяковой и др. Частично привлечен в переработанном виде также и материал из ряда других задачников.

Главы 1—7 и 12 настоящего задачника написаны А. Г. Бройдо, главы 8—11 — А. В. Курбатовой и Т. В. Ушаковой, главы 13—21 — С. В. Зверевой. В написании глав по атмосферному электричеству принял участие зав. кафедрой метеорологии Иркутского государственного университета д-р геогр. наук А. Х. Филиппов.

Задачник является учебным пособием по общей метеорологии в основном для метеорологических факультетов гидрометеорологических вузов, для физических и географических факультетов университетов. Он может также использоваться на гидрологических и океанологических факультетах, в педагогических, сельскохозяйственных, авиационных, морских и других вузах.

Авторы выражают глубокую признательность рецензентам, преподавателям Одесского гидрометеорологического института и Иркутского государственного университета: д-ру геогр. наук А. Х. Филиппову, доцентам В. С. Навроцкой, Ж. В. Волошиной, Н. В. Емшановой, И. Д. Лоевой, Л. Г. Стрелочных, Г. Н. Григорьеву, канд. геогр. наук Ф. Я. Ступиной, внимательно прочитавшим рукопись задачника и сделавшим большое число весьма полезных замечаний, которые были учтены при доработке рукописи. За большое число исключительно ценных советов авторы глубоко благодарны также проф. Л. Г. Качурину, проф. К. С. Шифрину и доценту В. И. Бекряеву.

С особой теплотой авторы благодарят проф. В. Г. Морачевского, являющегося инициатором создания как трех ранее изданных, так и настоящего объединенного задачника, давшего целый ряд установочных указаний еще в процессе подготовки последнего и вложившего большой труд в редактирование всего текста задачника. Авторы благодарят также Г. Н. Солдатенкову и Л. А. Соколову, помогавших в оформлении рукописи задачника.

Авторы с благодарностью примут любые замечания и конструктивные предложения, которые будут учтены как при работе с задачником, так и при подготовке последующих изданий.

Глава 1

НАЧАЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОСНОВНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИНАХ

1.1. Температура воздуха

Температура воздуха выражается в градусах термодинамической температурной шкалы, называемых кельвинами (К), или в градусах Международной практической температурной шкалы 1968 г., называемых градусами Цельсия ($^{\circ}\text{C}$). В прошлом, а в ряде стран и ныне используются также температурные шкалы Реомюра ($^{\circ}\text{R}$), Фаренгейта ($^{\circ}\text{F}$), Ренкина ($^{\circ}\text{Re}$) и др. Некоторые из них до сих пор встречаются в старинных приборах или упоминаются в научно-технической и художественной литературе. В СССР температуру воздуха обычно измеряют с точностью до десятых долей градуса Цельсия. При теоретических расчетах ее чаще выражают в кельвинах с той же точностью.

Задачи

1.1. Пользуясь приведенными ниже характеристиками температурных шкал, вывести формулы для перевода температуры из $^{\circ}\text{C}$ в К, а также для перевода $t^{\circ}\text{R}$, $n^{\circ}\text{F}$ и $p^{\circ}\text{Re}$ в $^{\circ}\text{C}$ и в К. Какая шкала имеет наиболее «крупные» градусы, а какие шкалы — самые «мелкие»? Может ли одна и та же температура в одной шкале выражаться положительным числом, а в другой — отрицательным?

	К	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{R}$	$^{\circ}\text{F}$	$^{\circ}\text{Re}$
Температура плавления чистого льда при нормальном давлении	273,15	0,0	0,0	32,0	491,67
Температура кипения воды при нормальном давлении	373,15	100,0	80,0	212,0	671,67

1.2. Найти температуру воздуха в К и в $^{\circ}\text{C}$, если старинный уличный термометр показывает $-32,0^{\circ}\text{R}$.

1.3. Выразить в К и в $^{\circ}\text{C}$ температуру 0,0; 14,0; 77,0 и 122,0 $^{\circ}\text{F}$.

1.4. В рассказе Дж. Лондона «За тех, кто в пути» действие происходит на Аляске при температуре воздуха $-74,0^{\circ}\text{F}$. Выразить эту температуру в К и в $^{\circ}\text{C}$.

1.5. Максимальная температура воздуха на стандартной высоте метеорологических наблюдений (2 м) составила 57,8 $^{\circ}\text{C}$. Она наблюдалась 11 августа 1933 г. в Сан-Луисе (Мексика) и 13 сентября

1922 г. в Эль-Азизии (Ливия). По не вполне достоверным данным, в Вади-Хальфа (Судан) она достигала даже $61,0^{\circ}\text{C}$. Минимальная температура воздуха ($-88,3^{\circ}\text{C}$) зафиксирована 24 августа 1960 г. на советской антарктической станции «Восток-1». Выразить эти температуры в К.

1.2. Атмосферное давление

Атмосферное давление выражается в гектопаскалях ($1 \text{ гПа} = 10^2 \text{ Па} = 10^2 \text{ Н/м}^2$). Для измерения давления нередко используются барометры со шкалами, градуированными в ранее применявшихся единицах — миллибарах (мбар) или миллиметрах ртутного столба (мм рт. ст.). Соотношения между этими единицами следующие:

$$1 \text{ мбар} = 1 \text{ гПа} = 0,750 062 \text{ мм рт. ст.},$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 1,333 224 \text{ мбар} = 1,333 224 \text{ гПа}.$$

Измерения и расчеты атмосферного давления производятся с точностью до десятых долей принятых единиц. За нормальное принимается давление 760,0 мм рт. ст.

В СССР для измерения атмосферного давления в стационарных условиях применяется стационарный чашечный барометр. В его показание (h) вводятся постоянная (Δh_n) и температурная (Δh_t) поправки. Первая является алгебраической суммой инструментальной (Δh_n) поправки, указываемой в паспорте прибора, и поправок на приведение к ускорению свободного падения на широте 45° ($\Delta h_{g(\varphi)}$) и на уровне моря ($\Delta h_{g(z)}$):

$$\Delta h_{g(\varphi)} = -2,64 \cdot 10^{-3} h \cos 2\varphi, \quad (1.1)$$

$$\Delta h_{g(z)} = -3,14 \cdot 10^{-7} h z, \quad (1.2)$$

где φ — широта места измерения давления, z — высота (м) чашки барометра над уровнем моря.

Температурная поправка приводит показание барометра к температуре $0,0^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta h_t = -1,63 \cdot 10^{-4} h t, \quad (1.3)$$

где t — температура ($^{\circ}\text{C}$) барометра. Тогда истинное давление на станции можно получить по формуле

$$h_c = h + \Delta h_n + \Delta h_t.$$

При измерении атмосферного давления в полевых условиях используется барометр-анероид. В его показания вносятся три поправки — шкаловая, температурная и добавочная. Они приводятся в паспорте прибора, причем температурная поправка обычно соответствует изменению температуры прибора на 1°C .

Задачи

1.6. Вывести соотношение между мм рт. ст. и гПа.

Указание. Определить давление, производимое ртутным столбом высотой 1 мм и с сечением 1 м², находящимся при нормальных условиях, при которых плотность ртути составляет 13 595,1 кг/м³. Ускорение свободного падения вблизи земной поверхности принять равным 9,806 65 м/с².

1.7. Выразить нормальное давление в гПа. Вычислить при этом давлении вес и массу столба воздуха с поперечным сечением 1 м², простирающегося от уровня моря до верхней границы атмосферы.

1.8. Выразить в мм рт. ст. давление, равное 1000,0 гПа. Найти при этом давлении вес и массу столба воздуха с сечением 1 м², простирающегося от уровня измерения давления до верхней границы атмосферы.

1.9. Максимальное давление на уровне моря (812,9 мм рт. ст.) наблюдалось 31 декабря 1968 г. на ст. Агата (Красноярский край), а минимальное (641,1 мм рт. ст.) в сентябре 1961 г. в тайфуне Нэнси над Тихим океаном. Выразить эти значения в гПа и найти их относительные отклонения от нормального давления.

1.10. Показание стационарного чашечного барометра 967,6 мбар, инструментальная поправка данного барометра 0,2 мбар, широта места 55°, высота чашки барометра над уровнем моря 300 м, показание термометра при барометре 14,8 °С, его поправка — 0,1 °С. Вычислить поправки, ввести их в показание барометра и найти давление на станции.

1.11. Показание стационарного чашечного барометра 975,4 мбар, постоянная поправка 1,5 мбар, показание термометра при барометре 9,8 °С, его поправка 0,1 °С. Найти давление на станции в гПа и в мм рт. ст.

1.12.* Показание стационарного чашечного барометра 729,8 мм рт. ст., постоянная поправка 1,7 мм рт. ст., показание термометра при барометре 9,9 °С, его поправка 0,3 °С. Найти давление на станции в мм рт. ст. и в гПа. Варианты исходных данных см. табл. 1 (приложение 41).

1.13. Показание барометра-анероида 745,4 мм рт. ст., шкаловая поправка при 740,0 мм равна — 0,1 мм, при 750 мм — 0,3 мм, показание термометра при барометре 11,5 °С, температурная поправка на 1 °С составляет — 0,04 мм, добавочная поправка 2,7 мм. Найти давление в мм рт. ст. и в гПа.

1.3. Влажность воздуха

1.3.1. Гигрометрические характеристики

Парциальное давление водяного пара и давление насыщенного водяного пара

Парциальное давление водяного пара (e) и давление насыщенного водяного пара (E) выражаются в гектопаскалях с точностью до десятых, а при температуре ниже 7,0 °С — с точностью до сотых.

Значения обеих величин определяются по Психрометрическим таблицам (Л.: Гидрометеиздат, 1981). Некоторые значения E приведены также в приложении 2. Для вычисления гигрометрических характеристик при отрицательных температурах принято использовать значения E над водой.

Задачи

1.14. Найти предельные значения парциального давления водяного пара при температурах $-10,0$; $0,0$ и $10,0$ °С. Может ли данная величина быть отрицательной? Часто ли встречается в природе нижний из найденных пределов? Возможность пересыщения пара в данной задаче не учитывать.

1.15. Найти изменение давления насыщенного водяного пара при изменении температуры воздуха от $-30,0$ до $-31,0$, от $1,0$ до $0,0$ и от $31,0$ до $30,0$ °С. Представить схематически график функции $E(t)$. При высокой или низкой температуре воздуха одинаковое ее понижение приводит к более значительному уменьшению давления насыщенного водяного пара? Какие следствия этого факта наблюдаются в природе?

Дефицит насыщения

Дефицит насыщения (d) определяется по формуле

$$d = E - e \quad (1.4)$$

и выражается в тех же единицах и с той же точностью, что e и E .

Задачи

1.16. Температура воздуха $16,7$ °С, парциальное давление водяного пара $12,1$ гПа. Найти дефицит насыщения. Как и почему он изменится, если при данной температуре увеличится (уменьшится) парциальное давление водяного пара? Если при данном парциальном давлении пара повысится (понижится) температура воздуха? В каких пределах может изменяться дефицит насыщения? Может ли он быть отрицательным? Как различается дефицит насыщения над льдом и над водой при одной и той же отрицательной температуре?

1.17. Температура воздуха $-4,2$ °С, парциальное давление водяного пара $1,54$ гПа. Найти дефицит насыщения.

1.18. Температура воздуха $12,4$ °С, дефицит насыщения $4,7$ гПа. Найти парциальное давление водяного пара и давление насыщенного водяного пара.

Относительная влажность

Относительная влажность (f) определяется по формуле

$$f = e/E \quad (1.5)$$

и обычно выражается в процентах с точностью до целых.

Задачи

1.19. Вычислить относительную влажность, если при температуре $14,4^\circ\text{C}$ парциальное давление водяного пара равно 0,0; 4,1; 8,2; 12,3; 16,4 гПа. Первое или последнее из найденных значений чаще встречается в природе?

1.20. Найти относительную влажность, если дефицит насыщения равен: а) давлению насыщенного водяного пара; б) 0,0 гПа. Указать предельные значения относительной влажности, если не учитывать возможность пересыщения пара. Какое из найденных предельных значений чаще встречается в природе?

1.21. Температура воздуха $-3,1^\circ\text{C}$, парциальное давление водяного пара 1,70 гПа. Вычислить относительную влажность. Как и почему она изменится, если при той же температуре парциальное давление водяного пара увеличится (уменьшится)? Если при том же его парциальном давлении температура повысится (понижится)? При повышении или при понижении температуры воздуха содержащийся в нем водяной пар с заданным парциальным давлением приближается к состоянию насыщения?

1.22. Температура воздуха $-8,6^\circ\text{C}$, относительная влажность 74 %. Найти давление насыщенного водяного пара, парциальное давление водяного пара, находящегося в воздухе, и дефицит насыщения.

Точка росы

Значения точки росы (t_d в $^\circ\text{C}$) при заданном парциальном давлении водяного пара приведены в Психрометрических таблицах с точностью до десятых. При стационарных метеорологических наблюдениях эти значения округляют до 1°C . Значения t_d можно также найти с помощью приложения 2.

Задачи

1.23. До какой температуры должен изобарически охладиться воздух, чтобы содержащийся в нем пар стал насыщенным, если начальная температура воздуха $13,4^\circ\text{C}$ и дефицит насыщения 4,2 гПа? Как и почему изменится ответ, если при той же начальной температуре дефицит насыщения будет больше (меньше) заданного? Если при данном дефиците насыщения повысится (понижится) начальная температура воздуха?

1.24. Станет ли насыщенным водяной пар, содержащийся в воздухе, если вечером температура и относительная влажность составляли $14,9^{\circ}\text{C}$ и 63% соответственно, а к утру температура понизилась до $6,7^{\circ}\text{C}$, причем атмосферное давление осталось неизменным? Какой процесс может начаться при таких условиях? Что появится в воздухе? Какое практическое значение может иметь решение подобных задач? Какими двумя способами можно решить задачу? Изменится ли ответ, если при тех же температурах начальная относительная влажность будет больше (меньше) заданной? Если начальная (конечная) температура будет больше (меньше) заданной, а остальные величины не изменятся?

1.25. Температура воздуха $26,4^{\circ}\text{C}$, точка росы $9,3^{\circ}\text{C}$. Найти парциальное давление водяного пара, давление насыщенного водяного пара, дефицит насыщения и относительную влажность. Как и почему изменятся ответы, если при той же температуре точка росы будет выше (ниже) заданной? Если при данной точке росы температура воздуха будет выше (ниже) заданной?

Абсолютная влажность

Абсолютная влажность (a) вычисляется по формуле

$$a = \frac{0,8e}{1 + \alpha t}, \quad (1.6)$$

где e — парциальное давление водяного пара (гПа), α — объемный коэффициент теплового расширения газов (см. приложение 1), t — температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$). На практике a выражается в г/м³ с точностью до десятых.

Задачи

1.26. Температура воздуха $7,2^{\circ}\text{C}$, парциальное давление водяного пара $4,7$ гПа. Вычислить абсолютную влажность. Как и почему она изменится, если при данном парциальном давлении водяного пара температура повысится (понижится)? Если при данной температуре парциальное давление пара увеличится (уменьшится)? При изменении какой величины — температуры воздуха или парциального давления пара — абсолютная влажность изменится больше?

1.27. При температуре $0,0^{\circ}\text{C}$ в 1 м³ воздуха содержится $4,0$ г водяного пара. Найти его парциальное давление.

1.28. Найти температуру воздуха, при которой абсолютная влажность (г/м³) численно равна парциальному давлению водяного пара (гПа).

1.29. Вычислить массу воды, которая образуется, если сконденсировать весь водяной пар в изолированном помещении площадью 30 м² и высотой 3 м, в котором температура воздуха равна $15,6^{\circ}\text{C}$, а относительная влажность — 74% . Как и почему изменится ответ, если при заданной температуре относительная влажность уве-

личится (уменьшится)? Если при заданной относительной влажности температура повысится (понижится)? Температуру воздуха во время конденсации пара считать постоянной.

1.30. В тропических пустынях температура воздуха иногда поднимается до $45,0^{\circ}\text{C}$ (и выше), а относительная влажность при этом уменьшается до 2 %. В полярных же районах возможна температура $-40,0^{\circ}\text{C}$ (и ниже) при относительной влажности 100 %. В каком случае абсолютная влажность больше и во сколько раз? Можно ли, зная только относительную влажность, определить массу водяного пара, содержащегося в воздухе?

1.31. Найти наибольшую массу водяного пара, которая может содержаться в 1 м^3 воздуха при температурах $20,0$ и $-20,0^{\circ}\text{C}$. Во сколько раз первое значение больше второго? Возможность пересыщения пара в данном случае не учитывать.

1.32. Температура воздуха $23,7^{\circ}\text{C}$, абсолютная влажность $14,1\text{ г/м}^3$. Найти парциальное давление водяного пара, давление насыщенного пара, дефицит насыщения, относительную влажность и точку росы.

Массовая доля водяного пара

Массовая доля водяного пара (S) вычисляется по формуле

$$S = 0,622e/p, \quad (1.7)$$

где e — парциальное давление водяного пара, p — атмосферное давление. Величина S выражается в долях единицы. В метеорологических задачах S удобно выражать в промилле (‰) с точностью до десятых.

Задачи

1.33. Парциальное давление водяного пара $10,0\text{ гПа}$, атмосферное давление $1000,0\text{ гПа}$. Найти массовую долю водяного пара. Как и почему она изменится, если при данном атмосферном давлении парциальное давление пара увеличится (уменьшится)? Если при данном парциальном давлении пара изменится атмосферное давление?

1.34. Температура воздуха $12,7^{\circ}\text{C}$, давление $974,2\text{ гПа}$, относительная влажность 42 %. Найти массовую долю водяного пара. Как и почему она изменится, если при остальных неизменных условиях относительная влажность увеличится (уменьшится)?

1.35. Найти предельные значения массовой доли водяного пара при температуре воздуха $11,4^{\circ}\text{C}$ и атмосферном давлении $981,4\text{ гПа}$. Какое из них чаще встречается в природе? Возможность пересыщения пара в данном случае не учитывать.

1.36. Температура воздуха $-7,1^{\circ}\text{C}$, давление $993,9\text{ гПа}$, массовая доля водяного пара $0,2\text{ ‰}$. Найти парциальное давление водяного пара, дефицит насыщения, относительную влажность, точку росы и абсолютную влажность.

Массовое отношение водяного пара

Массовое отношение водяного пара (r) вычисляется по формуле

$$r = 0,622 \frac{e}{p - e}, \quad (1.8)$$

где e — парциальное давление водяного пара, p — атмосферное давление. Величина r выражается в долях единицы. В метеорологических задачах r удобно выражать в промилле (‰) с точностью до десятых.

Задачи

1.37. Парциальное давление водяного пара 14,1 гПа, атмосферное давление 1017,4 гПа. Найти массовое отношение водяного пара. Будет ли оно численно больше или меньше массовой доли водяного пара при тех же условиях? Почему? Как и почему оно изменится, если при данном атмосферном давлении парциальное давление водяного пара увеличится (уменьшится)? Если при данном парциальном давлении пара атмосферное давление увеличится (уменьшится)?

1.38. Найти отношение массовой доли водяного пара к его массовому отношению при парциальном давлении пара 7,4 гПа и атмосферном давлении 982,7 гПа. Сильно ли различаются значения этих величин при одинаковых значениях атмосферного давления и одинаковых значениях парциального давления пара?

1.39. Температура воздуха 15,0 °С, атмосферное давление 1015,0 гПа, массовое отношение водяного пара 10,0‰. Найти парциальное давление водяного пара, давление насыщенного пара, дефицит насыщения, относительную влажность, абсолютную влажность и массовую долю водяного пара.

1.40. Температура воздуха 21,8 °С, атмосферное давление 1017,7 гПа, относительная влажность 37 %. Вычислить все остальные гигрометрические характеристики.

1.3.2. Психрометрические таблицы

Приводимые ниже задачи являются упражнениями для получения навыков работы с Психрометрическими таблицами. Они рассчитаны на использование таблиц, изданных в 1981 г.

Задачи

1.41.* Показание сухого термометра (t) стационарного психрометра 21,8 °С, смоченного (t') 15,6 °С, давление на станции 971,1 гПа. Найти по Психрометрическим таблицам точку росы, парциальное давление водяного пара, относительную влажность и дефицит насыщения. Вычислить абсолютную влажность, массовую долю и массовое отношение водяного пара. Варианты исходных данных см. табл. 2 (приложение 41).

1.42. Сухой термометр аспирационного психрометра показывает $-3,3^{\circ}\text{C}$, смоченный $-4,5^{\circ}\text{C}$; на батисте лед. Давление на уровне установки психрометра 978,7 гПа. Выполнить задание предыдущей задачи.

1.43. Показание сухого термометра стационарного психрометра $-3,1^{\circ}\text{C}$, смоченного $-3,9^{\circ}\text{C}$; на батисте вода. Давление 1000,0 гПа. Как и почему изменится показание смоченного термометра после замерзания воды на батисте?

Указание. При прежней t найти на страницах «лед» новую t' , отвечающую прежним e , f и d .

1.44. Температура воздуха $-13,2^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 77 %. Найти по Психрометрическим таблицам парциальное давление водяного пара, точку росы и дефицит насыщения.

Глава 2

ОСНОВЫ СТАТИКИ АТМОСФЕРЫ

2.1. Уравнение состояния сухого воздуха

Уравнение состояния сухого воздуха в метеорологии обычно записывается в виде

$$\rho_c = p/R_c T, \quad (2.1)$$

где ρ_c — плотность, p — давление (Па), T — температура (К), R_c — удельная газовая постоянная сухого воздуха (см. приложение 1). Значения ρ_c принято выражать в кг/м^3 с точностью до тысячных.

Значение R_c можно найти, используя следующие данные для основных компонентов сухого воздуха:

Компонент	Азот	Кислород	Аргон	Углекислый газ	Сумма
Объемная доля, %	78,084	20,946	0,934	0,031	99,995
Массовая доля, %	75,507	23,145	1,288	0,048	99,988
Молярная масса, кг/моль	$28,013 \cdot 10^{-3}$	$31,999 \cdot 10^{-3}$	$39,948 \cdot 10^{-3}$	$44,010 \cdot 10^{-3}$	

Удельную газовую постоянную любого (i -го) компонента воздуха можно найти по соотношению

$$R_{уд, i} = R_{ун}/\mu_i, \quad (2.2)$$

где $R_{ун}$ — универсальная газовая постоянная (см. приложение 1), μ_i — молярная масса (кг/моль) i -го газа.

Задачи

2.1. Вычислить удельную газовую постоянную сухого воздуха, если массовая доля и молярная масса основных его компонентов характеризуются приведенными выше значениями. Найти относительное отклонение найденного R_c от точного значения. Указать возможные причины расхождения. Исходя из точного значения R_c найти молярную массу сухого воздуха. В чем заключается условность последнего понятия?

2.2.* Вычислить плотность сухого воздуха при нормальных условиях (температура $0,0^\circ\text{C}$, давление $1013,3$ гПа). Как и почему изменится ответ, если при данном давлении воздух нагреется или охладится? Если при данной температуре изменится атмосферное давление? Во сколько раз (приблизительно) сухой воздух при обычных условиях легче воды? Варианты исходных данных см. табл. 3 (приложение 41).

2.3. Найти объем 1 г сухого воздуха при температуре $15,4^\circ\text{C}$ и давлении $1010,4$ гПа. Вычислить диаметр тонкой резиновой оболочки, надутой воздухом и имеющей найденный объем. Рассчитать при этих условиях массу сухого воздуха, заполняющего литровую банку.

2.4. Вычислить массу сухого воздуха, заполняющего помещение объемом 150 м^3 при температуре $21,7^\circ\text{C}$ и давлении $1030,0$ гПа. Используя значения массовой доли отдельных газов, найти массы азота, кислорода, аргона и углекислого газа в этом помещении. Проверить ответы, используя уравнение состояния каждого газа и значение его объемной доли. Сравнить первый ответ с суммой полученных масс четырех газов.

2.5. Вычислить вертикальный градиент плотности воздуха на высоте, где плотность составляет $1,0\text{ кг/м}^3$, температура $-23,1^\circ\text{C}$, а вертикальный градиент температуры $0,65^\circ\text{C}/100\text{ м}$. Найти значение вертикального градиента температуры, при превышении которого плотность воздуха возрастает с высотой.

Указание. Условно считая воздух сухим, продифференцировать (2.1) по высоте с использованием основного уравнения статики атмосферы.

2.2. Виртуальная температура. Уравнение состояния влажного воздуха

Виртуальная температура воздуха (T_v) определяется по формуле

$$T_v = T(1 + 0,608s), \quad (2.3)$$

где T — температура воздуха (K), s — массовая доля водяного пара в долях единицы. Величина $\Delta T = T_v - T$ называется виртуальным добавком:

$$\Delta T_v = 0,608sT. \quad (2.4)$$

Уравнение состояния влажного воздуха как идеального газа имеет вид

$$\rho_v = \frac{p}{R_c T_v}, \quad (2.5)$$

где ρ_v — плотность влажного воздуха. При особо точных расчетах рекомендуется учитывать отличие влажного воздуха от идеального газа. Для этого в (2.5) вместо T_v вводят «исправленную» виртуальную температуру, которая рассчитывается по формуле

$$T'_v = C T_v, \quad (2.6)$$

где C — коэффициент сжимаемости влажного воздуха. Некоторые значения C приведены в приложении 3. Соотношение (2.6) рекомендуется использовать только при $t \geq 0,0^\circ\text{C}$.

Задачи

2.6. Вычислить виртуальную температуру и виртуальный добавок для воздуха, имеющего температуру $7,0^\circ\text{C}$, давление $1000,0$ гПа и содержащего насыщенный водяной пар. Почему виртуальная температура влажного воздуха всегда выше его температуры при том же давлении?

2.7. Найти отношение виртуальных добавков для воздуха с насыщенным водяным паром при давлении $1000,0$ гПа и температурах $30,0$ и $-30,0^\circ\text{C}$. При высоких или низких значениях температуры и влажности воздуха виртуальный добавок больше? Для каких слоев атмосферы — нижних или высоких — при вычислении плотности воздуха целесообразно использовать виртуальную температуру?

2.8. Вычислить при нормальных условиях плотность воздуха, содержащего насыщенный водяной пар. Найти ее относительное отклонение от плотности сухого воздуха при тех же условиях. Как оно изменится при данном давлении, но меньшей (большей) температуре? При данной температуре, но меньшем (большем) давлении? Почему при одинаковых давлении и температуре плотность влажного воздуха меньше, чем сухого? Для каких слоев атмосферы при расчетах следует учитывать различие плотности влажного и сухого воздуха?

2.9. Вычислить виртуальную и исправленную виртуальную температуру (в $^\circ\text{C}$), а также плотность влажного воздуха как идеального и как реального газа, если его температура равна $17,5^\circ\text{C}$, давление $1000,0$ гПа и относительная влажность 50% . Найти относительное отклонение второго значения плотности от первого.

Указание. Плотность в данном случае рассчитывать с точностью до 10^{-4} кг/м³.

2.10. Воздух, температура которого составляла $17,5^\circ\text{C}$, а относительная влажность 20% , при давлении $1000,0$ гПа прошел над теплой водной поверхностью. При этом его температура повысилась

до $24,1^{\circ}\text{C}$, а относительная влажность — до 80 %. Давление осталось прежним. Вычислить массу водяного пара, поступившего в 1 м^3 воздуха. Найти изменение веса 1 м^3 воздуха.

2.3. Вертикальный градиент давления и барическая ступень

Вертикальный градиент давления (G) в метеорологии обычно выражается в гектопаскалях на 100 м с точностью до десятых. Из основного уравнения статики при нормальном ускорении свободного падения получаем

$$G = 3,42p/T, \quad (2.7)$$

где p выражается в гПа, T — в К.

Барическая ступень (h) выражается в м/гПа с точностью до десятых и вычисляется по формуле

$$h = 100/G \quad (2.8)$$

или по формуле

$$h = \frac{7995}{p} (1 + \alpha t), \quad (2.9)$$

где α — объемный коэффициент теплового расширения газов (см. приложение 1).

Задачи

2.11. Вычислить вертикальный градиент давления на высоте, на которой атмосферное давление равно 1000,0 гПа и температура $0,0^{\circ}\text{C}$. На сколько гПа уменьшается атмосферное давление на каждые 100 м высоты при обычных условиях у земной поверхности?

2.12. Сравнить вертикальный градиент давления у поверхности Земли при температуре $-11,9^{\circ}\text{C}$ и давлении 1045,0 гПа (G_0) с его значением на высоте, где температура равна $-38,8^{\circ}\text{C}$ и давление 468,7 гПа (G_z). Как и почему изменяется вертикальный градиент давления с высотой? Что можно на этом основании сказать о характере изменения самого давления с высотой? Представить схематически график изменения давления с высотой.

2.13. В двух пунктах, первый из которых находится на экваторе, а второй в Арктике, на уровне моря были получены одновременно одинаковые значения давления — 990,0 гПа. Температура в первом пункте равна $27,0^{\circ}\text{C}$, а во втором — $23,0^{\circ}\text{C}$. Условно считая, что вертикальный градиент давления не изменяется с высотой, приближенно определить в этих пунктах давление на высоте 5 км.

В холодном или теплом воздухе при остальных одинаковых условиях давление быстрее уменьшается с высотой? В каком общем направлении перемещается воздух на высоте 5 км?

2.14. У подножия горы высотой 3 км средние значения давления в один из зимних и в один из летних месяцев оказались одинаковыми — 1000,0 гПа. Средняя температура воздуха у подножия горы в эти месяцы составила соответственно —13,0 и 17,0 °С. Условно считая, что вертикальный градиент давления не меняется с высотой, вычислить среднее давление в указанные месяцы на вершине горы. Построить схему годового хода давления в высокогорных районах.

2.15. Вычислить барическую ступень у поверхности Земли при давлении 1000,0 гПа и температурах —40,0; 0,0 и 40,0 °С. На сколько метров надо переместиться по вертикали вблизи земной поверхности при обычных условиях, чтобы давление изменилось на 1 гПа? Летом или зимой, днем или ночью давление быстрее уменьшается с высотой?

2.16. Вычислить барическую ступень, если вертикальный градиент давления составляет 8,0 гПа/100 м.

2.17. Сравнить барическую ступень на высоте, где температура равна —30,0 °С и давление 500,0 гПа (h_z), с ее значением у поверхности Земли при температуре 0,0 °С и давлении 1000,0 гПа (h_0). Как изменяется барическая ступень с высотой? Что можно на этом основании сказать о характере изменения самого давления с высотой? Представить схематически график изменения давления с высотой.

2.18. Условно считая, что барическая ступень не меняется с высотой, найти давление на уровне моря, если на высоте 4800 м оно равно 500,0 гПа, а температура 0,0 °С. Бывает ли в действительности на уровне моря такое давление (см. задачу 1.9)? Как изменится ответ, если учесть характер изменения барической ступени с высотой?

2.19. Условно считая, что барическая ступень не изменяется с высотой, определить, как и на сколько изменится расстояние по вертикали между изобарическими поверхностями 1000,0 и 800,0 гПа, если температура на нижней из них увеличится от 0,0 до 10,0 °С. В теплом или холодном воздухе толщина слоя воздуха между одинаковыми изобарическими поверхностями больше?

2.20. Сравнить барическую ступень в воздухе, содержащем насыщенный пар ($h_{вл}$) при температуре 32,5 °С и давлении 978,0 гПа, с ее значением в сухом воздухе (h_c) при тех же условиях. В сухом или во влажном воздухе давление медленнее уменьшается с высотой при одинаковой температуре и одинаковом давлении на нижнем уровне?

2.21.* На уровне с давлением 1002,1 гПа температура воздуха составляет 1,5 °С. Найти на этом уровне вертикальный градиент давления и барическую ступень как величину, обратную градиенту. Последний результат проверить по формуле (2.9). Варианты исходных данных см. табл. 3 (приложение 41).

2.4. Однородная атмосфера

В однородной атмосфере изменение давления с высотой определяется соотношением

$$p_2 = p_1 - \rho g (z_2 - z_1), \quad (2.10)$$

где p_1 и p_2 — давление на высотах z_1 и z_2 соответственно, ρ — плотность воздуха, g — ускорение свободного падения.

Задачи

2.22. Вычислить вертикальный градиент температуры в однородной атмосфере. При каких условиях такие градиенты встречаются в природе? К развитию каких процессов приводит превышение найденного здесь значения?

2.23. Вычислить давление на высотах 3997 и 7995 м в однородной атмосфере при нормальных условиях у земной поверхности. Какова высота однородной атмосферы при этих условиях? Использовать ответы к задачам 1.7 и 2.2.

2.24. Вычислить вертикальный градиент давления и барическую ступень в однородной атмосфере при нормальных условиях у земной поверхности. Схематически изобразить изменение давления с высотой в такой атмосфере. В однородной или в реальной атмосфере давление быстрее уменьшается с высотой? Использовать ответ к задаче 2.2.

2.25. Вычислить высоту однородной атмосферы при температуре у земной поверхности $-20,0$; $0,0$ и $20,0$ °С. Как и почему изменяется высота однородной атмосферы при изменении температуры воздуха у земной поверхности?

2.5. Изотермическая атмосфера

В изотермической атмосфере изменение давления с высотой определяется соотношением

$$p_2 = p_1 e^{-\frac{g(z_2 - z_1)}{R_c T}}. \quad (2.11)$$

Задачи

2.26. Найти давление в изотермической атмосфере на высотах 3997 и 7995 м при нормальных условиях у земной поверхности. Результаты сравнить с ответами к задаче 2.23. В однородной или в изотермической атмосфере давление быстрее убывает с высотой? Почему?

2.27. Найти высоту изотермической атмосферы при любой ее температуре. В изотермической или в реальной атмосфере давление быстрее убывает с высотой? Почему?

2.28. Найти давление на высотах 5 и 10 км в изотермической атмосфере для случаев, когда ее температура составляет $-15,0$ и $15,0^\circ\text{C}$, если давление у земной поверхности равно $1000,0$ гПа. Представить графически функции $p(z)$ для этих двух случаев. Как зависит изменение давления с высотой в изотермической атмосфере от ее температуры? Проверить ответ, вычислив средний вертикальный градиент давления для слоя $0-10$ км в двух указанных случаях.

2.29. На метеорологической станции, находящейся на высоте 400 м над уровнем моря, температура воздуха $0,0^\circ\text{C}$, давление $965,0$ гПа. Найти давление на уровне моря, если слой воздуха $0-400$ м является изотермическим. Определить эту же величину по значению барической ступени на станции. Чем объясняется различие результатов?

2.6. Политропная атмосфера

В политропной атмосфере изменение давления с высотой определяется соотношением

$$p_2 = p_1 \left[1 - \frac{\gamma(z_2 - z_1)}{T_1} \right]^{g/R\gamma}, \quad (2.12)$$

где γ — вертикальный градиент температуры, T_1 — температура на высоте z_1 .

Задачи

2.30. Найти давление на высотах 3997 и 7995 м в политропной атмосфере с вертикальным градиентом температуры $0,65^\circ\text{C}/100$ м при нормальных условиях у земной поверхности. Сравнить ответы с результатами задач 2.23 и 2.26. В однородной, изотермической или политропной атмосфере с указанным для нее градиентом температуры давление быстрее изменяется с высотой при одинаковых условиях у земной поверхности? Как и почему изменятся ответы, полученные для политропной атмосферы, если вертикальный градиент температуры увеличится (уменьшится)?

2.31. Найти высоту политропной атмосферы, если температура воздуха у земной поверхности равна $15,0^\circ\text{C}$, а вертикальный градиент температуры составляет $0,65^\circ\text{C}/100$ м. Почему ответ не соответствует действительной высоте земной атмосферы, хотя исходные данные совпадают со значениями, фактически наблюдающимися в тропосфере? В политропной или в реальной атмосфере давление быстрее уменьшается с высотой?

2.32. Найти высоту политропной атмосферы при температуре на уровне моря $0,0^\circ\text{C}$ и вертикальном градиенте температуры

3,42 °C/100 м. Объяснить полученный результат, сравнить его с ответами к задачам 2.23 и 2.27.

2.33. Преобразовать формулу (2.12) к виду, позволяющему находить поправку на приведение давления к уровню моря с учетом влажности воздуха и зависимости ускорения свободного падения от широты φ и высоты z места.

Указания: 1. Принять $\gamma = 0,65^\circ\text{C}/100\text{ м}$. 2. Для учета влажности ввести виртуальную температуру. 3. Для учета зависимости $g(\varphi, z)$ использовать соотношение

$$g(\varphi, z) = 9,80616(1 - 2,6373 \cdot 10^{-3} \cos 2\varphi + 5,9 \cdot 10^{-6} \cos^2 2\varphi) - 3,086 \cdot 10^{-6} z + 1,118 \cdot 10^{-6} (z - z'),$$

где z' — средняя высота данной местности над уровнем моря в радиусе 150 км вокруг точки наблюдения (см. Методические указания ГГО по приведению давления к уровню моря. — Л.: Гидрометеониздат, 1979).

2.34.* На станций, находящейся на 45° с. ш. и высоте 1000 м над уровнем моря, давление 900,0 гПа, температура $7,0^\circ\text{C}$ и парциальное давление водяного пара 9,0 гПа. Найти поправку на приведение давления к уровню моря, если средняя высота окружающей местности составляет 900 м. Варианты исходных данных см. табл. 4 (приложение 41).

Указание. Использовать ответ к задаче 2.33. При вычислении виртуальной температуры в данном случае принять $T = t + 273,0$.

2.7. Реальная атмосфера

При необходимости расчета давления на определенных высотах или высот по измеренному давлению с погрешностью не более 0,1 % применяется полная барометрическая формула для реальной атмосферы (формула Лапласа):

$$p_2 = p_1 e^{-0,0001251 \frac{(1 - a \cos 2\varphi)(1 - bz_{cp})}{(1 + \alpha t_{cp})[1 + \beta(e/p)_{cp}]} (z_2 - z_1)}, \quad (2.13)$$

где φ — широта места; z_{cp} — средняя высота слоя, лежащего между уровнями z_1 и z_2 ; t_{cp} — средняя температура этого слоя; $(e/p)_{cp}$ — среднее значение отношения e/p в этом слое; $a = 2,64 \cdot 10^{-3}$; $b = 3,14 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1}$; $\alpha = 3,66 \cdot 10^{-3} (^\circ\text{C})^{-1}$; $\beta = 0,378$. При практических расчетах давления или высоты обычно допустима погрешность в пределах 1 %. Для таких расчетов формула Лапласа используется в сокращенном виде:

$$p_2 = p_1 e^{-\frac{g(z_2 - z_1)}{RT_{cp}}}. \quad (2.14)$$

Задачи

2.35. В районе экватора на двух станциях, одна из которых находится у подножия горы, а другая на вершине, одновременно получено:

Положение станции	t °C	p гПа	f %
У подножия	25,0	1000,0	60
На вершине	-5,0	500,0	40

Определить разность высот станций с погрешностью не более 0,1 %.

Указание. Первое приближение найти по значению барической ступени у подножия горы.

2.36. Принимая, что летом в низких широтах над сушей средняя по высоте температура тропосферы и нижней стратосферы несущественно отличается от 0,0 °C, найти по сокращенной барометрической формуле округленные значения высот, на которых давление в 2, 4, 8, 10 и в 100 раз меньше, чем на уровне моря. Какая часть всей массы атмосферы содержится в слое, расположенном ниже каждой из найденных высот?

2.37. Вычислить с ошибкой, не превышающей 1 %, среднее давление в реальной атмосфере на высоте 10 км, считая, что на уровне моря условия в среднем близки к нормальным, а средний вертикальный градиент температуры до высоты 10 км составляет 0,65 °C/100 м. Какая примерно часть массы атмосферы сосредоточена в нижнем 10-километровом ее слое? Как и почему изменился бы первый ответ, если бы температура на уровне моря была выше (ниже) заданной? Если бы при тех же условиях увеличился (уменьшился) вертикальный градиент температуры?

2.38. Определить с ошибкой, не превышающей 1 %, давление на вершине горы высотой 3680 м, если на уровне моря температура равна 34,6 °C, давление 1048,5 гПа, а средний вертикальный градиент температуры до уровня вершины горы составляет 0,5 °C/100 м.

2.39.* На станции, лежащей на широте 60° и высоте 552 м над уровнем моря, давление равно 952,4 гПа, температура 18,4 °C, относительная влажность 74 %. 1) Вычислить виртуальную температуру (считая, что $T = t + 273,0$), вертикальный градиент давления, барическую ступень и плотность воздуха на уровне станции. 2) Найти поправку на приведение давления к уровню моря, если средняя высота окружающей местности составляет 452 м, а вертикальный градиент температуры на уровне станции равен 0,65 °C/100 м. 3) Найти давление на уровне моря по значению барической ступени на станции, по формуле для изотермической атмосферы и по сокращенной формуле для реальной атмосферы.

имеющей такой же вертикальный градиент температуры, какой указан в п. 2. Сравнить ответы между собой, а также с полученным в п. 2 и объяснить причины расхождения. 4) Температура на высоте 3,68 км над уровнем станции составляет $-2,2^{\circ}\text{C}$. Найти давление на этой высоте по сокращенной формуле для реальной атмосферы. Условно считая воздух сухим, вычислить вертикальный градиент давления, барическую ступень и плотность воздуха на данной высоте. 5) Температура на высоте 7,36 км над уровнем станции составляет $-20,6^{\circ}\text{C}$. Найти величины, перечисленные в п. 4 (при вычислении давления нижним уровнем считать высоту 3,68 км). 6) Представить графически и проанализировать вертикальное распределение давления, температуры, плотности воздуха, вертикального градиента давления и барической ступени от уровня станции до уровня 7,36 км. Варианты исходных данных см. табл. 5 (приложение 41).

Глава 3

ТУРБУЛЕНТНОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

3.1. Некоторые методы определения коэффициента турбулентности

Коэффициент турбулентности K выражается в $\text{м}^2/\text{с}$ с точностью до сотых. При определении турбулентных потоков в приземном слое атмосферы используется коэффициент турбулентности K_1 на высоте 1 м, обозначаемой z' . По теории М. И. Будыко, в пределах приземного слоя

$$K = K_1 z / z',$$

где z — высота (м). Для определения K_1 на суше наиболее распространены следующие методы.

Метод теплового баланса. Согласно этому методу

$$K_1 = \alpha (B - P), \quad (3.1)$$

где B — радиационный баланс деятельного слоя ($\text{кВт}/\text{м}^2$) (см. п. 5.8), P — поверхностная плотность теплового потока в почве ($\text{кВт}/\text{м}^2$) (см. п. 6.4), коэффициент α определяется по формуле

$$\alpha = \frac{1,07}{\Delta t + 1,56 \Delta e} \quad (3.2)$$

и выражается в $\text{м}^4/\text{кДж}$, $\Delta t = t_{0,5} - t_{2,0}$ ($t_{0,5}$ и $t_{2,0}$ — температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$) на стандартных уровнях градиентных наблюдений 0,5 и 2,0 м), $\Delta e = e_{0,5} - e_{2,0}$ ($e_{0,5}$ и $e_{2,0}$ — парциальное давление водяного

пара (гПа) на тех же уровнях). Если температура воздуха или парциальное давление водяного пара измерены не на стандартных уровнях 0,5 и 2,0 м, а на некоторых других уровнях z_1 и z_2 , то от разностей $t_{z_1} - t_{z_2}$ и $e_{z_1} - e_{z_2}$, следует перейти к Δt и Δe по соотношениям

$$\Delta t = \frac{0,602}{\lg \frac{z_2}{z_1}} (t_{z_1} - t_{z_2}); \quad \Delta e = \frac{0,602}{\lg \frac{z_2}{z_1}} (e_{z_1} - e_{z_2}).$$

Формулу (3.1) рекомендуется применять только при

$$(B - P) \geq 0,14 \text{ кВт/м}^2; \quad \Delta t \geq 0,3^\circ\text{C}; \quad \Delta e \geq 0,3 \text{ гПа}. \quad (3.3)$$

Стационарный метод турбулентной диффузии. Если условия (3.3) не выполняются, то для определения K_1 используется метод турбулентной диффузии, разработанный М. И. Будыко и внедренный в станционную практику Л. В. Дубровиным. Для нахождения K_1 по этому методу необходимо из градиентных наблюдений температуры (t) и скорости ветра (u) на стандартных уровнях получить величины

$$\Delta t = t_{0,5} - t_{2,0}; \quad \Delta u = u_{2,0} - u_{0,5},$$

причем метод используется только при $\Delta u \geq 0,3$ м/с. По известным Δt и Δu значение K_1 находится из таблиц Дубровина (приложение 4).

Уточненный метод турбулентной диффузии (метод тангенсов). Этот метод используется, когда имеются результаты градиентных наблюдений более чем на двух уровнях. По этому методу

$$K_1 = 0,144 \operatorname{tg} \alpha (1 - \operatorname{tg} \beta / \operatorname{tg}^2 \alpha) z', \quad (3.4)$$

где

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{du}{d \ln z}, \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{dt}{d \ln z}. \quad (3.5)$$

Последние величины находятся графически (см. задачу 3.4), причем $\operatorname{tg} \alpha > 0$ всегда; $\operatorname{tg} \beta > 0$ при инверсии, а при уменьшении температуры с высотой $\operatorname{tg} \beta < 0$. Формула (3.4) сохраняет смысл только при $\operatorname{tg} \beta / \operatorname{tg}^2 \alpha \leq 1$.

Формула М. П. Тимофеева. Согласно этой формуле

$$K_1 = \frac{0,16 u_{1,0}}{\ln(z'/z_{00})} \left(1 + 7,5 \frac{\Delta t}{u_{1,0}^2} \right) z', \quad (3.6)$$

где $u_{1,0}$ — скорость ветра (м/с) на высоте 1 м; z_{00} — параметр шероховатости при равновесных условиях. Значение z_{00} определяется по графику ($u, \ln z$), на который наносится скорость ветра на нескольких уровнях. Если скорость ветра измерена только на двух уровнях z_1 и z_2 , то z_{00} находят из соотношения

$$\lg \frac{z_{00}}{z'} = \frac{\lg z_2 - (u_2/u_1) \lg z_1}{1 - (u_2/u_1)}. \quad (3.7)$$

Если скорость ветра измерена только на уровне 1 м, то приближенные значения z_{00} находятся по следующей таблице (см. Руководство по градиентным наблюдениям. Л.: Гидрометеониздат, 1964, с. 109):

Вид поверхности	z_{00} см	Вид поверхности	z_{00} см
Трава		Рыхлая почва без покрова	2
высота менее 6 см	1	Ровный глубокий снег с плотной поверхностью	0,5
" " 6—15 см	2	Неровный снег средней глубины	1
" " 16—25 см	3	Рыхлый и неглубокий снег	2
" " 26—35 см	4		
Плотная почва без покрова	1		

Задачи

3.1. При наблюдениях под Ленинградом в 12 ч 9 августа получено: радиационный баланс $0,70 \text{ кВт/м}^2$; поверхностная плотность теплового потока в почве $0,05 \text{ кВт/м}^2$; температура воздуха и парциальное давление водяного пара на высотах 0,5 и 2,0 м соответственно $19,6$ и $18,6^\circ\text{C}$, $14,8$ и $13,6 \text{ гПа}$. Найти коэффициент турбулентности на высоте 1 м. Указать порядок величины коэффициента турбулентности на данной высоте в умеренных широтах летом в полуденные часы.

3.2. На метеоплощадке получено: $t_{0,5} = 14,6^\circ\text{C}$, $t_{2,0} = 13,8^\circ\text{C}$; $u_{0,5} = 1,8 \text{ м/с}$; $u_{2,0} = 2,8 \text{ м/с}$. Найти коэффициент турбулентности на высоте 1 м. Повлияют ли на ответ одинаковые изменения температуры и (или) скорости ветра на обоих уровнях?

3.3. На Северо-западе Европейской части СССР 11 июля 1964 г. в 11 ч получено: $t_{0,2} = 19,9^\circ\text{C}$; $t_{1,0} = 19,2^\circ\text{C}$; $u_{0,2} = 1,3 \text{ м/с}$; $u_{2,0} = 1,8 \text{ м/с}$. Найти коэффициент турбулентности на высоте 1 м.

3.4. При градиентных наблюдениях на уровнях 0,2; 0,5; 1,0 и 2,0 м получены значения температуры $31,5$; $30,5$; $29,4$ и $28,6^\circ\text{C}$ и скорости ветра $2,1$; $3,5$; $4,5$ и $5,3 \text{ м/с}$. Найти коэффициент турбулентности на высоте 1 м уточненным и станционным методами турбулентной диффузии. Какой из полученных результатов предпочтительнее и почему? Определить относительную погрешность второго ответа.

Решение. Построить два графика тангенсов. На осях ординат отложить значения $\ln z$ от $-1,6$ до $1,0$ в масштабе $1 \text{ см} = 0,2$. Оси абсцисс провести при значении $\ln z = 0,00$. На первом графике на оси абсцисс отложить скорость ветра от 2 до 6 м/с в масштабе $3 \text{ см} = 1 \text{ м/с}$, на втором — температуру от $28,0$ до $32,0^\circ\text{C}$ в масштабе $3 \text{ см} = 1,0^\circ\text{C}$. Вычислить натуральные логарифмы указанных высот и провести соответствующие им изолинии, параллельные оси абсцисс. Нанести на них измеренные значения t и u . По четырем точкам на каждом графике провести прямую так, чтобы сумма расстояний от точек до прямой по перпендикуляру была примерно одинакова слева и справа. Точки должны располагаться слева и справа от прямой либо через одну, либо две крайние — по одну сторону, а две средние — по другую. Продолжить прямую вверх до пересечения с линией $\ln z = 1,0$. Из точки пересечения опустить перпендикуляр на ось абсцисс. Расстояние от его основания до точки пересечения

оси абсцисс с построенной прямой, выраженное в соответствующих единицах (согласно масштабу на оси абсцисс), на первом графике есть $\operatorname{tg} \alpha$, на втором — $\operatorname{tg} \beta$. Графики тангенсов для настоящей задачи приведены на рис. 3.1. В данном случае $\operatorname{tg} \alpha = 5,75 - 4,38 = 1,37$ м/с; $\operatorname{tg} \beta = 28,13 - 29,47 = -1,34$ °С. Тогда по формуле (3.4) $K_1 = 0,34$ м²/с. Используя значения на стандартных высотах 0,5

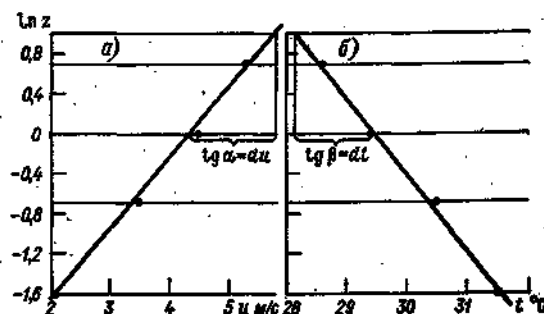


Рис. 3.1. Графики тангенсов.

α — определение $\operatorname{tg} \alpha$, β — определение $\operatorname{tg} \beta$.

и 2,0 м, найдем $\Delta t = 1,9$ °С и $\Delta u = 1,8$ м/с, откуда $K_1 = 0,27$ м²/с (см. приложение 4). Относительная погрешность этого значения по сравнению с найденным по уточненному методу равна 21 %.

Примечание. Масштабы, указанные для осей абсцисс, относятся лишь к данной задаче. Их следует каждый раз подбирать так, чтобы угол между прямой и осью абсцисс не очень отличался от 45 или 135 °.

3.5.* Вычислить коэффициент турбулентности на высоте 1 м по методу теплового баланса, стационарному и уточненному методам турбулентной диффузии, используя следующие результаты градиентных наблюдений на высотах 0,2; 0,5; 1,0; 2,0 м; температура 22,8; 22,0; 21,6; 21,1 °С; парциальное давление водяного пара 16,4; 16,1; 15,7; 15,6 гПа; скорость ветра 1,7; 2,2; 2,8; 3,2 м/с. Радиационный баланс составляет 0,49 кВт/м², поверхностная плотность теплового потока в почве 0,06 кВт/м². Определить погрешность второго и третьего результатов относительно первого. Варианты исходных данных см. табл. 6 (приложение 41).

3.6. Скорость ветра над рыхлой почвой в районе Воронежа в среднем за июль 1951 г. на высотах 0,6; 1,1; 2,0 и 11,5 м составляла 4,4; 5,7; 6,9 и 8,1 м/с. Определить параметр шероховатости графически и по формуле (3.7). Какой из ответов и почему следует считать более достоверным?

Указание. По оси абсцисс отложить скорость ветра начиная с 0 м/с, а по оси ординат значения $\ln z$. Прямую, построенную по точкам так, как описано в решении задачи 3.4, продолжить вниз до пересечения с осью ординат. При $u = 0,0$ снять значение $\ln z_{00}$, заключенное между осью абсцисс и точкой пересечения. По $\ln z_{00}$ найти z_{00} в метрах и перевести в сантиметры. При вычислении z_{00} по формуле (3.7) использовать значения скорости ветра на двух крайних высотах.

3.7. Используя первый из ответов к предыдущей задаче, найти K_1 по формуле М. П. Тимофеева, если на той же площадке 2 июля в 14 ч было получено: $t_{0,5}=21,7^\circ\text{C}$; $t_{2,0}=20,1^\circ\text{C}$; $u_{1,0}=4,1$ м/с. В какую сторону и почему изменится ответ, если при остальных неизменных условиях на площадке образуется высокий травяной покров? Если увеличится (уменьшится) разность температур?

3.8. Найти коэффициент турбулентности на высотах 10 м и 100 м, если на высоте 1 м он равен $0,20$ м²/с.

3.2. Факторы турбулентности

Соотношение между термическими и динамическими факторами турбулентности удобно анализировать, например, исходя из формулы М. И. Будыко

$$K_1 = 0,104 \Delta u z' + 0,144 \frac{\Delta t}{\Delta u} z', \quad (3.8)$$

где все обозначения имеют тот же смысл, что и в п. 3.1. В формуле (3.8) первое слагаемое отражает влияние динамических причин развития турбулентности (его можно условно назвать динамическим фактором (Д)), а второе — относительную роль термических причин (его можно условно назвать термическим фактором (Т)).

Задачи

3.9. В 17 ч 8 июля 1964 г. на площадке ЛГМИ в Даймище (Ленинградская область) было получено: $t_{0,5}=13,6^\circ\text{C}$; $t_{2,0}=13,4^\circ\text{C}$; $u_{0,5}=1,8$ м/с; $u_{2,0}=2,7$ м/с. Найти факторы турбулентности на высоте 1 м и установить, какой из них был преобладающим. Какие знаки могут иметь динамический и термический факторы турбулентности?

3.10. В 15 ч 13 июля 1964 г. на площадке ЛГМИ в Даймище было получено: $t_{0,5}=25,5^\circ\text{C}$; $t_{2,0}=24,9^\circ\text{C}$; $u_{0,5}=0,4$ м/с; $u_{2,0}=0,6$ м/с. Найти факторы турбулентности на высоте 1 м и установить, какой из них был преобладающим. Каковы возможные причины различия результатов двух последних задач?

3.11. Найти динамический и термический факторы и их сумму, если а) $\Delta u=1,0$ м/с, $\Delta t=0,5^\circ\text{C}$; б) $\Delta u=1,0$ м/с, $\Delta t=0,0^\circ\text{C}$; в) $\Delta u=-1,0$ м/с, $\Delta t=-0,5^\circ\text{C}$. Как влияет термическая стратификация приземного слоя атмосферы на интенсивность турбулентного перемешивания в этом слое?

3.12.* Используя приведенные ниже результаты градиентных наблюдений на ст. Воейково (Ленинградская область) за 23 июля 1966 г., вычислить динамический и термический факторы и их сумму на высоте 1 м во все сроки наблюдений. Построить и проанализировать график суточного хода всех трех величин. Варианты исходных данных см. табл. 7 (приложение 41).

Срок, ч	$t_{0,5}$	$t_{2,0}$	$u_{0,5}$	$u_{2,0}$
1	9,5	9,6	1,8	2,4
7	11,2	11,2	2,6	3,3
10	13,0	12,8	3,4	4,2
13	13,3	13,2	4,2	5,4
16	12,7	12,7	4,0	5,0
19	12,2	12,3	5,4	6,7
1 (следующие сутки)	10,6	10,8	2,4	3,0

Указания: 1. По оси абсцисс отложить часы от 0 до 24 в масштабе 1 см=2 ч. По оси ординат отложить значения от -0,04 до 0,16 м²/с в масштабе 1 см=0,02 м²/с. Нанести нужные точки, соединить их отрезками прямых разного вида или цвета и получить три ломаные линии, каждая из которых должна начинаться в 0 ч и оканчиваться в 24 ч. На графике надписать его содержание, время и место наблюдений. 2. Анализ выполнить письменно, последовательно рассматривая интервалы 0—7, 7—10, ..., 19—24 ч. При анализе каждого интервала осветить два вопроса: 1) природа турбулентности (какой фактор вносит основной вклад, и как влияет на турбулентность второй фактор?); 2) характер и причины изменения интенсивности турбулентности (под влиянием какого фактора изменялась их сумма и какую роль при этом играл второй фактор?).

Пример анализа графика к задаче 3.12.*

0—7 ч. Турбулентность в основном имела динамическое происхождение, а в 7 ч — чисто динамическое. Термический фактор был отрицательным и ослаблял действие динамического. Турбулентность усиливалась, так как возрастали оба фактора. Поэтому усиление турбулентности шло быстрее, чем увеличивался каждый фактор.

7—10 ч. Турбулентность в 7 ч имела чисто динамическое происхождение, а затем преимущественно динамическое. Термический фактор после 7 ч стал положительным и усиливал действие динамического. Турбулентность продолжала усиливаться в результате возрастания обоих факторов.

10—13 ч. Турбулентность продолжала оставаться в основном динамической, а термический фактор был положительным и усиливал действие динамического. Усиление турбулентности продолжалось, но уже только за счет роста динамического фактора, тогда как термический фактор уменьшался, в результате чего развитие турбулентности замедлялось. Поэтому оно происходило медленнее, чем увеличивался динамический фактор.

Глава 4

ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ АТМОСФЕРЫ

4.1. Адиабатические изменения состояния воздуха с ненасыщенным паром (сухоадиабатические процессы). Потенциальная температура

Сухоадиабатические процессы характеризуются уравнением Пуассона

$$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{0,286}, \quad (4.1)$$

где p_1 и T_1 — давление и температура воздуха в начальном состоянии, а p_2 и T_2 — в конечном состоянии. Практически это уравнение решается по аэрологической диаграмме.

Если воздух с ненасыщенным паром, имевший на начальном уровне z_0 температуру $T_{i,0}$, адиабатически переместится на уровень z (м), то его температура станет равной

$$T_{i,z} = T_{i,0} - \gamma_a (z - z_0), \quad (4.2)$$

где γ_a — сухоадиабатический градиент (см. приложение 1).

Потенциальная температура вычисляется по формуле

$$\theta = T (1000/p)^{0,236}, \quad (4.3)$$

где T — температура воздуха (К), p — давление (гПа). Практически потенциальную температуру находят по аэрологической диаграмме. Если на высоте z (м) температура воздуха равна t_z (°С), то его потенциальная температура на этой высоте определяется по формуле

$$\theta_z = t_z + \gamma_a z + \Delta p / 12,5, \quad (4.4)$$

где γ_a — сухоадиабатический градиент, $\Delta p = 1000,0 - p_0$, p_0 — давление у поверхности Земли. Изменение потенциальной температуры с высотой описывается формулой

$$\frac{d\theta}{dz} = \frac{\theta}{T} (\gamma_a - \gamma), \quad (4.5)$$

где γ — вертикальный градиент температуры в атмосфере на данном уровне. На практике обычно определяется среднее значение γ для слоя, лежащего между некоторыми уровнями z_1 и z_2 :

$$\gamma = - \frac{t_2 - t_1}{z_2 - z_1}, \quad (4.6)$$

где t_1 и t_2 — температуры на уровнях z_1 и z_2 .

Задачи

4.1. Найти относительное изменение (%) температуры (К) воздуха с ненасыщенным паром, если давление: а) адиабатически уменьшится в 4 раза; б) адиабатически увеличится в 2 раза. В каких условиях возможны такие изменения давления? Чем вызваны найденные изменения температуры воздуха?

4.2. Вычислить температуру, которую примет воздух с ненасыщенным паром, находившийся при нормальных условиях, если давление адиабатически уменьшится в 2,5 раза. Возможен ли такой процесс в природе?

4.3. Найти температуру, которую примет воздух с ненасыщенным паром, находившийся при температуре 0,0 °С, если его давление адиабатически увеличится от 990,0 до 1010,0 гПа. Могут ли колебания давления приводить к значительным изменениям температуры воздуха?

4.4. Найти температуру, которую примет воздух с ненасыщенным паром, находившийся при температуре $2,7^{\circ}\text{C}$, если его давление адиабатически уменьшится от 970,0 до 822,0 гПа.

Указание. Задачи 4.4—4.10 рекомендуется решить с помощью аэрологической диаграммы.

4.5. Найти температуру, которую примет воздух с ненасыщенным паром, имевший температуру $-6,0^{\circ}\text{C}$, если его давление адиабатически увеличится от 768,0 до 1020,0 гПа.

4.6. Найти температуру, которую примет воздух с ненасыщенным паром, имевший температуру $25,4^{\circ}\text{C}$, если его давление адиабатически изменится от 965,0 до 775,0 гПа.

4.7. Найти температуру, которую примет воздух с ненасыщенным паром, имевший температуру $14,0^{\circ}\text{C}$, если его давление адиабатически увеличится от 700,0 до 950,0 гПа.

Указание. Напечатанные на диаграмме сухие адиабаты, изобары и изотермы продолжить вправо и вниз.

4.8. Найти давление, при котором адиабатически расширяющийся воздух с ненасыщенным паром приобретет температуру $-9,5^{\circ}\text{C}$, если при давлении 925,0 гПа его температура составляла $7,1^{\circ}\text{C}$.

4.9. Найти температуру, которую примет воздух с ненасыщенным паром, находившийся при температуре $-10,0^{\circ}\text{C}$ и давлении 604,3 гПа, если последнее адиабатически увеличится до 750,0; 900,0; 1050,0 гПа.

4.10. Температура воздуха с ненасыщенным паром $23,7^{\circ}\text{C}$, давление 1015,8 гПа. Найти, какой станет температура воздуха, если давление адиабатически изменится до 912,2; 812,3; 712,4 гПа.

4.11. В 13 ч в июльский день температура воздуха в некотором пункте над сушей составляла $24,3^{\circ}\text{C}$. Несмотря на интенсивные восходящие движения воздуха, образования облаков не наблюдалось, т. е. водяной пар в поднимающемся воздухе оставался ненасыщенным. Найти температуру адиабатически поднимавшегося воздуха на высоте 1 км и высоту, на которой он охладился до $0,0^{\circ}\text{C}$. Почему адиабатически поднимающийся воздух охлаждается?

4.12. Найти высоту, на которую должен адиабатически подняться воздух с ненасыщенным паром, чтобы его температура уменьшилась на $12,7^{\circ}\text{C}$.

4.13. Воздух с ненасыщенным паром адиабатически стекает с вершины горы высотой 820 м к ее подножию. Найти его температуру у подножия, если на вершине горы она равнялась $14,2^{\circ}\text{C}$. Почему адиабатически опускающийся воздух нагревается?

4.14. Найти температуру воздуха с ненасыщенным паром на вершине горы высотой 1400 м, если в результате адиабатического опускания к ее подножию он нагрелся до $21,7^{\circ}\text{C}$.

4.15. На высоте 12 км температура составляет $-50,0^{\circ}\text{C}$. Найти температуру, которую приобрел бы воздух, если бы он мог сухо-

адиабатически опуститься с этой высоты на уровень моря. Чем объясняется неправдоподобность ответа?

4.16. Найти по диаграмме потенциальную температуру воздуха, температура которого $6,0^{\circ}\text{C}$, а давление $820,0$ гПа. Результат проверить по формуле (4.3). Как и почему изменился бы ответ, если бы температура или давление были больше (меньше) заданных? Почему в данном случае потенциальная температура воздуха выше обычной температуры? В каком случае результат был бы противоположным?

4.17. Один объем воздуха находится при давлении $804,7$ гПа и температуре $7,0^{\circ}\text{C}$, другой — при давлении $498,8$ гПа и температуре $-16,6^{\circ}\text{C}$. Какой из них имеет более высокую потенциальную температуру? На сколько градусов эти температуры различаются? Чем это объясняется?

4.18. Температура некоторого объема воздуха $9,2^{\circ}\text{C}$, давление $864,8$ гПа. Найти его потенциальную температуру при перемещении на уровни с давлением $950,0$ и $1050,0$ гПа, а также $800,0$ и $700,0$ гПа. Как изменяется потенциальная температура воздуха с ненасыщенным паром при его вертикальных перемещениях? Подтвердить полученный результат теоретически.

4.19. На высоте 4 км температура воздуха $-16,8^{\circ}\text{C}$. Найти потенциальную температуру на этой высоте, если у земной поверхности давление составляет $975,0$ гПа.

4.20. Вертикальный градиент температуры в отдельных слоях в атмосфере составляет $-1,0; 0,0; 1,0; 2,0^{\circ}\text{C}/100$ м. Указать характер изменения потенциальной температуры с высотой в этих слоях. Каков характер этого изменения в слоях инверсии, изотермии и уменьшения температуры с высотой, превышающего $1,0^{\circ}\text{C}/100$ м?

4.21. У земной поверхности температура воздуха $20,0^{\circ}\text{C}$, давление $1025,0$ гПа. На высоте 2 км температура $10,0^{\circ}\text{C}$. Найти средний вертикальный градиент потенциальной температуры в нижнем 2-километровом слое атмосферы. Указать соотношение между вертикальным градиентом температуры и сухоадиабатическим градиентом в этом слое.

4.22. На уровне моря температура воздуха $28,0^{\circ}\text{C}$, а на высоте 500 м $24,0^{\circ}\text{C}$. Где потенциальная температура больше?

4.2. Ускорение адиабатически перемещающегося воздуха с ненасыщенным паром. Уровень выравнивания температур

Если температура единичного объема воздуха T_i , содержащего ненасыщенный пар, отличается от температуры окружающей атмосферы T_e , то этот объем перемещается по вертикали с ускорением

$$a_i = g \frac{T_i - T_e}{T_e}, \quad (4.7)$$

где g — ускорение свободного падения.

Уровень, на котором температура вертикально перемещающегося воздуха станет равной температуре окружающей атмосферы, называют уровнем выравнивания температур; его высота определяется по формуле

$$z_{\text{выр}} = \frac{T_{i0} - T_{e0}}{\gamma_a - \gamma}, \quad (4.8)$$

где T_{i0} — температура перемещающегося объема воздуха на начальном уровне, T_{e0} — температура окружающей атмосферы на том же уровне.

Работа силы плавучести при вертикальном перемещении воздуха с уровня z_1 на уровень z_2 описывается выражением

$$A = m_i a_i (z_2 - z_1), \quad (4.9)$$

где m_i — масса перемещающейся порции воздуха. Ускорение a_i на уровнях z_1 и z_2 , как правило, неодинаково. Поэтому при вычислении значения A часто используют среднее значение a_i в рассматриваемом слое.

Задачи

4.23. У поверхности Земли единичный объем воздуха с ненасыщенным паром перегрелся на 6°C по сравнению с окружающей атмосферой, температура которой составляет $27,0^\circ\text{C}$. Найти его ускорение. В каком направлении и почему он будет перемещаться? За счет какой энергии производится работа его подъема и расширения?

4.24. На уровне моря температура воздуха $15,0^\circ\text{C}$. Считая пар в воздухе ненасыщенным, найти ускорение, которое приобретет единичный нагретый объем воздуха, поднявшийся под действием внешних сил на 500 м, если вертикальный градиент температуры в нижнем 500-метровом слое составляет $2,0^\circ\text{C}/100$ м. Как и почему изменится результат, если объем воздуха на уровне моря перегреется относительно окружающей атмосферы? Если вертикальный градиент температуры будет больше (меньше) заданного?

4.25. Найти ускорение единичного объема воздуха с ненасыщенным паром, имеющего температуру $10,0^\circ\text{C}$ и находящегося на уровне, где температура окружающей атмосферы равна $15,0^\circ\text{C}$. Куда будет перемещаться данный объем?

4.26. Найти ускорение единичного объема воздуха с ненасыщенным паром, температура которого составляет $20,0^\circ\text{C}$, если температура окружающей атмосферы равна $12,5^\circ\text{C}$. Куда будет перемещаться данный объем воздуха? Определить высоту уровня выравнивания температур, если вертикальный градиент температуры окружающего воздуха равен $-0,5; 0,0; 0,5; 1,0; 1,5^\circ\text{C}/100$ м. Каков смысл двух последних ответов? Как будет в каждом случае изменяться разность температур перемещающегося объема и окружающей атмосферы?

где γ_a — сухоадиабатический градиент; p — атмосферное давление; C — теплота конденсации или парообразования (Дж/кг), вычисляемая по соотношению

$$C = (2501,0 - 2,7t_i) \cdot 10^3, \quad (4.12)$$

где t_i и T_i — температура порции воздуха с насыщенным паром, °C и K соответственно; E — давление насыщенного пара при температуре T_i ; R_c — удельная газовая постоянная сухого воздуха; c_p — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении; R_n — удельная газовая постоянная водяного пара (см. приложение 1). Величину γ_a удобно находить с помощью диаграммы:

$$\gamma_a = (\Delta t_i)_{\text{нас}} / (\Delta t_i)_{\text{сух}}, \quad (4.13)$$

где $(\Delta t_i)_{\text{нас}}$ — изменение температуры воздуха с насыщенным паром при перемещении между заданными уровнями, определяемое по влажной адиабате; $(\Delta t_i)_{\text{сух}}$ — изменение температуры воздуха с ненасыщенным паром при перемещении между теми же уровнями, определяемое по сухой адиабате.

Задачи

4.33. Два объема воздуха находятся при одинаковом давлении 975,0 гПа и имеют одинаковую температуру 15,0 °C. В первом объеме воздуха содержится ненасыщенный водяной пар, а во втором — насыщенный. Найти изменение их температуры, если давление: а) адиабатически уменьшится до 800,0 гПа; б) адиабатически увеличится до 1040,0 гПа. Почему в каждом случае изменения неодинаковы?

4.34. Температура воздуха с насыщенным паром составляет 8,4 °C, давление равно 850,0 гПа. Найти его температуру при адиабатическом изменении давления до 800,0, 750,0 и 700,0 гПа, а также до 900,0, 950,0 и 1000,0 гПа. Чем вызваны найденные изменения температуры? Как и почему изменятся ответы, если при том же начальном давлении увеличится (уменьшится) исходная температура? Если при той же начальной температуре увеличится (уменьшится) исходное давление?

4.35. Воздух с ненасыщенным паром находится при давлении 1030,0 гПа и температуре 22,5 °C. Найти его температуру при адиабатическом уменьшении давления до 900,0 и 800,0 гПа, если при давлении 950,0 гПа пар станет насыщенным. Чем отличаются в данном случае процессы, происходящие при давлении от 1000,0 до 950,0 гПа, от процессов, протекающих при давлении менее 950,0 гПа?

4.36. Воздух с насыщенным водяным паром находится при давлении 875,0 гПа и температуре 4,0 °C. Найти его потенциальную температуру при изменении давления до 800,0, 700,0 и 600,0 гПа, а также до 900,0, 1000,0 и 1050,0 гПа. Как и почему меняется потенциальная температура при влажноадиабатическом процессе в случае уменьшения (увеличения) давления?

4.37.* Вычислить влажноадиабатический градиент для воздуха, находящегося при давлении 1013,3 гПа и температуре 15,0 °С. Как и почему изменится ответ при том же давлении, но более высокой (низкой) температуре? Почему и всегда ли влажноадиабатический градиент меньше сухоадиабатического? Варианты исходных данных см. табл. 3 (приложение 41).

4.38. На сколько градусов охладится воздух с насыщенным паром, адиабатически поднявшийся с уровня 1000,0 гПа на уровень 900,0 гПа, если начальная его температура составляла 20,0 и —20,0 °С? Определить с помощью диаграммы влажноадиабатический градиент для обоих случаев. Чем объясняется различие результатов?

4.39. Температура воздуха 10,0 °С, давление 1000,0 гПа, относительная влажность 79 %. Найти давление на уровне конденсации, температуру отдельного объема воздуха, адиабатически поднявшегося на уровни 900,0, 800,0, 700,0 и 600,0 гПа, и влажноадиабатический градиент при подъеме от 900,0 до 800,0, от 800,0 до 700,0 и от 700,0 до 600,0 гПа. Как и почему изменяется влажноадиабатический градиент по мере подъема воздуха с насыщенным паром? Как это отражается на конфигурации влажных адиабат? Почему в правой нижней части диаграммы они поднимаются круче сухих адиабат, а в левой верхней части параллельны последним?

4.40. На метеорологической станции, расположенной у подножия горы с наветренной стороны, получены следующие данные: температура 10,9 °С, давление 1010,0 гПа, относительная влажность 50 %. На вершине горы давление 720,0 гПа. Найти температуру воздуха, перевалившего через гору и опустившегося к подножию с подветренной стороны, если продукты конденсации полностью выпадут из него при подъеме, а давление у подножия 1005,0 гПа. Вычислить средний градиент температуры в поднимающемся воздухе между уровнем конденсации и вершиной горы. Определить высоту горы по данным для наветренной стороны. Ответ проверить по данным для подветренного склона. Описанные в задаче изменения состояния воздуха изобразить на диаграмме.

4.5. Определение гигрометрических характеристик по диаграмме и их изменение при вертикальных перемещениях воздуха

При известной относительной влажности f фактическая массовая доля водяного пара вычисляется по формуле

$$s_{\phi} = fs_n, \quad (4.14)$$

где s_n — массовая доля насыщенного пара, определяемая по изограммам. Фактическая массовая доля пара может быть найдена также по известным давлению и точке росы (t_d): при заданном давлении надо найти изограмму, проходящую через известную точку росы. Наоборот, по известному давлению и фактической массовой доле пара находится точка росы.

Масса пара, сконденсировавшегося в 1 кг воздуха при его подъеме до любого уровня z , лежащего выше уровня конденсации, определяется по соотношению

$$\Delta s = s_0 - s_{tz}, \quad (4.15)$$

где s_0 и s_{tz} — фактическая массовая доля водяного пара в поднимающемся воздухе на начальном и на заданном уровне соответственно.

Задачи

4.41.* Давление 1020,0 гПа, температура 17,1 °С, относительная влажность 50 %. Найти массовые доли насыщенного пара и пара, фактически находящегося в воздухе, точку росы и дефицит точки росы. Как изменятся три первые величины, если при прочих неизменных условиях одна из заданных величин окажется больше (меньше) другой? Варианты исходных данных см. табл. 8 (приложение 41).

4.42. При зондировании атмосферы получено:

p гПа	1000,0	900,0	800,0	700,0	600,0
t °С	20,0	14,9	10,5	7,1	3,1
s %	6,0	8,0	5,0	3,0	4,0

Найти относительную влажность, точку росы и дефицит точки росы на каждом уровне.

4.43. Давление 970,0 гПа, температура 14,8 °С, точка росы 4,8 °С. Определить массовую долю водяного пара, относительную влажность и дефицит точки росы.

4.44. Давление 1010,0 гПа, температура 26,8 °С, дефицит точки росы 10,0 °С. Определить массовую долю водяного пара и относительную влажность.

4.45. Давление 990,0 гПа, точка росы 12,3 °С, дефицит точки росы 16,0 °С. Определить массовую долю водяного пара и относительную влажность.

4.46. При зондировании атмосферы получено:

p гПа	900,0	830,0	770,0	660,0	630,0
t_d °С	27,2	22,4	20,7	17,3	14,0

Определить массовую долю водяного пара на каждом уровне.

4.47. У поверхности Земли давление 984,2 гПа, температура 30,2 °С, относительная влажность 50 %. Определить давление на уровне конденсации. Построить кривую изменения состояния адиабатически поднимающегося объема воздуха. Найти для этого объема температуру, массовую долю водяного пара, относительную влажность, точку росы и дефицит точки росы на уровнях: начальном; 900,0 гПа; конденсации; 800,0 и 700,0 гПа. Вычислить массу пара, который сконденсируется при подъеме 1 кг воздуха до уровней 800,0 и 700,0 гПа.

4.6. Некоторые термодинамические температуры

Эквивалентная температура t_s вычисляется по соотношению

$$t_s = t + 2,5s; \quad (4.16)$$

если же пар непосредственно переходит в твердую фазу, то

$$t_s = t + 2,84s, \quad (4.17)$$

где t — температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$), s — массовая доля водяного пара (%).

Эквивалентно-потенциальная температура $t_{\text{эп}}$ находится путем приведения эквивалентной температуры к давлению 1000,0 гПа по сухой адиабате.

Псевдопотенциальная температура $t_{\text{пс}}$ определяется следующим образом: из начальной точки нужно подняться по сухой адиабате до уровня конденсации, а затем по влажной адиабате до тех пор, пока весь пар сконденсируется, а продукты конденсации полностью выпадут (влажные адиабаты станут параллельны сухим). После этого нужно сухоадиабатически привести воздух к давлению 1000,0 гПа (псевдоадиабатический процесс). На диаграмме значения $t_{\text{пс}}$ (К) надписаны на влажных адиабатах.

Задачи

4.48. Давление 964,2 гПа, температура $16,5^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 40 %. Найти эквивалентную температуру. Как и почему изменится результат, если при прочих равных условиях температура или относительная влажность будут больше (меньше) заданных?

4.49. При одинаковом давлении 978,1 гПа температура и относительная влажность одного объема воздуха составляют $18,3^{\circ}\text{C}$ и 40 %, а другого — $15,6^{\circ}\text{C}$ и 80 % соответственно. Найти эквивалентную температуру каждого объема. Какой объем имеет более высокую эквивалентную температуру и на сколько градусов она выше? Всегда ли соотношение между эквивалентными температурами двух объемов воздуха с разными температурами будет таким же?

4.50. Давление 983,1 гПа, температура $18,8^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 50 %. Найти эквивалентно-потенциальную температуру. Как и почему изменится результат, если изменятся температура или относительная влажность?

4.51. Давление 1022,0 гПа, температура $6,8^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 60 %. Найти эквивалентную, эквивалентно-потенциальную и псевдопотенциальную температуры адиабатически поднимающегося объема воздуха на уровнях: начальном, конденсации; 900,0, 800,0 и 700,0 гПа. Как и почему изменяются эти температуры в поднимающемся (опускающемся) объеме воздуха? Чем объясняется найденное соотношение между эквивалентно-потенциальной и псевдопотенциальной температурами?

4.52. При зондировании атмосферы получено:

p гПа	1050,0	950,0	850,0	750,0	650,0
t °C	16,8	13,7	7,8	4,3	—2,7
s ‰	6,6	5,2	2,4	1,8	2,0

Найти эквивалентную, эквивалентно-потенциальную и псевдо-потенциальную температуры на указанных уровнях. Почему две последние величины в данной задаче изменяются с увеличением высоты иначе, чем в предыдущей задаче?

4.7. Стратификация слоев атмосферы

Стратификация слоя атмосферы определяется:

а) по вертикальному градиенту температуры γ : при $\gamma < \gamma_a$ слой сухоустойчив, при $\gamma = \gamma_a$ сухобезразличен, а при $\gamma > \gamma_a$ сухонеустойчив; при $\gamma < \gamma_a$ слой влажноустойчив, при $\gamma = \gamma_a$ — влажнобезразличен и при $\gamma > \gamma_a$ влажнонеустойчив;

б) по изменению с высотой потенциальной и псевдопотенциальной температур: при увеличении θ с высотой слой сухоустойчив, при $\theta(z) = \text{const}$ сухобезразличен, а при уменьшении θ с высотой сухонеустойчив; при росте $t_{\text{пс}}$ с высотой слой влажноустойчив, при $t_{\text{пс}}(z) = \text{const}$ влажнобезразличен и при уменьшении $t_{\text{пс}}$ с высотой влажнонеустойчив;

в) по аэрологической диаграмме, для чего строится «кривая стратификации»: если отдельный ее отрезок поднимается круче сухой адиабаты, проходящей через его начало, то данный слой сухоустойчив, если отрезок совпадает с сухой адиабатой, то слой сухобезразличен, если же проходит более полого, то слой сухонеустойчив. Сравнение тех же отрезков с влажными адиабатами позволяет судить о влажноустойчивости или влажнонеустойчивости.

По кривой стратификации можно также определить давление на уровне выравнивания температур, для чего нужно найти точку пересечения кривой стратификации с кривой состояния. Высоту уровня выравнивания температур можно приближенно найти, продолжив от уровня конденсации вверх до уровня выравнивания температур сухую адиабату, отвечающую нижней части кривой состояния.

Задачи

4.53. На высоте 2,5 км температура 3,0 °C, а на высоте 3 км 0,0 °C. Определить стратификацию этого слоя по отношению к вертикальным перемещениям воздуха с ненасыщенным паром. Можно ли в данном случае судить о стратификации по отношению к воздуху с насыщенным паром?

4.54. На высоте 1 м температура 27,2 °C, а на высоте 2 м 26,6 °C. Определить стратификацию слоя 1—2 м. Можно ли судить

о стратификации этого слоя по отношению к воздуху с насыщенным паром? Какими могут быть вертикальные градиенты температуры воздуха в приземном слое атмосферы в умеренных широтах летом в дневные часы? К каким последствиям это приводит?

4.55. При зондировании атмосферы получено:

z м	0	100	300	500	700	1000
t °C	16,2	14,6	12,6	11,2	11,2	12,4
γ_a °C/100 м	0,75	0,80	0,65	0,80	0,70	

(в последней строке результаты расчета). Определить стратификацию каждого слоя. Каковы знаки вертикального градиента температуры при ее уменьшении и росте с высотой? Какие специальные названия имеют в данном случае два последних слоя? Одинакова ли устойчивость найденных устойчивых слоев? Какие слои в атмосфере являются наиболее устойчивыми?

4.56. Охарактеризовать стратификацию по отношению к вертикальным перемещениям воздуха с ненасыщенным, а если возможно; то и с насыщенным паром, если вертикальный градиент температуры равен: 1,2; 1,0; 0,7; 0,0; $-1,2$ °C/100 м. Результаты для воздуха с ненасыщенным паром проверить по изменению потенциальной температуры с высотой.

4.57. На уровне 960,0 гПа температура $-20,0$ °C, а на уровне 800,0 гПа $-28,0$ °C. Определить стратификацию данного слоя по изменению потенциальной температуры с высотой. Проверить ответ по диаграмме, не находя потенциальную температуру. Если с нижнего уровня начнет под действием внешней силы перемещаться объем воздуха с ненасыщенным паром, то какова будет его температура по сравнению с температурой окружающей атмосферы в пределах данного слоя? Каким будет для этого объема знак ускорения на всех уровнях? Куда объем начнет перемещаться после прекращения действия внешней силы? Ответить на те же вопросы для объема воздуха, который начнет опускаться с верхнего уровня. Способствует данный слой или препятствует вертикальному перемещению воздуха? Какое значение это имеет для развития турбулентного перемешивания? Ответить на те же вопросы для объема воздуха с насыщенным паром.

4.58. На уровне 960,0 гПа температура $-6,0$ °C, а на уровне 800,0 гПа $-24,0$ °C. Ответить на вопросы предыдущей задачи.

4.59. При зондировании атмосферы получено:

p гПа	1020,0	950,0	900,0	820,0	660,0	610,0	550,0
t °C	4,1	$-8,9$	$-13,0$	$-19,0$	$-22,0$	$-31,0$	$-30,0$

Определить стратификацию каждого слоя. Найти высоту уровня выравнивания температур для объема воздуха, поднимающегося с нижнего уровня без перегрева, если относительная влажность на этом уровне 60 %. Определить массу пара, сконденсировавшегося в 1 кг воздуха при его подъеме с нижнего уровня до уровня выравнивания температур. Ответить на те же вопросы для объема

воздуха, перегревшегося на нижнем уровне на $4,6^{\circ}\text{C}$ по сравнению с окружающей атмосферой. Как влияет перегрев при прочих неизменных условиях на высоту уровня выравнивания температур и на массу сконденсировавшегося пара?

4.60.* При зондировании атмосферы получено:

p гПа	1030,0	940,0	870,0	720,0	610,0	490,0	400,0
t $^{\circ}\text{C}$	22,3	9,2	4,0	-10,9	-8,0	-19,4	-19,4
t_d $^{\circ}\text{C}$	8,5	2,0	-7,0	-13,5	-20,3	-32,8	-29,2

Определить массовые доли водяного пара и насыщенного водяного пара, относительную влажность, потенциальную, эквивалентную и псевдопотенциальную температуры на указанных уровнях (результаты представить в виде таблицы); стратификацию каждого слоя (ответы проверить по изменению потенциальной и псевдопотенциальной температур с высотой); давление на уровне конденсации и его высоту для объема воздуха, поднимающегося с начального уровня без перегрева; давление на уровне выравнивания температур и высоту этого уровня для того же объема; температуру, массовые доли водяного пара и насыщенного водяного пара, относительную влажность, точку росы, потенциальную, эквивалентную, псевдопотенциальную температуру и ускорение того же объема на уровнях: начальном, 900,0 гПа, конденсации, 700,0 гПа и на уровне выравнивания температур (составить таблицу); массу пара, сконденсировавшегося при подъеме 1 кг воздуха до уровня выравнивания температур. Варианты исходных данных см. табл. 9 (приложение 41).

Глава 5

ЛУЧИСТАЯ ЭНЕРГИЯ В АТМОСФЕРЕ И НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

5.1. Солнечная радиация на верхней границе атмосферы

К солнечной радиации с некоторыми ограничениями применимы законы теплового излучения черных тел:

а) закон смещения (закон Вина)

$$\lambda_{\text{max}} T = 2898, \quad (5.1)$$

где λ_{max} — длина волны (мкм), на которую приходится наибольшая энергия в спектре излучения Солнца, T — яркостная температура Солнца (К);

б) закон Стефана—Больцмана

$$E = \sigma T^4, \quad (5.2)$$

где E — энергетическая светимость Солнца (Вт/м^2), σ — постоянная Стефана—Больцмана (см. приложение 1), T — радиационная температура Солнца (К).

Энергетическая освещенность солнечной радиацией горизонтальной поверхности на верхней границе атмосферы определяется по соотношению

$$S'_0 = S_0 \sin h_0, \quad (5.3)$$

где S_0 — солнечная постоянная (см. приложение 1), h_0 — высота Солнца в момент, для которого вычисляется S'_0 . Значения S'_0 принято выражать в кВт/м^2 с точностью до сотых. Значение h_0 на широте φ в момент, когда часовой угол Солнца равен τ_0 , определяется по формуле

$$\sin h_0 = \sin \varphi \sin \delta_0 + \cos \varphi \cos \delta_0 \cos \tau_0, \quad (5.4)$$

где δ_0 — склонение Солнца в истинный полдень данных суток. При решении задач можно использовать значения δ_0 для 1984 г., приведенные в приложении 5. Из (5.4) следует, что в истинный полдень, когда $\tau_0 = 0,0^\circ$,

$$h_0 = 90 - \varphi + \delta_0. \quad (5.5)$$

Суточная энергетическая экспозиция солнечной радиации на горизонтальную поверхность на верхней границе атмосферы для любой даты вычисляется по формуле

$$\sum_{\text{сут}} S'_0 = \frac{S_0 t}{\pi} (\tau_{0,0} \sin \varphi \sin \delta_0 + \cos \varphi \cos \delta_0 \sin \tau_{0,0}), \quad (5.6)$$

где t — период суточного вращения Земли (см. приложение 1), $\tau_{0,0}$ — часовой угол Солнца в момент восхода ($-\tau_{0,0}$) или захода ($+\tau_{0,0}$), определяемый из соотношения

$$\cos \tau_{0,0} = -\tan \varphi \tan \delta_0, \quad (5.7)$$

причем в формуле (5.6) в первом слагаемом $\tau_{0,0}$ выражено в радианах, а во втором — в градусной мере. На широтах более $66,5^\circ$ в период полярного дня $\tau_{0,0} = 180^\circ$. Величину $\sum_{\text{сут}} S'_0$ иногда для

краткости называют теоретической суточной суммой солнечной радиации. Этот термин будет использоваться и в настоящем задатнике. Значения $\sum_{\text{сут}} S'_0$ принято выражать в МДж/м^2 с точ-

ностью до сотых.

При решении ряда задач необходимо знать моменты восхода и захода Солнца в часах и минутах. Для их нахождения следует значение $\tau_{0,0}$, полученное по формуле (5.7), перевести из градусной меры в единицы времени ($1^\circ = 4$ мин, $1' = 4$ с). Тогда получится истинное солнечное время восхода и захода по астрономическому счету, т. е. отсчитываемое от истинного солнечного

полудня. Для перехода к гражданскому счету, ведущемуся от предыдущей полуночи, используют соотношение

$$\tau_{\odot, \text{г}} = 12 \text{ ч } 00 \text{ мин } 00 \text{ с} \mp \tau_{\odot, \text{в}},$$

где знак минус соответствует моменту восхода, а знак плюс — моменту захода. Для перехода же от $\tau_{\odot, \text{в}}$ к соответствующим моментам летнего или зимнего декретного времени (московского или поясного) применяются правила, изложенные в курсах астрономии.

Задачи

5.1. При экстраполяции наземных, ракетных и спутниковых измерений на верхнюю границу атмосферы получено следующее распределение спектральной плотности энергетической освещенности солнечной радиацией, перпендикулярной к лучам поверхности (S_{λ} , кВт/(м²·мкм)) по длинам волн (λ мкм):

λ	S_{λ}	λ	S_{λ}	λ	S_{λ}	λ	S_{λ}	λ	S_{λ}
0,16	0,000	0,34	1,076	0,52	1,833	0,70	1,369	2,00	0,103
0,18	0,001	0,36	1,068	0,54	1,783	0,72	1,314	3,00	0,031
0,20	0,011	0,38	1,120	0,56	1,695	0,75	1,235	4,00	0,009
0,22	0,057	0,40	1,429	0,58	1,715	0,80	1,107	5,00	0,004
0,24	0,063	0,42	1,747	0,60	1,666	1,00	0,746	6,00	0,002
0,26	0,130	0,44	1,810	0,62	1,602	1,20	0,484	7,00	0,001
0,28	0,222	0,46	2,066	0,64	1,544	1,40	0,336	8,00	0,001
0,30	0,514	0,48	2,074	0,66	1,486	1,60	0,244	10,00	0,000
0,32	0,830	0,50	1,942	0,68	1,427	1,80	0,159		

Представить графически и проанализировать спектр солнечной радиации, приходящей к Земле. Найти по графику длину волны, на которую приходится наибольшая энергия. В какой области спектра лежит эта волна? Проинтегрировать функцию $S_{\lambda}(\lambda)$ в пределах λ от 0,16 до 10,00 мкм и найти солнечную постоянную. Указать причины отличия найденного результата от значения S_0 , приведенного в приложении 1. Вычислить доли ультрафиолетовой ($\lambda < 0,40$ мкм), видимой ($\lambda = 0,40 - 0,76$ мкм) и инфракрасной ($\lambda > 0,76$ мкм) радиации в общем притоке солнечной радиации к Земле.

Указание. При вычислении определенного интеграла функции $S_{\lambda}(\lambda)$ в указанных пределах использовать общую формулу трапеций.

5.2. За пределами атмосферы видимая часть солнечного спектра соответствует излучению черного тела с яркостной тем-

пературой $T = 6116$ К. Вычислить длину волны $\lambda_{\max}$, имеющей наибольшую энергию. Сопоставляется ли результат с полученным в предыдущей задаче? Какая из величин, фигурирующих в задаче (T и $\lambda_{\max}$), в действительности находится из измерений и экстраполяцией за пределы атмосферы, а какая вычисляется?

5.3. Излучение Солнца примерно соответствует излучению черного тела с радиационной температурой 5805 К. Вычислить энергетическую светимость Солнца и полный поток излучения всей его поверхности. Найти солнечную постоянную, считая Солнце точечным черным источником, находящимся в центре сферы, радиус которой равен среднему расстоянию между центрами Солнца и Земли. Результат сравнить со значением S_0 , полученным в задаче 5.1, и с приведенным в приложении 1. Перечислить возможные причины расхождения трех результатов.

5.4. Вычислить энергетическую освещенность солнечной радиацией, перпендикулярной к лучам поверхности на верхней границе атмосферы 2 января (Земля в перигелии) и 4 июля (Земля в афелии). Найти относительные отклонения найденных значений от солнечной постоянной.

5.5. Вычислить энергию солнечного излучения, приходящего к верхней границе всей атмосферы за час, сутки и год. Найти средние по всей поверхности атмосферы значения энергетической экспозиции за те же интервалы времени. Высотой атмосферы по сравнению с радиусом Земли пренебречь.

5.6. Вычислить энергетическую освещенность солнечной радиацией горизонтальной поверхности на верхней границе атмосферы при высотах Солнца 0, 15, 30, 45, 60, 75 и 90°. Построить и проанализировать график функции $S'_0(h_\odot)$.

5.7. Вычислить теоретические суточные суммы солнечной радиации 21 июня на экваторе и 30, 60 и 90° с. ш. Построить график зависимости $\sum_{\text{сут}} S'_0$ от широты. Чем объясняется найденное ши-

ротное изменение этой величины в заданный день? Сохранится ли оно в другое время года?

5.8. Вычислить теоретические суточные суммы солнечной радиации 22 декабря на экваторе и 30, 60 и 90° с. ш. Результаты нанести на график, построенный к задаче 5.7. Как и почему изменились значения $\sum_{\text{сут}} S'_0$ на каждой из рассмотренных широт? Как

сказывается широтное различие годового изменения этой величины на амплитуде годового хода температуры почвы и нижнего слоя атмосферы?

5.9. Вычислить теоретические суточные суммы солнечной радиации на экваторе и 30, 60 и 90° с. ш. в дни весеннего и осеннего равноденствия, считая, что в эти дни $\delta_\odot = 0$. Результаты нанести на график, построенный к задачам 5.7 и 5.8, и произвести сравнение.

5.2. Ослабление солнечной радиации при ее прохождении через атмосферу

Ослабление прямой солнечной радиации при ее прохождении от верхней границы атмосферы до земной поверхности характеризуется законом Буге

$$S = S_0 P^m, \quad (5.8)$$

где S — энергетическая освещенность прямой солнечной радиацией, перпендикулярной к лучам площадки у земной поверхности; S_0 — солнечная постоянная; P — интегральный коэффициент прозрачности атмосферы; m — оптическая масса атмосферы, пройденная солнечными лучами. В настоящей главе будем для краткости называть P просто коэффициентом прозрачности, а S — прямой радиацией на перпендикулярную поверхность. Значения m при разной высоте Солнца $h_\odot$ помещены в таблице Бемпорада (приложение 6). При $h_\odot > 30^\circ$ они могут быть найдены также по формуле

$$m = 1/\sin h_\odot. \quad (5.9)$$

Выражение для коэффициента прозрачности в соответствии с формулой (5.8) имеет вид

$$P = (S/S_0)^{1/m}. \quad (5.10)$$

Методика приведения значений P , найденных при разных m , к $m=2$ разработана С. И. Сивковым. Она заключается в следующем:

а) по измеренному S и дате измерения находится поправка ΔS для приведения S к среднему расстоянию $\bar{r}$ от Земли до Солнца (приложение 7), после чего вычисляется

$$S_p = S + \Delta S; \quad (5.11)$$

б) по S_p и высоте Солнца S_p приводится к $h_\odot = 30^\circ$ ($m=2$), т. е. определяется $S_{p, 30^\circ}$ (приложение 8);

в) по $S_{p, 30^\circ}$ находится приведенный к $m=2$ коэффициент прозрачности P_2 (приложение 9).

Другими характеристиками ослабления солнечной радиации при прохождении через атмосферу могут служить коэффициент ослабления c , введенный В. Г. Кастровым:

$$c = \frac{S_0 - S}{Sm}, \quad (5.12)$$

и фактор мутности

$$T = \lg P / \lg P_i, \quad (5.13)$$

где P_i — коэффициент прозрачности идеальной атмосферы, значение которого изменяется в зависимости от m :

m	1	2	3	4	5	8	10
P_i	0,906	0,916	0,922	0,927	0,935	0,941	0,946

Значения T определяются с точностью до сотых.

Ослабление радиации, вызванное только молекулярным рассеянием, характеризуется коэффициентом молекулярного рассеяния σ_m , представляющим собою долю поступившей радиации, рассеянную единицей объема воздуха. Для любой длины волны λ

$$\sigma_m \sim 1/\lambda^4. \quad (5.14)$$

Задачи

5.10. Найти оптические массы атмосферы, проходимые солнечными лучами при всех высотах Солнца, кратных 10° . Построить график функции $m(h_\odot)$. Объяснить причины найденного характера данной зависимости. Использовать приложение 6.

5.11. Найти оптические массы атмосферы, проходимые солнечными лучами в полдень 21 июня и 22 декабря на широтах 68° , 56° и 41° с. ш. Какое значение имеет изменение m с широтой и в течение года для прихода солнечной радиации к земной поверхности?

5.12. При высоте Солнца 30° прямая радиация на перпендикулярную поверхность составила $0,72 \text{ кВт/м}^2$, а при высоте Солнца 55° — $0,82 \text{ кВт/м}^2$. Вычислить коэффициент прозрачности для обоих случаев. Если предположить, что исходные данные получены в один и тот же день в одном и том же пункте, то можно ли утверждать, что за время, прошедшее между измерениями, изменилось оптическое состояние атмосферы? Какая другая причина могла вызвать изменение P ?

5.13. В некотором пункте в один и тот же день дважды измерена прямая радиация на перпендикулярную поверхность: при высоте Солнца 90° она составила $0,98 \text{ кВт/м}^2$, а при высоте Солнца 30° — $0,70 \text{ кВт/м}^2$. Полагая, что в период между измерениями оптическое состояние атмосферы не изменилось, вычислить коэффициент прозрачности и солнечную постоянную. Почему полученное значение S_0 отличается от значения, принятого в настоящее время (приложение 1)?

5.14. 18 сентября при высоте Солнца 42° прямая радиация на перпендикулярную поверхность составила $0,63 \text{ кВт/м}^2$. Найти коэффициент прозрачности при оптической массе, равной 2.

5.15. 1 сентября при высоте Солнца 30° прямая радиация на перпендикулярную поверхность составляла $0,68 \text{ кВт/м}^2$, а при 10° — $0,36 \text{ кВт/м}^2$. Вычислить коэффициенты ослабления s (по Кастрову) и коэффициенты прозрачности — неприведенные и при $m=2$. Изменилось ли состояние атмосферы в интервале между наблюдениями? Почему неприведенный коэффициент прозрачности не позволяет правильно ответить на предыдущий вопрос? Чем объясняется полученное соотношение между неприведенным и приведенным коэффициентами прозрачности в каждом случае?

5.16. При высоте Солнца 42° прямая радиация на перпендикулярную поверхность равна $0,63 \text{ кВт/м}^2$. Найти фактор мутности. Каков смысл полученного результата?

5.17. Л. И. Мамонтова и С. П. Хромов нашли, что на Европейской территории СССР воздушные массы в среднем характеризуются следующими факторами мутности: континентальный арктический воздух — 2,45; морской воздух умеренных широт — 2,66; континентальный воздух умеренных широт — 3,09; континентальный тропический воздух — 3,49. Принимая средний коэффициент прозрачности идеальной атмосферы равным 0,92, найти средний коэффициент прозрачности для каждой из указанных воздушных масс. Как изменяются фактор мутности и коэффициент прозрачности при изменении запыленности воздуха?

5.18. Условно принимая энергию каждого из потоков, поступающих на верхнюю границу атмосферы в виде красных ($\lambda \approx 0,8$ мкм) и в виде фиолетовых ($\lambda \approx 0,4$ мкм) лучей солнечного спектра, за 100 единиц, и полагая, что вследствие молекулярного рассеяния в атмосфере теряется 5 единиц из первого потока, определить количество единиц второго потока, доходящих до земной поверхности. Ослаблением потоков под влиянием других причин, кроме молекулярного рассеяния, в данном случае пренебречь.

5.3. Приход солнечной радиации на земную поверхность

Прямая радиация на перпендикулярную поверхность (S) измеряется непосредственно или вычисляется по формуле (5.8). Энергетическая освещенность прямой солнечной радиацией горизонтальной поверхности (S') также измеряется непосредственно или вычисляется по формуле

$$S' = S \sin h_{\odot}. \quad (5.15)$$

В настоящей главе будем для краткости называть S' прямой радиацией на горизонтальную поверхность.

Энергетическая освещенность прямой солнечной радиацией поверхности, наклоненной под углом α к горизонту и ориентированной в любую сторону (S_n), составляет

$$S_n = S [\sin h_{\odot} \cos \alpha + \cos h_{\odot} \sin \alpha \cos (\psi_{\odot} - \psi_n)], \quad (5.16)$$

где $\psi_{\odot}$ — азимут Солнца, ψ_n — азимут поверхности. Значения $\psi_{\odot}$ и ψ_n отсчитываются от юга к северу через запад (от 0 до 180°) или через восток (от 0 до -180°). При таком отсчете ψ_n есть угол между направлением на юг и горизонтальной проекцией нормали к поверхности. (В геодезии и топографии более принято $\psi_{\odot}$ и ψ_n отсчитывать от севера по часовой стрелке — от 0 до 360° .)

В настоящем задачнике будем для краткости величину S_n называть прямой радиацией на наклонную поверхность.

Энергетическая освещенность рассеянной солнечной радиацией (D) измеряется непосредственно. Ниже будем величину D называть просто рассеянной радиацией.

Энергетическая освещенность суммарной солнечной радиацией (Q) измеряется непосредственно или вычисляется по формуле

$$Q = S' + D. \quad (5.17)$$

Ниже для краткости будем называть Q суммарной радиацией.

Так называемые мгновенные (правильнее — секундные) значения S , S' , D и Q выражаются в кВт/м^2 с точностью до сотых.

Возможные и действительные часовые, суточные, месячные и годовые энергетические экспозиции солнечной радиации на горизонтальную поверхность определяют с помощью актинометрических самописцев или путем численного интегрирования функций, выражающих зависимость радиации от времени. Для этого обычно по результатам отдельных измерений мгновенных значений или по известным энергетическим экспозициям за меньшие интервалы строят график указанной зависимости для заданного большего интервала. При численном интегрировании используют общую формулу трапеций. Ниже будем перечисленные энергетические экспозиции называть часовыми, суточными и т. д. *суммами* соответствующей (прямой, рассеянной и т. д.) радиации и обозначать, например, $\sum_{\text{ч}} S'$, $\sum_{\text{сут}} D$ и т. п. Все эти суммы выражают в МДж/м^2 : часовые и суточные с точностью до сотых, месячные — до единиц, годовые — до десятков.

Действительные суммы ($\sum_{\text{д}}$) суммарной радиации за те или иные интервалы можно приближенно определить по теоретически рассчитанным возможным ее суммам ($\sum_{\text{в}}$) с помощью, например, формулы С. И. Савинова

$$\sum_{\text{д}} (S' + D) = [\sum_{\text{в}} (S' + D)] (1 - C\bar{n}), \quad (5.18)$$

где C — облачный коэффициент, $\bar{n}$ — среднее количество облаков за интервал, для которого вычисляется $\sum_{\text{д}} (S' + D)$.

Задачи

5.19. Вычислить прямую радиацию на перпендикулярную поверхность при высоте Солнца 53° и коэффициенте прозрачности 0,751. Найти долю вычисленной величины от солнечной радиации, приходящей к такой же поверхности на верхней границе атмосферы. Как изменятся ответы, если при том же оптическом состоянии атмосферы увеличится (уменьшится) высота Солнца или при постоянной высоте солнца изменится состояние атмосферы?

5.20. Вычислить прямую радиацию на перпендикулярную поверхность на 56° с. ш. 15 июля при высотах Солнца 10, 20, 30° и т. д. до максимальной высоты, возможной в данный день, если неприведенный коэффициент прозрачности равен 0,710. Построить и проанализировать график дневного изменения прямой радиации.

Почему прямая радиация изменяется с изменением высоты Солнца при неизменной прозрачности атмосферы? Какие периодические изменения в связи с этим испытывает прямая радиация? Какова широтная ее изменчивость, связанная с зависимостью от высоты Солнца?

Указание. Каждую высоту Солнца отложить на графике дважды: до и после полудня.

5.21. Вычислить прямую радиацию на перпендикулярную поверхность при высотах Солнца 30 и 60°, если коэффициент прозрачности составляет 0,500; 0,600; 0,700; 0,800. Построить и проанализировать график зависимости $S(P)$ при заданных высотах Солнца.

5.22. Прямая радиация на перпендикулярную поверхность в Каменной Степи (51° с. ш.) 9 июля 1951 г.:

Срок, ч	5	7	9	11	13	15	17	19
кВт/м ²	0,50	0,74	0,86	0,91	0,91	0,91	0,73	0,42

Определив моменты восхода и захода Солнца, построить и проанализировать график суточного хода S . Вычислить действительную суточную сумму S за данные сутки. При анализе графика отметить: было ли изменение прямой радиации беспорядочным или упорядоченным, какой вид оно имело (монотонный рост, простая волна, двойная волна и т. п.); в какое время суток, сколько всего часов и минут прямая радиация была равна нулю; в какое время суток и на протяжении какого интервала времени она была положительной; время наступления максимума и его значение; типичен ли такой ход для ясного дня или дня с переменной облачностью.

5.23. Применить общую формулу трапеций для вычисления действительной суточной суммы прямой радиации по наблюдениям, выполненным на 60° с. ш. 1 сентября в стандартные актинометрические сроки (6 30, 9 30, 12 30, 15 30, 18 ч 30 мин).

5.24.* Средние часовые действительные суммы прямой радиации на перпендикулярную поверхность (МДж/м²) в Воейково:

Месяц	Интервал, ч							
	0—1	3—4	6—7	9—10	12—13	15—16	18—19	21—22
Июнь	0	0,21	1,17	1,51	1,38	1,30	0,84	0
Декабрь	0	0	0	0,04	0,17	0	0	0

Построить и проанализировать график суточного хода. Вычислить действительные суточные суммы. Как и почему различается

суточный ход прямой радиации в одном и том же пункте в разные месяцы? Чем вызвано различие суточных сумм? Как оно изменится для более северных (южных) широт при неизменном состоянии атмосферы? Варианты исходных данных см. табл. 10 (приложение 41).

5.25. Средние часовые действительные суммы прямой радиации на перпендикулярную поверхность (МДж/м^2) в июне:

Пункт	Интервал, ч							
	0—1	3—4	6—7	9—10	12—13	15—16	18—19	21—22
Якутск	0,00	0,38	1,30	1,67	1,59	1,30	0,96	0,04
Карадаг	0,00	0,00	1,42	2,09	2,05	1,84	0,92	0,00

Построить и проанализировать график суточного хода. Вычислить действительные суточные суммы прямой радиации. Почему в рассмотренных пунктах, несмотря на различную их широту, суммы прямой радиации в июне различаются незначительно? Сохранится ли такое соотношение в другие месяцы?

5.26. Действительные месячные суммы прямой радиации на перпендикулярную поверхность в одном из пунктов на 60° с. ш.:

Месяц	II	IV	VI	VIII	X	XII
$\sum_{\text{мес}} S \text{ МДж/м}^2$	112	394	606	450	137	31

Построить и проанализировать график годового хода месячных сумм. Вычислить действительную годовую сумму прямой радиации. Как и почему изменятся график и сумма для более северного (южного) пункта при неизменном состоянии атмосферы?

5.27. Прямая радиация на перпендикулярную поверхность при высоте Солнца 34° составила $0,78 \text{ кВт/м}^2$. Вычислить прямую радиацию на горизонтальную поверхность. Всегда ли между этими величинами сохраняется такое соотношение?

5.28. Вычислить прямую радиацию на горизонтальную поверхность при высоте Солнца 36° и коэффициенте прозрачности $0,722$. Как и почему изменится ответ при изменении одной из заданных величин?

5.29. Вычислить прямую радиацию на горизонтальную поверхность на 60° с. ш. в истинный полдень 21 июня и 22 декабря, если прямая радиация на перпендикулярную поверхность 21 июня равнялась $0,70 \text{ кВт/м}^2$, а 22 декабря $0,14 \text{ кВт/м}^2$. Почему 22 декабря на перпендикулярную поверхность поступает меньше прямой радиации, чем 21 июня? Во сколько раз изменился приход прямой радиации на перпендикулярную и горизонтальную поверхности 22 декабря по сравнению с ее приходом 21 июня? Почему их изменение неодинаково?

5.30. Найти отношение значений прямой радиации на горизонтальную поверхность на 41 и 60° с. ш. в полдень 7 мая, если значения прямой радиации на перпендикулярную поверхность были на этих широтах одинаковыми. Почему значения прямой радиации на перпендикулярную поверхность в один и тот же момент на разных широтах могут быть одинаковыми несмотря на различную высоту Солнца? Какая прямая радиация — на перпендикулярную или горизонтальную поверхность — сильнее зависит от высоты Солнца?

5.31. Вычислить действительную часовую сумму прямой радиации на горизонтальную поверхность, если за этот час средняя высота Солнца 30°, а коэффициент ослабления $c = 0,25$.

5.32. Вычислить прямую радиацию на перпендикулярную и горизонтальную поверхности в полдень 21 июня и 22 декабря на широтах северного полушария, кратных 15° (начиная с 0°), если коэффициент прозрачности всюду равен 0,700. Результат представить графически. Чем объясняется широтное изменение этих величин? Почему вторая величина изменяется с широтой больше первой? Чем отличается широтное изменение каждой величины 21 июня от ее изменения 22 декабря?

5.33. Высота Солнца и прямая радиация на перпендикулярную поверхность в Каменной Степи (51° с. ш.) 13 июля 1951 г.:

Срок, ч	5	7	9	11	13	15	17	19
$h_{\odot}$	7°30'	25°49'	43°23'	57°27'	59°15'	46°04'	27°38'	9°47'
S кВт/м ²	0,48	0,71	0,80	0,84	0,84	0,82	0,68	0,37

Вычислить для каждого срока прямую радиацию на горизонтальную поверхность. Определив время восхода и захода Солнца, построить и проанализировать графики суточного хода S и S' . Вычислить действительные суточные суммы этих величин. Как изменится соотношение сумм в том же пункте в зимний день или в указанный день, но на других широтах?

Указания к анализу графика см. в задаче 5.22.

5.34. По Н. Н. Калитину, средние действительные месячные суммы прямой радиации на перпендикулярную и горизонтальную поверхности в Павловске (Ленинградская область):

Месяц	II	IV	VI	VIII	X	XII
$\sum_{\text{мес}} S$ МДж/м ² . . .	112	394	594	450	137	31
$\sum_{\text{мес}} S'$ МДж/м ² . . .	26	184	341	228	40	3

Построить и проанализировать график годового хода этих величин. Найти их годовые суммы. Вычислить отношение (%)

$\sum_{\text{мес}} S' / \sum_{\text{мес}} S$ для указанных месяцев. Построить и рассмотреть график его годового хода. На каких широтах и в какие месяцы рассматриваемое отношение приближается к единице?

5.35. Действительные месячные суммы прямой радиации на горизонтальную поверхность (МДж/м²) в Ленинграде и в Воейково (30 км от центра Ленинграда):

Станция	II	IV	VI	VIII	X	XII
Ленинград	13	163	301	167	25	0
Воейково	21	193	327	184	21	4

Построить и проанализировать график годового хода. Найти годовые суммы. На сколько процентов одна из них больше другой? Указать возможные причины различия в этих двух пунктах, расположенных близко друг к другу.

5.36. По И. Н. Ярославцеву, средние годовые действительные суммы прямой радиации на перпендикулярную и на горизонтальную поверхности в Павловске равны 3460 и 1670 МДж/м², в Ташкенте 7300 и 4250 МДж/м². Найти отношение вторых сумм к первым. Как оно изменится для пункта, расположенного севернее Павловска, и для пункта, находящегося южнее Ташкента?

5.37.* При высоте Солнца 53°29' и азимуте — 20°00' прямая радиация на перпендикулярную поверхность составляет 0,82 кВт/м². Вычислить прямую радиацию на горизонтальную поверхность, а также на склоны крутизной 30, 60 и 90° (вертикальная стена), обращенные на север, юг, восток и запад. Проанализировать результаты. Как они изменятся при изменении высоты и азимута Солнца? Варианты исходных данных см. табл. 11 (приложение 41).

5.38. Средняя за месяц рассеянная радиация в одном из пунктов на 42° с. ш. в июне:

Срок, ч	5	7	9	11	13	15	17	19
D кВт/м ²	0,02	0,11	0,20	0,21	0,21	0,18	0,11	0,02

Условно принимая, что эти данные относятся к 15 июня и что поступление рассеянной радиации на земную поверхность начинается за 1 ч до восхода Солнца и прекращается через 1 ч после его захода, построить и проанализировать график суточного хода D . Вычислить среднюю для данного месяца суточную сумму. Какие факторы и как влияют на суточный ход D ? Как изменится суточная сумма при рассмотрении зимнего месяца или более северного (южного) района? Указания к анализу графика см. в задаче 5.22.

5.39. Средние за месяц суточные суммы рассеянной радиации (МДж/м²):

Пункт	II	IV	VI	VIII	X	XII
Якутск	2,34	7,08	8,50	5,86	2,47	0,50
Тбилиси	4,23	6,57	6,57	6,15	4,14	2,60

Построить кривые годового хода и указать возможные причины его различия в этих пунктах.

5.40. Средние месячные суммы рассеянной радиации (МДж/м²):

Пункт	II	IV	VI	VIII	X	XII
Игарка	38	247	310	234	63	0
Смоленск	80	193	268	247	92	29
Ашхабад	130	226	193	172	126	88

Построить график годового хода, сравнить с графиком из предыдущей задачи и указать возможные причины различия. Вычислить годовые суммы. Почему полученные результаты различаются между собою не очень значительно?

5.41. Годовые суммы рассеянной радиации для северного полушария, по Т. Г. Берлянд:

Широта	80°	70°	60°	50°	40°
$\sum D$ МДж/м ²	1970	1670	1550	1630	2050

Построить и проанализировать график широтного изменения D .
 5.42. Найти суммарную радиацию, если при высоте Солнца 30° прямая радиация на перпендикулярную поверхность составляет 0,42 кВт/м², а рассеянная радиация 0,14 кВт/м². Может ли рассеянная радиация быть больше прямой радиации на горизонтальную поверхность? Может ли суммарная радиация состоять только из прямой или только из рассеянной? От каких факторов зависит соотношение между прямой и рассеянной радиацией, поступающей к земной поверхности?

5.43. В Днепропетровской области 7 июля 1961 г. получено:

Срок, ч	7	9	11	13	15	17	19
S' кВт/м ²	0,17	0,50	0,70	0,70	0,52	0,27	0,03
D кВт/м ²	0,06	0,10	0,11	0,14	0,13	0,10	0,06

Вычислить для каждого срока суммарную радиацию и вклад в нее (%) прямой и рассеянной радиации. Построить диаграмму

дневного хода двух последних величин. Чем объясняется изменение вклада в суммарную радиацию прямой и рассеянной радиации в течение дня?

Указание. По оси абсцисс отложить сроки, по оси ординат — вклад (%). Для каждого срока нанести вклад прямой радиации, а над ней — вклад рассеянной (их сумма должна равняться 100 %). Нижние точки соединить ломаной, а верхние — горизонтальной прямой линией. Две получившиеся площади выделить разной штриховкой.

5.44. Вычислить средние действительные суточные суммы суммарной радиации в январе и июле в пункте, где средние в эти месяцы возможные суточные ее суммы равны соответственно 2,22 и 28,73 МДж/м², среднее количество облаков 8,3 и 6,1 балла, облачные коэффициенты в формуле С. И. Савинова 0,060 и 0,045.

5.45.* Действительные месячные суммы прямой радиации на горизонтальную поверхность и рассеянной радиации в Куйбышеве:

Месяц	II	IV	VI	VIII	X	XII
$\sum_{\text{мес}} S' \text{ МДж/м}^2$	59	222	469	331	80	17
$\sum_{\text{мес}} D \text{ МДж/м}^2$	105	276	260	218	96	42

Вычислить месячные и годовую суммы суммарной радиации. Построить и проанализировать график годового хода месячных сумм. Найти вклады прямой и рассеянной радиации в месячные и в годовую сумму суммарной радиации. Построить график годового изменения этих вкладов (см. указание к задаче 5.43). Соотношение их в годовой сумме представить в виде линейной или круговой диаграммы. Варианты исходных данных см. табл. 12 (приложение 41).

5.4. Отражение и поглощение солнечной радиации деятельным слоем

Коэффициент отражения солнечной радиации деятельным слоем — альбедо — определяется как отношение

$$A = Q_{\text{отр}}/Q, \quad (5.19)$$

где $Q_{\text{отр}}$ — отраженная солнечная радиация, т. е. отразившаяся часть суммарной радиации (кВт/м²), Q — суммарная радиация (кВт/м²). Альбедо выражается в долях единицы с точностью до сотых, или в процентах. Часть суммарной радиации (кВт/м²), поглощенная деятельным слоем, составляет

$$Q_n = Q(1 - A). \quad (5.20)$$

Эту величину называют также остаточной солнечной радиацией или коротковолновым радиационным балансом. В этих случаях ее обозначают B_n .

Задачи

5.46. Альbedo свежевспаханного влажного чернозема около 10 %, а чистого сухого снега около 90 %. Если суммарная радиация на этих участках одинакова, то какой участок больше поглощает и во сколько раз? Как влияет различие в альbedo на количество поглощенной радиации? Как это сказывается на тепловом режиме разных участков деятельного слоя и прилегающих к нему слоев атмосферы при одинаковом поступлении солнечной радиации?

5.47. Средние значения альbedo (%) в Ленинграде и Воейково:

Пункт	II	IV	VI	VIII	X	XII
Ленинград	58	17	17	18	19	47
Воейково	71	28	18	19	22	69

Построить график и указать возможные причины различия годового хода альbedo в этих пунктах.

5.48. Средние значения альbedo поверхности Черного моря летом:

$h_{\odot}^{\circ}$	20	30	40	50	60
A %	10	7	6	6	5

Построить график функции $A(h_{\odot})$ и указать причину уменьшения альbedo моря при увеличении высоты Солнца (волнением моря пренебречь).

5.49. Вычислить количество солнечной радиации, поглощаемой поверхностью снега, альbedo которого составляет 80 %, в истинный полдень 20 февраля на 60° с. ш., если коэффициент ослабления s , по В. Г. Кастрову, равен 0,25, а рассеянная радиация составляет $0,07 \text{ кВт/м}^2$.

5.50.* Средние месячные значения альbedo в Куйбышеве:

Месяц	II	IV	VI	VIII	X	XII
A %	72	18	15	14	20	66

Построить график и указать возможные причины годового хода альbedo. Используя данные задачи 5.45*, вычислить месячные и годовые суммы поглощенной и отраженной солнечной радиации. Результат для каждого месяца представить в виде линейной диаграммы. Чем объясняется изменение соотношения между поглощенной и отраженной солнечной радиацией в течение года? Варианты исходных данных см. табл. 12 и 13 (приложение 41).

5.5. Излучение деятельного слоя

Энергетическая светимость деятельного слоя измеряется непосредственно или вычисляется по формуле

$$E_c = \varepsilon \sigma T_0^4, \quad (5.21)$$

где ε — коэффициент теплового излучения, называемый также коэффициентом черноты; σ — постоянная Стефана—Больцмана (см. приложение 1), T_0 — температура деятельного слоя (К). По В. Л. Гаевскому, значения ε для некоторых видов деятельного слоя составляют:

Вид деятельного слоя	ε	Вид деятельного слоя	ε
Песок сухой	0,949	Торф сырой	0,983
Песок влажный	0,962	Трава густая	0,986
Почва сухая	0,954	Трава редкая	0,975
Почва влажная	0,968	Снег чистый	0,986
Торф сухой	0,970	Вода	0,960

Эти же значения ε характеризуют поглощательные свойства деятельного слоя по отношению к падающей на него длинноволновой радиации. Произведение σT^4 при разных температурах затабулировано (приложение 10).

Излучение деятельного слоя называют также «земным» или «собственным», чем объясняется индекс при букве E . Мгновенные (секундные) значения E_c и энергетические экспозиции этого излучения за различные интервалы (суммы) выражаются в тех же единицах и с тем же округлением, что и соответствующие характеристики коротковолновой радиации (см. п. 5.3).

Задачи

5.51. Средняя за год для всей планеты в целом температура деятельного слоя Земли составляет около $15,0^\circ\text{C}$, а наиболее характерные экстремальные ее значения — около $50,0$ и $-50,0^\circ\text{C}$. Считая излучение деятельного слоя близким к излучению черного тела, имеющего такую же температуру, найти длины волн, на которые приходится наибольшая энергия при указанных температурах. Результат сравнить с ответами к задачам 5.1 и 5.2, объяснить причины различия. Каким участкам длин волн соответствуют метеорологические термины «коротковолновая радиация» и «длинноволновая радиация»?

5.52. Считая излучение Солнца и деятельного слоя Земли близкими к излучению черных тел с температурами соответственно 6000 K и $15,0^\circ\text{C}$, найти, во сколько раз энергетическая светимость деятельного слоя Земли меньше, чем Солнца. Можно ли из

полученного результата сделать вывод о том, что роль излучения деятельного слоя в формировании теплового режима почвы, водоемов и атмосферы невелика?

5.53. Вычислить энергетическую светимость деятельного слоя сухого песка при температуре $15,0^{\circ}\text{C}$. Результат сравнить со значением прямой радиации на горизонтальную поверхность при высоте Солнца 30° и коэффициенте прозрачности 0,700. Значительно ли различаются эти величины? Может ли излучение деятельного слоя скомпенсировать или превысить поглощенную часть прямой или суммарной радиации?

5.54. Вычислить энергетическую светимость деятельного слоя оголенной сухой почвы при температурах $40,0$ и $-40,0^{\circ}\text{C}$. Значительно ли изменяется излучение деятельного слоя от лета к зиме? Изменится ли ответ, если учесть, что зимой почва может быть покрыта снегом?

5.55. Приблизительно определить радиационную температуру деятельного слоя сухого торфа, если его энергетическая светимость составляет $0,49 \text{ кВт/м}^2$. Каковы преимущества радиационного термометра перед другими приборами для измерения температуры земной поверхности?

Указание. Определив σT_0^4 , найти t_0 по приложению 10.

5.56. Энергетическая освещенность поверхности влажного песка длинноволновой радиацией составляет $0,83 \text{ кВт/м}^2$. Какое количество длинноволновой радиации поглощается и какое отражается? Чем различается отражение деятельным слоем коротковолновой и длинноволновой радиации?

5.57. Многолетняя средняя месячная температура деятельного слоя в Воейково в июле, когда почва покрыта редкой травой:

Срок, ч мин	0 30	6 30	9 30	12 30	15 30	18 30
$t^{\circ}\text{C}$	12,6	16,3	24,4	27,7	26,6	19,3

Вычислить энергетическую светимость деятельного слоя в каждый срок. Построить и проанализировать график суточного хода. Указать причину суточного изменения E_c . Вычислить суточную сумму.

Указание. Значение E_c в 0 ч 30 мин использовать дважды — в начале и в конце суток.

5.58. Многолетняя средняя месячная температура деятельного слоя в Куйбышеве в 12 ч 30 мин:

Месяц	II	IV	VI	VIII	X	XII
$t^{\circ}\text{C}$	-12,4	13,8	46,0	39,3	11,5	-7,7

Вычислить среднюю за каждый указанный месяц энергетическую светимость деятельного слоя, считая, что в феврале и декабре поверхность покрыта снегом, а в остальные месяцы — ред-

кой травой. Построить график годового хода E_0 и указать возможные причины годового изменения этой величины.

5.59. Расчеты показали, что при отсутствии атмосферы среднее для всей Земли альbedo ее поверхности составляло бы 2,3 %. Какой была бы при этом средняя температура деятельного слоя Земли? Зная, что в действительности она составляет около 15,0°C, сделать вывод о характере влияния атмосферы на тепловое состояние деятельного слоя.

Указание. Исходить из радиационного равновесия планеты (поглощение солнечной радиации равно длинноволновому излучению). Средний коэффициент теплового излучения поверхности Земли считать равным 0,95.

5.6. Встречное излучение

Энергетическая освещенность деятельного слоя встречным излучением при ясном небе измеряется непосредственно или вычисляется, например, по формуле Брента

$$E_A = \sigma T_A^4 (D + G \sqrt{e}), \quad (5.22)$$

где T_A — температура воздуха (K) на высоте 2 м над земной поверхностью, e — парциальное давление водяного пара (гПа) на той же высоте, D и G — постоянные (см. приложение 1). В настоящем задачнике будем для краткости величину E_A называть просто встречным излучением.

Поглощенная и отраженная деятельным слоем части встречного излучения определяются из соотношений

$$E_{A, \text{п}} = \epsilon E_A, \quad E_{A, \text{отр}} = (1 - \epsilon) E_A, \quad (5.23)$$

где E_A , $E_{A, \text{п}}$ и $E_{A, \text{отр}}$ выражаются в тех же единицах, что и E_0 (п. 5.5).

Задачи

5.60. Температура нижней стратосферы в умеренных широтах составляет около $-55,0^\circ\text{C}$. Условно считая ее излучение близким к излучению черного тела с такой же яркостной температурой, найти длину волны, имеющей наибольшую энергию. Результат сравнить с ответами к задачам 5.1, 5.2 и 5.51. Почему допущение, принятое в задаче, является условным? Следует ли, используя метеорологические термины, относить атмосферное излучение к коротковолновой или к длинноволновой радиации?

5.61. Вычислить встречное излучение при ясном небе, температуре воздуха $20,0^\circ\text{C}$ и парциальном давлении водяного пара 9,0 гПа. Как и почему изменится ответ при увеличении (уменьшении) заданной температуры и влажности воздуха; при появлении облачности? Сравнимы ли между собой характерные значения встречного и земного излучения?

5.62. Вычислить встречное излучение при ясном небе, температуре воздуха $30,0^{\circ}\text{C}$ и парциальном давлении водяного пара $16,0$ гПа.

Сравнить его с излучением сухого песка, поверхность которого имеет такую же температуру. Какая из двух сравниваемых величин при обычных условиях бывает преобладающей?

5.63. Многолетняя средняя месячная температура воздуха и парциальное давление водяного пара в Воейково в июле:

Срок, ч мин	0 30	6 30	9 30	12 30	15 30	18 30
$t^{\circ}\text{C}$	11,8	14,7	17,6	18,9	18,9	17,3
e гПа	13,6	14,3	14,1	13,9	13,9	14,2

Вычислить встречное излучение для каждого срока. Построить и проанализировать график суточного хода E_A . Рассчитать его суточную сумму. С чем связаны особенности суточного хода встречного излучения? Как он изменится в этом же пункте зимой или в указанном месяце, но в случае более южных (северных) пунктов?

См. указание к задаче 5.57.

5.64. Многолетняя средняя месячная температура воздуха и парциальное давление водяного пара в Куйбышеве в 12 ч 30 мин:

Месяц	II	IV	VI	VIII	X	XII
$t^{\circ}\text{C}$	-15,2	8,0	24,6	24,0	8,4	-9,5
e гПа	1,7	6,3	11,0	12,5	7,2	2,9

Вычислить среднее за каждый указанный месяц встречное излучение в 12 ч 30 мин. Построить и проанализировать график годового хода. Указать возможные причины годового изменения E_A .

5.65. Температура деятельного слоя редкой травы $30,0^{\circ}\text{C}$, температура воздуха $20,0^{\circ}\text{C}$, парциальное давление водяного пара $16,0$ гПа, небо ясное. Вычислить поглощенную часть встречного излучения, земное излучение и разность между ними. Приход или расход длинноволновой радиации в деятельном слое преобладает в данном случае? Возможно ли обратное соотношение между ними? Как называется найденная разность? О каком соотношении двух первых величин свидетельствует ее знак? Часто ли наблюдается такое соотношение?

5.7. Эффективное излучение и длинноволновый радиационный баланс

Эффективное излучение деятельного слоя определяется соотношением

$$E_s = E_c - \epsilon E_A. \quad (5.24)$$

Эффективное излучение, взятое со знаком минус, представляет собой длинноволновый радиационный баланс (B_d):

$$B_d = \varepsilon E_A - E_c. \quad (5.25)$$

При подстановке (5.21) и (5.22) в (5.24) получается полная формула

$$E_s = \varepsilon [\sigma T_0^4 - \sigma T_A^4 (D + G \sqrt{e})]. \quad (5.26)$$

Иногда принимают $T_0 = T_A$ и получают приближенную формулу:

$$E_s^* = \varepsilon \sigma T_A^4 (1 - D - G \sqrt{e}). \quad (5.27)$$

Результат, полученный по формуле (5.27), можно привести к точному значению, вычисленному по формуле (5.26), введя поправку

$$\Delta E_s^* = \varepsilon (\sigma T_0^4 - \sigma T_A^4). \quad (5.28)$$

Эффективное излучение при наличии облачности характеризуется соотношением

$$E_{s,o} = E_{s,y} (1 - Cn), \quad (5.29)$$

где $E_{s,y}$ — эффективное излучение при ясном небе, n — количество облаков в баллах, C — эмпирический облачный коэффициент (см. приложение 1). Фактически он различается для облаков разных ярусов, поэтому более точным является соотношение

$$E_{s,o} = E_{s,y} (1 - C_n n_n - C_s n_s - C_v n_v), \quad (5.30)$$

где n_n , n_s и n_v — количество облаков нижнего, среднего и верхнего ярусов в баллах; C_n , C_s и C_v — соответствующие облачные коэффициенты (см. приложение 1). Мгновенные (секундные) значения E_s и B_d выражаются в тех же единицах и с тем же округлением, что и потоки коротковолновой радиации (см. п. 5.3).

Задачи

5.66. Вычислить при ясном небе излучение деятельного слоя, температура которого 20°C , $\varepsilon = 0,90$; встречное излучение при температуре воздуха $15,0^\circ\text{C}$ и парциальном давлении водяного пара $9,0$ гПа; поглощенную часть встречного излучения, эффективное излучение и длинноволновый радиационный баланс. Каков смысл полученных знаков двух последних величин? Нагревание или выхолаживание деятельного слоя происходит в данном случае за счет длинноволновой радиации?

5.67. Вычислить по полной и по приближенной формулам эффективное излучение деятельного слоя, температура которого 55°C , а $\varepsilon = 0,95$, если температура воздуха $25,0^\circ\text{C}$, парциальное давление водяного пара $25,0$ гПа, небо ясное. В приближенный ответ внести поправку, после чего сравнить его с результатом.

расчета по полной формуле. Может ли введение поправки значительно изменить результат расчета по приближенной формуле? Почему в данном случае поправка значительно превышает значение E_0^* ?

5.68. Каким станет эффективное излучение деятельного слоя, составлявшее при ясном небе $0,25 \text{ кВт/м}^2$, если половина неба будет покрыта облаками верхнего, среднего или нижнего яруса? Как влияет облачность на эффективное излучение? Почему облака разных ярусов неодинаково уменьшают эффективное излучение?

5.69. Вычислить эффективное излучение деятельного слоя чистого снега, температура которого $-6,0^\circ\text{C}$, если температура воздуха $-5,0^\circ\text{C}$, парциальное давление водяного пара $4,0 \text{ гПа}$ и наблюдается 4 балла облаков среднего и 5 баллов облаков нижнего яруса.

5.70. М. Е. Берлянд и Т. Г. Берлянд установили, что в холодный период коэффициент C_n севернее 60° с. ш. составляет $0,090$, а в поясе $50-40^\circ \text{ с. ш.}$ $0,082$. В каком из этих широтных поясов эффективное излучение зимой сильнее уменьшается за счет наличия облаков и на сколько процентов по сравнению со значением при ясном небе, если небо полностью покрыто облаками нижнего яруса? Вывод обосновать.

5.71. Многолетние фактические средние значения эффективного излучения деятельного слоя в Воейково в июле:

Срок, ч мин	0 30	6 30	9 30	12 30	15 30	18 30
$E_0, \text{ кВт/м}^2$	0,04	0,07	0,08	0,08	0,08	0,06

Сравнить исходные данные с разностью ответов к задачам 5.57 и 5.63. Указать возможные причины расхождения. Построить и проанализировать график суточного хода E_0 . Вычислить суточную сумму. Чем вызван суточный ход E_0 ? Слабо или отчетливо выраженным следует считать его в данном случае? Каким он будет в зимние месяцы? Как он изменится на станции, расположенной значительно южнее (севернее)?

См. указание к задаче 5.57.

5.72. Месячные суммы эффективного излучения деятельного слоя (МДж/м^2):

Пункт	II	IV	VI	VIII	X	XII
Воейково	88	130	188	138	80	42
Куйбышев	180	188	235	247	130	92

Построить и проанализировать график годового хода этих сумм. Вычислить годовые суммы эффективного излучения и указать возможные причины их различия.

5.8. Радиационный баланс деятельного слоя

Радиационный баланс деятельного слоя, называемый также «остаточной радиацией», характеризуется соотношением

$$B = (S' + D)(1 - A) - E_s. \quad (5.31)$$

Мгновенные значения радиационного баланса деятельного слоя и его суммы выражаются в тех же единицах и с таким же округлением, как и все отдельные потоки радиации (см. п. 5.3, 5.5, 5.6 и 5.7).

Задачи

5.73. Вычислить радиационный баланс деятельного слоя, если поглощенная часть прямой радиации на горизонтальную поверхность составляет $0,35 \text{ кВт/м}^2$, рассеянной радиации $0,08 \text{ кВт/м}^2$, встречного излучения $0,30 \text{ кВт/м}^2$, а земное излучение равно $0,40 \text{ кВт/м}^2$. О чем говорит знак ответа? Близок ли ответ к характерным значениям этой величины или он сравнительно велик (мал)? Для какого времени суток или года он характерен, если исходные данные относятся к умеренным широтам?

5.74. Найти радиационный баланс деятельного слоя, если поглощенная часть коротковолновой радиации равна $0,03 \text{ кВт/м}^2$, а эффективное излучение $0,08 \text{ кВт/м}^2$. Каков смысл знака ответа? К какому времени суток (или года) относятся исходные данные, если они получены в умеренных широтах при безоблачном небе?

5.75. Вычислить радиационный баланс деятельного слоя, если коротковолновый радиационный баланс равен $0,38 \text{ кВт/м}^2$, а длинноволновый $-0,10 \text{ кВт/м}^2$. Может ли B_k равняться нулю или быть отрицательным? Как при этом изменится ответ при том же B_d ? Может ли B_d равняться нулю или быть положительным? Как при этом изменится ответ при том же B_k ? Каково обычное соотношение между радиационным балансом деятельного слоя, коротковолновым и длинноволновым радиационным балансом в умеренных широтах днем и ночью?

5.76. Рассчитать радиационный баланс деятельного слоя сухого песка, если суммарная радиация равна $0,84 \text{ кВт/м}^2$, альбедо 20% , температура поверхности $45,0^\circ\text{C}$, температура воздуха $27,0^\circ\text{C}$, парциальное давление водяного пара $16,0 \text{ гПа}$ и наблюдается 2 балла облаков нижнего яруса.

5.77. Вычислить радиационный баланс деятельного слоя чистого снега, если суммарная радиация равна $0,14 \text{ кВт/м}^2$, альбедо 90% , температура поверхности и воздуха $-30,0^\circ\text{C}$, парциальное давление водяного пара $0,25 \text{ гПа}$, небо ясное. Может ли радиационный баланс деятельного слоя быть отрицательным при наличии прямой и рассеянной радиации? Может ли он быть положительным, если прямая и рассеянная радиация отсутствуют?

5.78. Вычислить радиационный баланс деятельного слоя моря и соседнего с ним сухого песчаного пляжа, если прямая радиация на обе поверхности равна $0,56 \text{ кВт/м}^2$, рассеянная радиация $0,14 \text{ кВт/м}^2$, альбедо песка 30 %, альбедо моря 10 %, температура деятельного слоя песка и моря соответственно $50,0$ и $25,0^\circ\text{C}$, температура воздуха над обеими поверхностями $30,0^\circ\text{C}$, парциальное давление водяного пара над песком и над морем соответственно $16,0$ и $25,0 \text{ гПа}$, небо ясное. Как и почему обычно различаются значения радиационного баланса суши и водоема при одинаковом поступлении к ним солнечной радиации? Что можно предположить о соотношении между радиационным балансом сухой и обильно увлажненной почвы (например, искусственно орошаемой), пустыни и оазиса, одной и той же почвы после засухи и после периода дождей, если в каждом из сравниваемых случаев приход солнечной радиации примерно одинаков?

5.79. Радиационный баланс деятельного слоя суши в некотором пункте на 60° с. ш. при безоблачном небе 13 июля 1964 г.:

Срок, ч	1	3	5	7	9	11
$B \text{ кВт/м}^2$	-0,04	-0,04	0,06	0,20	0,34	0,43
Срок, ч	13	15	17	19	21	23
$B \text{ кВт/м}^2$	0,44	0,41	0,19	-0,04	-0,06	-0,06

Построить и проанализировать график суточного хода. Указать общий характер изменения B , экстремальные значения, время их наступления, амплитуду колебания, продолжительность интервалов с положительными и отрицательными значениями, время переходов через нуль. Вычислить сумму радиационного баланса за интервал от 1 до 23 ч.

5.80. Средние месячные значения радиационного баланса деятельного слоя в Минске в 1958 г. (кВт/м^2):

Месяц	Срок, ч мин					
	0 30	6 30	9 30	12 30	15 30	18 30
Январь	-0,01	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	-0,02
Июль	-0,04	0,10	0,31	0,33	0,25	0,03

Построить и проанализировать график суточного хода радиационного баланса на одной и той же станции зимой и летом. Указать возможные причины различия. Вычислить суточные суммы B .

См. указание к задаче 5.57.

5.81. Средние месячные значения радиационного баланса деятельного слоя в июне 1958 г. (кВт/м²):

Пункт	Срок, ч мин					
	0 30	6 30	9 30	12 30	15 30	18 30
Архангельск	-0,03	0,12	0,24	0,25	0,19	0,06
Ташкент	-0,06	0,14	0,47	0,54	0,30	-0,01

Построить и проанализировать график суточного хода B в один и тот же летний месяц на двух станциях, значительно различающихся по широте и физико-географическим условиям. Указать возможные причины различия. Вычислить суточные суммы.

5.82. Месячные суммы радиационного баланса деятельного слоя в 1959 г. (МДж/м²):

Пункт	II	IV	VI	VIII	X	XII
Верхоянск	-17	0	360	218	-29	-33
Книшинов	29	201	356	276	75	-33

Построить и проанализировать график годового хода радиационного баланса за один и тот же год на двух станциях, значительно различающихся по широте и физико-географическим условиям. Указать возможные причины различия. Вычислить годовые суммы.

5.83. В июле 1952 г. Пахта-Аральская экспедиция ГГО проводила наблюдения за элементами радиационного баланса в полупустыне (42° с. ш.). После осреднения результатов наблюдений за восемь ясных суток были получены следующие значения (все, кроме A , в кВт/м²):

Элемент	Срок, ч мин										
	0 30	4 30	6 30	8 30	10 30	12 30	14 30	16 30	18 30	20 30	0 30
S'	0,00	0,00	0,17	0,51	0,77	0,84	0,70	0,38	0,06	0,00	0,00
D	0,00	0,00	0,08	0,13	0,11	0,12	0,10	0,08	0,04	0,00	0,00
A	—	—	0,31	0,27	0,27	0,25	0,27	0,28	0,33	—	—
E_c	0,45	0,43	0,42	0,46	0,53	0,58	0,57	0,52	0,52	0,49	0,45
ϵE_A	0,39	0,38	0,33	0,33	0,33	0,32	0,37	0,40	0,41	0,42	0,39

Вычислить для каждого срока суммарную и поглощенную радиацию, длинноволновый радиационный баланс и радиационный баланс деятельного слоя. Построить, проанализировать и описать

график суточного хода прямой радиации на горизонтальную поверхность, рассеянной радиации, суммарной и поглощенной коротковолновой радиации, длинноволнового радиационного баланса и радиационного баланса деятельного слоя. Вычислить суточные суммы радиационного баланса и указанных выше его элементов.

Указания: 1. При определении моментов восхода и захода Солнца условно принять, что исходные данные относятся к 15 июля. 2. Считать, что поступление рассеянной радиации начинается за 1 ч до восхода Солнца и прекращается через 1 ч после его захода.

5.84. Решить предыдущую задачу по результатам наблюдений той же экспедиции на орошаемом хлопковом поле, осредненным аналогичным образом:

Элемент	Срок, ч мин									
	0 30	4 30	6 30	8 30	10 30	12 30	14 30	16 30	18 30	20 30
S'	0,00	0,00	0,16	0,50	0,79	0,86	0,73	0,42	0,08	0,00
D	0,00	0,00	0,08	0,13	0,13	0,13	0,10	0,09	0,06	0,00
A	—	—	0,29	0,22	0,22	0,22	0,23	0,25	0,26	—
E_c	0,43	0,42	0,39	0,38	0,39	0,40	0,39	0,43	0,45	0,44
ΣE_A	0,38	0,37	0,34	0,33	0,30	0,30	0,32	0,36	0,38	0,38

Сравнить результаты и сделать выводы о влиянии орошения на радиационный баланс.

5.85.* В результате наблюдений в один из ясных дней июня в Воейково получены следующие значения прямой радиации на перпендикулярную поверхность (S), рассеянной радиации (D), альбедо (A) и радиационного баланса деятельного слоя (B):

Срок, ч мин	$\alpha_{\odot}$	S кВт/м ²	D кВт/м ²	A %	B кВт/м ²
0 30	—	0,00	0,00	—	—0,04
6 30	25°24'	0,50	0,11	22	0,17
9 30	46 36	0,74	0,21	18	0,47
12 30	53 42	0,82	0,23	17	0,57
15 30	39 00	0,68	0,19	16	0,40
18 30	17 00	0,46	0,08	20	0,10
0 30	—	0,00	0,00	—	—0,05

Для сроков с 6 ч 30 мин до 18 ч 30 мин вычислить коэффициенты прозрачности — неприведенный и при массе 2, сравнить их между собой и указать причину различия. Построить и проанализировать график дневного хода P_2 . Сделать вывод об изменении оптического состояния атмосферы в течение дня. Для всех сроков найти прямую радиацию на горизонтальную поверхность, суммарную радиацию, долю прямой и долю рассеянной радиации, погло-

щенную часть суммарной радиации и длинноволновый радиационный баланс.

Ответить на вопросы: 1) Почему во все сроки прямая радиация на горизонтальную поверхность меньше, чем на перпендикулярную? В каком случае эти величины одинаковы? Может ли первая быть больше второй? 2) Почему во все сроки поглощенная коротковолновая радиация меньше суммарной? Могут ли эти величины быть одинаковыми? 3) Как и почему меняются в течение дня доля прямой и доля рассеянной радиации в составе суммарной радиации? 4) Что показывает знак длинноволнового радиационного баланса? 5) Каков смысл полученных знаков радиационного баланса деятельного слоя?

Построить и описать графики суточного хода прямой радиации на горизонтальную поверхность, рассеянной радиации, поглощенной части суммарной радиации, длинноволнового радиационного баланса и радиационного баланса деятельного слоя. Найти сумму радиационного баланса деятельного слоя за интервал от 0 ч 30 мин данных суток до 0 ч 30 мин следующих суток. Как и почему изменится последний результат, если произвести расчет для этого же района, но для зимнего дня? Для летнего дня и площадки с таким же альбедо, но для более северного района? Для более южного района? Варианты исходных данных см. табл. 14 (приложение 41).

5.9. Радиационный баланс атмосферы и системы деятельный слой — атмосфера

Радиационный баланс атмосферы выражается соотношением

$$B_a = E_a + Q_n - U_\infty, \quad (5.32)$$

где E_a — эффективное излучение деятельного слоя; Q_n — суммарная радиация, поглощенная вертикальным столбом атмосферы, имеющим единичное сечение и простирающимся от деятельного слоя до верхней границы атмосферы; U_∞ — длинноволновое излучение деятельного слоя и атмосферы, выходящее через верхнюю границу указанного столба атмосферы в космос (уходящее излучение).

Радиационный баланс системы деятельный слой—атмосфера, т. е. Земли в целом (как планеты) можно представить в виде

$$B_c = (S' + D)(1 - A) + Q_n - U_\infty, \quad (5.33)$$

где все обозначения имеют прежний смысл.

Задачи

5.86. Среднее во времени и в пространстве альбедо системы деятельный слой—атмосфера, по расчетам М. И. Будыко, составляет 36 %. При этом на долю атмосферы приходится около 33 %

солнечной радиации, поглощенной этой системой. Зная, что годовая энергетическая экспозиция солнечной радиации на верхней границе атмосферы равна $10\,880 \text{ МДж/м}^2$, вычислить годовые суммы солнечной радиации, поглощаемой атмосферой и деятельным слоем. Велика ли роль атмосферы в поглощении солнечной радиации по сравнению с ролью деятельного слоя? Является ли атмосфера по отношению к солнечной радиации преимущественно поглощающей или рассеивающей средой?

5.87. Средняя во времени и в пространстве годовая сумма эффективного излучения деятельного слоя, по расчетам М. И. Будыко, составляет 1670 МДж/м^2 , а уходящего излучения 7030 МДж/м^2 . Вычислить годовую сумму длинноволнового радиационного баланса атмосферы. Каков смысл полученного знака этой величины? Сравнить результат с ответом к предыдущей задаче и сделать вывод о знаке радиационного баланса атмосферы.

5.88. Используя ответы к задачам 5.86 и 5.87, вычислить годовую сумму радиационного баланса атмосферы. Результат проверить по уравнению (5.32). Каков смысл знака полученного ответа? Почему не происходит монотонного изменения средней температуры атмосферы от года к году? Как согласуется найденный результат с законом сохранения энергии?

5.89. Распределение средних многолетних годовых сумм радиационного баланса атмосферы по широте φ , по Т. Г. Берлянд и К. Я. Винникову:

φ° ш.	70—60 с.	50—40	30—20	10—0	0—10 ю.	20—30	40—50
$\sum_{\text{год}} B_a \text{ МДж/м}^2$	—2930	—2510	—3430	—3180	—3100	—3100	—2680

Построить и проанализировать график широтной зависимости $\sum_{\text{год}} B_a$. Велика ли межширотная изменчивость данной величины?

5.90. По результатам спутниковых измерений установлено, что фактическое альbedo системы деятельный слой—атмосфера составляет 29 %. Зная, что годовая энергетическая экспозиция солнечной радиации на верхней границе атмосферы равна $10\,880 \text{ МДж/м}^2$, вычислить годовую сумму солнечной радиации, отраженной Землей как планетой в окружающее пространство. Рассчитать баланс солнечной радиации на верхней границе атмосферы.

5.91. Средняя многолетняя годовая сумма солнечной радиации, поглощаемой деятельным слоем, по расчетам М. И. Будыко, составляет 4670 МДж/м^2 , а эффективного излучения — 1670 МДж/м^2 . Вычислить среднюю многолетнюю годовую сумму радиационного баланса деятельного слоя. Каков смысл знака ответа? Почему не происходит монотонного изменения температуры деятельного слоя от года к году? Как согласуется полученный результат с законом сохранения энергии? Сравнить ответы к данной задаче и задаче 5.88 и объяснить, почему один из них больше другого.

5.92. Средняя многолетняя годовая сумма уходящего излучения, по расчетам М. И. Будыко, составляет 7030 МДж/м². Используя ответы к задаче 5.86, найти годовую сумму радиационного баланса системы деятельный слой—атмосфера. Преобладает ли в среднем многолетнем приход лучистой энергии к Земле из окружающего пространства над уходящим излучением или наоборот? Какие опытные данные подтверждают ответ на этот вопрос? Сохраняется ли установленный результат лишь в среднем или он имеет место также в отдельные годы, моменты и в отдельных пунктах?

5.93. Распределение по широте φ средних многолетних годовых сумм радиационного баланса системы деятельный слой—атмосфера, по К. Я. Винникову:

φ° с. ш.	70—60	60—50	50—40	40—30	30—20	20—10	10—0
$\sum_{\text{год}} B_c$ МДж/м ² . . .	—2050	—1260	—500	170	590	960	1210
φ° ю. ш.	0—10	10—20	20—30	30—40	40—50	50—60	
$\sum_{\text{год}} B_c$ МДж/м ² . . .	1300	1170	840	380	—300	—1210	

Построить и проанализировать график широтной зависимости $\sum_{\text{год}} B_c$. В каком широтном поясе данная величина положительна и в каких областях Земли она отрицательна? К каким атмосферным процессам приводит наличие поясов с положительными и отрицательными суммами данной величины?

Глава 6

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПОЧВЫ И ВОДОЕМОВ

В настоящей главе используется широко распространенный термин «температура поверхности почвы» (или моря), под которым более обоснованно было бы понимать температуру деятельного слоя.

6.1. Изменения температуры почвы и водоемов во времени и в пространстве

Задачи

6.1. Температура (°C) поверхности почвы на площадке ЛГМИ в Даймище в пасмурный день 9 июля и в ясный день 13 июля 1964 г.:

Дата	Срок, ч												
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
9 июля	11	11	12	12	13	15	20	21	21	20	17	10	10
13 июля	11	10	9	16	24	35	38	40	36	28	21	13	10

Построить и проанализировать кривые суточного хода. Указать возможные причины его различия в ясные и пасмурные дни.

6.2. Средняя за 1953—1956 гг. температура ($^{\circ}\text{C}$) поверхности почвы в Куйбышеве в январе и в июле:

Месяц	Срок, ч мин					
	0 30	6 30	9 30	12 30	15 30	18 30
Январь	—18	—19	—19	—14	—16	—16
Июль	16	21	33	40	36	26

Построить и проанализировать кривые суточного хода. Объяснить возможные причины его различия летом и зимой.

Указание. Значение за 0 ч 30 мин использовать дважды — в начале и в конце интервала.

6.3. По наблюдениям в Финляндии за несколько летних дней получены экстремальные температуры поверхности соседних участков с гранитной почвой: $34,8$ и $14,5^{\circ}\text{C}$, и с сухой песчаной почвой: $42,3$ и $7,8^{\circ}\text{C}$. Вычислить амплитуду на каждом участке и указать причину их различия.

6.4. Средняя за 8 сут температура поверхности почвы на площадке в полупустыне и на близлежащем орошаемом хлопковом поле совхоза Пахта-Арал (УзбССР) в июле 1962 г.:

Вид поверхности	Срок, ч мин								
	0 30	4 30	6 30	8 30	10 30	12 30	14 30	16 30	18 30
Полупустыня	22,2	17,8	25,4	43,0	58,4	64,9	63,2	53,8	38,6
Орошаемое поле	20,6	18,8	20,3	24,0	28,3	35,6	32,7	30,1	27,3

Построить и проанализировать кривые суточного хода. Указать причины его различия на этих площадках.

См. указание к задаче 6.2.

6.5. Температура поверхности воды в Атлантическом океане (судно погоды *E*) и температура оголенной поверхности солончаковой почвы примерно на той же широте (ст. Чарджоу) 15 августа 1968 г.:

Судно погоды <i>E</i>									
Срок, ч	0	3	6	9	12	15	18	21	24
$t^{\circ}\text{C}$	25,6	25,2	25,2	25,1	25,1	25,1	25,1	25,0	25,2

Ст. Чарджоу						
Срок, ч	1	7	10	13	16	19
$t^{\circ}\text{C}$	25,6	25,5	38,1	48,0	44,6	28,9
						22,3

Построить и проанализировать кривые суточного хода. Указать причину различия суточного хода на море и в глубине континента.

6.6.* Температура ($^{\circ}\text{C}$) поверхности и верхнего слоя почвы на ст. Колтуши (Ленинградская область) 9—11 июля 1951 г.:

Дата	Срок, ч	Глубина, см				
		0	5	10	15	20
9 июля	20	16,7	18,3	17,5	16,8	15,7
10 июля	0	14,5	17,2	16,5	15,9	15,3
"	4	15,2	16,0	15,4	15,4	14,8
"	8	20,6	16,7	16,0	15,5	15,0
"	12	23,2	19,0	17,2	16,0	15,7
"	16	21,6	19,6	18,3	17,1	16,1
"	20	16,2	18,1	17,6	17,0	16,4
11 июля	0	11,2	16,0	16,2	16,3	16,1
"	4	10,2	14,6	14,8	15,2	15,4

Построить и проанализировать график суточного хода температуры поверхности почвы и температуры на всех глубинах за 10 июля (с 0 до 24 ч). Определить, меняется ли период колебания с глубиной. Найти по графику амплитуду колебания на каждой глубине и описать ее изменение с глубиной. Определить время наступления максимума на всех глубинах. Найти запаздывание максимума на каждой глубине по сравнению с моментом его наступления на поверхности. Вычислить среднее для всего слоя 0—20 см запаздывание на 10 см глубины. Построить и проанализировать график термизоплет. Варианты исходных данных см. табл. 15 (приложение 41).

6.7. Многолетняя средняя месячная температура оголенной поверхности в двух пунктах с примерно одинаковым характером почвы:

Пункт	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Москва	-10	-9	-5	4	15	20	22	19	12	4	-2	-7
Ашхабад	1	4	10	19	28	35	37	35	27	17	9	3

Построить и проанализировать кривые годового хода. Указать причины различия годового хода на разных широтах.

6.8. Средняя за месяц температура поверхности почвы в районе Москвы в дневной срок наблюдений на северном и южном склонах одинаковой крутизны и на равнинной местности в апреле—октябре:

Поверхность	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Северный склон	5,5	16,0	22,3	23,7	20,0	12,2	4,9
Равнина	9,4	18,2	23,6	25,7	22,8	16,8	6,7
Южный склон	12,9	20,0	24,6	27,0	25,1	20,8	8,4

Построить и проанализировать кривые изменения температуры от месяца к месяцу. Указать причины различия температурного режима площадок с разной экспозицией.

6.9. Многолетняя средняя месячная температура поверхности воды в Каспийском море и поверхности супесчаной почвы на двух станциях на той же широте, одна из которых (Гасан-Кули) находится на берегу Каспийского моря, а другая (Ничка) примерно на расстоянии 900 км от моря, в Юго-Восточных Каракумах:

Точка	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Каспийское море	11,0	9,4	8,9	10,9	14,6	22,8	26,2	25,8	21,6	19,6	14,7	11,8
Гасан-Кули	5	6	11	17	24	29	33	32	28	20	12	7
Ничка	2	6	12	20	29	36	38	34	27	18	9	4

Построить и проанализировать кривые годового хода. Указать причины различия годового хода в этих трех точках.

6.10. Средняя за 15 лет температура (°C) поверхности оголенной почвы и почвы под снегом в Ленинграде:

Поверхность	XI	XII	I	II	III	IV
Оголенная	-1,6	-6,5	-8,0	-8,8	-4,7	3,8
Под снегом	0,1	-1,8	-1,5	-1,6	-1,2	1,8

Построить и проанализировать кривые изменения температуры во времени. Указать причины различия температурного режима этих площадок.

6.11.* Многолетняя средняя месячная температура (°C) поверхности и верхних слоев почвы под естественным покровом в Смоленске:

Глубина, м	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	-9	-8	-5	3	13	18	20	17	11	4	-1	-6
1,6	3,6	2,9	2,4	2,3	4,9	8,4	11,0	12,5	12,1	9,9	7,4	5,0
3,2	6,1	5,3	4,7	4,1	4,3	5,6	7,4	8,9	9,8	9,7	8,8	7,5

Построить и проанализировать кривые годового хода температуры поверхности почвы и температуры на обеих глубинах (данные относить к серединам месяцев). Найти амплитуду на каждой глубине и указать характер ее изменения с глубиной. Определить, меняется ли период колебаний с глубиной. Найти по графику примерную дату наступления экстремумов на каждой глубине, а также запаздывание максимума по сравнению с временем его наступления на поверхности. Вычислить среднее запаздывание на 1 м глубины. Варианты исходных данных см. табл. 16 (приложение 41).

6.12. Амплитуда годового хода температуры на одинаковых глубинах на суше и в море в районе Калининграда:

	Глубина, м			
	0	5	8	15
Суша	20,3	3,9	1,7	0,1
Море	19,0	18,6	14,5	7,5

Построить и проанализировать кривые изменения амплитуды с глубиной. Указать причины различия.

6.13. По многолетним средним данным запаздывание максимума годовых колебаний температуры почвы составляет: в Павловске 108 сут на глубину 3,2 м, в Нукусе (УзбССР) 105 сут на глубину 4,0 м, в Калининграде 111 сут на глубину 4,0 м. Найти среднее запаздывание годовых колебаний температуры почвы на 1 м глубины.

6.14.* По данным задачи 6.6 построить вертикальные профили температуры почвы на ст. Колтуши 10 июля 1951 г. в сроки 0, 8, 12 и 20 ч. Определить тип каждого профиля и отметить, нормален ли он для данного времени суток. Указать причины такого распределения температуры в каждый срок. Вычислить вертикальный градиент температуры (°C/см) в срок 12 ч в слоях 0—5, 5—10,

10—15, 15—20 см. Указать причину его изменения с глубиной. Определить направление переноса тепла в каждом слое в указанные сроки. Варианты исходных данных см. табл. 15 (приложение 41).

6.15. Многолетняя средняя месячная температура поверхности почвы и температура на разных глубинах в Смоленске:

Глубина, м	I	IV	VII	IX
0,0	—9	3	20	11
0,2	—0,5	1,8	17,2	12,0
0,4	0,4	1,6	16,2	12,4
0,6	1,2	1,5	15,0	12,5
0,8	1,8	1,5	14,0	12,6
1,2	2,8	1,9	12,4	12,4
1,6	3,6	2,3	11,0	12,1
2,4	5,1	3,2	8,9	11,0
3,2	6,1	4,1	7,4	9,8

Построить вертикальные профили температуры, назвать тип каждого профиля и указать, нормален ли он для данного месяца. Описать причины возникновения таких профилей. Вычислить вертикальный градиент температуры ($^{\circ}\text{C}/\text{м}$) в июле для каждого слоя отдельно и средний от поверхности до глубины 3,2 м. Указать характер и причины его изменения с глубиной. Определить направление переноса тепла в каждом слое в рассмотренные месяцы.

6.16. Средняя месячная температура воды в Каспийском море:

Глубина, м	I	IV	VII	IX
0	11,1	10,9	26,2	23,6
10	11,0	10,7	24,7	22,6
25	11,0	9,6	18,7	18,7
50	10,6	8,8	10,0	10,7
100	9,0	7,5	7,4	6,4

Построить вертикальные профили температуры и сравнить с профилями из задачи 6.15. Вычислить вертикальный градиент температуры в июле для каждого слоя отдельно и средний от поверхности до глубины 100 м. Результат сравнить с полученным в задаче 6.15. Указать причины различия.

6.17. Средняя температура поверхности и верхнего слоя оголенной почвы и почвы с травяным покровом в Ленинграде в июне:

Поверхность	Глубина, см			
	0	20	40	80
Оголенная	24,6	21,6	20,0	17,4
Покрытая травой	20,5	16,8	14,6	12,8

Построить вертикальные профили температуры. Вычислить вертикальный градиент температуры для каждого отдельного слоя ($^{\circ}\text{C}/\text{см}$). Указать его изменения с глубиной и возможные причины различия градиентов на этих двух площадках.

6.2. Теплофизические характеристики почвы и водоемов

Теплопроводность λ выражается в $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ с точностью до десятых, а при очень малых значениях — с точностью до тысячных. Примерные значения λ некоторых почв, воды и воздуха составляют:

Гранит	4,2	Неподвижная вода . . .	0,5
Глина влажная	2,1	Неподвижный воздух . . .	0,023
Песок сухой	1,0		

Теплопроводность снежного покрова рассчитывается по формуле Абельса $\lambda = 2,8 \cdot 10^{-8} \rho^2$, где ρ — плотность снега ($\text{кг}/\text{м}^3$). Обычно λ не определяется непосредственно, а вычисляется через другие характеристики (см. задачу 6.27).

Удельная теплоемкость $c_{\text{уд}}$ выражается в $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ с точностью до сотых. Примерные значения $c_{\text{уд}}$ для сухой части некоторых почв:

Торф	2,18	Глина	0,92
Гумус	1,84	Суглинок	0,84
Чернозем суглинистый	1,26	Песок	0,80
Чернозем супесчаный	1,09	Солончаки	0,59

Значения удельной теплоемкости воды и воздуха при постоянном давлении составляют соответственно 4,19 и 1,005 $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Объемная теплоемкость c выражается в $\text{МДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$ с точностью до сотых. Для сухой почвы $c_s = c_{\text{уд},s} \rho$, где ρ — плотность; для влажной почвы

$$c_v = (c_{\text{уд},s} + c_{\text{уд},v} w) \rho, \quad (6.1)$$

где $c_{\text{уд},s}$ и ρ — удельная теплоемкость и плотность сухой части почвы, $c_{\text{уд},v}$ — удельная теплоемкость воды, w — влажность почвы, т. е. отношение массы воды в некотором объеме почвы к массе сухой ее части в том же объеме (выражается в долях единицы). Для определения w и ρ берется проба почвы, имеющая определенный объем V . Она взвешивается, а затем тщательно просушивается и взвешивается вторично. Если вес (N) до просушивания составлял F_1 , а после просушивания стал F_2 , то

$$w = (F_1 - F_2)/F_2, \quad \rho = F_2/Vg.$$

Средняя объемная теплоемкость некоторых почв $c_{\text{ср}}$ приблизительно составляет:

Характеристика влажности почв	$c_{\text{ср}}$ МДж/(м ³ ·К)		
	Песок	Глина	Гумус
Абсолютно сухая	1,21	0,96	0,67
Сухая	1,55	1,17	0,75
Слабо увлажненная	1,84	1,42	0,84
Влажная	2,18	1,63	0,92
Сильно увлажненная	2,47	1,84	1,00

Объемная теплоемкость воды составляет 4,19 МДж/(м³·К), объемная теплоемкость воздуха при постоянном давлении и нормальных условиях $1,30 \cdot 10^{-3}$ МДж/(м³·К).

Температуропроводность a выражается в м²/с. В метеорологии ее чаще выражают в см²/ч с точностью до сотых, причем $1 \text{ см}^2/\text{ч} = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$. Приближенно температуропроводность определяется:

а) по уменьшению амплитуды колебаний температуры почвы или водоема с глубиной:

$$a = \frac{0,6 (z_2 - z_1)^2}{T \lg (A_2/A_1)^2}, \quad (6.2)$$

где a — температуропроводность слоя от z_1 до z_2 ; T — период колебаний; A_1 и A_2 — амплитуды на указанных глубинах;

б) по запаздыванию определенной фазы колебаний, например максимума, на глубине z_2 по сравнению с моментом ее наступления на глубине z_1 :

$$a = \frac{T}{12,56} \frac{(z_2 - z_1)^2}{(\Delta\tau)^2}, \quad (6.3)$$

где $\Delta\tau$ — время запаздывания.

Точнее средняя температуропроводность верхнего 20-см слоя почвы (см²/ч) находится как отношение M (см²·К) к N (ч·К), где

$$M = \sum_i m_i \Delta' t_i, \quad (6.4)$$

$$N = \tau \sum_j n_j \Delta'' t_j. \quad (6.5)$$

Здесь $\Delta' t_i$ — разность температур на стандартных глубинах i , равных 0, 5, 10, 15 и 20 см, в вечерний и утренний сроки измерений; $\Delta'' t_j = (t_0 + t_{20})/2 - t_{10}$ (t_0 , t_{10} , t_{20} — температуры на глубинах 0, 10 и 20 см в разные дневные сроки измерений j); τ — интервал (ч) между соседними сроками измерений; m_i — постоянные коэффициенты для разных глубин i (см. приложение 1);

n_j — постоянные коэффициенты, зависящие от числа дневных сроков измерений, разделенных одинаковыми интервалами τ , — имеют следующие значения:

Число дневных сроков измерения	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5	n_6
4	0,75	2,25	2,25	0,75		
5	0,62	2,84	1,07	2,84	0,62	
6	0,66	2,61	1,74	1,74	2,61	0,66

В Руководстве по теплобалансовым наблюдениям (Л.: Гидрометеиздат, 1977) для определения N рекомендована более простая по сравнению с (6.5) формула, дающая, однако, менее точные результаты.

Задачи

6.18. Найти изменение средней температуры двух изолированных проб почвы объемом по 20 см³ при одинаковом притоке тепла 50,24 Дж и при одинаковой теплоотдаче 41,87 Дж, если первая проба состоит из слабо увлажненного песка, а вторая из влажного гумуса. Как влияет различие теплоемкостей разных видов почвы на нагревание (охлаждение) почвы при одинаковом притоке (отдаче) тепла?

6.19. Вес абсолютно сухой пробы глинистой почвы объемом 40 см³, взятой перед началом дождя, равнялся 0,41 Н. После продолжительного сильного дождя вес новой пробы с таким же объемом, взятой из той же почвы, составил 0,49 Н. Найти абсолютное и относительное изменение объемной теплоемкости данной почвы в результате дождя. Как изменяется теплоемкость почвы при ее увлажнении (просушивании)? Когда больше нагревается одна и та же почва при одинаковом притоке тепла: до или после дождя?

6.20. Найти относительное изменение объемной теплоемкости песка при изменении его влажности от 25 до 10 %. Указать причину изменения.

6.21. Используя приведенные в начале параграфа значения теплопроводности и объемной теплоемкости, вычислить температуропроводность гранита ($c = 2,09$ мДж/(м³·К)), влажной глины, сухого песка, неподвижной воды и неподвижного воздуха. Как влияет увеличение влажности почвы на ее температуропроводность? Как сказывается на скорости и глубине распространения температурных колебаний в почве, неподвижной воде и неподвижном воздухе значительная разница их температуропроводностей? Как она влияет на сдвиг фазы колебаний температуры?

6.22. Амплитуда суточного хода температуры поверхности почвы составила 31 °С, а на глубине 20 см 3,7 °С. Вычислить среднюю температуропроводность верхнего 20-см слоя почвы.

6.23. Максимальная температура поверхности почвы отмечена в 12 ч, а на глубине 20 см — в 22 ч. Найти среднюю температуропроводность верхнего 20-см слоя почвы. Полагая, что исходные данные настоящей и предыдущей задач относятся к одному и тому же пункту и к одинаковой дате, объяснить причину различия ответов.

6.24. По данным задачи 6.12 вычислить средние значения температуропроводности верхнего 15-м слоя для суши и для моря. Указать причину их различия. Почему температуропроводность моря заметно отличается от температуропроводности не только суши, но и неподвижной воды (см. 4-й ответ к задаче 6.21)?

6.25.* Используя данные задачи 6.6 за сроки с 8 до 20 ч, вычислить среднюю температуропроводность верхнего 20-см слоя почвы на ст. Колтуши 10 июля 1951 г. Варианты исходных данных см. табл. 15 (приложение 41).

6.26. Температура почвы в полупустыне и на близлежащем орошаемом хлопковом поле в совхозе Пахта-Арал 16 июля 1951 г.:

Срок ч мин	Участок	Глубина, см				
		0	5	10	15	20
8 30	Полупустыня	42,1	29,8	29,2	30,4	31,3
	Орошаемое поле	22,4	22,4	21,8	22,1	23,0
10 30	Полупустыня	55,8	36,5	32,9	31,1	31,2
	Орошаемое поле	26,3	25,1	24,2	23,0	23,2
12 30	Полупустыня	62,9	40,9	35,9	32,8	31,8
	Орошаемое поле	33,1	30,1	26,7	24,3	23,9
14 30	Полупустыня	61,3	45,6	39,2	35,0	32,7
	Орошаемое поле	30,6	29,5	27,3	25,5	24,7
16 30	Полупустыня	50,5	45,4	40,6	36,4	33,8
	Орошаемое поле	27,2	27,4	27,0	25,9	25,2

Вычислить среднюю температуропроводность верхнего 20-см слоя почвы на обоих участках. Указать причины их различия.

6.27. Проба песчаной почвы объемом 100 см³ имела до просушивания вес 1,942 Н, после просушивания 1,687 Н. Температура почвы в день взятия пробы:

Срок, ч	Глубина, см				
	0	5	10	15	20
7	18,6	22,6	25,0	25,9	26,5
10	28,0	26,2	25,5	25,5	26,2
13	38,9	31,1	28,3	26,9	26,6
16	33,6	33,0	30,4	28,4	27,8
19	24,2	30,2	29,9	29,0	28,4

Определить объемную теплоемкость и среднюю температуру и теплопроводность верхнего 20-см слоя почвы.

6.28. Вычислить теплопроводность снежного покрова при плотности 10^2 кг/м^3 . Как и почему изменится ответ, если плотность снега в результате слеживания увеличится в 2 раза?

6.3. Теоретические законы распространения колебаний температуры в почве

Если почва однородна по вертикали, то ее температура t на глубине z в момент времени τ определяется из уравнения теплопроводности (уравнение Фурье)

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}, \quad (6.6)$$

где a — температуропроводность. Основными законами распространения температурных колебаний в почве являются следующие:

1) закон неизменности периода колебаний с глубиной:

$$T(z) = \text{const};$$

2) закон уменьшения амплитуды колебаний с глубиной:

$$A_{z_2} = A_{z_1} e^{-\sqrt{\frac{\pi}{aT}}(z_2 - z_1)}, \quad (6.7)$$

где A_{z_1} и A_{z_2} — амплитуды на глубинах z_1 и z_2 ($z_2 > z_1$), a — температуропроводность слоя почвы, лежащего между глубинами z_1 и z_2 ;

3) закон сдвига фазы колебаний с глубиной (закон запаздывания):

$$\Delta\tau_{z_2 - z_1} = \frac{z_2 - z_1}{2} \sqrt{\frac{T}{a\pi}}, \quad (6.8)$$

где $\Delta\tau_{z_2 - z_1}$ — запаздывание, т. е. разность между моментами наступления одинаковой фазы колебаний (например, максимума) на глубинах z_1 и z_2 . Колебания температуры проникают в почву до глубины z_{np} , определяемой соотношением

$$z_{np} = \sqrt{\frac{aT}{\pi}} \frac{1}{\lg e} \lg \frac{A_0}{0,1}. \quad (6.9)$$

Кроме того, из формулы (6.7) вытекает ряд следствий:

а) глубины, на которых в разных почвах ($a_1 \neq a_2$) амплитуды температурных колебаний с одинаковым периодом ($T_1 = T_2$) уменьшаются в одинаковое число раз ($A_{z_1}/A_{z_2} = \text{const}$), относятся между собой как корни квадратные из температуропроводности этих почв:

$$z_1/z_2 = \sqrt{a_1/a_2}; \quad (6.10)$$

б) глубины, на которых в одной и той же почве ($\alpha = \text{const}$) амплитуды температурных колебаний с разными периодами ($T_1 \neq T_2$) уменьшаются в одинаковое число раз ($A_{z_1}/A_{z_2} = \text{const}$), относятся между собой как корни квадратные из периодов колебаний:

$$z_1/z_2 = \sqrt{T_1}/\sqrt{T_2}. \quad (6.11)$$

Задачи

6.29. Доказать, что в слое почвы, в котором вертикальный градиент температуры не изменяется с глубиной, температура почвы не меняется во времени. Указать физическую причину этой закономерности.

6.30. Принимая, что температура почвы изменяется во времени линейно, а вертикальный ее градиент таким же образом изменяется с глубиной, рассчитать, как и на сколько изменится за 1 ч средняя температура слоя почвы 0—5 см, температуропроводность которого составляет $10 \text{ см}^2/\text{ч}$, если вертикальный градиент температуры на поверхности равен $2,0^\circ\text{C}/\text{см}$, а на глубине 5 см $1,0^\circ\text{C}/\text{см}$. Как и почему изменится ответ, если градиент на глубине станет больше, чем на поверхности? Если он станет отрицательным?

6.31. Амплитуда суточного хода температуры поверхности почвы $20,7^\circ\text{C}$. Вычислить амплитуду на глубине 30 см и найти глубину, на которой колебания температуры практически прекратятся, если средняя по глубине температуропроводность верхнего слоя почвы в этот день равнялась $18 \text{ см}^2/\text{ч}$.

6.32. Вычислить глубины, на которых уменьшается в 2 раза и в e раз амплитуда суточных колебаний температуры в граните, сухом песке и неподвижной воде, если их температуропроводности составляют 70, 25 и $5 \text{ см}^2/\text{ч}$ соответственно. Проверить ответы, вычислив отношения корней квадратных из соответствующих значений температуропроводности.

6.33. Вычислить глубины, на которых уменьшается в 2 раза амплитуда суточных и годовых колебаний температуры в почве с температуропроводностью $28,3 \text{ см}^2/\text{ч}$. Проверить ответы, вычислив отношение корней квадратных из периодов колебаний.

6.34.* По данным задачи 6.11 определить амплитуду годового хода температуры поверхности почвы и температуры на глубине 3,2 м в Смоленске. Найти температуропроводность слоя 0—3,2 м. Вычислить амплитуду на глубине 1,6 м и сравнить с фактическим значением. Указать возможные причины различия. Варианты исходных данных см. табл. 16 (приложение 41).

6.35.* По данным задачи 6.6 найти амплитуды суточного хода температуры на всех глубинах и вычислить отношения A_5/A_0 , A_{10}/A_5 , A_{15}/A_{10} , A_{20}/A_{15} . Используя ответ к задаче 6.25, вычислить теоретическое значение этих отношений. Сделать вывод о качественном и количественном выполнении закона уменьшения ампли-

туды. Указать причины расхождения результатов. Варианты исходных данных см. табл. 15 (приложение 41).

6.36. По данным задачи 6.3 найти глубину проникновения суточных колебаний температуры в гранит и в сухой песок, если температуропроводность гранита $72,0 \text{ см}^2/\text{ч}$, а сухого песка $23,0 \text{ см}^2/\text{ч}$. Указать причины различия ответов.

6.37. По данным задачи 6.26 найти глубину проникновения суточных колебаний температуры на площадках в полупустыне и на орошаемом хлопковом поле, если температуропроводность почвы на первой площадке $7,7 \text{ см}^2/\text{ч}$, на второй $51,2 \text{ см}^2/\text{ч}$. Указать, какой фактор оказывает преобладающее влияние на глубину распространения колебаний температуры в почве.

6.38.* По данным задачи 6.11 найти амплитуду годового хода температуры поверхности почвы в Смоленске. Определить глубину проникновения годовых колебаний температуры. Как изменится последний ответ при большей (меньшей) температуропроводности? При большей (меньшей) амплитуде годового хода температуры поверхности? Варианты исходных данных см. табл. 16 (приложение 41).

У к а з а н и е. Использовать температуропроводность почвы на данной станции, найденную в задаче 6.34.

6.39. По данным задачи 6.12 вычислить глубину проникновения годовых колебаний температуры для суши и для моря, если температуропроводность суши $29 \text{ см}^2/\text{ч}$, моря $945 \text{ см}^2/\text{ч}$. Какое влияние на климат приморских и континентальных районов оказывает различие тепловых режимов моря и суши, заметное, в частности, из данной задачи?

6.40. В некотором пункте максимум температуры поверхности почвы в суточном ходе отмечен в 13 ч 25 мин. В какое время теоретически наступит максимум на глубинах 20, 40 и 60 см, если температуропроводность на всех глубинах равна $16 \text{ см}^2/\text{ч}$? Как изменится ответ при большей (меньшей) температуропроводности?

6.41. По результатам многолетних наблюдений в Павловске (под Ленинградом) максимальная температура поверхности почвы в суточном ходе наблюдается в 13 ч 10 мин, а на глубине 20 см — в 18 ч 10 мин. Рассчитать время наступления максимума на глубине 40 см, если температуропроводности слоев 0—20 и 20—40 см одинаковы. Выполняется ли качественно и количественно закон запаздывания, если по результатам наблюдений максимум на глубине 40 см в Павловске в среднем наступает в 23 ч 40 мин? Что можно сказать о температуропроводности слоя 20—40 см: больше она или меньше, чем температуропроводность слоя 0—20 см?

6.42.* По данным задачи 6.6 найти запаздывание времени наступления максимума температуры на глубинах 5, 10, 15 и 20 см ($\Delta\tau_5, \Delta\tau_{10}, \Delta\tau_{15}, \Delta\tau_{20}$). Вычислить отношения $\Delta\tau_{10}/\Delta\tau_5$, $\Delta\tau_{15}/\Delta\tau_5$, $\Delta\tau_{20}/\Delta\tau_{10}$ и сравнить полученные значения с теоретическими.

Сделать вывод о выполнении закона сдвига фазы и указать возможные причины отклонений от него. Варианты исходных данных см. табл. 15 (приложение 41).

6.4. Тепловой поток в почве

Поверхностная плотность теплового потока в почве определяется по формуле

$$P = -\lambda \frac{\partial t}{\partial z}, \quad (6.12)$$

где λ — теплопроводность почвы, $-\frac{\partial t}{\partial z}$ — вертикальный градиент температуры. Мгновенные значения P выражаются в кВт/м² с точностью до сотых, суммы P — в МДж/м²: часовые и суточные — с точностью до сотых, месячные — до единиц, годовые — до десятков.

Средняя поверхностная плотность теплового потока через поверхность почвы за интервал времени τ описывается формулой

$$P = \frac{c}{\tau} z_{\text{пр}} \Delta t_{\text{ср}}, \quad (6.13)$$

где c — объемная теплоемкость почвы, τ — интервал, $z_{\text{пр}}$ — глубина проникновения температурных колебаний, $\Delta t_{\text{ср}}$ — разность средних температур слоя почвы до глубины $z_{\text{пр}}$ в конце и начале интервала τ .

По наблюдениям за температурой почвы на стандартных глубинах i (0, 5, 10, 15, 20 см) средняя поверхностная плотность теплового потока на поверхности почвы определяется по сокращенной формуле

$$P = \frac{c}{\tau} S_1, \quad (6.14)$$

или, более точно, по полной формуле

$$P = \frac{c}{\tau} \left(S_1 - \frac{a}{10} S_2 \right), \quad (6.15)$$

где a — температуропроводность,

$$S_1 = \sum_i r_i \Delta t_i, \quad S_2 = 0,14 \cdot 10^{-5} \tau (\Delta t'_1 + \Delta t'_2). \quad (6.16)$$

Здесь r_i — постоянные коэффициенты (см. приложение 1); Δt_i — разность температур на i -й глубине в конце и в начале интервала τ ; $\Delta t'_1$ — разность температур на глубинах 20 и 10 см в начале интервала; $\Delta t'_2$ — то же в конце интервала. Подставляя в формулы значения c (МДж/(м³·К)), τ (с), Δt (°C), a (см²/ч), получаем P

(МВт/м²). При расчетах принято S_1 и S_2 округлять до тысячных. Подробные примеры расчета по формулам (6.14)—(6.16) приведены в Руководстве по теплобалансовым наблюдениям (Л.: Гидрометеиздат, 1977).

Задачи

6.43. Приближенно принимая, что температура верхнего слоя почвы изменяется с глубиной линейно, вычислить поверхностную плотность теплового потока в сухом песке (значение λ см. в п. 6.2); если температура его поверхности составляет 23,6°C, а температура на глубине 5 см равна 19,4°C. О чем говорит знак ответа? Происходит ли при сделанном предположении накопление или потеря тепла в верхнем 5-см слое почвы? Изменяется ли температура на глубине 5 см со временем?

6.44. Условно считая, что температура в снежном покрове линейно изменяется с глубиной, найти поверхностную плотность теплового потока в покрове высотой 10 см, если плотность снега равна $0,2 \cdot 10^3$ кг/м³, температура поверхности снега —14,3°C, температура поверхности почвы под снегом —2,7°C. Каково направление этого потока?

6.45. Средняя теплопроводность земной коры составляет 2,34 Вт/(м·К). Температура коры увеличивается примерно на 1°C на каждые 33 м глубины. Приближенно определить количество теплоты, поступающее за год из недр Земли к площадке в 1 м² на земной поверхности. Результат сравнить с последним ответом к задаче 5.5 и вычислить долю прихода внутрипланетарного тепла к земной поверхности от прихода солнечной энергии к внешней периферии атмосферы.

6.46. Многолетняя средняя температура почвы в Москве на разных глубинах в марте и августе:

Месяц	Глубина, м												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Март	—1,4	—0,1	1,4	3,0	4,2	5,1	5,4	6,0	6,2	6,3	6,3	6,1	6,0
Август	16,6	14,4	12,3	10,4	8,5	7,2	6,1	5,7	5,4	5,5	5,6	5,8	6,0

Вычислить среднюю поверхностную плотность теплового потока в почве за период с 1 марта по 31 августа, если средняя объемная теплоемкость этой почвы за указанный период равна 2,09 МДж/(м³·К). Найти количество теплоты, накапливаемое за этот период столбом почвы сечением 1 м² и глубиной 12 м.

6.47.* По исходным данным задачи 6.6 вычислить среднюю поверхностную плотность теплового потока в почве за каждый интервал по сокращенной и по полной формуле, если объемная теплоемкость почвы на данной площадке равна 1,51 МДж/(м³·К).

Сравнить результаты и оценить, насколько точнее результат, полученный при использовании полной формулы. Определить поверхностную плотность теплового потока в почве в моменты 0,4, ..., 20, 24 ч и найти суточную его сумму. Объяснить знак полученной величины. Построить и проанализировать график суточного хода P . Варианты исходных данных см. табл. 15 (приложение 41).

Указания. 1. При вычислениях по полной формуле использовать теплопроводность, найденную в задаче 6.25. Поверхностную плотность теплового потока в конкретные моменты находить как среднее из значений, относящихся к двум соседним интервалам. 2. В каждом варианте за первый срок принимать 20 ч предыдущих суток, а за два последних срока — 0 и 4 ч следующих суток. Суточную сумму определять численным интегрированием функции $P(\tau)$ за интервал от 0 ч данных суток до 0 ч следующих суток. При интегрировании использовать формулу трапеций.

Глава 7

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ НИЖНЕГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

7.1. Изменения температуры воздуха во времени и в пространстве

Предлагаемые ниже задачи иллюстрируют влияние некоторых факторов на амплитуду суточного и годового хода температуры приземного слоя атмосферы. Вертикальное же распределение (профиль) этой температуры при равновесной стратификации более или менее точно описывается логарифмическим законом

$$\frac{t_1 - t_2}{t_3 - t_2} = \frac{\lg z_2/z_1}{\lg z_2/z_3}, \quad (7.1)$$

где t_1, t_2, t_3 — температура на уровнях z_1, z_2, z_3 , двумя из которых могут быть, например, стандартные уровни градиентных измерений 0,5 и 2,0 м.

Задачи

7.1. Температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$) на площадке ЛГМИ в Даймище в пасмурный день 9 июля и в ясный день 13 июля 1964 г.:

Дата	Срок, ч											
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
9 июля	13,0	13,4	13,1	13,6	14,1	14,5	18,3	18,8	18,4	16,1	14,1	13,7
13 июля	10,9	8,7	11,0	17,4	19,6	21,9	23,0	24,9	24,5	21,0	12,8	10,0

Построить и проанализировать кривые суточного хода. Указать причины его различия в пасмурные и ясные дни. Как влияют на суточный ход температуры воздуха форма облаков и их количество? Какие другие погодные явления на него влияют и каким образом? Используя исходные данные задачи 6.1, построить совмещенные графики суточного хода температуры поверхности почвы и воздуха отдельно для каждого из указанных дней. Рассмотреть связь изменения температуры воздуха с изменениями температуры поверхности почвы в эти дни.

7.2. Многолетняя средняя температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$) в Куйбышеве в январе и июле:

Месяц	Срок, ч					
	0	2	4	6	8	10
Январь	-14,1	-14,2	-14,4	-14,5	-14,5	-14,0
Июль	18,3	17,3	16,5	17,3	19,6	22,0

Месяц	Срок, ч					
	12	14	16	18	20	22
Январь	-13,1	-12,5	-12,9	-13,4	-13,8	-13,9
Июль	23,7	24,4	24,5	23,5	21,3	19,5

Построить и проанализировать кривые суточного хода. Объяснить причины его различия на данной станции зимой и летом.

Указание. Данные за 0 ч использовать дважды — в начале и в конце суток.

7.3. Многолетняя средняя температура воздуха в июле в двух континентальных пунктах, один из которых (Торжок) находится примерно на 57° с. ш., а другой (Байрам-Али) — на 38° с. ш.:

Пункт	Срок, ч											
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Торжок	13,8	12,9	12,4	14,1	16,9	19,0	20,3	20,7	20,7	19,7	17,7	15,2
Байрам-Али	26,2	24,5	22,7	22,3	28,7	33,5	35,6	36,7	37,1	35,7	30,9	28,1

Построить график суточного хода и указать причины его различия над сушей на разных широтах.

См. указание к задаче 7.2.

7.4. Температура воздуха (°C) над Атлантическим океаном 15 августа 1968 г. на судах погоды *E* и *M* (35 и 66° с. ш.):

Судно погоды	Срок, ч								
	0	3	6	9	12	15	18	21	24
<i>E</i>	25,2	25,1	25,1	25,2	25,5	25,7	26,0	25,9	25,5
<i>M</i>	8,0	8,1	8,5	9,8	10,0	10,0	9,5	9,5	9,7

Построить и проанализировать кривые суточного хода. Сравнить их с кривыми, построенными по данным предыдущей задачи. Как и почему изменяется широтное различие суточного хода температуры воздуха при переходе с суши на океан?

7.5. Средняя за 8 сут температура воздуха на высоте 3 м над полупустыней и близлежащим орошаемым хлопковым полем совхоза Пахта-Арал (УзССР) в июле 1952 г.:

Вид поверхности	Срок, ч мин									
	0 30	4 30	6 30	8 30	10 30	12 30	14 30	16 30	18 30	20 30
Полупустыня	24,4	20,3	23,0	28,2	33,1	35,7	37,0	37,1	34,0	29,6
Орошаемое поле	23,2	19,4	21,2	25,9	30,2	33,1	34,4	34,0	30,6	26,6

Построить и проанализировать кривые суточного хода. Объяснить причины его различия над разными участками земной поверхности.

Указание. Данные за 0 ч 30 мин использовать дважды — в начале и в конце суток.

7.6. Многолетняя средняя температура воздуха в июле на двух соседних станциях, одна из которых (Ашхабад) находится на равнине, а другая (Хейрабад) — на возвышенности:

Пункт	Срок, ч											
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Ашхабад	27,4	25,9	24,9	25,2	29,9	33,1	35,2	36,2	36,4	35,1	30,4	28,7
Хейрабад	15,2	14,5	13,9	15,3	17,9	19,2	20,2	20,5	20,3	19,1	16,8	15,8

Построить и проанализировать кривые суточного хода. Указать причины его различия на станциях, расположенных на равнине и

на возвышенности. Рассмотреть и объяснить суточный ход разности температур на этих станциях.

См. указание к задаче 7.2.

7.7. Температура воздуха на высоте 25 см над южным и северным склонами возвышенности в Саблино (под Ленинградом):

Склон	Срок, ч						
	0	10	12	14	16	18	20
Южный	28,4	32,0	32,6	35,8	32,6	26,5	22,4
Северный	27,8	31,4	31,2	30,8	28,6	25,0	21,7

Вычислить разность температур над южным и северным склонами в каждый срок. Указать причины ее изменения в течение суток.

7.8. Средняя за 9 сут температура воздуха в 13 ч над южным и северным склонами возвышенности в Батуми в сентябре—октябре:

Склон	Высота, см				
	5	25	50	100	150
Южный	28,0	25,2	23,8	22,6	22,0
Северный	23,8	22,6	22,2	22,0	21,8

Вычислить разность температур над южным и северным склонами на каждой высоте. Указать причины ее изменения с высотой.

7.9. Многолетняя средняя температура воздуха в июле на станциях Таллин и Якутск, находящихся примерно на одинаковой широте:

Пункт	Срок, ч											
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Таллин	14,6	14,1	13,8	14,9	16,7	18,0	18,7	18,9	18,9	18,3	17,0	15,4
Якутск	14,7	13,4	13,1	15,7	18,3	20,7	22,4	23,3	23,3	22,7	20,9	17,0

Построить и проанализировать кривые суточного хода. Указать причины его различия на береговой и континентальной станциях. Вычислить разность температур на этих станциях в каждый срок. Построить и рассмотреть суточный ход разности температур.

См. указание к задаче 7.2.

7.10. Средняя суточная температура воздуха на ст. Токсово (Ленинградская область) в период с 10 по 20 апреля 1957 г.:

Дата . . . 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
 $t^{\circ}\text{C}$. . . -4,0 -4,5 -1,1 -3,7 -3,2 -1,7 -2,1 0,0 2,2 1,6 2,8

Вычислить межсуточную изменчивость температуры воздуха и среднее ее значение за весь период на указанной станции. Какие атмосферные процессы характеризует эта величина?

7.11. Средняя за 8 сут температура воздуха на разной высоте в полупустыне в районе совхоза Пахта-Арал в июле 1952 г.:

Высота, м	Срок, ч мин									
	0 30	4 30	6 30	8 30	10 30	12 30	14 30	16 30	18 30	20 30
0,15	22,8	18,6	23,6	30,4	36,3	39,3	40,2	39,3	35,2	27,2
0,50	23,3	19,1	23,5	29,4	34,8	37,8	38,9	38,3	34,9	28,0
1,50	24,0	19,6	23,3	28,7	33,6	36,3	37,6	37,5	35,0	28,8
3,00	24,4	20,3	23,0	28,2	33,1	35,7	37,0	37,1	34,9	29,6

Построить и проанализировать график суточного хода температуры воздуха на всех высотах (см. указание к задаче 7.5). Выполняются ли и в этом случае законы, характеризующие распространение колебаний температуры в почве? Вычислить разность температур на высотах 0,5 и 3,0 м за каждый срок. Рассмотреть суточный ход разности температур. Какие изменения стратификации нижнего слоя и интенсивности турбулентного перемешивания связаны с этим ходом? Какие факторы приводят к образованию и разрушению ночной приземной инверсии? Зная, что температура поверхности почвы в сроки 0 ч 30 мин и 14 ч 30 мин составляет 22,2 и 63,2 $^{\circ}\text{C}$ (см. задачу 6.4), построить и проанализировать профили температуры от поверхности почвы до высоты 3,0 м в эти сроки. Вычислить вертикальный градиент температуры в слое 0—3 м ($^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$) за те же сроки и сравнить его с сухоадиабатическим градиентом. Сделать выводы о стратификации слоя 0—3 м, о направлении и интенсивности переноса тепла в этом слое.

7.12. Температура поверхности почвы и воздуха на нескольких уровнях в одном и том же пункте:

Срок, ч	Высота, м				
	0,0	0,2	0,5	1,0	2,0
3	4,3	5,7	6,1	6,3	6,6
5	11,4	8,6	8,9	9,1	9,2
13	25,8	17,6	17,3	17,0	16,8
17	11,7	13,7	13,6	13,5	13,4

Построить и проанализировать вертикальные профили температуры воздуха в каждый срок. Вычислить значения вертикального градиента температуры ($^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$) в каждом слое для всех сроков. Рассмотреть характер его изменения с высотой и со временем. Указать направления переноса тепла в этих слоях.

7.13. Температура воздуха, измеренная на 300-метровой метеорологической мачте 11—12 июля 1963 г.:

Высота, м	Срок, ч				
	1	7	13	19	1
0,5	13,3	16,3	21,5	19,2	11,9
25	13,5	14,9	19,9	19,2	14,8
97	13,6	13,9	19,0	18,8	17,8
193	13,6	13,8	18,4	18,1	17,8
301	13,4	12,3	17,0	17,9	17,4

Найти амплитуду суточного хода температуры на каждой из высот. Указать возможные причины различия ее изменения до уровня 193 м и выше. Вычислить вертикальный градиент температуры ($^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$) в каждом слое в срок 13 ч и сравнить с сухадиабатическим градиентом. Сделать вывод о стратификации этих слоев. Построить и сравнить между собой профили температуры за 1 ч данных и следующих суток. Определить вертикальную протяженность слоя инверсии в эти два срока. Установить характер стратификации слоя 0,5—25 м в срок 19 ч и указать, чем такая стратификация обусловлена.

7.14. Вычислить коэффициенты для перехода от разности температур на уровнях 0,2 и 1,0; 0,5 и 1,5; 0,4 и 1,8 м к их разностям на стандартных уровнях градиентных измерений (0,5 и 2,0 м). Использовать логарифмический закон для профиля температуры в приземном слое атмосферы.

7.15.* Считая профиль температуры в приземном слое атмосферы логарифмическим, вычислить температуру на уровне 1,0 м, если на уровнях 0,5 и 2,0 м она составляет 22,0 и 21,1 $^{\circ}\text{C}$. Ответ сравнить с фактическим значением, равным 21,6 $^{\circ}\text{C}$. В случае расхождения указать возможную причину. По тем же данным найти температуру на уровне 8,0 м и проанализировать характер профиля температуры в слое 0,5—8,0 м. Варианты исходных данных см. табл. 6 (приложение 41).

7.16. Многолетняя средняя месячная температура воздуха на станциях, лежащих примерно на одинаковой долготе, но на разных широтах:

Пункт	I	II	III	IV	V	VI
Салем (Южная Индия)	23,9	25,8	28,5	30,4	29,6	28,3
Агра (Северная Индия)	15,6	18,2	24,8	31,2	34,4	34,1
Алма-Ата	-7,4	-5,6	1,8	10,5	16,2	20,6
Омск	-19,4	-17,9	-11,0	1,0	11,3	16,8
Сургут	-22,0	-19,6	-13,3	-3,5	4,1	13,0

Пункт	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Салем (Южная Индия)	27,3	26,8	26,4	26,0	24,9	23,9
Агра (Северная Индия)	30,0	29,0	29,0	26,3	20,4	16,2
Алма-Ата	23,3	22,3	16,9	9,5	0,8	-4,8
Омск	19,4	16,5	11,0	1,9	-9,5	-16,5
Сургут	16,9	14,0	7,8	-1,4	-13,2	-20,3

Построить и проанализировать кривые годового хода. Указать причины его различия на разных широтах.

7.17. Многолетняя средняя месячная температура воздуха над Атлантическим океаном (судно погоды К) и над сушей на той же широте (ст. Кзыл-Орда, Туркменская ССР):

Пункт	I	II	III	IV	V	VI
Судно погоды К	-12,3	11,5	12,0	12,6	13,9	16,3
Кзыл-Орда	-9,3	-7,3	0,8	11,7	19,4	24,3

Пункт	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Судно погоды К	18,0	18,9	18,4	16,6	14,4	13,1
Кзыл-Орда	25,7	23,8	17,0	8,7	-0,1	-6,6

Построить и проанализировать кривые годового хода. Указать причины его различия над океаном и над сушей. Вычислить разность температур воздуха над океаном и над сушей для каждого месяца. Построить и проанализировать кривую ее годового хода. Указать влияние этой разности на развитие атмосферных процессов.

7.18. Многолетняя средняя месячная температура воздуха на двух станциях, лежащих примерно на одинаковой широте:

Пункт	I	II	III	IV	V	VI
Таллин	-4,7	-5,5	-2,7	2,6	8,4	13,2
Якутск	-43,2	-35,9	-22,2	-7,4	5,7	15,4

Пункт	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Таллин	16,6	15,6	11,1	6,0	1,2	-2,6
Якутск	18,7	14,8	6,2	-6,9	-28,0	-39,8

Построить и проанализировать кривые годового хода. Указать причины его различия на береговой и континентальной станциях. Вычислить разность температур воздуха на этих станциях для каждого месяца. Построить и проанализировать кривую ее годового хода. Выводы сравнить с результатами задач 7.9 и 7.17.

7.19. Многолетняя средняя месячная температура на станциях Казахской ССР, расположенных близко друг от друга, но лежащих на разной высоте над уровнем моря:

Пункт	I	II	III	IV	V	VI
Или (453 м)	-11,4	-8,1	2,4	11,9	17,9	22,7
Алма-Ата (848 м)	-7,4	-5,6	1,8	10,5	16,2	20,6
Сосновка (1007 м)	-6,5	-5,0	1,3	9,6	14,8	19,1
Верхний Горельник (2252 м)	-7,8	-6,7	-2,5	2,3	7,0	10,6
Мын-Джилки (3036 м)	-12,7	-11,4	-7,3	-2,6	1,5	5,0

Пункт	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Или (453 м)	25,4	24,1	17,7	9,4	-0,4	-7,6
Алма-Ата (848 м)	23,3	22,3	16,9	9,5	0,8	-4,8
Сосновка (1007 м)	21,7	20,6	15,4	8,3	0,2	-4,0
Верхний Горельник (2252 м)	13,3	12,9	8,4	3,3	-2,0	-5,2
Мын-Джилки (3036 м)	7,4	7,5	3,1	-1,8	-6,9	-10,2

Построить и проанализировать кривые годового хода. Указать причину его различия на разных высотах. Для июля вычислить вертикальный градиент температуры ($^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$) между соседними (по вертикали) станциями. Рассмотреть его изменение с высотой.

Вычислить для того же месяца средний градиент в слое 453—3036 м и сравнить его со средним значением градиента для всей тропосферы. Используя значение среднего градиента и считая, что оно сохраняется и в слое 0—453 м, привести к уровню моря среднюю температуру за июль для каждой станции.

7.20. Средняя температура воздуха в январе и в июле на станциях, сгруппированных попарно так, что станции каждой пары расположены примерно на одинаковой долготе:

Станции	Примерное расстояние между станциями, км	Месяц	
		I	VII
Мурманск, Симферополь	2700	—10,0 —0,5	12,9 21,2
Архангельск, Краснодар	2170	—12,5 —1,8	15,6 23,2
Печора, Ашхабад	3000	—18,3 1,4	14,8 30,7
Салехард, Ташкент	2820	—23,6 —0,9	13,8 26,9

Найти численное значение и направление горизонтального градиента температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}/100\text{ км}$) для каждой пары станций в указанные месяцы. Как и почему изменяется градиент от зимы к лету? Для каких пар станций это изменение наибольшее и почему?

7.21. Многолетние средние месячные температуры поверхности почвы и воздуха в Смоленске в январе -9 и $-8,8^{\circ}\text{C}$, в июле 20 и $17,1^{\circ}\text{C}$. Вычислить вертикальный градиент температуры в слое 0—2,0 м в эти месяцы ($^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$). Сравнить результаты с сухадиабатическим градиентом. Сделать вывод о средней стратификации слоя 0—2,0 м в эти месяцы. Определить направление переноса тепла в этом слое. Наблюдается ли вентильный эффект в годовом изменении этого переноса?

7.2. Факторы, определяющие тепловой режим нижнего слоя атмосферы

Поверхностная плотность вертикального молекулярного теплового потока определяется соотношением

$$M = -\lambda \frac{\partial t}{\partial z}, \quad (7.2)$$

где λ — теплопроводность неподвижного воздуха (см. п. 6.2), $-\partial t/\partial z$ — вертикальный градиент температуры воздуха.

Изменение температуры воздуха под влиянием адиабатического изменения давления определяется из первого начала термодина-

мики (п. 4.1), изменение под влиянием теплоты фазовых превращений воды — с помощью эквивалентной температуры (п. 4.10).

Поверхностная плотность вертикального турбулентного теплового потока на высоте z в приземном слое атмосферы описывается формулой

$$L = -\rho c_p K \frac{\partial t}{\partial z}, \quad (7.3)$$

где ρ — плотность воздуха, c_p — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении (см. приложение 1), K — коэффициент турбулентности. Мгновенные значения L выражаются в кВт/м² с точностью до сотых, суммы L — в МДж/м², причем часовые и суточные — с точностью до сотых, месячные — до единиц, годовые — до десятков.

Из метеорологических наблюдений на суше значения L можно получить следующими методами.

Метод теплового баланса. Согласно этому методу

$$L = A(B - P), \quad (7.4)$$

где

$$A = \frac{\Delta t}{\Delta t + 1,56 \Delta e}, \quad (7.5)$$

B — радиационный баланс деятельного слоя (кВт/м²), P — поверхностная плотность теплового потока в почве (кВт/м²), Δt и Δe — разность температур и разность парциального давления водяного пара на стандартных высотах градиентных наблюдений (0,5 и 2,0 м). Формула (7.4) используется только при выполнении следующих условий:

$$(B - P) \geq 0,07 \text{ кВт/м}^2; \quad \Delta t \geq 0,1 \text{ }^\circ\text{C}; \quad \Delta e \geq 0,1 \text{ гПа}. \quad (7.6)$$

Стационарный метод турбулентной диффузии. Используется для обширных однородных и ровных участков деятельного слоя в тех случаях, когда условия (7.6) не выполняются или не имеется необходимых исходных данных. По этому методу

$$L = 0,94 \frac{K_1}{z'} \Delta t, \quad (7.7)$$

где K_1 — коэффициент турбулентности (м²/с) на высоте 1 м (п. 3.1).

Уточненный метод турбулентной диффузии (метод тангенсов). Используется при наличии результатов градиентных наблюдений более чем на двух уровнях. По этому методу

$$L = -1,3K_1 \operatorname{tg} \beta. \quad (7.8)$$

Смысл величины $\lg \beta$ и порядок ее определения изложены в п. 3.1. При известной затрате тепла на испарение V значение L можно приближенно получить из отношения Боуэна

$$\frac{L}{V} = 0,64 \frac{t_0 - t}{E_1 - e}, \quad (7.9)$$

где E_1 — давление насыщенного водяного пара, определяемое по температуре испаряющей поверхности t_0 ; t — температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$); e — парциальное давление водяного пара (гПа). Этим соотношением можно пользоваться только для определения L над водоемами или над избыточно увлажненной сушей.

При известных B , P и V можно получить L как остаточный член уравнения теплового баланса:

$$L = B - P - V. \quad (7.10)$$

Этот способ удобен, в частности, для получения средних многолетних годовых сумм L , так как соответствующие суммы P как для суши, так и для замкнутых водоемов равны нулю.

Для суточных сумм L над морями и океанами (МДж/м^2) можно пользоваться формулой

$$L = 0,21 u_{\text{ср}} (t_0 - t), \quad (7.11)$$

где $u_{\text{ср}}$ — средняя за сутки скорость ветра (м/с) на высоте судовых наблюдений; t_0 и t — средние за сутки температуры поверхности воды и воздуха.

Задачи

7.22. Вычислить поверхностную плотность теплового потока через горизонтальную площадку в приземном слое атмосферы, если вертикальный градиент температуры на уровне этой площадки равен $30,0^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}$ и воздух абсолютно неподвижен.

Указание. Принять, что вблизи площадки температура воздуха изменяется с высотой линейно.

7.23. На высоте $0,5 \text{ м}$ над земной поверхностью вертикальный градиент температуры составляет $25,0^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}$, а на уровне $1,5 \text{ м}$ $20,0^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}$. Найти изменение температуры 1 м^3 воздуха в слое $0,5$ — $1,5 \text{ м}$ за 1 ч , если в течение этого часа воздух находится при нормальных условиях и абсолютно неподвижен. Оценить роль молекулярной теплопроводности в формировании теплового режима атмосферы.

См. указание к задаче 7.22.

7.24. Вычислить адиабатическое изменение температуры ($^{\circ}\text{C/ч}$) 1 м^3 сухого воздуха, находившегося при нормальных условиях, если давление изменяется на 1 гПа в час. Оценить роль адиабатических изменений давления в формировании теплового режима атмосферы.

Указание. Считать, что изменение температуры и давления во времени происходит линейно.

7.25. Массовая доля водяного пара 10,0‰. Найти изменение температуры 1 м³ воздуха за 1 ч, если весь содержащийся в воздухе пар за это время сконденсируется, а теплота, выделившаяся при конденсации, пойдет только на изменение температуры этого объема воздуха при постоянном давлении. Оценить роль фазовых переходов воды в атмосфере в формировании ее теплового режима по сравнению с ролью процессов, рассмотренных в задачах 7.23—7.24. Чем объясняется нереальность абсолютного значения полученного ответа?

7.26. Вычислить поверхностную плотность вертикального турбулентного теплового потока в приземном слое атмосферы через площадку, на уровне которой плотность воздуха равна нормальной, коэффициент турбулентности 0,40 м²/с, вертикальный градиент температуры 30,0 °С/100 м. Ответ сравнить с ответом к задаче 7.22 и сделать вывод об относительной роли сравниваемых процессов.

7.27. Найти изменение поверхностной плотности и направления вертикального турбулентного теплового потока в приземном слое атмосферы при переходе от дня к ночи, если при этом вертикальный градиент температуры сохранит свое абсолютное значение, но переменит знак, а коэффициент турбулентности уменьшится в 10 раз. В чем состоит вентильный эффект и какова его роль в суммарном теплообмене деятельного слоя с атмосферой за длительные интервалы времени?

7.28. По данным задачи 3.1 вычислить поверхностную плотность вертикального турбулентного теплового потока в Ленинградской области в 12 ч 9 июля 1951 г. и его долю (%) от радиационного баланса деятельного слоя. Для каких видов деятельного слоя характерен последний результат?

7.29.* По приведенным ниже данным вычислить поверхностную плотность вертикального турбулентного теплового потока во все сроки наблюдений. Построить и проанализировать график суточного хода. Вычислить сумму потока за интервал с 1 ч данных суток до 1 ч следующих суток. Отчетливо ли выражен вентильный эффект? Варианты исходных данных см. табл. 7 (приложение 41).

Срок, ч	$t_{0,5}$	$t_{2,0}$	$u_{0,5}$	$u_{2,0}$
1	12,6	13,7	0,2	0,7
7	13,8	14,1	0,5	0,9
10	17,2	16,8	1,5	2,1
13	24,6	22,9	3,7	4,7
16	22,1	21,1	2,7	3,4
19	19,3	19,1	2,4	2,9
1	15,4	16,3	1,2	1,6

7.30.* По исходным данным задачи 3.5 найти поверхностную плотность вертикального турбулентного потока тепла в призем-

ном слое атмосферы методом теплового баланса, стационарным и уточненным методами турбулентной диффузии. Считая первый метод наиболее точным, определить относительную погрешность второго и третьего ответов. Почему первый метод считается наиболее точным? Варианты исходных данных см. табл. 6 (приложение 41).

7.31. Суточная сумма испарения с поверхности пруда 1,34 мм. Найти суточную сумму турбулентного теплового потока над прудом, если в среднем за эти сутки температура поверхности 10,5°C, воздуха 11,5°C, относительная влажность 77 %. Каков смысл знака ответа? Использовать отношение Боуэна.

7.32. Вычислить годовую сумму турбулентного теплового потока над поверхностью замкнутого водоема, если годовые суммы радиационного баланса и испарения составляют 3010 МДж/м² и 910 мм. Использовать уравнение теплового баланса.

7.33. Вычислить суточную сумму турбулентного теплового потока над поверхностью моря, если средние за эти сутки температура поверхности 6,3°C, температура воздуха 5,3°C, скорость ветра 6 м/с.

Глава 8

ВОДЯНОЙ ПАР В АТМОСФЕРЕ

8.1. Суточный и годовой ход характеристик влажности воздуха

Задачи

8.1. Построить и проанализировать кривые суточного хода температуры воздуха t , парциального давления водяного пара e , относительной влажности f и дефицита точки росы Δt_d в ясный и пасмурный дни (n — количество облаков) по данным станции, находящейся на северо-западе ЕТС за 9 и 11 июля 1977 г.:

Метеорологический элемент	Срок наблюдения, ч							
	0	3	6	9	12	15	18	21
9 июля								
n баллы	0/0	0/0	0/0	2/2	3/3	4/4	2/2	0/0
t °C	11,0	7,7	8,8	18,9	20,8	22,6	21,1	10,5
e гПа	12,1	10,4	10,7	13,4	10,8	11,9	12,9	11,0
f %	92	99	95	62	44	43	52	87
Δt_d °C	1,2	0,1	0,8	7,6	12,7	13,1	10,4	2,1

Метеорологический элемент	Срок наблюдения, ч							
	0	3	6	9	12	15	18	21

11 июля

<i>n</i> баллы	10/3	10/4	10/6	10/0	9/2	9/7	10/10	1/1
<i>t</i> °C	15,1	11,6	12,5	17,0	19,2	17,0	14,1	13,5
<i>e</i> гПа	15,2	13,3	14,0	15,8	16,2	15,8	15,5	13,0
<i>f</i> %	94	97	97	81	73	81	96	97
Δt_d °C	1,9	0,4	0,5	3,2	5,0	3,2	0,6	2,6

Указать время наступления и значения максимума и минимума рассматриваемых метеорологических элементов и привести объяснения. Сопоставить суточный ход характеристик влажности с суточным ходом температуры. Объяснить различие суточного хода характеристик влажности в ясные и пасмурные дни. Какие факторы определяют суточный ход парциального давления водяного пара, относительной влажности и температуры точки росы?

8.2. Построить и проанализировать кривые суточного хода температуры воздуха, парциального давления водяного пара, относительной влажности и дефицита точки росы по данным наблюдений станции, находящейся на северо-западе ЕТС за 15 и 20 января 1978 г.:

Метеорологический элемент	Срок наблюдения, ч							
	0	3	6	9	12	15	18	21

20 января

<i>n</i> баллы	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
<i>t</i> °C	-11,2	-13,3	-16,1	-15,1	-14,2	-10,5	-11,3	-11,9
<i>e</i> гПа	2,2	2,0	1,5	1,7	1,8	2,5	2,2	2,1
<i>f</i> %	85	89	86	90	88	92	87	86
Δt_d °C	2,1	1,1	1,8	1,3	1,5	1,2	2,0	2,0

15 января

<i>n</i> баллы	10/10	6/0	9/0	5/1	10/10	10/10	10/10	10/10
<i>t</i> °C	-10,7	-15,3	-15,3	-17,2	-9,2	-7,1	-3,3	-1,8
<i>e</i> гПа	2,6	1,7	1,8	1,4	2,8	3,2	4,1	4,6
<i>f</i> %	93	92	93	91	98	88	86	86
Δt_d °C	0,5	1,1	0,2	1,5	0,4	1,5	2,1	2,0

Выполнить задание и ответить на вопросы к задаче 8.1. Сопоставить суточный ход характеристик влажности в задачах 8.1 и 8.2 и указать, чем отличается суточный ход характеристик влажности воздуха в холодный и теплый сезоны?

8.3. По осредненным за октябрь 1965 г. ежечасным наблюдениям за температурой и относительной влажностью воздуха на агрометеостанции Ереван вычислить парциальное давление водяного пара и температуру точки росы; проанализировать суточный ход характеристик влажности воздуха.

Время, ч	t °C	f %	Время, ч	t °C	f %	Время, ч	t °C	f %
1	8,5	75	9	10,6	71	17	13,2	59
2	8,0	78	10	11,2	67	18	11,2	71
3	7,9	78	11	12,3	61	19	9,7	76
4	7,6	79	12	13,5	57	20	9,1	78
5	7,3	80	13	14,3	54	21	8,9	76
6	6,9	83	14	14,3	54	22	8,9	75
7	7,0	82	15	14,4	52	23	8,6	75
8	8,6	76	16	14,1	53	24	8,4	74

8.4. Построить и проанализировать кривые годового хода средней месячной температуры воздуха, парциального давления водяного пара, относительной влажности и дефицита точки росы по данным станции ЛГМИ за 1976 и 1977 г.г.

Метеорологическая величина	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1976 г.												
t °C	-10,7	-9,3	-3,8	2,9	10,6	12,2	16,4	14,4	9,3	0,3	0,0	-4,1
e гПа	2,7	2,8	4,0	5,4	7,7	10,6	14,0	12,7	9,7	5,2	5,7	4,2
f %	88	80	83	73	62	74	75	78	80	82	90	88
Δt_d °C	0	1,0	1,9	4,6	7,4	4,4	4,4	3,9	2,8	2,5	0,9	0,9
1977 г.												
t °C	-7,7	-7,9	-2,2	4,4	11,3	15,7	17,1	15,8	9,6	4,6	2,5	-6,0
e гПа	3,2	3,2	4,5	6,2	9,0	12,0	14,7	14,3	9,9	7,3	6,5	3,6
f %	84	86	80	74	68	67	76	78	79	83	87	84
Δt_d °C	0,9	0,7	1,9	4,2	5,8	6,0	4,4	3,5	2,8	2,1	1,6	1,1

Указать время наступления максимума и минимума приведенных в таблице значений метеорологических величин, амплитуду годового хода и привести объяснения. Сопоставить годовой ход характеристик влажности с годовым ходом температуры воздуха.

8.5. По многолетним средним месячным значениям температуры и парциального давления водяного пара определить средние месячные значения относительной влажности и температуры точки росы. Проанализировать годовой ход указанных характеристик влажности.

Станция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
---------	---	----	-----	----	---	----	-----	------	----	---	----	-----

Температура воздуха, °C

Кустанай	-17,8	-17,0	-10,7	1,8	12,9	18,4	20,4	18,1	11,9	3,0	-8,4	-14,9
Сарыч-Маяк	4,5	4,1	6,1	9,9	15,0	19,8	23,6	23,8	20,0	15,3	10,2	6,8

Парциальное давление водяного пара, гПа

Кустанай	1,9	1,7	2,7	5,9	8,8	12,9	14,0	12,7	8,9	5,7	3,7	2,0
Сарыч-Маяк	6,5	6,3	6,6	8,6	12,0	15,4	16,8	16,9	18,8	11,5	9,9	7,8

Как различается годовой ход рассмотренных характеристик влажности на континентальной и береговой станциях?

8.2. Распределение влажности воздуха с высотой в тропосфере

8.2.1. Изменение влажности воздуха в приземном слое

Изменение влажности с высотой в приземном слое определяется характером возрастания коэффициента турбулентности с высотой при постоянном по высоте турбулентном потоке водяного пара.

При линейном возрастании коэффициента турбулентности с высотой в приземном слое атмосферы обычно наблюдается логарифмический вертикальный профиль парциального давления водяного пара:

$$\frac{e_1 - e_2}{e_2 - e_3} = \frac{\ln(z_2/z_1)}{\ln(z_3/z_2)}, \quad (8.1)$$

где e_1 , e_2 , e_3 — парциальное давление водяного пара на уровнях z_1 , z_2 , z_3 .

Отклонения вертикального распределения влажности от логарифмического наблюдаются при существенных отклонениях термического состояния приземного слоя от равновесного: при неустойчивом состоянии атмосферы парциальное давление водяного пара убывает с высотой медленнее, а при инверсионном состоянии быстрее, чем по логарифмическому закону.

8.2.2. Изменение характеристик влажности в свободной атмосфере

Изменение характеристик влажности с высотой описывается следующими эмпирическими формулами:

1) формулы для парциального давления водяного пара Ганна, полученные по материалам наблюдений в Альпах

$$e_z = e_0 \cdot 10^{-z/6,3}, \quad (8.2)$$

и по аэрологическим данным

$$e_z = e_0 \cdot 10^{-z/5,0}, \quad (8.3)$$

где e_0 , e_z — парциальное давление водяного пара (гПа) у поверхности Земли и на высоте z , z — высота (км) над поверхностью Земли;

2) формулы Зюринга для парциального давления водяного пара

$$e_z = e_0 \cdot 10^{-z/6 - z^2/120} \quad (8.4)$$

и для массовой доли водяного пара

$$s_z = s_0 \cdot 10^{-z/9 - z^2/120}, \quad (8.5)$$

где s_0 и s_z — массовая доля водяного пара (‰) у поверхности Земли и на высоте z (км);

3) формула Н. Ф. Накоренко для парциального давления водяного пара

$$e_z = e_0 \cdot 10^{-k(t_0 - t)}, \quad (8.6)$$

где t_0 и t — температура воздуха у земной поверхности и на высоте z , k — эмпирический коэффициент, равный 0,0387.

Интегральное содержание водяного пара W есть количество водяного пара, выраженное в граммах или килограммах, содержащееся в столбе атмосферы с площадью основания 1 см² или 1 м². Значение W (г/м²) можно определить, просуммировав значения абсолютной влажности на всех высотах от поверхности Земли до высоты z :

$$W = \int_0^z a(z) dz, \quad (8.7)$$

где $a(z)$ — абсолютная влажность (г/м³) на высоте z .

Поскольку при радиозондировании измеряется массовая доля водяного пара, то для определения интегрального содержания водяного пара (кг/м²) применяется формула

$$W = \frac{1}{g} \int_{p_0}^{p_z} s(p) dp, \quad (8.8)$$

где g — ускорение свободного падения; p_0 и p_z — давление у поверхности Земли и на высоте z ; $s(p)$ — массовая доля водяного пара в 10³ ‰.

Интегрирование на практике выполняется графически методом трапеций:

$$W = 0,5 \left(\frac{s_0}{2} + s_1 + s_2 + \dots + \frac{s_n}{2} \right), \quad (8.9)$$

где s_0 — массовая доля водяного пара у поверхности Земли; $s_1, s_2, \dots, s_n$ — массовая доля водяного пара (‰) на уровнях, соответствующих изменению давления, равному 50 гПа. Приблизительно интегральное содержание водяного пара можно вычислить, используя значение влажности на основных изобарических поверхностях:

$$W = 2,25s_{850} + 1,75s_{700} + s_{500}. \quad (8.10)$$

Задачи

8.6. По данным градиентных наблюдений на четырех уровнях на учебной станции Даймище построить и проанализировать вертикальные профили парциального давления водяного пара (гПа) в разное время суток за 9 июля 1977 г. Вычислить вертикальный градиент парциального давления водяного пара (гПа/м) за все сроки в каждом слое.

Высота, м	Срок наблюдения, ч					
	0	4	8	12	16	22
0,2	10,0	8,9	13,6	11,8	12,1	13,6
0,5	10,8	9,0	13,4	10,8	11,5	13,4
1,0	11,5	9,2	13,2	10,2	11,0	13,5
2,0	12,1	9,3	12,8	9,0	10,6	13,5

Почему парциальное давление водяного пара неодинаково изменяется с высотой в разное время суток? Как изменяется градиент парциального давления водяного пара с высотой? Указать направление переноса водяного пара в разное время суток в каждом слое.

8.7. Считая профиль парциального давления водяного пара логарифмическим, вычислить парциальное давление на уровне 5 м, если на уровне 0,5 м $e = 18,2$ гПа, а на уровне 2,0 м $e = 17,8$ гПа.

8.8. Вычислить парциальное давление водяного пара на высотах 3 см и 10 м над лугом, если $\Delta t / \Delta z \approx 0$ и парциальное давление водяного пара на уровне 0,5 м составляет 13,2 гПа, а на уровне 2,0 м — 12,5 гПа. Зачем в задаче задан вертикальный градиент температуры?

8.9. Вычислить парциальное давление водяного пара на высоте 0,8 м, если на высотах 0,2; 0,5; 1,0 и 2,0 м оно составляет 12,1, 11,7, 11,4 и 11,1 гПа соответственно. Решить задачу графическим способом и по формуле 8.1, используя данные на двух стандартных уровнях (0,5 и 2,0 м). Результаты сопоставить.

8.10. Определить парциальное давление водяного пара в воздухе над морем на высоте 20 м, если на высоте 2 м оно составляет 10,0 гПа, а на высоте 8 м — 9,0 гПа.

8.11. Вычислить парциальное давление водяного пара и относительную влажность на высотах 1 и 3 км, если при радиозондировании на ст. Воейково получено:

Высота, км	0	1	3
t_z °C	14,2	10,9	1,8
e_0 гПа	10,6	—	—

Расчет парциального давления водяного пара выполнить по формулам Ганна, Зюринга и Накоренко. Результаты сопоставить между собой.

8.12. Вычислить парциальное давление водяного пара на высотах по формулам Ганна, Зюринга, Накоренко. Результаты расчета сопоставить между собой и с фактическим распределением влажности, полученным по материалам радиозондирования на ст. Воейково (70 м над уровнем моря) за 16 июля 1968 г.:

h м	p гПа	t °C	s %	h м	p гПа	t °C	s %
70	1007	16,8	7,1	3000	705	—3,3	3,0
200	993	16,2	6,9	3080	699	—3,9	2,8
500	958	15,0	6,4	4000	620	—5,4	2,4
550	952	14,8	6,3	4050	616	—5,6	2,4
1000	902	11,7	5,3	5000	546	—10,4	1,4
1500	849	7,5	5,9	7000	419	—22,5	0,5
2000	799	3,6	4,9	8000	364	—29,0	0,3

Какая формула позволяет получить результаты, наиболее близкие к данным радиозондирования?

8.13. Вычислить массовую долю водяного пара (s) и абсолютную влажность (a) на всех указанных высотах по формуле Зюринга. Результаты расчетов сопоставить с фактическим распределением s , полученным по материалам радиозондирования на ст. Воейково (70 м над уровнем моря) за 15 июля 1958 г.:

h м	p гПа	t °C	s %	h м	p гПа	t °C	s %
70	1000	13,1	9,3	3000	699	—2,2	3,2
200	985	12,8	8,9	4000	614	—8,2	2,0
500	950	11,2	8,1	5000	540	—16,2	1,0
1000	895	8,0	6,4	6000	471	—23,8	0,4
1500	842	4,9	5,2	7000	410	—31,6	0,2
1920	799	2,3	4,5	8000	356	—38,4	0,1
2000	791	2,1	4,4				

8.14. Используя исходные данные задачи 8.13, вычислить по формуле (8.9) интегральное содержание водяного пара в единичном столбе атмосферы 0—3, 0—5, 0—8 км. В каком слое атмосферы содержится большая часть водяного пара? Какая часть общего содержания водяного пара в слое 0—8 км приходится на слои 0—3 и 0—5 км?

8.15. Используя условия задачи 8.12, вычислить содержание водяного пара в единичном столбе 0—3, 0—5 и 0—8 км.

8.16. Определить интегральное содержание водяного пара в столбе атмосферы от поверхности Земли до изобарической поверхности 500 гПа, если при радиозондировании получено:

Поверхность, гПа	850	700	500
s ‰	4,5	2,5	0,4

Глава 9

ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ ВОДЫ В АТМОСФЕРЕ

9.1. Факторы, влияющие на фазовые переходы воды, связанные со свойствами испаряющей среды

Поток водяного пара зависит от разности между парциальным давлением насыщенного пара непосредственно у поверхности воды или суши (E_1) и парциальным давлением пара, содержащегося в воздухе на некотором удалении от поверхности (e). Если $E_1 - e > 0$, то происходит перенос пара от поверхности воды в воздух — испарение; если $E_1 - e < 0$, то, наоборот, преобладает поступление пара из воздуха на поверхность водоема (суши) — конденсация или сублимация пара. При $E_1 - e = 0$ наблюдается динамическое равновесие потоков к поверхности водоема (суши) и от нее.

Величину $d_1 = E_1 - e$ называют дефицитом насыщения, рассчитанным по температуре испаряющей поверхности.

Характер процесса (испарение или конденсация) можно определить также и по равновесной относительной влажности f_p (%) сопоставляя последнюю с относительной влажностью воздуха f . Под равновесной относительной влажностью понимается влажность, при которой устанавливается динамическое равновесие систем пар—жидкость или пар—лед.

$$f_p = \frac{E_1}{E} \cdot 100, \quad (9.1)$$

где E_1 — давление насыщенного водяного пара в тонком слое над поверхностью воды (льда), *определяемое по температуре испаряющей поверхности с учетом ее фазового состояния, наличия примесей, кривизны испаряющей поверхности и электрических зарядов;*

E — давление насыщенного водяного пара над плоской поверхностью чистой воды, *определяемое по температуре воздуха*. При отрицательных температурах E берется по отношению к воде. Если $f < f_p$, то осуществляется испарение, если $f > f_p$ — конденсация, если $f = f_p$, то наступает динамическое равновесие фаз.

Влияние факторов, определяющих испарение и связанных со свойствами испаряющей среды, проявляется через изменение давления насыщенного пара в тонком слое воздуха, прилегающем к испаряющей поверхности.

Изменение давления насыщенного пара dE в зависимости от изменения температуры dT выражается уравнением Клаузиуса—Клапейрона

$$\frac{dE}{dT} = \frac{C_{1-2}}{T(v_2 - v_1)}, \quad (9.2)$$

где C_{1-2} — удельная теплота перехода из одного фазового состояния в другое; v_1, v_2 — удельные объемы воды в различных агрегатных состояниях. В случае перехода вода ⇌ водяной пар уравнение Клаузиуса—Клапейрона принимает вид

$$\frac{dE}{E} = \frac{C}{R_n} \frac{dT}{T^2}, \quad (9.3)$$

где R_n — удельная газовая постоянная водяного пара.

Для определения $E = f(T)$ можно использовать уравнение Клаузиуса—Клапейрона, а также эмпирические формулы Магнуса, позволяющие вычислить парциальное давление насыщенного водяного пара над водой (9.4) и над льдом (9.5):

$$E = E_0 \cdot 10^{\frac{7,63t}{241,9 + t}}, \quad (9.4)$$

$$E_{\text{л}} = E_0 \cdot 10^{\frac{9,5t}{265,5 + t}}, \quad (9.5)$$

Если известно давление насыщенного пара над плоской поверхностью чистой воды, то для расчета давления насыщенного пара над плоской поверхностью чистого льда при разных температурах можно использовать формулу

$$E_{\text{л}} = E \left(1 + \frac{t}{10^3} + \frac{t^2}{2 \cdot 10^4} \right). \quad (9.6)$$

Зависимость давления насыщенного пара от кривизны испаряющей поверхности описывается формулой Томсона

$$\ln \frac{E_r}{E} = \frac{2\sigma}{\rho_n R_n T r}, \quad (9.7)$$

где E_r — давление насыщенного водяного пара над каплей или капилляром радиусом r ; σ — коэффициент поверхностного натяжения на границе вода—водяной пар, или поверхностная энергия;

ρ_K — плотность воды; r — радиус кривизны поверхности; T — температура воздуха (K).

Формулу (9.7) можно преобразовать к виду

$$E_r = E \left(1 + \frac{c_r}{r} \right), \quad (9.8)$$

где $c_r = 2\sigma/R_{\text{п}}\rho_K T$ — величина, которую практически можно считать постоянной и равной $1,2 \cdot 10^{-7}$ см. Формула (9.8) справедлива как для выпуклой ($r > 0$), так и для вогнутой ($r < 0$) поверхностей.

Совместное влияние кривизны и фазового состояния на давление насыщенного водяного пара можно описать выражением

$$E_{r, \kappa} = E \left(1 + \frac{c_r}{r} \right) \left(1 + \frac{t}{10^2} + \frac{t^2}{2 \cdot 10^4} \right). \quad (9.9)$$

Зависимость давления насыщенного пара от наличия примесей в воде, согласно закону Рауля, имеет вид

$$E_p = E \frac{N}{n + N}, \quad (9.10)$$

где n — число молей растворенного вещества, N — число молей растворителя. Закон Рауля получен для растворов неэлектролитов малой концентрации. Формула (9.10) при условии $N \gg n$ может быть записана в виде

$$E_p = E (1 - n/N). \quad (9.11)$$

Для растворов электролитов со значительной концентрацией учитывается степень диссоциации молекул на ионы:

$$E_p = E \frac{N}{N + ni}, \quad (9.12)$$

где i — коэффициент Вант-Гоффа. Однако и с учетом диссоциации закон Рауля для насыщенного раствора солей дает расхождение с экспериментальными данными на 10—15 %. Давление насыщенного пара над каплями растворов зависит от наличия примесей солей и кривизны:

$$E_{r, p} = E \left[1 + \frac{c_r}{r} - c_p \left(\frac{r_0}{r} \right)^3 \right], \quad (9.13)$$

где r и r_0 — радиусы капель с ненасыщенным и насыщенным растворами соли соответственно; $c_p = (\Delta E_p)_{\text{нас}}/E$ — определяемый экспериментально коэффициент, характеризующий уменьшение давления насыщенного пара над насыщенным раствором вещества, который для основных ядер конденсации в атмосфере имеет следующие значения:

Вещество	$(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4$	NaNO_3	NaCl	NH_4Cl	CaCl_2
c_p	0,17	0,19	0,22	0,20	0,65

Зависимость упругости насыщения от кривизны и электрических зарядов капель определяется формулой Томсона

$$E_{r,q} = E \left(1 + \frac{c_r}{r} - \frac{c_q v^2}{r^4} + \dots \right), \quad (9.14)$$

где c_q для единичного элементарного заряда и температуры 0°C равно $7,5 \cdot 10^{-30} \text{ см}^4$, v — число единичных зарядов на поверхности капли.

Задачи

9.1. На основании уравнения Клаузиуса—Клапейрона получить характер зависимости давления насыщенного пара над плоской поверхностью чистой воды и льда от температуры, принимая теплоту парообразования постоянной.

9.2. Вычислить изменение давления насыщенного водяного пара при понижении температуры от $10,0$ до $0,0$ и от $0,0$ до -10°C . Обсудить полученный результат.

9.3. Вычислить давление насыщенного водяного пара над водой по теоретической формуле (9.3) и по формуле Магнуса при температурах $10,0$; $30,0$; $45,0$; $-10,0$; $-30,0$; $-45,0^\circ\text{C}$. Результаты вычислений по указанным формулам сопоставить. Какова причина расхождения результатов расчета по теоретической формуле и уравнению Магнуса?

9.4. Какой процесс (испарение или конденсация) будет происходить над водоемом или увлажненной поверхностью суши при относительной влажности 100% , если температура их поверхности равна $2,5$; $10,3$; $15,8^\circ\text{C}$, а температура воздуха — соответственно $0,0$; $7,3$; $12,5^\circ\text{C}$? Какое атмосферное явление при условиях данной задачи может наблюдаться над водоемом (увлажненной сушей)? При какой относительной влажности воздуха в условиях данной задачи возможно динамическое равновесие системы пар—вода? Как различается при условиях данной задачи дефицит насыщения, рассчитанный по температуре испаряющей поверхности и по температуре воздуха?

9.5. Температура поверхности воды (увлажненной суши) $10,0^\circ\text{C}$, температура воздуха $12,0^\circ\text{C}$. Испаряется ли вода при относительной влажности воздуха 80 и 90% ? Определить, при какой относительной влажности установится динамическое равновесие системы пар—вода в условиях данной задачи. При каком соотношении значений равновесной относительной влажности и относительной влажности воздуха возможно испарение?

9.6. Температура воздуха $10,0^\circ\text{C}$, температура испаряющей поверхности $4,0^\circ\text{C}$. При какой относительной влажности прекратится испарение? При каком соотношении температур испаряющей среды и воздуха испарение прекратится? Проанализировать полученные результаты.

9.7. Температура воздуха 12°C , относительная влажность 70 %. До какой температуры должна охладиться поверхность почвы, чтобы на ней появилась роса?

9.8. При ветреной и пасмурной погоде температура воздуха повысилась от 5 до 10°C . Капли воды, появившиеся на земной поверхности, наблюдатель зафиксировал как росу. Верна ли запись? Какие метеорологические условия благоприятны для возникновения росы?

9.9. Вечером температура воздуха и почвы составляла $10,0^{\circ}\text{C}$, относительная влажность воздуха 80 %. В течение ночи парциальное давление водяного пара, находящегося в воздухе, не менялось, но температура почвы и воздуха понизилась до $8,0^{\circ}\text{C}$. Наблюдатель зафиксировал появление росы. Верна ли запись?

9.10. Определить по Психрометрическим таблицам давление насыщенного пара надо льдом при температурах $-2,0$; $-5,0$; $-10,0$; $-12,0$; $-13,0$; $-15,0$; $-20,0$; $-30,0^{\circ}\text{C}$ и сопоставить с давлением насыщенного пара при тех же температурах над переохлажденной водой. Как зависит давление насыщенного пара от фазового состояния испаряющей среды? Как изменяется разность давления насыщенного пара над водой и льдом по мере понижения температуры?

9.11. При какой относительной влажности окружающего воздуха, температура которого $-10,0$ и $-20,0^{\circ}\text{C}$, установится динамическое равновесие в системе пар—лед, если температура поверхности льда $-10,0$ и $-20,0^{\circ}\text{C}$ соответственно. Почему испарение с поверхности льда прекращается при относительной влажности воздуха менее 100 %?

9.12.* Температура поверхности снега и воздуха $-40,0^{\circ}\text{C}$, относительная влажность воздуха 80 %. Какой процесс будет происходить на поверхности снега? Варианты исходных данных см. табл. 17 (приложение 41).

9.13. Будет ли испаряться снег в Арктике при температуре его поверхности $-40,0^{\circ}\text{C}$, если температура воздуха $-37,0^{\circ}\text{C}$, а относительная влажность 60 %?

9.14. Температура воздуха $6,0^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 50 %. До какой температуры должна охладиться поверхность почвы, чтобы на ней мог образоваться иней?

9.15. Температура воздуха $-3,0^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 90 %. Возможна ли сублимация водяного пара на наземных предметах, имеющих ту же температуру? Каковы особенности конденсации и сублимации на поверхности почвы и на наземных предметах? Как влияют на образование продуктов наземной конденсации теплофизические характеристики подстилающей поверхности и наземных предметов?

9.16. В течение суток температура воздуха не изменялась и составляла $-7,0^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 80 %, облачность 10 баллов. Затем при сохранении 10-балльной облачности температура повысилась до $-1,0^{\circ}\text{C}$, но относительная влажность оставалась неизменной. Появится ли конденсационный осадок на

массивном гранитном вертикальном столбе? Какое метеорологическое явление может наблюдаться при условиях данной задачи?

9.17. До какого значения должна понизиться относительная влажность воздуха в вагоне трамвая, где температура составляет $-5,0^{\circ}\text{C}$, чтобы прекратился рост морозных узоров на стеклах, поверхность которых имеет температуру $-12,0^{\circ}\text{C}$?

9.18. Используя приложение 2, построить график равновесия различных фаз воды в диапазоне температур от $-30,0$ до $30,0^{\circ}\text{C}$. Используя график, решить следующую задачу: температура воздуха $5,0^{\circ}\text{C}$, парциальное давление водяного пара $7,5$ гПа. Определить, находится ли пар в равновесии с водой? Какие процессы должны произойти, чтобы такое равновесие установилось? Какая из двух рассматриваемых фаз воды при этом устойчива, а какая — неустойчива? Какие процессы могут происходить с неустойчивой фазой? При каком значении парциального давления водяного пара установится равновесие пар—вода?

9.19. Используя график равновесия различных фаз воды (см. задачу 9.18), определить, наблюдается ли равновесие между паром и льдом, если температура воздуха, находящихся в нем ледяных кристаллов и водяного пара $-5,0^{\circ}\text{C}$, парциальное давление водяного пара $8,0$ гПа. Какие процессы должны произойти, чтобы равновесие установилось? Какая из рассматриваемых фаз устойчива и какой процесс может произойти с неустойчивой (метастабильной) фазой? Может ли при указанных условиях существовать вода? В каком состоянии она будет находиться? Какие процессы могут с ней происходить? В каком состоянии по отношению к такой воде находятся пар и лед и какие процессы при этом возможны?

9.20. Вычислить давление насыщенного водяного пара и равновесную относительную влажность над поверхностью незаряженных капель дистиллированной воды радиусом $5 \cdot 10^{-7}$ см, имеющих температуру $10,0$ и $0,0^{\circ}\text{C}$. Каким должно быть пересыщение пара в воздухе, чтобы капля могла существовать, не испаряясь? Возможно ли в реальной атмосфере подобное пересыщение водяного пара?

9.21. Вычислить давление насыщенного водяного пара и равновесную относительную влажность над поверхностью незаряженных капель дистиллированной воды радиусом $2,4 \cdot 10^{-6}$ см, имеющих температуру $10,0$ и $0,0^{\circ}\text{C}$. Сопоставить ответы к задачам 9.21 и 9.20 и обсудить, как изменяется разность давления насыщенного пара над каплями разных размеров в зависимости от температуры. Как это скажется на формировании спектра капель облака?

9.22. Каким должно быть пересыщение в облаке, чтобы в нем могли расти незаряженные капли дистиллированной воды радиусом $1,10$ и 100 мкм? При каком размере капель давление насыщенного пара слабо зависит от их кривизны?

9.23. Будет ли происходить испарение из почвенных капилляров радиусом $5 \cdot 10^{-7}$ и 10^{-6} см при относительной влажности воздуха 70 и 85% ? При каких условиях конденсация водяного пара может происходить в воздухе, содержащем ненасыщенный водяной пар?

Как будет изменяться при прочих равных условиях равновесная относительная влажность с уменьшением размера капилляров? Почему ядрами конденсации в атмосфере могут служить гигроскопические частицы?

9.24. Вычислить и сравнить между собой давление насыщенного пара над замерзшей и переохлажденной каплями дистиллированной воды радиусом $6 \cdot 10^{-6}$ см, температура которых равна $-12,0^\circ\text{C}$. При какой относительной влажности они могут существовать не испаряясь? Какие капли — замерзшие или переохлажденные — при условиях данной задачи могут вырасти до больших размеров?

9.25. Вычислить давление насыщенного пара и равновесную относительную влажность над поверхностью незаряженных замерзших и переохлажденных капель дистиллированной воды радиусом $6 \cdot 10^{-6}$ см, температура которых $-24,0^\circ\text{C}$. Сравнить ответы к данной задаче с результатами предыдущей и выяснить, как изменяется разность давлений насыщенного водяного пара над переохлажденной и замерзшей каплями с понижением температуры?

9.26. Температура поверхности Красного моря и температура воздуха над ним $28,0^\circ\text{C}$, а средняя соленость морской воды 50 ‰. Определить, при какой относительной влажности воздуха установится динамическое равновесие в системе пар—соленая вода?

9.27. Температура поверхности моря $15,0^\circ\text{C}$, соленость 35 ‰, парциальное давление водяного пара в воздухе 15,6 гПа. Определить давление насыщенного пара у поверхности водоема и найти, на сколько процентов занижается результат вычисления испарения без учета солености водоема.

9.28. Определить относительное понижение давления водяного пара над поверхностью насыщенного раствора азотнокислого натрия (NaNO_3) и поваренной соли (NaCl) по закону Рауля и сопоставить с экспериментальными данными, приведенными во введной части при температуре 0°C .

9.29. Вычислить давление насыщенного пара и равновесную относительную влажность над поверхностью незаряженных капель насыщенного раствора азотнокислого натрия (NaNO_3) радиусом $2,4 \cdot 10^{-6}$ см, температура которых $10,0$ и $0,0^\circ\text{C}$. Сопоставить результаты данной задачи и задачи 9.21. На сколько процентов уменьшается давление насыщенного пара над поверхностью капли раствора азотнокислого натрия по сравнению с упругостью насыщения над такой же каплей дистиллированной воды? При какой относительной влажности воздуха такая капля будет расти?

9.30. Вычислить давление насыщенного пара и равновесную относительную влажность над поверхностями незаряженных капель насыщенного раствора сульфата аммония $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$, хлористого аммония (NH_4Cl), хлористого кальция (CaCl_2), хлористого натрия (NaCl) радиусом $2,4 \cdot 10^{-6}$ см, температуры которых $0,0$ и $10,0^\circ\text{C}$. Результаты расчетов данной задачи и задач 9.21 и 9.29 представить в виде таблицы; проанализировать и выявить, какое из рассматриваемых веществ может образовать наиболее

эффективные ядра конденсации. Что оказывает большее влияние на давление насыщенного пара в условиях данной задачи — кривизна поверхности или примеси?

9.31. Вычислить давление насыщенного водяного пара и равновесную относительную влажность над поверхностью незаряженных капель 50 и 25 %-ного раствора NaNO_3 радиусом $2,4 \cdot 10^{-6}$ см, температуры которых 10,0 и 0,0 °C. Коэффициент Вант-Гоффа принять равным 2. Как влияет концентрация раствора на давление насыщенного пара над поверхностью капель?

9.32.* Вычислить и сопоставить давление насыщенного пара и равновесную относительную влажность над поверхностью капель радиусом 10^{-5} растворов 50 %-ной концентрации следующих веществ: NaCl , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, CaCl_2 и NaNO_3 при температурах 10,0 и 0,0 °C. Варианты исходных данных см. табл. 18 (приложение 41).

9.33. Вычислить равновесную относительную влажность над поверхностью капель дистиллированной воды радиусом $2 \cdot 10^{-7}$ и $2 \cdot 10^{-6}$ см, несущих один элементарный электрический заряд. Как влияют заряды на образование и рост зародышевых капель? При каких размерах капель сказывается влияние электрических зарядов? Как изменился бы результат, если бы капли несли не один, а два элементарных заряда? Могут ли в реальных условиях капли нести несколько зарядов?

9.34. Сколько единичных зарядов должны нести капли дистиллированной воды радиусом $2 \cdot 10^{-7}$; 10^{-7} ; $0,63 \cdot 10^{-7}$; $0,40 \cdot 10^{-7}$ см, чтобы они могли вырасти до размеров облачных капель при отсутствии пересыщения в окружающем воздухе? При каких размерах капель влияние зарядов на парциальное давление насыщенного пара превышает влияние кривизны их поверхности?

9.2. Методы расчета испарения с поверхности суши и водоемов

Испарением, или скоростью испарения, называется масса воды, испарившаяся с единицы поверхности в единицу времени ($\text{г}/(\text{см}^2 \times \text{с})$, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$). Испарение часто характеризуется высотой слоя испарившейся воды, измеряемой в миллиметрах или сантиметрах (1 мм слоя воды равен $0,1 \text{ г}/\text{см}^2 = 1 \text{ кг}/\text{м}^2$).

Затрата тепла на испарение равна CW , где C — удельная теплота парообразования (конденсации), которая зависит от температуры испаряющей поверхности. При вычислении испарения с поверхности льда (снега) используется удельная теплота сублимации C_s , которая слабо зависит от температуры испаряющей поверхности (приложение 13).

При расчетах скорости испарения с поверхности неограниченных водоемов (морей и океанов) применяется формула, в которой используются данные судовых гидрометеорологических наблюдений на высотах 6 или 8 м:

$$W = 0,622 \cdot 10^{-3} a_{zu} (E_1 - e), \quad (9.15)$$

где u и e — скорость ветра и парциальное давление водяного пара на уровне судовых наблюдений; E_1 — давление насыщенного пара, соответствующее температуре поверхности водоема. Величина a_z учитывает зависимость турбулентного влагообмена от шероховатости поверхности водоема (волнения), температурной стратификации приводного слоя и от уровня измерений. При малых z величина a_z сильно меняется с высотой по мере удаления от поверхности воды. Выше уровня судовых измерений изменение величины a_z с высотой незначительно. Среднее значение a_z на уровне судовых измерений для всего Мирового океана, по расчетам М. И. Будыко и Л. А. Строкиной, составляет $2,5 \cdot 10^{-3}$ кг/м³. Тогда формула для расчета суточных сумм испарения W (кг/(м²·сут) или мм/сут) с поверхности неограниченных водоемов приобретает вид

$$W = 0,134u (E_1 - e), \quad (9.16)$$

где u (м/с), E_1 (гПа), e (гПа) — средние суточные значения метеорологических величин.

Для расчета суточных сумм испарения с поверхности малых водоемов используются эмпирические формулы вида

$$W = A(1 + bu)(E_1 - e). \quad (9.17)$$

За безледоставный период для зоны недостаточного увлажнения Б. Д. Зайковым получена формула

$$W = 0,15(1 + 0,72u_2)(E_1 - e_2), \quad (9.18)$$

где u_2 , e_2 — средние суточные значения скорости ветра (м/с) и парциального давления водяного пара (гПа) над водоемом на уровне 2 м от поверхности воды, W выражено в мм/сут. Для районов недостаточного и избыточного увлажнения используется формула, полученная А. П. Браславским и З. А. Викулиной:

$$W = 0,13(1 + 0,72u_2)(E_1 - e_2). \quad (9.19)$$

При отсутствии наблюдений за температурой поверхности водоемов для расчета испарения используются метеорологические наблюдения береговых станций; в этом случае формула Б. Д. Зайкова принимает вид

$$W = 0,15(1 + 0,72u_2)(E_2 - e_2)^{0,78}, \quad (9.20)$$

где $E_2 - e_2$ — средний суточный дефицит насыщения на высоте 2 м.

Для вычисления месячных и годовых сумм испарения с поверхности водоемов можно использовать отношение Боуэна

$$\frac{L}{CW} = 0,64 \frac{t_0 - t_1}{E_1 - e}, \quad (9.21)$$

где L и CW — месячные или годовые суммы поверхностной плотности вертикального турбулентного теплового потока и затрат тепла на испарение соответственно, t_0 и t_1 — средняя месячная или средняя годовая температура поверхности водоема и воздуха (°C).

Для замкнутых водоемов при вычислении годовых сумм испарения можно использовать уравнение теплового баланса

$$W = \frac{B}{C \left(1 + 0,64 \frac{t_0 - t_1}{E_1 - e} \right)}, \quad (9.22)$$

где B — годовой радиационный баланс; C — удельная теплота парообразования; t_0, t_1, E_1, e — средние годовые значения метеорологических величин.

Для расчета испарения с поверхности суши используются следующие методы.

1. Метод теплового баланса:

$$W = \frac{(B - P)}{C \left(1 + 0,64 \frac{t_1 - t_2}{e_1 - e_2} \right)}, \quad (9.23)$$

где B — радиационный баланс деятельного слоя (Вт/м^2), P — поверхностная плотность теплового потока в почве (Вт/м^2), t_1 и e_1 — температура и парциальное давление водяного пара на уровне 0,5 м, t_2 и e_2 — соответствующие метеорологические величины на уровне 2 м. Формулу (9.23) рекомендуется применять только при

$$B - P \geq 0,07 \text{ кВт/м}^2; \Delta t \geq 0,1^\circ\text{C}; \Delta e \geq 0,1 \text{ гПа}.$$

Затраты тепла на испарение:

$$V = WC = A_1 (B - P), \quad (9.24)$$

где

$$A_1 = \frac{\Delta e}{\Delta e + 0,64 \Delta t}.$$

Значения A_1 затабулированы в Руководстве по теплосбалансовым наблюдениям 1977 г.

2. Метод турбулентной диффузии:

$$W = \frac{K_1 \rho}{z'} \frac{s_1 - s_2}{\ln(z_2/z_1)}, \quad (9.25)$$

где K_1 — коэффициент турбулентности ($\text{м}^2/\text{с}$) на высоте 1 м (z'), s_1 и s_2 — массовая доля водяного пара на уровнях z_1 и z_2 , ρ — плотность воздуха (кг/м^3), W — в $\text{кг/м}^2\text{с}$. Формула (9.25) получена в предположении линейного изменения коэффициента турбулентности с высотой.

При расчете скорости испарения по данным градиентных наблюдений на стандартных уровнях (0,5 и 2,0 м) формула (9.25) приобретает вид

$$W = \frac{0,58 \cdot 10^{-4} K_1 (e_{0,5} - e_{2,0})}{z'} = \frac{0,58 \cdot 10^{-3} K_1 \Delta e}{z'} = 2,1 \frac{K_1 \Delta e}{z'}, \quad (9.26)$$

где W в $\text{г/см}^2\text{с}$, мм/с , мм/ч соответственно.

При проведении градиентных наблюдений на четырех уровнях для расчета испарения (мм/ч) используется уточненный метод турбулентной диффузии:

$$W = -0,42 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \gamma \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg}^2 \alpha} \right), \quad (9.27)$$

где

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{du}{d \ln z}; \quad \operatorname{tg} \beta = - \frac{dt}{d \ln z},$$

$$\operatorname{tg} \gamma = - \frac{de}{d \ln z}.$$

Последние величины определяются графически (см. задачу 3.4), причем $\operatorname{tg} \alpha \geq 0$ всегда, тогда как $\operatorname{tg} \beta, \operatorname{tg} \gamma > 0$ только при инверсии температуры и влажности, а при уменьшении температуры и влажности с высотой $\operatorname{tg} \beta, \operatorname{tg} \gamma < 0$.

Расчет испарения со снежной поверхности W (мм/ч), если снег покрывает обширные пространства, производится по формуле

$$W = \frac{0,622}{p} a_z u (E_{1, \lambda} - e), \quad (9.28)$$

где $E_{1, \lambda}$ — давление насыщенного пара над льдом при температуре поверхности снега или льда (гПа), u — скорость ветра (м/с), a_z зависит от высоты измерения скорости ветра и от параметра шероховатости. Величина $\frac{0,622}{p} a_z$ при давлении 1000 гПа и различных значениях шероховатости z_0 для двух уровней измерения скорости ветра — 2 и 10 м — имеет следующие значения:

Вид поверхности	z_0 см	$\frac{0,622}{p} a_z$	$\frac{0,622}{p} a_{10}$
Устойчивый снежный покров высотой более 20 см	0,05	0,0061	0,0051
Пятнистый снег и неустойчивый снежный покров	0,25	0,0092	0,0077
Наличие под снегом стерни или стеблей	0,60	0,0123	0,0103

Для расчетов испарения широкое применение получил метод А. М. Обухова и А. С. Монины, в дальнейшем детализированный А. С. Мониним и А. Б. Казанским для условий, сильно отличающихся от равновесных. Формула имеет вид

$$W = \psi_w u (s_{0,5} - s_{2,0}). \quad (9.29)$$

Зависимость ψ_w от шероховатости подстилающей поверхности z_0 , стратификации приземного слоя, изменения коэффициента турбулентности с высотой и уровня измерений ветра z очень сложна

и поэтому расчеты по формуле весьма трудоемки. Для практического использования Мониним и Казанским была построена номограмма для определения ψ_w , сокращенный вариант которой приводится в приложении 12. Номограмма построена при условии, что скорость ветра измеряется на высоте 1 м, а температура и парциальное давление водяного пара — на стандартных высотах (0,5 и 2,0 м).

Значение ψ определяется по номограмме следующим образом:

1) на левой вертикальной шкале находят точку, соответствующую измеренному значению ΔT , и перемещаются от нее направо до пересечения с кривой u_1 , соответствующей измеренной скорости ветра;

2) от точки пересечения движутся по вертикали до линии z_0 , соответствующей заданному параметру шероховатости и данному знаку устойчивости;

3) от новой точки пересечения перемещаются направо до шкалы ψ_w .

По найденному значению ψ_w и измеренным значениям Δe , p (гПа) и u_1 (м/с) испарение (мм/ч) определяется по формуле

$$W = \psi_w u_1 \Delta e = \frac{0,622}{p} \psi_w u_1 \Delta e. \quad (9.30)$$

Испаряемость. Под испаряемостью (W_0) понимают то количество воды, которое испарилось бы с поверхности суши в данной местности при неограниченном запасе влаги в почве:

$$W_0 = \rho D (s_1 - s), \quad (9.31)$$

где ρ — плотность воздуха; D — интегральный коэффициент турбулентности; s_1 — массовая доля насыщенного водяного пара, определяемая по температуре испаряющей поверхности; s — массовая доля водяного пара в воздухе. Величина s_1 определяется из уравнения теплового баланса увлажненной поверхности почвы (комплексный метод М. И. Будыко):

$$B_0 - P = C_p D (s_1 - s) + (4\epsilon \sigma T^4 + \rho c_p D) (t_0 - t), \quad (9.32)$$

где B_0 — радиационный баланс увлажненной поверхности при условии, что ее температура равна температуре воздуха; P — поверхностная плотность теплового потока в почве; C — теплота испарения; ϵ — коэффициент теплового излучения деятельного слоя; t — температура воздуха; t_0 — температура испаряющей поверхности; σ — постоянная Стефана—Больцмана; c_p — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении. Интегральный коэффициент турбулентности D зависит от скорости ветра и стратификации атмосферы. Л. П. Серяковой была получена следующая зависимость D от скорости ветра на высоте 1 м над орошаемыми полями:

u м/с . . .	1	2	3	4	5	6
D см/с . . .	0,60	0,80	0,91	1,12	1,43	1,78

Для определения температуры орошенной поверхности суши используются номограммы, рассчитанные по формуле 9.32 (приложения 14, 15). С помощью номограммы по значениям разности $B_0 - P = 1,25Dd$ (где d — дефицит насыщения (гПа)) и температуре воздуха определяется разность температур поверхности орошаемого участка и воздуха ($t_0 - t$). Затем по найденным значениям t_0 по психрометрическим таблицам (см. приложение 2) определяется E_1 .

Расчетная формула для W_0 (мм/мес) имеет вид

$$W_0 = 2,08D(E_1 - e), \quad (9.33)$$

где D — интегральный коэффициент турбулентности (см/с). Ввиду трудоемкости расчетов испаряемости по комплексному методу в ряде случаев ее можно определить по формуле

$$W_0 = \frac{B_0 - P}{C}. \quad (9.34)$$

Такой метод расчета возможен в связи с тем, что в районах с большим увлажнением разность температур поверхность—воздух невелика и потому теплоотдачей поверхности почвы в атмосферу можно пренебречь.

Задачи

9.35. Вычислить скорость испарения и затраты тепла на испарение с поверхности неограниченного водоема, если температура водоема и воздуха составляет $26,5^\circ\text{C}$, скорость ветра на уровне судовых наблюдений 4 м/с, относительная влажность 90% , параметр шероховатости $0,02$ см. Изменяется ли с высотой поток водяного пара в приводном слое? Какой фактор определяет испарение с водоема при условиях данной задачи? В районах теплых или холодных морских течений при прочих одинаковых условиях испарение интенсивнее?

9.36. На сколько процентов меньше испарение с поверхности моря, соленость которого 35% , по сравнению с испарением с поверхности пресного водоема, если их температура $12,3^\circ\text{C}$, а парциальное давление водяного пара $10,3$ гПа?

9.37. Температура поверхности озера, соленость которого 35% , составляет $25,0^\circ\text{C}$, температура воздуха $18,0^\circ\text{C}$, относительная влажность 90% . На сколько процентов завышается результат вычисления испарения, если не учитывать влияния солёности?

9.38. Вычислить испарение и затраты тепла на испарение с поверхности моря за сутки, в течение которых средние значения метеорологических величин составили: температура воды $6,3^\circ\text{C}$, температура воздуха на уровне судовых наблюдений $5,3^\circ\text{C}$, относительная влажность 75% , скорость ветра 6 м/с.

9.39. Рассчитать испарение за час с поверхности моря, температура которой $10,0^\circ\text{C}$, если на уровне судовых наблюдений температура воздуха $6,0^\circ\text{C}$, относительная влажность 100% , скорость

ветра 2 м/с. Какое атмосферное явление может наблюдаться в этих условиях?

9.40. Вычислить скорость испарения с поверхности моря за час, если температура поверхности воды 10,0 °С, температура воздуха на уровне судовых наблюдений 12,0 °С, относительная влажность 60 %, скорость ветра 3 м/с.

9.41. Определить суточную сумму испарения с поверхности моря, если на уровне судовых наблюдений средняя скорость ветра 7 м/с, а парциальное давление водяного пара 11,6 гПа, температура поверхности воды 15,0 °С.

9.42. Вычислить испарение мм с поверхности озера за год, если сумма радиационного баланса поверхности водоема 4040 МДж/(м²·год), средняя годовая температура поверхности водоема 9,5 °С, средняя годовая температура воздуха 6,2 °С, среднее парциальное давление водяного пара 8,5 гПа.

9.43. Вычислить (в мм и см) средние месячные суммы испарения с оз. Севан, по полученным средним месячным данным. Построить и проанализировать график годового хода испарения с поверхности оз. Севан.

Месяц	B МДж/м ²	t_0 °С	t °С	e гПа	U м/с
I	0	3,1	−3,8	3,6	4,2
II	31	2,2	−3,4	4,0	4,2
III	94	2,0	−0,6	4,6	3,7
IV	153	3,2	3,4	6,1	3,2
V	202	6,9	7,8	8,7	2,6
VI	211	13,2	12,2	11,7	3,0
VII	204	17,7	15,7	14,5	3,5
VIII	185	18,7	16,2	15,1	3,4
IX	129	17,4	14,0	12,2	3,5
X	68	14,1	10,3	9,5	3,4
XI	13	9,8	3,5	6,8	3,7
XII	−13	5,5	−1,6	4,9	4,2
Среднее за год	1277	9,5	6,1	8,5	3,6

Примечание. t_0 — температура воды, t — температура воздуха.

9.44. Вычислить суточную сумму испарения с поверхности озера, если средняя суточная скорость ветра на береговой станции на высоте флюгера (10 м) 3 м/с, температура воздуха 18,0 °С, температура воды 17,0 °С, относительная влажность воздуха 70 %, шероховатость подстилающей поверхности 3 см.

9.45. Вычислить испарение с поверхности озера за год, если средние годовые значения температуры поверхности водоема 6,5 °С, воздуха 6,2 °С, парциальное давление водяного пара 8,5 гПа и годовая сумма турбулентного теплового потока 1583 МДж/м².

9.46. Вычислить испарение в мм/ч, мм/сут и затраты тепла на испарение с поверхности пруда, если дефицит насыщения воздуха на ближайшей метеостанции составляет 4,3 гПа, скорость ветра на высоте флюгера (12 м) 7 м/с, а параметр шероховатости 3 см. Как зависит скорость испарения от дефицита насыщения воздуха и скорости ветра? При какой стратификации атмосферы при прочих равных условиях увеличивается испарение с поверхности водоемов и суши? Как изменится температура поверхности водоема, с которого происходит интенсивное испарение при условии отсутствия притока тепла? В какое время суток происходит более интенсивное испарение с поверхности малых водоемов летом? Как влияют размер и форма водоемов на скорость испарения?

9.47. Вычислить испарение (мм/ч) и затраты тепла на испарение с оголенной почвы по данным измерений в Ленинградской области 26 июня 1978 г., если радиационный баланс в 12 ч составлял 0,70 кВт/м², поверхностная плотность теплового потока в почве 0,05 кВт/м², температура воздуха на высоте 0,5 м 19,6°C, на высоте 2 м 18,6°C, а парциальное давление водяного пара на соответствующих высотах 14,8 и 13,6 гПа. Какую роль играют затраты тепла на испарение в тепловом балансе подстилающей поверхности при условиях данной задачи? При каких условиях возможен расчет испарения по методу теплового баланса?

9.48. Вычислить испарение (мм/ч) и затраты тепла на испарение с оголенной почвы по данным измерений в Саратовской области 26 июня 1978 г., если радиационный баланс в 12 ч составлял 0,58 кВт/м², поверхностная плотность теплового потока в почве 0,06 кВт/м², а при градиентных наблюдениях было получено: $t_{0,5} = 30,8^\circ\text{C}$; $t_{2,0} = 29,8^\circ\text{C}$; $e_{0,5} = 9,8$ гПа, $e_{2,0} = 9,6$ гПа. Сравнить доли радиационного баланса, затрачиваемые на испарение в один и тот же момент в Ленинградской и Саратовской областях (см. задачу 9.47). Объяснить причины различия.

9.49. Вычислить испарение и затраты тепла на испарение по данным наблюдений в Даймище за дневные сроки 15 июля 1978 г. по методу теплового баланса. Проанализировать результаты вычислений за отдельные сроки. Рассчитать поверхностную плотность вертикального турбулентного теплового потока и проверить замыкание уравнения теплового баланса.

Срок, ч	B кВт/м ²	P кВт/м ²	$t_{0,5}$ °C	$t_{2,0}$ °C	$e_{0,5}$ гПа	$e_{2,0}$ гПа
10	0,49	0,10	16,9	15,8	12,8	11,9
12	0,57	0,10	19,3	17,9	12,6	11,9
14	0,15	0,02	18,2	17,5	11,5	11,0
16	0,11	0,01	17,2	16,6	12,0	11,4

9.50.* Вычислить испарение в различные часы суток по данным градиентных наблюдений на площадке ЛГМИ в Даймище

10 июня 1978 г. на двух уровнях и проанализировать суточный ход. При расчетах коэффициента турбулентности использовать метод Л. В. Дубровина (Руководство по теплобалансовым наблюдениям, 1977 г.).

Срок, ч	u м/с		t °C		e гПа	
	0,5 м	2,0 м	0,5 м	2,0 м	0,5 м	2,0 м
1	1,0	1,6	11,0	11,2	16,4	16,9
7	1,2	1,6	13,4	13,3	18,4	17,9
10	2,1	3,0	16,6	16,4	18,9	18,2
13	1,2	1,8	19,9	19,1	17,6	17,2
16	1,9	2,6	16,6	16,6	17,4	17,0
19	1,2	1,7	17,1	17,2	18,5	18,2
1	0,8	1,4	9,8	10,0	18,1	18,6

Варианты исходных данных см. табл. 19 (приложение 41).

9.51.* Вычислить испарение и затраты тепла на испарение методами теплового баланса и турбулентной диффузии по следующим исходным данным, полученным на учебной метеорологической площадке в Даймише 12 июля в 13 ч: $B = 0,55$ кВт/м²; $P = 0,10$ кВт/м²; $t_{0,5} = 22,5$ °C; $t_{2,0} = 22,3$ °C; $e_{0,5} = 10,8$ гПа; $e_{2,0} = 10,2$ гПа; $u_{0,5} = 1,5$ м/с; $u_{2,0} = 2,7$ м/с. Результаты вычислений сопоставить и определить погрешность метода турбулентной диффузии по отношению к методу теплового баланса. Варианты исходных данных см. табл. 20 (приложение 41).

9.52. При градиентных наблюдениях на четырех уровнях было получено:

z м	0,2	0,5	1,0	2,0
t °C	31,5	30,5	29,4	28,6
u м/с	2,1	3,5	4,5	5,3
e гПа	8,6	8,3	7,8	7,6

Определить испарение и затраты тепла на испарение уточненным методом турбулентной диффузии. Найти те же величины по результатам, полученным только на двух стандартных уровнях (0,5 и 2,0 м). Оценить расхождение ответов, полученных двумя способами.

9.53. Вычислить испарение с поверхности луга, покрытого травой высотой 8 см ($z_0 = 1$ см), если атмосферное давление составляет 1000,0 гПа и при градиентных наблюдениях получены следующие данные: $u_1 = 3,5$ м/с; $t_{0,5} = 24,3$ °C; $e_{0,5} = 19,3$ гПа; $t_{2,0} = 22,8$ °C; $e_{2,0} = 17,8$ гПа. Использовать номограмму Мокина—Казанского (приложение 12).

9.54. Вычислить испарение с метеоплощадки учебной станции ЛГМИ 15 июля 1978 г. в 12 ч, если при градиентных наблюдениях

получено: $t_{0,5} = 20,4^\circ\text{C}$; $e_{0,5} = 8,9$ гПа; $t_{2,0} = 19,8^\circ\text{C}$; $e_{2,0} = 8,0$ гПа. Скорость ветра на высоте 1 м 2,9 м/с; параметр шероховатости $z_0 = 3$ см; атмосферное давление на станции 1000,0 гПа. Использовать приложение 12.

9.55. Вычислить испарение (конденсацию) с поверхности метеоплощадки в Воейково 1 августа 1978 г. в 1 ч, если при градиентных наблюдениях получено: $t_{0,5} = 15,1^\circ\text{C}$; $e_{0,5} = 16,1$ гПа; $t_{2,0} = 15,6^\circ\text{C}$; $e_{2,0} = 16,4$ гПа. Скорость ветра на уровне 1 м 0,8 м/с; параметр шероховатости $z_0 = 1$ см; атмосферное давление на станции 1000,0 гПа. Использовать приложение 12.

9.56. Вычислить испарение (мм/ч и мм/сут) с поверхности снежного покрова высотой 20 см, если температура воздуха и поверхности снега $-8,0^\circ\text{C}$, относительная влажность 90 %, скорость ветра на высоте флюгера (10 м) 2 м/с, параметр шероховатости 0,05 см.

9.57. Вычислить испарение (мм/сут) с поверхности поля со стерней, покрытого снегом, если температура воздуха составляет $-11,0^\circ\text{C}$, относительная влажность 70 %, скорость ветра на уровне 2 м 3 м/с, температура поверхности снега $-12,0^\circ\text{C}$, параметр шероховатости 0,6 см.

9.58. Вычислить испаряемость на ст. Ямбура (север АТС) в июне 1973 г., если средние месячные значения температуры воздуха $7,5^\circ\text{C}$, парциального давления водяного пара 7,7 гПа, скорость ветра на высоте 1 м 5 м/с; рассчитанные месячные суммы радиационного баланса (B_0) 370 МДж/м² и поверхностной плотности теплового потока в почве (P) 60 МДж/м². Использовать приложение 15.

9.59. Вычислить испаряемость на ст. Березово (север АТС) в июле 1973 г., если средние месячные значения температуры воздуха и парциального давления водяного пара соответственно равны $14,3^\circ\text{C}$ и 12,7 гПа, скорость ветра на высоте 1 м 1,0 м/с. Рассчитанные месячные суммы радиационного баланса (B_0) 324 МДж/м² и поверхностной плотности теплового потока в почве (P) 57 МДж/м². Использовать приложение 14. Проанализировать результаты данной и предыдущей задач. Как зависит испаряемость от метеорологических условий?

9.60. Вычислить испаряемость за год в Ростове-на-Дону, где годовая сумма радиационного баланса в среднем составляет 1675 МДж/м², а фактическое испарение 300 мм/год. Близок ли полученный результат к фактической сумме испарения за год в данном пункте?

9.61. Вычислить испаряемость за год в Ленинграде, где годовая сумма радиационного баланса составляет 837 МДж/м², а фактическое испарение 300 мм/год. Чем объясняется более близкое, чем было получено в предыдущей задаче, соответствие между вычисленной годовой суммой испаряемости и фактической суммой испарения для данного пункта.

9.62. Вычислить среднюю месячную испаряемость за июнь в Астрахани, если месячная сумма радиационного баланса дея-

тельного слоя составляет 410 МДж/м², а поверхностная плотность теплового потока в почве 59 МДж/м², причем температуры орошаемой поверхности и воздуха различаются мало.

9.3. Образование и рост зародышей жидкой и твердой фаз воды

Образование зародыша жидкой фазы воды может происходить в результате следующих процессов: гомогенного при отсутствии в атмосфере ядер конденсации и гетерогенного, когда конденсация водяного пара происходит на ядрах конденсации.

Радиус устойчивого критического зародыша жидкой фазы при гомогенном процессе определяется по формуле

$$r_{кр} = \frac{2\sigma_{п-в}\mu}{RT\rho_k \ln(E_r/E)}, \quad (9.35)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения на границе вода—водяной пар, μ — молярная масса водяного пара, T — температура в момент образования зародыша жидкой фазы, ρ_k — плотность воды, E_r — давление насыщенного пара над поверхностью зародыша, E — давление насыщенного пара над плоской поверхностью воды.

Если образование зародышей происходит на растворимых ядрах конденсации, то уравнение для критического зародыша имеет вид

$$r_{кр} = \frac{c_r}{\ln \frac{E_r}{E} + \frac{\ln}{N + \ln}}, \quad (9.36)$$

где

$$c_r = \frac{2\sigma\mu}{\rho_k RT}.$$

Образование ледяных зародышей в парообразной фазе может происходить путем сублимации водяного пара (минуя жидкое состояние), образование ледяных зародышей в жидкой фазе — путем гомогенной и гетерогенной кристаллизации переохлажденных капель воды. При гомогенном процессе зародыши кристаллов льда образуются в чистой воде в результате группировки молекул. При гетерогенном процессе ледяные зародыши образуются в воде на поверхности частиц содержащихся в ней примесей. Размер равновесного зародыша твердой фазы, образовавшегося при гомогенных процессах из парообразной и жидкой фаз, рассчитывается соответственно по формулам

$$r_{кр} = \frac{2\sigma_{п-л}\mu}{RT\rho_l \ln(E_{r,л}/E_l)}, \quad (9.37)$$

$$r_{кр} = \frac{2\sigma_{в-л}}{\rho_l C_{пл} \ln(T_0/T)}, \quad (9.38)$$

9.43

где $\sigma_{п-л}$ и $\sigma_{в-л}$ — коэффициенты поверхностного натяжения на границах раздела фаз пар—лед и вода—лед, $\rho_{л}$ — плотность льда, $T_0 = 273,16$ К, T — температура образования зародыша твердой фазы, $C_{пл}$ — теплота плавления, $E_{л}$ — давление насыщенного пара над плоской поверхностью льда.

Критическое пересыщение, необходимое для образования зародышей жидкой фазы, при гомогенной конденсации приблизительно можно определить по формуле

$$\ln f_{кр} = c \left(\frac{\sigma}{T} \right)^{3/2} \frac{\mu}{\rho}, \quad (9.39)$$

где $c = 1,76 \cdot 10^7$ К^{3/2}·кмоль)/Дж^{3/2}.

Работа образования зародыша новой фазы, согласно Гиббсу, равна

$$A = \frac{1}{3} \sigma F, \quad (9.40)$$

где F — площадь поверхности зародыша.

В случае образования сферического зародыша

$$A = \frac{4}{3} \pi \sigma r^2,$$

или

$$A = \frac{16\pi\sigma^3\mu^2}{3\rho_{в,л}^2 R^2 T^2 \left(\ln \frac{E_r}{E} \right)^2}.$$

Для расчета работы при гомогенном образовании зародыша твердой фазы в жидкой используется формула

$$A = \frac{16\pi\sigma_{в-л}^3}{3\rho_{л}^2 C_{пл}^2 \ln(T_0/T_2)}.$$

Работа образования зародыша новой фазы на ядрах конденсации описывается выражением

$$A = \frac{4\pi\sigma}{3} (r^2 - r_0^2) = \frac{16\pi\sigma^3\mu^2}{3\rho_{в,л}^2 R^2 T^2 \left(\ln \frac{E_r}{E} \right)^2} - \frac{4\pi\sigma r_0^2}{3}, \quad (9.44)$$

где r_0 — радиус зародышевой капли, образовавшейся на ядре конденсации. Вероятность образования зародышей новой фазы или скорость образования рассчитывается по формуле

$$I = D e^{-A/kT}, \quad (9.45)$$

где I — число зародышей новой фазы, образующихся за единицу времени в единице объема; k — постоянная Больцмана (приложение 1); D — коэффициент, пропорциональный числу молекул в единице объема и зависящий от температуры и пересыщения. По оценке ряда авторов, для гомогенного образования зародышей жидкой фазы $D = 10^{25}$.

Вероятность образования ледяных зародышей в жидкой фазе может быть вычислена по формуле

$$I = \frac{nkT}{h} \exp\left(-\frac{U+A}{kT}\right), \quad (9.46)$$

где n — число молекул в 1 м^3 жидкой фазы; h — постоянная Планка (приложение 1), U — энергия активации молекул жидкости. Согласно оценкам ряда авторов, $U = 4,8 \cdot 10^{-20}$ Дж.

Рабочая формула имеет вид

$$\lg I = 38,84 + \lg T - \frac{U+A}{kT}. \quad (9.47)$$

Задачи

9.63. Вычислить критическое пересыщение, необходимое для образования зародышей жидкой фазы при гомогенной конденсации водяного пара, если его температура $30,0$; $-10,0$; $-20,0^\circ\text{C}$.

9.64. Вычислить критическое пересыщение, необходимое для образования зародышей твердой фазы при гомогенной сублимации водяного пара, если его температура $-10,0$; $-20,0$; $-32,0^\circ\text{C}$. Для образования зародыша твердой или жидкой фазы необходимо большее пересыщение при температурах $-10,0$ и $-20,0^\circ\text{C}$. Как пересыщение, необходимое для гомогенного образования зародышей твердой фазы, зависит от температуры?

9.65. Вычислить критический радиус зародыша жидкой фазы, образующегося при гомогенной конденсации водяного пара, если его температура $30,0^\circ\text{C}$, при 2-, 4-, 8-кратном пересыщении.

Что понимают под гомогенной конденсацией водяного пара? Возможна ли гомогенная конденсация водяного пара в атмосфере? Как зависит критический размер зародыша при гомогенной конденсации от пересыщения?

9.66. Вычислить критический радиус зародыша жидкой фазы, образующегося при гомогенной конденсации водяного пара, если его температура $0,0$ и $-10,0^\circ\text{C}$, при 2-, 4-, 8-кратном пересыщении. Результаты сопоставить с ответами к задаче 9.65. Как зависит критический размер зародыша от температуры при одном и том же пересыщении?

9.67. Вычислить критический радиус зародыша твердой фазы, образующегося при гомогенной сублимации водяного пара, температура которого составляет $-10,0$ и $-32,0^\circ\text{C}$ при 2-, 4-, 8-кратном пересыщении над льдом. Как зависит размер зародыша твердой

фазы от температуры и пересыщения водяного пара по отношению ко льду? Результаты сопоставить с ответами к задаче 9.66, полученными для температуры $-10,0^{\circ}\text{C}$. При образовании какой фазы в условиях одинакового пересыщения над водой должен быть больше размер зародыша?

9.68. Вычислить критический радиус зародыша твердой фазы, образующегося при гомогенной кристаллизации водяных капель, температура которых $-10,0$ и $-32,0^{\circ}\text{C}$. Как зависит размер зародыша твердой фазы, образующегося путем гомогенной кристаллизации, от переохлаждения воды?

9.69. Используя ответы к задачам 9.65 и 9.66, определить максимальную работу образования зародыша жидкой фазы при 2-, 4-, 8-кратном пересыщении. От чего в большей степени зависит работа образования зародыша жидкой фазы — от пересыщения или от температуры?

9.70. Определить работу образования зародышей жидкой фазы радиусом 10^{-7} и 10^{-6} см путем гомогенной конденсации водяного пара при температуре $30,0^{\circ}\text{C}$. Результаты расчетов проанализировать.

9.71. Вычислить и сопоставить работу образования сферического зародыша жидкой и твердой фаз при гомогенных процессах, если температура водяного пара $-5,0$; $-20,0$; $-32,0^{\circ}\text{C}$ и имеется четырехкратное пересыщение. Вероятность образования каких зародышей больше — жидкой или твердой фазы? Как зависит вероятность образования зародышей жидкой и твердой фаз при гомогенных процессах от температуры?

9.72. Вычислить работу образования сферического зародыша твердой фазы при гомогенной кристаллизации, если температура капель $-10,0$ и $-32,0^{\circ}\text{C}$ (см. ответ к задаче 9.68). Как в реальных атмосферных условиях образуется твердая фаза? Как зависит работа образования сферического зародыша твердой фазы при спонтанной кристаллизации от температуры? Облака каких форм имеют кристаллическое строение? Облака каких форм имеют смешанное строение?

9.73. Вычислить работу образования сферического зародыша твердой фазы при гомогенной кристаллизации водяных капель радиусом 10^{-7} , 10^{-4} и 10^{-3} см, если температура капель равна $-10,0^{\circ}\text{C}$. Вероятность переохлаждения каких облаков больше — крупнокапельных или мелкокапельных? При каких отрицательных температурах чаще всего наблюдаются капельно-жидкие облака?

9.74. Оценить, на сколько уменьшается работа образования сферического зародыша жидкой фазы радиусом $8 \cdot 10^{-6}$ см при гетерогенных процессах на нерастворимых, но смачиваемых водой ядрах конденсации радиусом $1,8 \cdot 10^{-6}$ см по сравнению с работой образования зародышей такого же размера при гомогенных процессах.

9.75. Вычислить вероятность образования ледяных кристаллов при гомогенной кристаллизации, если температура капель составляет $-5,0$ и $-15,0^{\circ}\text{C}$.

9.76. Вычислить вероятность образования ледяных зародышей путем гомогенной кристаллизации при температуре $-32,0^{\circ}\text{C}$. Работу образования сферического зародыша твердой фазы см. в ответе к задаче 9.72. Как зависит вероятность образования зародышей в жидкой фазе от степени ее переохлаждения?

9.77. Вычислить равновесную относительную влажность над поверхностью каплей дистиллированной воды и каплей насыщенного раствора поваренной соли радиусом $5 \cdot 10^{-7}$; 10^{-6} ; $3,5 \cdot 10^{-6}$; 10^{-5} ; 10^{-4} см. Использовать формулы (9.8) и (9.13). Результаты представить графически (по оси абсцисс отложить логарифмы радиусов, по оси ординат — относительную влажность). При каких значениях относительной влажности в атмосфере на ядре NaCl могут образоваться зародышевые капли указанных размеров?

9.78.* Выполнить указанные ниже расчеты роста зародышевой капли до размера облачной, образовавшейся на ядре конденсации, состоящем из поваренной соли, радиусом $1,8 \cdot 10^{-6}$ см. Используя приложение 11, вычислить: 1) массу сферического ядра конденсации; 2) радиус зародышевой капли в момент, когда концентрация соли понизится до насыщающей; 3) равновесную относительную влажность над поверхностью капли насыщенного раствора; 4) равновесную относительную влажность над поверхностью капли ненасыщенного раствора, когда ее радиус увеличился до размера $4 \cdot 10^{-6}$ см; 5) размер капли, при котором относительная влажность над ее поверхностью возрастет до 100 %; 6) радиус капли, при котором относительная влажность над ее поверхностью станет наибольшей; 7) необходимое пересыщение в атмосфере для роста зародышевой капли до размеров облачной. Результаты вычислений нанести на график, построенный при решении задачи 9.77.

Ответить на следующие вопросы: 1) На сколько должен увеличиться объем капли, чтобы концентрация раствора понизилась до насыщающей? 2) Как изменяется концентрация раствора в растущей капле? 3) Как и почему изменяется равновесная относительная влажность над растущей каплей? 4) При каком размере каплей увеличение давления насыщенного пара за счет кривизны и уменьшение за счет влияния раствора компенсируются? 5) При каких размерах зародышевых капель равновесная относительная влажность не зависит от содержания примесей в капле и ее радиуса? 6) Для каких капель условия роста наиболее благоприятны и почему: для образовавшихся на малых или на крупных ядрах конденсации? Варианты исходных данных см. табл. 21 (приложение 41).

9.79.* Выполнить расчеты роста зародышевой капли до размера облачной, если она образовалась на ядре конденсации, состоящем из соли азотнокислого натрия NaNO_3 , радиусом $1,8 \times 10^{-6}$ см. Расчет выполнить по схеме, приведенной в задаче 9.78. В пункте 4 радиус капли с ненасыщенным раствором принять равным $3,2 \cdot 10^{-6}$ см. Варианты исходных данных см. табл. 22 (приложение 41).

Глава 10

ОБЛАКА И ТУМАНЫ

10.1. Микрофизические характеристики облаков и туманов

В качестве характеристик размеров капель облаков и туманов используют:

модальный радиус — радиус наиболее часто встречающихся капель в облаке или тумане;

средний арифметический радиус

$$r_{\text{ср}} = \sum n_i r_i / \sum n_i, \quad (10.1)$$

где r_i — радиус капель, n_i — число капель радиусом r_i ;

средний квадратический радиус

$$r_{\text{кв}} = \sqrt{\sum n_i r_i^2 / \sum n_i}, \quad (10.2)$$

средний кубический радиус

$$r_{\text{куб}} = \sqrt[3]{\sum n_i r_i^3 / \sum n_i}. \quad (10.3)$$

Для характеристики распределения капель по размерам, т. е. их спектра, предложено несколько способов. Наиболее простым и наглядным способом является построение кривых повторяемости числа капель облака (тумана) в зависимости от их размера. По оси абсцисс на таких графиках откладывается радиус капель, а по оси ординат — число капель n_i (или их доля n_i/N) радиусом от r_i до $r_i + \Delta r_i$; интервал Δr берется постоянным. Если n_i отнести к середине интервала $(r_i + \Delta r_i/2)$, то можно получить сглаженный непрерывный спектр размеров капель, т. е. кривую $n(r)$. Эта зависимость, выраженная в виде аналитического уравнения, носит название функции дифференциального распределения. Наряду с такой функцией вводится понятие интегральной функции распределения, которая показывает, какая доля частиц имеет радиус больше или меньше заданного значения:

$$n_a(r) = \int_0^{\infty} n(r) dr, \quad n_b(r) = \int_0^r n(r) dr.$$

Функция $n_a(r)$ показывает долю частиц, радиус которых больше r , функция $n_b(r)$ — долю частиц, радиус которых меньше r . Пред-

ложено несколько аналитических выражений для функции $n(r)$. Широкое распространение получила формула А. Н. Колмогорова

$$n(r) = \frac{1}{r\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_0)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (10.4)$$

где $\ln r_0$ — среднее арифметическое из логарифмов радиусов частиц:

$$\ln r_0 = \overline{\ln r} = \frac{\ln r_1 + \ln r_2 + \dots + \ln r_n}{n},$$

$r_0 = \sqrt[n]{r_1 r_2 \dots r_n}$ — средний геометрический радиус, $\sigma = \sqrt{(\ln r - \ln r_0)^2}$ — среднее квадратическое отклонение логарифма радиусов, σ^2 — дисперсия логарифмов r . Формула (10.4) носит название логарифмически нормального распределения частиц. При таком распределении средние арифметический ($r_{\text{ар}}$), квадратический ($r_{\text{кв}}$), кубический ($r_{\text{куб}}$) и модальный (r_m) радиусы частиц связаны с r_0 и σ следующими соотношениями:

$$r_{\text{ар}} = r_0 \exp(\sigma^2/2), \quad (10.5)$$

$$r_{\text{кв}} = r_0 \exp(\sigma^2), \quad (10.6)$$

$$r_{\text{куб}} = r_0 \exp(3\sigma^2/2), \quad (10.7)$$

$$r_m = r_0 \exp(-\sigma^2). \quad (10.8)$$

При указанном распределении частиц водность облака рассчитывается по формуле

$$\delta = \frac{4}{3} \pi r_{\text{ар}}^3 N r_0^3 \exp(9\sigma^2/2). \quad (10.9)$$

П. В. Дьяченко предложил выразить функцию $n(r)$ в виде

$$n(r) = A r^b \exp(-a r^c), \quad (10.10)$$

где A , a , b , c — коэффициенты, постоянные для данного распределения. Распределение (10.10) называется гамма-распределением. После преобразования формулу (10.10) можно представить в виде

$$n(r) = \frac{c}{\Gamma\left(\frac{b+1}{c}\right)} \left(\frac{b}{c}\right)^{\frac{b+1}{c}} \left(\frac{r}{r_m}\right)^b \frac{1}{r_m} \exp\left[-\frac{b}{c} \left(\frac{r}{r_m}\right)^c\right], \quad (10.11)$$

где Γ — гамма-функция. Частным случаем гамма-распределения является формула А. Х. Хргиана и И. П. Мазина

$$n(r) = Ar^2 e^{-ar}, \quad (10.12)$$

где A и a — коэффициенты, постоянные для данного распределения капель облака, r — радиус капель. Параметры A и a можно определить графически. Если левую и правую части (10.12) прологарифмировать:

$$\lg n = \lg A + 2 \lg r - 0,434ar, \quad (10.13)$$

то в осях координат $x = r$ и $y = \lg n - 2 \lg r$ формула (10.13) будет изображаться прямой линией

$$y = -0,434ax + \lg A. \quad (10.14)$$

Если распределение капель по размерам аппроксимируется формулой (10.12), то опытные точки будут располагаться вблизи этой прямой. Постоянные A и a можно определить по экспериментальным данным с помощью построенного графика, а также по другим микрофизическим характеристикам облака: $a = 2/r_m$, где r_m — модальный радиус, или $a = 3/r_{cp}$; $A = 1,45\delta/\rho_k r_{cp}^3$, где δ — водность облака. Водность облака (δ) может быть определена, если просуммировать массу всех N капель, содержащихся в единичном объеме:

$$\delta = \int_0^\infty \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_k n(r) dr = \frac{4\pi}{3} \rho_k r_{куб}^3 N. \quad (10.15)$$

На практике водность измеряется в г/м³. Из (10.12) можно получить соотношения между некоторыми микрофизическими характеристиками облака:

$$r_{cp} = \frac{3}{2} r_m; \quad r'_m = \frac{5}{3} r_{cp}, \quad (10.16)$$

где r'_m — радиус капель, которые вносят максимальный вклад в водность облака. Формула Хргиана—Мазина хорошо согласуется с опытными данными распределения капель в облаках St, Sc, Ns. Распределение массовой доли влаги δ' (%) в облаках с высотой при вертикальной скорости $\omega > 0$ можно получить на основании формулы Л. Т. Матвеева

$$\delta'(z) = s_m(z) \left[\left(\frac{v - v^*/H^*}{v - 1} \right) \exp\left(\frac{z}{B}\right) - 1 \right], \quad (10.17)$$

$s_m(z)$ — массовая доля водяного пара; $v = \exp\left(\frac{\omega}{K} H^*\right)$; ω — скорость вертикальных движений; K — коэффициент турбулентности;

H^* — превышение тропопаузы над нижней границей облака; z — высота, на которой определяется массовая доля влаги в облаке; B вычисляется по формуле (приложение 16):

$$\frac{1}{B} = \frac{C\gamma}{R_n T_n^2} - \frac{g}{RT_n}, \quad (10.18)$$

где C — удельная теплота парообразования, γ — вертикальный градиент температуры, T_n — температура на нижней границе облака. Если вертикальная скорость мала ($\omega \approx 0$), для расчета массовой доли влаги применяется формула

$$\delta'(z) = s_m(z) [(1 - z/H^*) \exp(z/B) - 1]. \quad (10.19)$$

Зависимость средней массовой доли влаги δ' (‰) от температуры может быть описана функцией

$$\delta' = 0,201 \frac{T}{p} \exp \left[17,86 \left(1 - \frac{258}{T} \right) \right], \quad (10.20)$$

p — атмосферное давление (гПа), T — температура (К).

Сведения о распределении водности в облаках слоистых форм находят применение для расчета их водозапаса. Практически водозапасы q (г/м³, мм) могут быть определены по формуле

$$q = \Delta H \bar{\delta}, \quad (10.21)$$

где ΔH — мощность облака, м, $\bar{\delta}$ — средняя водность в облаке (г/м³).

Коэффициент подтока влаги в облачную систему K определяется как отношение количества осадков M , выпавших из облака на поверхность Земли, к его водозапасу в данный момент:

$$K = M/\bar{\delta} \Delta H. \quad (10.22)$$

Задачи

10.1. При одном из измерений размеров капель в пробе, взятой в слоистом облаке 23 декабря 1965 г., получено:

r мкм . . .	2	4	6	8	10	12
n см ⁻³ . . .	38	36	20	10	8	4

Определить средний арифметический, средний квадратический, средний кубический и модальный радиусы капель. Для каких целей используются в метеорологии данные о радиусах капель, полученных в задаче? Почему в данном случае средний арифметический радиус больше модального? Дает ли сумма объемов капель, имеющих средний арифметический радиус, фактическую сумму объемов капель данного полидисперсного тумана?

10.2. Построить дифференциальные и интегральные кривые распределения капель по размерам для облаков, если при исследовании проб, взятых при зондировании над югом ЕТС, получено:

r мкм	Число капель, см ⁻³			r мкм	Число капель, см ⁻³		
	St	Sc	Ns		St	Sc	Ns
1,1—3	96	11	4	17,1—19	6	2	23
3,1—5	48	27	11	19,1—21	4	2	9
5,1—7	31	29	18	21,1—23	—	—	6
7,1—9	18	22	17	23,1—25	3	1	7
9,1—11	10	12	22	25,1—27	3	1	2
11,1—13	16	9	21	27,1—29	2	1	—
13,1—15	7	2	12	29,1—31	1	—	2
15,1—17	5	4	18				

Примечание. Данные для St и Sc получены зимой, а для Ns — летом.

Сравнить между собой распределения капель по размерам в облаках трех рассмотренных форм.

10.3. При исследовании пробы, взятой при самолетном зондировании в слоисто-дождевом облаке над югом ЕТС 16 декабря 1965 г., получено:

r мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
n см ⁻³	6	18	28	35	37	31	17	11	10	3	3	1	1

Определить модальный, средний арифметический, средний квадратический, средний кубический радиусы, водность облаков и аналитический вид функции $n(r)$. При аппроксимации функции $n(r)$ использовать формулу Колмогорова.

10.4. Преобразовать формулу (10.11) гамма-распределения облачных капель к виду распределения облачных капель по размерам Хргиана—Мазина.

10.5. При исследовании пробы, взятой в слоисто-кучевом облаке зимой над югом ЕТС, получено:

r мкм	2	6	10	14	18	22	26
n см ⁻³	12	34	20	12	6	3	1

Определить модальный, средний арифметический, средний квадратический, средний кубический радиусы, водность облаков и аналитический вид функции $n(r)$. При аппроксимации функции $n(r)$ использовать формулу Хргиана—Мазина. Каково соотношение между вычисленными радиусами в полидисперсном облаке?

10.6. При исследовании пробы, взятой в слоистом облаке зимой над западом ЕТС, получено:

r мкм	2	6	10	14	18	22	26	30
n см ⁻³	16	52	60	33	17	7	3	1

Выполнить задание предыдущей задачи.

10.7. Вычислить модальный, средний кубический радиусы и водность слоистого облака, в котором распределение капель по размерам описывается формулой Хргиана—Мазина, средний арифметический радиус капель составляет 7,7 мкм, число капель — 100 в 1 см³.

10.8. Вычислить средний арифметический, средний кубический радиусы капель тумана и его водность, если распределение капель по размерам описывается формулой Хргиана—Мазина, модальный радиус составляет 1,5 мкм, число капель — 300 в 1 см³.

10.9. Вычислить водность капельно-жидкого тумана, если при концентрации капель и их распределении по размерам, заданным в задаче 10.8, средний кубический радиус составляет 5 мкм. Результат сопоставить с ответом к предыдущей задаче. Как зависит водность тумана от размера капель?

10.10. При исследовании трех проб, взятых в слоистых облаках зимой над югом ЕТС, получены следующие значения n (см⁻³):

Номер полета	r мкм														
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
1	18	29	20	13	5	6	4	1							
2	30	23	21	11	12	13	10	15	10	3	4	3	3	2	1
3	96	48	31	18	10	16	7	5	6	4		3	3	2	1
Σ	144	100	72	42	27	35	21	21	16	7	4	6	6	4	2

Определить среднюю водность слоистых облаков, если скорость самолета 220 км/ч, радиус поверхности заборника проб 150 мкм, время забора пробы 2 с.

10.11. При исследовании пробы, взятой в слоистых облаках 19 декабря 1965 г. над ЕТС, получено:

r мкм	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
n см ⁻³	48	27	12	8	11	4	8	4	8	8	2	3	1	1	2

Определить среднюю водность облаков, если скорость самолета 220 км/ч, радиус поверхности заборника проб 150 мкм, время забора пробы 2 с.

10.12. Вычислить удельную водность слоисто-дождевых облаков на высотах 0,5; 0,88; 1,00 и 1,33 км, используя данные самолетного зондирования в районе Риги 15 ноября 1963 г.:

H км	0,0	0,46*	0,50	0,88	1,00	1,33	1,43*
p гПа	1004	948	943	900	886	850	840
t °C	2,7	2,3	2,0	-0,1	-0,7	-1,5	-2,0
s %	4,6	4,6	4,5	4,0	4,0	4,0	3,9

* Нижняя и верхняя границы облаков.

Высота нижней границы тропопаузы 8500 м, $\eta = \frac{\omega}{K} H^* = 1$.

Как изменяется с высотой водность слоисто-дождевых облаков?

10.13. Вычислить массовую долю влаги в слоисто-кучевых облаках на высотах 190, 400 и 570 м над нижней границей, используя данные самолетного зондирования над Ригой за 11 октября 1958 г.:

H км	1,10 *	1,29	1,50	1,67	1,72 *
p гПа	894	873	851	834	
t °C	9,7	8,0	6,1	6,0	
s ‰	7,5	7,2	6,9	7,0	

* Нижняя и верхняя границы облаков.

Высота нижней границы тропопаузы 9300 м. Вертикальные токи малы и ими можно пренебречь. При расчете использовать формулу (10.19). Как изменяется водность с высотой в слоисто-кучевых облаках?

10.14. Вычислить массовую долю влаги в системах слоисто-дождевых и высоко-слоистых облаков на всех указанных высотах до верхней границы облачного слоя по данным самолетного зондирования в районе Свердловска за 27 февраля 1958 г.:

H км	1,74 *	2,00	2,45	3,29	3,55 *
p гПа	820	792	747	670	647
t °C	-6,9	-8,0	-9,0	-15,4	-17,3

* Нижняя и верхняя границы облаков.

При расчете использовать формулу 10.20. Результаты сопоставить с ответами к задаче 10.12. Как водность облаков зависит от температуры?

10.15. Вычислить массовую долю влаги в слоисто-дождевых облаках в Свердловске в теплое время года на всех указанных высотах, используя данные, полученные при самолетном зондировании:

H км	0,51 *	0,64	0,81	1,00	1,29	1,50	1,52 *
p гПа	934	919	900	880	850	829	826
t °C	9,4	9,1	8,2	7,1	5,6	4,4	4,3

* Нижняя и верхняя границы облаков.

10.16. Вычислить массовую долю влаги в слоисто-кучевых облаках на высотах 1,5 и 1,62 км, используя данные, полученные при самолетном зондировании над Свердловском за 29 сентября 1960 г.:

H км	1,48 *	1,50	1,62	1,80 *
p гПа	852	849	837	—
t °C	-1,0	-1,2	-2,1	—

* Нижняя и верхняя границы облаков.

При расчетах использовать формулу 10.20.

10.17. Концентрация капель в плотных облаках составляет 500 см^{-3} . Температура облака $10,0^\circ\text{C}$, средний кубический радиус капель 7 мкм . Определить, в каком состоянии преимущественно находится вода в облаке — в капельно-жидком или парообразном.

10.18. Вычислить водозапасы слоисто-кучевых облаков, если их средняя водность $0,09 \text{ г/м}^3$, а средняя мощность 450 м .

10.19. Вычислить водозапасы облачной системы слоисто-дождевых облаков, если средняя мощность облака 970 м , а средняя водность $0,30 \text{ г/м}^3$.

10.20. Рассчитать влагогенерирующий коэффициент (коэффициент подтока) системы слоисто-дождевых облаков в районе Куйбышева за 29 мая 1959 г., если по данным самолетного зондирования мощность облаков составляла $3,89 \text{ км}$, средняя водность $0,31 \text{ г/м}^3$, а среднее количество осадков, выпавших на четырех станциях этого района (Бузулук, Бугульма, Сызрань, Чулпаново), $5,6 \text{ мм}$. В каком соотношении находится количество осадков, выпавших из облачной системы, и содержание воды в облаках?

10.2. Нижняя граница облаков

Для определения высоты нижней границы облаков могут быть использованы эмпирические формулы:

для слоистообразных облаков нижнего яруса (St, Sc, Ns)

$$H = 215(t - t_d), \quad (10.23)$$

$$H = 25(102 - f), \quad (10.24)$$

$$H = 22(107 - f), \quad (10.25)$$

для облаков вертикального развития

$$H = 121(t - t_d), \quad (10.26)$$

где t — температура воздуха, t_d — точка росы, f — относительная влажность воздуха.

Определение высоты z_k нижней границы слоистообразных облаков можно выполнить также по методике Л. Т. Матвеева:

$$\ln\left(1 - \frac{v^{z_k/H}}{v-1}\right) + \left(bv - \frac{1}{H_1}\right)z_k = b(T - T_d), \quad (10.27)$$

где $b = C/R_d T_d^2$; $H_1 = RT_d/g$; C — удельная теплота парообразования; T и T_d — температура воздуха и точки росы (К) у поверхности Земли. В том случае, когда скорость вертикальных движе-

ний близка к нулю, формула для расчета высоты нижней границы слоистообразных облаков имеет вид

$$\ln\left(1 - \frac{z'_k}{H}\right) + \frac{z'_k}{B} = b(T - T_d), \quad (10.28)$$

где z'_k — высота нижней границы облаков при $\omega = 0$, $b\gamma = 1/H_1 = \frac{1}{B}$. Значения B приведены в приложении 16. На основании формул (10.27), (10.28) построены графики (приложения 17, 18), по которым можно определить высоту нижней границы слоистообразных облаков.

Задачи

10.21. Определить высоту нижней границы St в 7 ч 50 мин 30 апреля в районе Воейково, если температура воздуха $5,2^\circ\text{C}$, относительная влажность 92 %, парциальное давление водяного пара 8,0 гПа. Использовать формулы (10.23) — (10.25). Результаты сравнить между собой и с фактическим значением высоты, определенной при радиозондировании (290 м над поверхностью Земли).

10.22. Определить высоту нижней границы облаков N_s , F_{rnb} , из которых выпадает слабый снег, в 8 ч 3 февраля в районе Воейково, если температура воздуха $0,1^\circ\text{C}$, относительная влажность 100 %. Использовать формулы (10.23) — (10.25). Результаты сопоставить между собой и с фактическим значением, определенным при радиозондировании (150 м над поверхностью Земли).

10.23. Определить высоту нижней границы C_u , C_b в 19 ч 50 мин 24 июля в районе Воейково, если температура воздуха $19,0^\circ\text{C}$, атмосферное давление 997 гПа и относительная влажность 74 %. Использовать формулу (10.26). Результат сопоставить с высотой уровня конденсации, определенной по аэрологической диаграмме.

10.24. Определить высоту нижней границы Sc 21 июля в районе Свердловска, если у поверхности Земли температура воздуха $11,7^\circ\text{C}$, парциальное давление водяного пара 10,8 гПа, вертикальный градиент температуры для нижней части тропосферы $0,55^\circ\text{C}/100\text{ м}$, высота тропопаузы 11 км, скорость восходящих движений 1 см/с. Для расчета высоты использовать номограммы и таблицу, приведенные в приложениях 16—18.

10.25. Определить высоту нижней границы N_s , из которых выпал мокрый снег, за 20 марта в районе Свердловска, если у поверхности Земли температура $-0,9^\circ\text{C}$, парциальное давление водяного пара 4,5 гПа, вертикальный градиент температуры для нижней части тропопаузы $0,55^\circ\text{C}/100\text{ м}$, высота тропопаузы 10 км, скорость восходящих движений 0,5 см/с. Оценить погрешность определения высоты нижней границы N_s , если при самолетном зондировании была зафиксирована высота нижней границы 1300 м. Использовать приложения 16—18.

10.3. Процессы образования тумана. Видимость в тумане

Для образования тумана необходимо охлаждение воздуха ниже точки росы настолько, чтобы сконденсировалось достаточное количество водяного пара, необходимое для создания водности. Понижение температуры рассчитывается по формуле

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2. \quad (10.29)$$

Здесь ΔT_1 — понижение температуры до точки росы, которое можно определить по Психрометрическим таблицам, а также по формуле

$$\Delta T_1 = 0,115T(2 - \lg f), \quad (10.30)$$

где T — температура (К) в вечерний срок (21 ч); f — относительная влажность воздуха (%) в вечерний срок (21 ч); ΔT_2 — понижение температуры ниже точки росы, необходимое для создания тумана определенной водности:

$$\Delta T_2 = 19 \frac{\delta}{e}, \quad (10.31)$$

где δ — водность тумана (г/м^3) e — парциальное давление водяного пара (гПа) в вечерний срок.

Туманы смешения образуются в случае, если водяной пар смешивающихся масс близок к состоянию насыщения ($f \geq 95\%$), а разность их температур не менее 10°C . На рис. 10.1

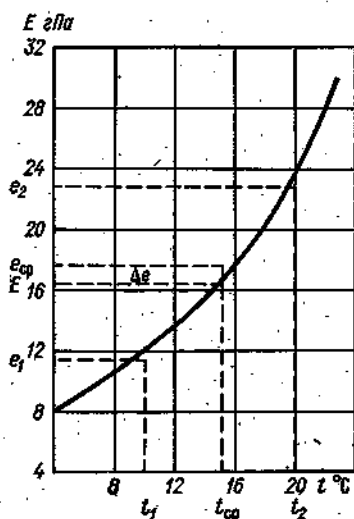


Рис. 10.1. Конденсация при смешении воздушных масс.

представлен пример конденсации водяного пара при смешении двух воздушных масс, имеющих различные температуры: e_{cp} — среднее давление пара двух смешивающихся масс ($e_{cp} = (e_1 + e_2)/2$); E — давление насыщенного водяного пара при средней температуре смешивающихся воздушных масс ($t_{cp} = (t_1 + t_2)/2$); $\Delta e = e_{cp} - E$ — избыток водяного пара, образовавшегося при смешении масс воздуха. Этот избыток водяного пара (г/м^3) можно определить по формуле

$$\delta = \frac{0,8 \Delta e}{1 + \alpha t_{cp}}. \quad (10.32)$$

Метеорологическую дальность видимости S_m (м) в тумане можно определить по формуле

$$S_m = 2,6 \frac{r^*}{\delta}, \quad (10.33)$$

где r^* — поверхностно-эквивалентный радиус капель тумана (мкм):

$$r^* = r_{куб}^3 / r_{кв}^2, \quad (10.34)$$

который связан с модальным и средним арифметическим радиусами в случае распределения Хргиана—Мазина соотношениями

$$r^* = \frac{5}{2} r_m, \quad r^* = \frac{5}{3} r_{\text{ср}}. \quad (10.35)$$

Задачи

10.26. Какое изобарическое охлаждение воздуха необходимо для образования тумана водностью $1,00 \text{ г/м}^3$, если температура воздуха $10,0^\circ\text{C}$ и относительная влажность 80% ? Как изменился бы результат задачи, если бы при прочих равных условиях температура в вечерний срок была равна $17,0^\circ\text{C}$? Как изменится водность тумана при том же охлаждении воздуха, если относительная влажность в вечерний срок составляла 90% ?

10.27. Вечером в ясную погоду при слабом ветре температура воздуха составляла $15,0^\circ\text{C}$, а относительная влажность 70% . К утру температура понизилась на $10,0^\circ\text{C}$. Возможно ли образование радиационного тумана? При каком знаке радиационного баланса, какой скорости ветра и каком вертикальном распределении температуры в приземном слое атмосферы образуется радиационный туман?

10.28. Определить водность радиационного тумана, который образуется при условии, что вечером температура составляла $10,0^\circ\text{C}$, относительная влажность 90% и ожидалось ночное охлаждение воздуха на $6,0^\circ\text{C}$. В какое время года при одинаковом охлаждении воздуха водность образующегося тумана больше?

10.29. На границе теплого и холодного морских течений происходит смешение воздушных масс: холодной (температура $5,0^\circ\text{C}$, относительная влажность 90%) и теплой (температура $11,0^\circ\text{C}$, относительная влажность 80%). Возможно ли образование тумана смешения? При каких условиях возможно образование тумана смешения?

✓10.30. Две массы воздуха, температуры которых составляют $10,0$ и $20,0^\circ\text{C}$, а относительная влажность 96 и 98% соответственно, смешиваются. Определить избыток водяного пара в 1 м^3 , образовавшийся в результате смешения. Какие значения водности характерны для туманов в теплое время года?

10.31. Температура насыщенного водяным паром воздуха составляет $25,0^\circ\text{C}$. Сколько воды сконденсируется в 1 м^3 воздуха при образовании тумана, если температура воздуха изобарически понизится на $5,0^\circ\text{C}$?

10.32.* Вечером температура воздуха составила $15,0^\circ\text{C}$, относительная влажность 80% . Определить среднюю водность в г/м^3 и количество тепла, выделяющееся при образовании тумана, если перед восходом Солнца наблюдались следующие метеорологические условия: температура воздуха $9,0^\circ\text{C}$, скорость ветра 2 м/с , безоблачно. Зачем в условиях задачи приводятся данные о ветре и состоянии неба? Варианты исходных данных см. табл. 23 (приложение 41).

10.33. Вечером температура воздуха составила $-8,8^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 80 %. Определить среднюю водность и количество тепла, выделившегося при образовании тумана, если перед восходом Солнца температура воздуха равнялась $-14,0^{\circ}\text{C}$. Результат сопоставить с ответом к задаче 10.32. Почему при одинаковом охлаждении воздуха в условиях задач 10.32 и 10.33 образуется туман с разной водностью? При каких метеорологических условиях возможно рассеяние тумана?

10.34. Вычислить поверхностно-эквивалентный радиус капель тумана, имеющего водность $0,07 \text{ г/м}^3$ и видимость 50 м.

10.35. Определить дальность видимости в монокдисперсном тумане, состоящем из капель радиусом 3 мкм, если его водность $0,10 \text{ г/м}^3$. Как изменится полученный ответ, если при той же водности капли тумана укрупнятся до 8 мкм?

10.36. В монокдисперсном тумане с водностью $1,00 \text{ г/м}^3$ первоначально в 1 см^3 находилось 465 капель. Затем без изменения водности тумана капли укрупнились настолько, что в каждом кубическом сантиметре осталось лишь по 30 капель. Определить сумму площадей поперечных сечений капель и дальность видимости в первом и втором случаях. Как изменится видимость в тумане при увеличении его водности, если размер капель не меняется?

10.37. Во сколько раз увеличится горизонтальная дальность видимости в тумане, если без изменения водности в нем сольются вместе каждые 27 капель? В каком случае видимость в тумане будет больше: когда преобладают капли радиусом 2 мкм или когда преобладают капли радиусом 6 мкм при том же их количестве?

10.38. Вечером температура воздуха составляла $10,0^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 90 %. При понижении температуры до $7,5^{\circ}\text{C}$ образовался монокдисперсный туман с каплями радиусом 7 мкм. Найти водность тумана и дальность видимости.

10.39. При заходе Солнца температура воздуха составляла $17,0^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 70 %. Утром ожидалось понижение температуры до $5,5^{\circ}\text{C}$. Считая поверхностно-эквивалентный радиус капель тумана равным 10 мкм, определить: 1) Через какое время после захода Солнца видимость уменьшится до 250 м, если ожидается, что каждый час температура будет понижаться на $2,2^{\circ}\text{C}$? 2) Какой будет минимальная видимость; 3) Через сколько часов после наступления минимальной температуры туман рассеется полностью, если повышение температуры пойдет со скоростью $1,8^{\circ}\text{C/ч}$?

10.40. По наблюдениям в вечерний срок температура воздуха составила $-12,0^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 90 %. Согласно прогнозу погоды, утром ожидается понижение температуры до $-16,0^{\circ}\text{C}$. Через какое время после захода Солнца образуется монокдисперсный туман, состоящий из капель радиусом 2 мкм с видимостью 300 м, если ожидается, что каждый час температура будет понижаться на $0,5^{\circ}\text{C}$? Какой будет минимальная видимость?

Глава 11

ОСАДКИ

11.1. Скорость падения капель и ледяных частиц в атмосфере

Для капель радиусом менее 50 мкм скорость падения описывается законом Стокса:

$$v = \frac{2}{9} \frac{r^2 g \rho_k}{\eta} = c_{\text{Ст}} r^2, \quad (11.1)$$

где r — радиус капли, g — ускорение свободного падения, ρ_k — плотность капли, η — коэффициент молекулярной вязкости, $c_{\text{Ст}}$ — коэффициент Стокса. Значения η и $c_{\text{Ст}}$ зависят от температуры:

t °C	-10	0	10	20
$\eta 10^{-6}$ г/(см·с)	167	172	177	182
$c_{\text{Ст}} 10^{-8}$ см ⁻¹ ·с ⁻¹	1,31	1,26	1,23	1,19

При $r = 50 \dots 600$ мкм для определения скорости падения можно применять приближенную формулу

$$v = c_1 r, \quad (11.2)$$

где $c_1 = 8 \cdot 10^3$ с⁻¹.

Если радиус капель осадков превышает 0,6 мм, то при определении скорости их падения можно использовать формулу Крыстонова

$$v = \alpha \sqrt{r}, \quad (11.3)$$

где $\alpha = 2 \cdot 10^3$ см^{1/2}·с⁻¹. Для приближенного расчета скорости падения (см/с) ледяных частиц можно использовать следующие эмпирические формулы:

для крупы

$$v = 520 r^{0.6}, \quad (11.4)$$

где r — радиус ледяных частиц (см);
для снежинок

$$v = b D^n, \quad (11.5)$$

где D — диаметр капли, которая образовалась бы из растаявшей снежинки; b составляет 160 для дендритов и 234 для столбиков и пластинок, $n \approx 0.3$;

для сферической градины ($r = 0,25 \dots 2,5$ см)

$$v = 65 \sqrt{R_{\text{л}} \frac{\rho_{\text{л}}}{\rho}}, \quad (11.6)$$

где ρ — плотность воздуха на высоте падения, $\rho_{\text{л}}$ — плотность градины, $R_{\text{л}}$ — радиус градины (см).

Обзерненные структуры (кристаллы с каплями) падают со скоростями около 1 м/с.

Задачи

11.1. Вычислить скорость падения капель радиусом 30, 200 мкм и 1 мм по соответствующим формулам. Оценить ошибку расчета скорости падения капель радиусом 200 мкм и 1 мм по формуле Стокса.

11.2. Капля радиусом 300 мкм падает в слоисто-дождевом облаке и сливается с 1000 каплями средним радиусом 10 мкм. Определить радиус образовавшейся капли и скорость ее падения. Как изменилась скорость падения капли после коагуляции с каплями облака?

11.3. С какой скоростью будут оседать в неподвижном воздухе капельки тумана радиусом 3 и 8 мкм при температуре $10,0^\circ\text{C}$?

11.4. Найти скорость восходящих движений воздуха, способных удержать в равновесии по отношению к поверхности Земли слоисто-кучевое облако, состоящее из капель радиусом 6 мкм.

11.5. Определить скорость падения снежной крупы радиусом 2 мм. На сколько полученное значение меньше, чем скорость падения капли такого же размера?

11.6. Через какое время выпадет на поверхность Земли снежинка (дендрит) из высоко-слоистых облаков, нижняя граница которых расположена на высоте 3,5 км?

11.7. Определить скорость падения сферических градин радиусом 0,25 и 2,5 см, если средняя температура кучево-дождевого облака $-10,0^\circ\text{C}$ и средняя плотность воздуха в подоблачном слое $1,2 \text{ кг/м}^3$.

11.2. Процессы укрупнения облачных элементов и образование осадков

Укрупнение облачных капель до размеров капель осадков происходит за счет процессов конденсации (сублимации) водяного пара и коагуляции:

$$\frac{dr}{dt} = \left(\frac{dr}{dt} \right)_{\text{конд}} + \left(\frac{dr}{dt} \right)_{\text{ковг}}.$$

Конденсационный рост облачных капель возможен при пересыщении в облаке. Он описывается выражением

$$\left(\frac{dr}{d\tau}\right)_{\text{конд}} = k_{\text{конд}} \frac{(e - E_k)(1 + F)}{r}. \quad (11.7)$$

Здесь $k_{\text{конд}} = D_m / \rho_k R_{\text{п}} T_k = 1,74 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2 / (\text{гПа} \cdot \text{с})$; D_m — коэффициент молекулярной диффузии; ρ_k — плотность капли; $R_{\text{п}}$ — удельная газовая постоянная пара; T_k — температура капли; e — парциальное давление водяного пара в воздухе; E_k — давление насыщенного водяного пара над каплей; r — радиус капли, $e - E_k$ — пересыщение (гПа) относительно поверхности капли (поскольку $r \gg 10^{-4} \text{ см}$, то практически $E_k = E$); F — ветровой коэффициент, зависящий от размера капли, плотности и вязкости воздуха, а также от скорости капли относительно обтекающего воздуха: $F = a \sqrt{\text{Re}}$, где a — некоторый коэффициент; Re — число Рейнольдса. Коэффициент F зависит от размера капель:

r мкм	10	100	200	500	700	1000
F	0,1	0,5	0,9	3,95	5,2	>5,2

Если пересыщение в облаке выражать в процентах (Δf), то

$$e - E_k = e - E = \frac{\Delta f E}{100}.$$

Тогда

$$\left(\frac{dr}{d\tau}\right)_{\text{конд}} = k_{\text{конд}} \frac{\Delta f E}{100r} (1 + F), \quad (11.8)$$

а время конденсационного роста капель равно

$$d\tau = \frac{100r dr}{k_{\text{конд}} \Delta f E (1 + F)}. \quad (11.9)$$

Интегрируя, получаем

$$\tau = \frac{100 \left(\frac{r_2^2}{2} - \frac{r_1^2}{2} \right)}{k_{\text{конд}} \Delta f E (1 + F)}. \quad (11.10)$$

Если $r_2^2 \gg r_1^2$, то формула (11.10) примет вид

$$\tau = \frac{2,86 \cdot 10^8 r_2^2}{\Delta f E (1 + F)}, \quad (11.11)$$

где значение r выражено в сантиметрах, τ — в секундах.

Путь dz , который должна пройти капля в облаке, чтобы она могла вырасти до определенных размеров за счет конденсации водяного пара определяется по формуле

$$dz = (v - \omega) d\tau = \frac{100(v - \omega) r dr}{k_{\text{конд}} \Delta f E (1 + F)}, \quad (11.12)$$

где v — скорость падения капли, ω — скорость вертикальных движений воздуха. Для капель радиусом меньше 50 мкм ветровым множителем можно пренебречь. Тогда после интегрирования формула для z при $r < 50$ мкм примет вид

$$z = \frac{100 c_{\text{ст}}}{k_{\text{конд}} \Delta f E} \left(\frac{r_2^4}{4} - \frac{r_1^4}{4} \right) - \frac{100 \omega}{k_{\text{конд}} \Delta f E} \left(\frac{r_2^2}{2} - \frac{r_1^2}{2} \right), \quad (11.13)$$

или

$$z = \frac{1,43 \cdot 10^8 c_{\text{ст}} (r_2^4 - r_1^4)}{\Delta f E} - \frac{2,86 \cdot 10^8 \omega (r_2^2 - r_1^2)}{\Delta f E}. \quad (11.14)$$

Для капель радиусом 50–600 мкм формула приобретает вид

$$z = \frac{1,53 \cdot 10^{12} (r_2^3 - r_1^3)}{\Delta f E} - \frac{2,86 \cdot 10^8 \omega (r_2^2 - r_1^2)}{\Delta f E}, \quad (11.15)$$

Для капель радиусом более 0,6 мм используется формула

$$z = \frac{200 \alpha (r_2^{3/2} - r_1^{3/2})}{5 k_{\text{конд}} \Delta f E} - \frac{100 \omega (r_2^2 - r_1^2)}{2 k_{\text{конд}} \Delta f E}, \quad (11.16)$$

или

$$z = \frac{4,6 \cdot 10^{11} (r_2^{3/2} - r_1^{3/2})}{\Delta f E} - \frac{2,86 \cdot 10^8 \omega (r_2^2 - r_1^2)}{\Delta f E}. \quad (11.17)$$

Сублимационный рост ледяной сферической частицы определяется по формуле

$$\left(\frac{dr}{d\tau} \right)_{\text{субл}} = k_{\text{субл}} \frac{e - E_{\text{л}}}{r}, \quad (11.18)$$

где $E_{\text{л}}$ — давление насыщенного пара над ледяной частицей, $k_{\text{субл}} = 1,9 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/(\text{гПа} \cdot \text{с})$.

Поскольку в облаке обычно наблюдается небольшое пересыщение водяного пара по отношению к воде, то $e \approx E$. Для определения времени сублимационного роста облачных элементов применяется выражение

$$\tau = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2 k_{\text{субл}} (E - E_{\text{л}})} \quad (11.19)$$

или

$$\tau = \frac{2,63 \cdot 10^6 (r_2^2 - r_1^2)}{E - E_{\text{л}}}. \quad (11.20)$$

Путь z , который необходимо пройти в облаке сферической ледяной частице радиусом r_1 менее 100 мкм для достижения ею определенного размера r_2 , вычисляется по формуле

$$z = \frac{1,66 \cdot 10^{12} (r_2^4 - r_1^4)}{E - E_n} - \frac{2,63 \cdot 10^6 \omega (r_2^2 - r_1^2)}{E - E_n}. \quad (11.21)$$

Выражение для скорости роста капель за счет гравитационной коагуляции имеет вид

$$\left(\frac{dR}{d\tau} \right)_{\text{коаг}} = \frac{\partial \delta (R+r)^2 [v(R) - v(r)]}{4\rho_k R^2}, \quad (11.22)$$

где δ — водность облака (г/см³), ρ_k — плотность капли, R — радиус падающей капли, r — средний радиус капель в облаке, $v(R)$ — скорость падения крупной капли, $v(r)$ — скорость падения мелких капель, ∂ — коэффициент захвата, равный произведению коэффициентов слияния и соударения ($\partial = \partial' \cdot \partial''$) (приложение 20). Если $R \gg r$ и $v(R) \gg v(r)$, то формулу (11.22) можно преобразовать к виду

$$\left(\frac{dR}{d\tau} \right)_{\text{коаг}} = \frac{\partial \delta v(R)}{4\rho_k}. \quad (11.23)$$

Время роста капли за счет коагуляции при ее прохождении через облако с учетом различных скоростей падения капель (см. п. 11.1) можно определить по следующим формулам:

при $r \leq 50$ мкм

$$\tau = \frac{4\rho_k}{\partial \delta c_{\text{ст}}} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), \quad (11.24)$$

где R_1, R_2 — начальный и конечный радиусы падающей капли; при $r = 50 \dots 600$ мкм

$$\tau = \frac{4\rho_k}{\partial \delta c_1} (\ln R_2 - \ln R_1); \quad (11.25)$$

при $r > 0,6$ мм

$$\tau = \frac{8\rho_k}{\partial \delta \alpha} \sqrt{R_2 - R_1}. \quad (11.26)$$

Изменение радиуса капли с высотой за счет коагуляции описывается выражением

$$\frac{dR}{dz} = \frac{\partial \delta}{4\rho_k} \frac{v(R)}{[\omega - v(R)]}, \quad (11.27)$$

где ω — скорость вертикальных движений воздуха. При малых скоростях восходящих движений, когда $v(R) \gg \omega$, формула (11.27) приобретает вид

$$\frac{dR}{dz} = -\frac{\partial \delta}{4\rho_k}, \quad (11.28)$$

откуда, интегрируя, получаем:

$$R_2 = R_1 + \frac{\partial \delta}{4\rho_K} z. \quad (11.29)$$

Изменение радиуса капли за счет конденсации в зависимости от пройденного пути в облаке можно рассчитать по формуле, предложенной Л. Г. Качуриным,

$$\left(\frac{dR}{dz}\right)_{\text{конд}} = - \frac{2D_m \mu^2 \sigma E}{(\rho N k T)^2 R [v(R) - \omega]} \times \\ \times \left[\left(1 - \frac{dS}{d\tau} \frac{\rho (kNT)^2}{8\pi n \sigma D_m \mu^2 E}\right) \frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right]. \quad (11.30)$$

Здесь D_m — коэффициент диффузии водяного пара, μ — молярная масса воды, σ — удельная поверхностная энергия на границе вода—пар, ρ — плотность воды, k — постоянная Больцмана, N — число Авогадро, n — число капель в единице массы, r — средний радиус капель в облаке, $dS/d\tau$ — изменение массовой доли насыщенного водяного пара в единицу времени:

$$\frac{dS}{d\tau} = -0,622 \frac{CE}{pT^2 R_n} \gamma \omega, \quad (11.31)$$

где γ — вертикальный температурный градиент в облаке, ω — вертикальная скорость, C — удельная теплота парообразования, R_n — удельная газовая постоянная водяного пара. Изменение радиуса сферической ледяной частицы в зависимости от пройденного пути за счет сублимации можно рассчитать по формуле

$$\left(\frac{dR}{dz}\right)_{\text{субл}} = \frac{D_m \mu (e - E_n) (1 + a \sqrt{Re})}{T_p k N R [v(R) - \omega]}. \quad (11.32)$$

Если размеры ледяных частиц не превышают 100 мкм, то $Re < 1$ и $(1 + a \sqrt{Re}) \approx 1$.

Задачи

11.8. Сколько облачных капель радиусом 5 мкм необходимо для образования одной дождевой капли радиусом 1 мм?

11.9. За какое время капля радиусом 1 мкм при температуре 10,0°C вырастет за счет конденсации до 5, 10, 20, 50, 100, 500 и 1000 мкм, если пересыщение в облаке 0,1%? Могут ли облачные капли за короткий промежуток времени (1–3 ч) вырасти до размеров капель осадков за счет процесса конденсации?

11.10. Вычислить скорость конденсационного роста облачных капель с начальным радиусом 1, 10, 20, 50, 100, 200 и 500 мкм, если пересыщение в облаке 0,2% и температура 6,0°C. По расчетным данным построить график зависимости $(dr/d\tau)_{\text{конд}} = f(r)$. Как изменяется скорость конденсационного роста капли по мере увеличения ее радиуса?

11.11.* Какой путь в капельно-жидком слоисто-кучевом облаке, температура которого $8,0^{\circ}\text{C}$, должна пройти капля с начальным радиусом 6 мкм, чтобы она могла только за счет конденсации вырасти до 20, 50 и 100 мкм, если пересыщение в облаке 0,12 % и восходящие движения: а) отсутствуют; б) имеют скорость 2,4 см/с? Варианты исходных данных см. табл. 23 (приложение 41).

Наблюдаются ли в умеренных широтах слоисто-кучевые капельно-жидкие облака с полученными значениями вертикальной мощности? Какую среднюю мощность имеют облака слоистых форм и вертикального развития в умеренных широтах? Существенно ли изменятся результаты расчетов при учете вертикальных движений в облаках слоистообразных форм?

11.12. Какой путь в мощном кучевом облаке со средней температурой $0,0^{\circ}\text{C}$ и пересыщением 2 % должна пройти капля с начальным радиусом 5 мкм, чтобы ее радиус мог за счет конденсации достичь 50, 100 и 1000 мкм, если скорость вертикальных токов в облаке 10 м/с? Какой должна быть мощность облака при условиях данной задачи, чтобы капли выросли до размеров капель мороси и осадков за счет процесса конденсации? Может ли при условиях данной задачи в результате конденсации выпасть умеренный ливневый дождь?

11.13. Какого размера достигнут за счет коагуляционного роста капли с начальным радиусом 40, 70 и 100 мкм при прохождении облака мощностью 300, 1000 и 2000 м; средний радиус капель облака 6 мкм и средняя водность $0,2 \text{ г/м}^3$. Вертикальные движения в облаке малы. Коэффициент захвата см. в приложении 20. Какие виды коагуляции приводят к укрупнению облачных капель до размеров осадков? Как зависит конечный радиус капли от пути, проходимого падающей каплей в облаке? Как зависит скорость коагуляционного роста от водности облака? Что понимают под коэффициентом соударения и слияния? Как зависит коэффициент захвата от размеров капель?

11.14. Определить скорость коагуляционного роста облачных капель с начальным радиусом 25, 50, 100, 300, 500, 1000 и 2000 мкм, если водность облака $0,3 \text{ г/м}^3$ и средний радиус капель облака 8 мкм. По расчетным данным построить график зависимости $(dr/dt)_{\text{коаг}} = f(r)$ и сопоставить с графиком, построенным при решении задачи 11.10. Как и почему изменяется скорость коагуляционного роста капель по мере их укрупнения? С каких размеров капель коагуляционный рост становится весьма эффективным? В каком соотношении находятся процессы конденсационного и коагуляционного роста капель в облаках?

11.15. Какой путь в капельно-жидком слоистообразном облаке (средний радиус капель 6 мкм, средняя водность $0,3 \text{ г/м}^3$) должна пройти капля, имеющая начальный радиус 40 мкм, чтобы за счет коагуляции ее радиус увеличился сначала до размеров капель мороси 100 (мкм), а затем до размеров капли осадков (300, 500, 1000 мкм). Какую мощность при условиях данной задачи

должно иметь облако, чтобы облачные капли могли укрупниться до размеров капель осадков за счет процесса коагуляции? С какой целью в условии задачи задан радиус капель облака?

11.16. Определить, какой должна быть вертикальная мощность облака (средний радиус капель 8 мкм, средняя водность $0,50 \text{ г/м}^3$), чтобы капля, падающая от его вершины, выросла за счет коагуляции от 40 мкм до размеров капель мороси радиусом 100 мкм, а затем до размеров капель осадков радиусом 300, 500 и 1000 мкм. Результаты расчетов сопоставить с ответами к предыдущей задаче и обсудить.

11.17. За какое время замерзшая капля радиусом 1 мкм, находящаяся в переохлажденном облаке с температурой $-10,0^\circ\text{C}$, вырастет за счет сублимации до размеров 5, 10, 20, 50, 100, 500 и 1000 мкм? Сопоставить результаты расчетов с ответами к задаче 11.9. За счет какого процесса — сублимации или конденсации — рост капли в облаке идет интенсивнее? До каких размеров при условиях данной задачи за счет сублимационного роста ледяные частицы за короткий интервал времени могут укрупниться в облаках?

11.18. Вычислить скорость сублимационного роста сферических ледяных частиц с начальным радиусом 1, 10, 20, 50, 100, 200 и 500 мкм, если температура переохлажденного облака $-13,0^\circ\text{C}$. Результаты расчетов сопоставить с ответами к задаче 11.10.

11.19. Сопоставить время сублимационного и конденсационного роста сферической ледяной частицы и переохлажденной капли от 20 до размера 100 и 300 мкм, если средняя температура в облаке $-12,0^\circ\text{C}$, пересыщение по отношению к воде 0,1 %. Для какой частицы (жидкой или твердой) условия роста в облаке более благоприятны?

11.20. Определить путь, который должна пройти в переохлажденном облаке с температурой $-10,0^\circ\text{C}$ замерзшая капля радиусом 20 мкм, чтобы за счет сублимации вырасти до 100, 200, 1000 мкм, если скорость восходящих движений мала.

11.21. Определить путь, который должна пройти сферическая ледяная частица в переохлажденных облаках с температурой $-6,0$ и $-12,0^\circ\text{C}$, чтобы в результате сублимации ее радиус увеличился от 10 до 100 мкм, если: а) восходящие движения слабы и ими можно пренебречь; б) скорость восходящих движений составляет 2 см/с ? Как влияют восходящие движения в облаке на скорость сублимационного роста замерзших капель?

11.22. Вычислить радиусы, до которых вырастут капли и сферические ледяные частицы за счет конденсационно-коагуляционных процессов, пройдя в слоисто-кучевом облаке расстояние от верхней (1050 м) до нижней (300 м) границы, если при самолетном зондировании получено:

$H \text{ м}$	1050	950	900	650	600	450	300
$p \text{ гПа}$	902	925	938	945	955	968	978
$t^\circ\text{C}$	$-9,8$	$-9,8$	$-9,8$	$-9,8$	$-9,2$	$-8,0$	$-6,5$

Радиус капли и ледяной частицы на верхней границе облака 40 мкм, средняя водность облака $0,06 \text{ г/м}^3$, скорость восходящих движений $0,10 \text{ см/с}$. Для какой частицы условия роста в облаке наиболее благоприятны?

11.3. Испарение облачных и дождевых капель

Испарение с единицы поверхности капли находится по формуле

$$W = -D_m \rho \frac{ds}{dr}, \quad (11.33)$$

где D_m — коэффициент молекулярной диффузии водяного пара в воздухе; $D_m = 0,22 + 0,0015t$; ρ — плотность воздуха; s — массовая доля водяного пара; r — расстояние от центра капли.

Испарение со всей поверхности капли в единицу времени описывается выражением

$$W = -4\pi r^2 \rho D_m \frac{ds}{dr}. \quad (11.34)$$

Время, в течение которого радиус капли вследствие испарения уменьшается от r_1 до r_2 , рассчитывается по формуле

$$\tau = \frac{\rho_k (r_1^2 - r_2^2)}{2D_m \rho (S_k - s)}. \quad (11.35)$$

где r_1 и r_2 — начальный и конечный радиусы капли; S_k — массовая доля насыщенного водяного пара над каплей, определяемая по температуре капли; s — массовая доля водяного пара в окружающем пространстве.

Заменяя массовую долю водяного пара на парциальное давление, формулу (11.35) можно записать в виде

$$\tau = \frac{\rho_k R_p T}{2D_m} \frac{r_1^2 - r_2^2}{(E_k - e)(1 + f)}, \quad (11.36)$$

где $\rho_k R_p T / 2D_m = 2,86 \cdot 10^6 \text{ гПа с/см}^2$ при $T = 273 \text{ К}$. Для определения E_k используется психрометрическая формула

$$e = E_k - A p (t - t_k). \quad (11.37)$$

Здесь $E_k = E(t_k)$ — давление насыщенного водяного пара при температуре поверхности капли t_k ; e — парциальное давление водяного пара в воздухе; p — атмосферное давление; $A = 1,608\lambda / \rho D_m C$ — психрометрическая постоянная, где λ — коэффициент молекулярной теплопроводности воздуха; $\lambda = c_p \rho a$ (a — коэффициент молекулярной температуропроводности воздуха, c_p — теплоемкость при постоянном давлении), C — удельная теплота парообразования.

Для приближенного определения температуры капли и давления насыщенного водяного пара над ее поверхностью можно использовать приложение 19, данные которого рассчитаны по формуле

$$e - E_k = \frac{a c_p p}{0,622 D_k C} (t_k - t). \quad (11.38)$$

Если в формуле (11.38) принять $a = D_m$, то

$$e - E_k = \frac{c_p p}{0,622 C} (t_k - t). \quad (11.39)$$

При $p = 900$ гПа $c_p p / 0,622 C = 0,58$.

Задачи

11.23. Вычислить температуру капель, находящихся на нижней границе разрушающегося кучевого облака, и давление насыщенного пара над ними, если температура воздуха $12,0^\circ\text{C}$, относительная влажность 86% , для двух значений атмосферного давления — 900 и 1000 гПа.

11.24. Вычислить температуру капель испаряющегося слоисто-кучевого облака и давление насыщенного пара над ними, если температура воздуха $6,0^\circ\text{C}$, парциальное давление пара $5,5$ гПа и атмосферное давление 900 гПа.

11.25. Получить рабочие формулы для определения пути, проходимого каплями радиусом 40 , 100 и 1000 мкм до полного испарения.

11.26. Определить скорость падения капли радиусом 10 мкм и расстояние, проходимое ею до полного испарения, если температура воздуха $10,0^\circ\text{C}$, относительная влажность 90% и среднее атмосферное давление в подоблачном слое 900 гПа. Принять, что вертикальные движения в подоблачном слое отсутствуют.

Надо ли учитывать при определении испарения облачных капель зависимость давления насыщенного пара над каплей от кривизны ее поверхности?

11.27. Определить расстояние, проходимое каплей при условии предыдущей задачи, если в подоблачном слое скорость вертикальных движений составляет $2,0$ см/с.

11.28.* Может ли достичь земной поверхности капля радиусом 50 мкм, выпавшая из облака, высота нижней границы которого 200 м, если в подоблачном слое средняя температура $6,0^\circ\text{C}$, относительная влажность 98% , давление 1000 гПа и вертикальные движения отсутствуют? Если скорость вертикальных движений составляет 2 см/с? Сравните полученные результаты. Как изменится расстояние, проходимое каплей до полного испарения, при наличии вертикальных движений в атмосфере? Варианты исходных данных см. табл. 25 (приложение 41).

11.29. При какой высоте нижней границы облака капля радиусом 100 мкм может достичь земной поверхности, если в под-

облачном слое средняя температура воздуха $6,0^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 80, 91 и 98 %, давление 1000 гПа, вертикальные движения отсутствуют? Как зависит расстояние, проходимое каплей, от влажности в подоблачном слое?

11.30. Определить время полного испарения падающих капель радиусом 500 и 1000 мкм, если в подоблачном слое средняя температура воздуха $12,0^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 50 % и атмосферное давление 900 гПа.

Что нужно учитывать при расчете времени и пути падения крупных дождевых капель в отличие от расчетов для мелких капель? При каких радиусах капель нельзя использовать для расчета скорости их падения формулу Стокса?

11.31. Какой должна быть высота нижней границы облака, чтобы капли радиусом 500 и 1000 мкм могли достичь поверхности Земли, если в подоблачном слое средняя температура $10,0^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 50 %, атмосферное давление 900 гПа и скорость вертикальных движений 3 см/с? Из облаков каких форм могут выпасть капли указанных радиусов?

11.32.* На высоте нижней границы кучево-дождевых облаков 1500 м радиус капель составляет 1,5 мм. Определить размер капель, выпавших на поверхность Земли, при условии, что в подоблачном слое средняя температура воздуха $12,0^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 65 % и атмосферное давление 900 гПа, если вертикальные движения отсутствуют, а также если скорость их составляет 10 см/с. Ветровой коэффициент принять равным 5. Варианты исходных данных см. табл. 26 (приложение 41).

11.33. Каким должен быть наименьший радиус капель у нижней границы слоисто-дождевого облака, расположенной на высоте 0,5 км, чтобы на поверхность Земли выпали капли осадков радиусом 0,5 мм, если в подоблачном слое средняя температура воздуха $0,0^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 85 % и давление 900 гПа? Ветровой коэффициент принять равным 4.

11.34. Определить наименьший радиус капель в облаке, которые смогут долететь до поверхности Земли от нижнего основания облака, расположенного на высоте 0,5 км, если в подоблачном слое средняя температура воздуха $12,0^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 85 %, атмосферное давление 900 гПа. Ветровой коэффициент принять равным 2, конечный размер капли 1 мкм. Полученный результат сопоставить с ответом к предыдущей задаче и обсудить.

11.35. Вычислить размеры капли и сферической ледяной частицы, которых они достигнут, пролетев от верхней границы облака до поверхности Земли, если при самолетном зондировании получено:

H м	0	100	200	300*	400	450	500	600	690*
p гПа	1024,2	1009,0	994,0	973,0	948,0	940,0	935,0	922,0	905,0
t $^{\circ}\text{C}$	-6,3	-7,0	-8,1	-8,8	-9,7	-10,1	-10,0	-10,1	-11,0
f %	80	79	77						

* Нижняя и верхняя границы облаков.

Радиус капли и ледяной частицы на верхней границе облака 40 мкм, средняя водность облака $0,10 \text{ г/м}^3$, скорость вертикальных движений 1 см/с . Изменение размера капли и ледяных частиц оценить с учетом конденсационно-коагуляционных процессов в облаках и испарения в подоблачном слое.

11.36. Сферическая ледяная частица, выпавшая из перистослоистых облаков, имеет начальный радиус 100 мкм. Вычислить, какого размера она достигнет, долетев до поверхности Земли, если при самолетном зондировании получено:

$H \text{ км}$	$p \text{ гПа}$	$t \text{ } ^\circ\text{C}$	$f \%$	$H \text{ км}$	$p \text{ гПа}$	$t \text{ } ^\circ\text{C}$	$f \%$
0,00	1017	-7,8	84	2,47	712	-18,6	95
0,13	1000	-9,0	94	2,87	700	-19,6	96
0,20	991	-9,7	99	2,99	689	-20,5	97
0,42	963	-5,0	100	3,00	688	-20,6	97
0,50	954	-5,0	100	3,33	658	-22,7	99
0,57	945	-5,7	100	3,60	634	-24,2	98
0,77	922	-6,7	100	3,87	611	-25,9	95
0,96	900	-7,1	97	4,00	600	-27,1	94
1,00	896	-7,4	97	4,14	528	-28,3	94
1,40	850	-9,6	91	4,43	565	-30,2	96
1,43	848	-9,7	91	4,52	558	-28,1	97
1,50	839	-10,1	92	4,87	531	-29,7	77
1,85	802	-12,3	96	5,00	521	-31,9	72
1,87	800	-12,5	96	5,15	511	-31,9	66
2,00	786	-13,7	95	5,20	500	-33,3	68
2,16	770	-15,1	94	5,59	480	-36,1	72
2,46	740	-16,7	95				

Средняя водность слоисто-кучевых облаков $0,15 \text{ г/м}^3$, высококучевых $0,11 \text{ г/м}^3$. Высота нижней и верхней границ для Sc 570 и 770 м, для As 2160 и 4140 м соответственно. Скорость восходящих движений на высотах 1400, 2870 и 5300 м составляет 0,7; 0,8 и $1,0 \text{ см/с}$.

Глава 12

ОСНОВЫ ДИНАМИКИ АТМОСФЕРЫ

12.1. Барическое поле и барический градиент

Пространственное барическое поле графически можно представить изобарическими поверхностями. Линии их пересечения с горизонтальной плоскостью называются изобарами. Количественной характеристикой барического поля является барический градиент — вектор, направленный перпендикулярно к изобарической

поверхности в сторону уменьшения давления и равный изменению давления на единицу расстояния. Барический градиент и его вертикальную составляющую обычно выражают в гПа/100 м с точностью до десятых. Вертикальную составляющую можно вычислить, например, по формуле (2.7). Горизонтальную составляющую барического градиента в практике выражают в гПа/111 км с той же точностью. Предлагаемые ниже упражнения следует выполнить, используя любую обработанную синоптическую карту.

Упражнения

1. Указать на синоптической карте характерные формы изобар и назвать соответствующие барические области.
2. Схематически изобразить в вертикальном разрезе положение изобарических поверхностей над областями повышенного и пониженного давления.
3. Представить вертикальный разрез изобарических поверхностей над расположенными рядом теплой и холодной областями земной поверхности.
4. Указать направление горизонтальной составляющей барического градиента в разных точках синоптической карты и качественно сопоставить между собою значения этой величины в выбранных точках.
5. Выполнить упражнение 4 для вертикальных составляющих барического градиента, построенных в упражнениях 2 и 3.

Задачи

12.1 Расстояние по нормали между двумя изобарами, проведенными через 5 гПа на синоптической карте масштаба 1:10 000 000, составляет 2 см. Вычислить горизонтальную составляющую барического градиента.

12.2. Вычислить и сравнить между собою вертикальную (G_z) и горизонтальную (G_x) составляющие барического градиента у поверхности Земли при нормальных условиях, если расстояние между соседними изобарами, проведенными через 5 гПа на синоптической карте масштаба 1:10 000 000, составляет 1 см. Для сравнения полученных результатов выразить каждый из них в гПа/100 м. Как ориентирован барический градиент в пространстве?

12.3. Найти угол, образуемый барическим градиентом с вертикалью в некотором слое атмосферы, если на нижнем основании этого слоя температура воздуха $6,0^\circ\text{C}$ и давление 1000 гПа, а на верхнем — температура $1,2^\circ\text{C}$ и давление 900,0 гПа, причем на нижнем уровне расстояние между соседними изобарами, проведенными через 5 гПа, составляет 200 км. Почему под действием вертикальной составляющей барического градиента атмосфера не «всплывает» от земной поверхности вверх, не «вытесняется» от Земли в космос?

12.2. Силы, действующие при горизонтальном движении воздуха

В метеорологии принято рассматриваемые силы относить к единице массы воздуха, поэтому в СИ их выражают в м/с^2 обычно с точностью до десятых.

Горизонтальная составляющая силы барического градиента определяется соотношением

$$\Gamma = 7 \cdot 10^{-4} \frac{\rho_0}{\rho} G_x, \quad (12.1)$$

где ρ_0 — плотность воздуха при нормальных условиях (см. приложение 1), ρ — плотность воздуха при данных условиях, G_x — горизонтальная составляющая барического градиента (гПа/111 км). Ниже будем эту силу для краткости называть «градиентной силой».

Горизонтальная составляющая силы Кориолиса вычисляется по формуле

$$A = 2\omega u \sin \varphi, \quad (12.2)$$

где ω — угловая скорость вращения Земли (см. приложение 1), u — горизонтальная составляющая скорости движения воздуха, т. е. скорость ветра (м/с), φ — широта места. Эту силу будем ниже называть просто отклоняющей.

Горизонтальная составляющая центробежной силы находится из выражения

$$Z = u^2/R, \quad (12.3)$$

где R — радиус кривизны траектории движения воздуха. Эту силу будем ниже называть просто «центробежной».

Горизонтальная составляющая силы трения условно может быть представлена как результирующая сил «внешнего трения» (между движущимся воздухом и земной поверхностью) и «внутреннего трения», связанного с молекулярной вязкостью воздуха и с турбулентным перемешиванием. Первая из этих трех сил может быть представлена в виде

$$T_a = bu, \quad (12.4)$$

где b — коэффициент «внешнего трения». Эта сила направлена противоположно скорости движения. Трение, связанное с молекулярной вязкостью воздуха, заметно лишь в очень тонком «вязком подслое» непосредственно возле земной поверхности. В задачах, связанных с движением воздуха в пограничном слое и выше этого слоя, им можно пренебречь. Большое значение имеет внутреннее трение, связанное с турбулентным перемешиванием атмосферы. Однако сила этого трения, пропорциональная вертикальному градиенту скорости ветра, тоже довольно быстро уменьшается с высотой и выше пограничного слоя становится пренебрежимо малой. Влияние турбулентного трения в пограничном слое про-

является, в частности, в том, что горизонтальная составляющая результирующей силы трения оказывается направленной не прямо противоположно скорости движения, а отклоняется от этого направления на угол, иногда достигающий $30\text{--}40^\circ$.

Задачи

12.4. Найти градиентную силу при нормальных условиях, если горизонтальная составляющая барического градиента равна $3,0 \text{ гПа/111 км}$. Результат сравнить с силой тяжести, действующей на такую же массу воздуха. Почему сила тяжести не создает заметных вертикальных перемещений воздуха, тогда как значительно меньшая градиентная сила способна вызывать иногда очень сильный ветер?

12.5. Вычислить и сравнить градиентную силу у земной поверхности при нормальных условиях (Γ_1) и на высоте, где плотность воздуха составляет $1,000 \text{ кг/м}^3$ (Γ_2), если горизонтальная составляющая барического градиента в обоих случаях равна $4,0 \text{ гПа/111 км}$. Почему одинаковый барический градиент при меньшей плотности воздуха обуславливает большую градиентную силу, чем при большей плотности?

12.6. На протяжении 500 км вдоль некоторой прямой линии на земной поверхности горизонтальная составляющая барического градиента всюду составляет $3,0 \text{ гПа/111 км}$. Найти скорость, которую приобрел бы воздух, если бы он двигался вдоль этой прямой под действием только градиентной силы. Начальную скорость движения воздуха считать равной нулю, а его плотность — близкой к нормальной. Почему, несмотря на правдоподобность заданного значения градиента, найденная скорость ветра у земной поверхности встречается лишь в редких случаях?

12.7. Доказать, что вертикальная составляющая градиентной силы всегда точно уравнивается силой тяжести.

12.8. Найти силу Кориолиса на широте 60° , если скорость ветра равна 5 м/с ; сравнить с градиентной силой, найденной в задаче 12.4. Возможны ли случаи, когда сила Кориолиса уравнивается градиентную? Если все остальные условия одинаковы, то когда такое равновесие вероятнее — при большой или незначительной горизонтальной составляющей барического градиента? При большой или малой скорости ветра? В высоких или низких широтах?

12.9. При какой скорости ветра на широте 30° отклоняющая сила будет такой же, как и на 60° при скорости ветра 5 м/с ?

12.10. Найти центробежную силу, действующую на воздух, движущийся по окружности радиусом 500 км со скоростью 5 м/с . Ответ сравнить с градиентной силой, найденной в задаче 12.4. Может ли центробежная сила в обычных условиях уравнивать градиентную силу?

12.11. Сравнить между собою центробежную силу и силу Кориолиса, действующие на широте 60° на воздух, движущийся по круговой траектории радиусом 200 км со скоростью 6 м/с . Как

и почему изменится ответ, если при прочих неизменных условиях увеличится (уменьшится) радиус траектории? То же при увеличении (уменьшении) широты места и скорости ветра? При каких условиях вероятнее равновесие между рассмотренными силами?

12.12. В некотором пункте сила Кориолиса увеличилась в 2 раза. Во сколько раз должна увеличиться здесь же центробежная сила, чтобы воздух продолжал двигаться по прежним траекториям?

12.13. Вычислить силу «внешнего» трения при скорости ветра 5 м/с, если коэффициент внешнего трения составляет $6,0 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Результат сравнить с ответами к задачам 12.4, 12.8 и 12.10. Сделать вывод об относительной роли сил, действующих при горизонтальном движении воздуха.

12.3. Градиентный ветер

Скорость геострофического ветра вычисляется по формуле

$$u_r = \frac{4,8}{\sin \varphi} \frac{\rho_0}{\rho} G_x, \quad (12.5)$$

скорость циклострофического ветра в круговом циклоне — по формуле

$$u_{цк} = -\omega R \sin \varphi + \sqrt{\omega^2 R^2 \sin^2 \varphi + \Gamma R} \quad (12.6)$$

и в круговом антициклоне — по формуле

$$u_{ца} = \omega R \sin \varphi - \sqrt{\omega^2 R^2 \sin^2 \varphi - \Gamma R}. \quad (12.7)$$

Задачи

12.14. Изобразить схематически действующие силы и направление движения воздуха при геострофическом ветре в северном полушарии. На каких высотах в атмосфере наблюдается геострофический ветер? В чем заключается барический закон ветра?

12.15. Выполнить задание предыдущей задачи для южного полушария.

12.16. Вычислить скорость геострофического ветра на широтах 90, 60 и 30° и на высоте, где плотность воздуха составляет 1,000 кг/м³, если горизонтальная составляющая барического градиента во всех случаях равна 2,0 гПа/111 км. Почему одинаковый барический градиент вызывает в низких широтах более сильный геострофический ветер, чем в высоких? Может ли ветер быть геострофическим на экваторе?

12.17. На широтах 60 и 20° и на высотах, где плотность воздуха одинакова, скорость геострофического ветра также оказалась одинаковой. Найти соотношение между горизонтальными составляющими барического градиента в этих двух случаях.

12.18. На широте 30° и высоте, где плотность воздуха равна 0,800 кг/м³ скорость геострофического ветра составляет 40 м/с. Найти горизонтальную составляющую барического градиента,

градиентную силу и силу Кориолиса. Две последние сравнить между собой и объяснить результат.

12.19. Изобразить схематически действующие силы и направление движения воздуха в круговом циклоне в северном полушарии при отсутствии силы трения. Каков общий характер движения воздуха в данном случае? Сохраняет ли силу барический закон ветра?

12.20. Выполнить задание предыдущей задачи для южного полушария.

12.21. Вычислить скорость циклострофического ветра в циклоне на широте 60° и на высоте, где плотность воздуха равна $0,800 \text{ кг/м}^3$, если радиус кривизны траектории движения воздуха равен 200 км , а горизонтальная составляющая барического градиента $0,62 \text{ гПа/111 км}$. Результат сравнить со скоростью геострофического ветра при тех же условиях. Почему при всех одинаковых условиях скорость геострофического ветра в циклоне меньше, чем при прямолинейных изобарах?

12.22. Изобразить схематически действующие силы и направление движения воздуха в круговом антициклоне в северном полушарии при отсутствии силы трения. Каков общий характер движения воздуха в данном случае? Сохраняет ли силу барический закон ветра?

12.23. Выполнить задание предыдущей задачи для южного полушария.

12.24. Вычислить скорость циклострофического ветра в антициклоне на широте 60° и на высоте, где плотность воздуха равна $0,800 \text{ кг/м}^3$, если радиус кривизны траектории движения воздуха равен 200 км , а горизонтальная составляющая барического градиента $0,62 \text{ гПа/111 км}$. Результат сравнить со значениями скорости геострофического и циклострофического ветра в циклоне при тех же условиях (см. ответ к задаче 12.21). Почему при всех одинаковых условиях скорость градиентного ветра в антициклоне больше, чем при прямолинейных изобарах или в циклоне? Может ли круговой антициклон с циклострофическим ветром существовать на экваторе?

12.25. Найти максимально возможную скорость циклострофического ветра в антициклоне на широте 60° , если радиус кривизны изобары составляет 400 км .

12.26. Найти значение горизонтальной составляющей барического градиента, обеспечивающее максимум скорости циклострофического ветра в антициклоне на широте 30° и на высоте, где плотность воздуха равна $1,000 \text{ кг/м}^3$, а радиус кривизны изобары — 300 км .

12.4. Движение воздуха при наличии трения

Наличие трения в пограничном слое атмосферы (слое трения) вызывает уменьшение скорости ветра по сравнению с градиентным и отклоняет ветер от изобар; при этом направление ветра

приближается к направлению градиентной силы. Угол α между направлением ветра и градиентной силой определяется из соотношения

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2\omega \sin \varphi}{K}, \quad (12.8)$$

где K — коэффициент внешнего трения.

С учетом трения скорость ветра при прямолинейных изобарах выражается формулой

$$u = \frac{\Gamma}{\sqrt{(2\omega \sin \varphi)^2 + K^2}}. \quad (12.9)$$

Задачи

12.27. Изобразить схематически действующие силы и направление движения воздуха в северном полушарии при прямолинейных изобарах с учетом силы трения. Как формулируется барический закон ветра для слоя трения?

12.28. Выполнить задание предыдущей задачи для южного полушария.

12.29. Найти угол между направлением ветра и градиентной силой при прямолинейных изобарах на широте 30° , если коэффициент внешнего трения равен $6,0 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Как зависит этот угол от характера местности? Где он больше — над пересеченной местностью на суше или над спокойной морской поверхностью? Как он изменяется с высотой в слое трения? Каков в данном случае угол отклонения ветра от изобар?

12.30. На синоптической карте на широте 60° измерен угол отклонения ветра от изобар, оказавшийся равным 30° . Найти коэффициент внешнего трения в данной местности.

12.31. Вычислить скорость ветра вблизи земной поверхности на широте 30° , если при прямолинейных изобарах горизонтальная составляющая барического градиента равна $1,0 \text{ гПа/111 км}$, а коэффициент внешнего трения в данной местности составляет $1,0 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Результат сравнить со скоростью геострофического ветра при тех же условиях. Плотность воздуха у земной поверхности считать близкой к нормальной. Как влияет сила трения на скорость ветра вблизи земной поверхности?

12.32. Изобразить схематически действующие силы и направление движения воздуха в циклоне северного полушария с учетом силы трения. Каков общий характер движения воздуха в данном случае? Сохраняет ли силу барический закон ветра? Как выглядит при этом поле линий тока?

12.33. Выполнить задание предыдущей задачи для южного полушария. Какая сила вызывает «втекание» воздуха в область низкого давления в нижних слоях атмосферы? Каково направление вертикальных движений воздуха в такой области?

12.34. Изобразить схематически действующие силы и направление движения воздуха в антициклоне северного полушария

с учетом силы трения. Каков общий характер движения воздуха в данном случае? Сохраняет ли силу барический закон ветра? Как выглядит при этом поле линий тока?

12.35. Выполнить задание предыдущей задачи для южного полушария. Какая сила вызывает «вытекание» воздуха из области высокого давления в нижних слоях атмосферы? Каково направление вертикальных движений воздуха в такой области?

Глава 13

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

В оптический диапазон электромагнитных волн включают: УФ излучение (от 1 до 380—400 нм), видимое излучение (от 380—400 до 760—780 нм) и ИК излучение (от 760—780 нм до 1 мм).

13.1. Оптические характеристики атмосферы

Ослабление потока монохроматического излучения I_λ , прошедшего через всю атмосферу, описывается законом Буге

$$I_\lambda = I_{0\lambda} e^{-\tau_\lambda^m}, \quad (13.1)$$

где $I_{0\lambda}$ — поток монохроматического излучения на верхней границе атмосферы, m — оптическая масса атмосферы, τ_λ — *оптическая толщина* (или оптическая плотность) атмосферы (безразмерная величина):

$$\tau_\lambda = \int_0^\infty \alpha_\lambda(h) dh. \quad (13.2)$$

Здесь α_λ — линейный (объемный) коэффициент ослабления (м^{-1} или км^{-1}). Коэффициент α_λ является суммой нескольких слагаемых:

$$\alpha_\lambda = \sigma_{\lambda\text{м}} + \sigma_{\lambda\text{а}} + \alpha_{\lambda\text{оз}} + \alpha_{\lambda\text{в.п}}, \quad (13.3)$$

где $\sigma_{\lambda\text{м}}$ и $\sigma_{\lambda\text{а}}$ — объемные коэффициенты соответственно молекулярного и аэрозольного рассеяния; $\alpha_{\lambda\text{оз}}$ и $\alpha_{\lambda\text{в.п}}$ — объемные коэффициенты, характеризующие поглощение озоном и водяным паром.

Оптическая толщина атмосферы также является суммой нескольких слагаемых:

$$\tau_{\lambda} = \tau_{\lambda m} + \tau_{\lambda a} + \tau_{\lambda oz} + \tau_{\lambda в. п.}, \quad (13.4)$$

где $\tau_{\lambda m}$ — оптическая толщина молекулярной атмосферы, $\tau_{\lambda a}$ — оптическая толщина аэрозольной атмосферы, $\tau_{\lambda oz}$ — оптическая толщина озонной атмосферы, $\tau_{\lambda в. п.}$ — оптическая толщина атмосферы водяного пара.

Коэффициент прозрачности определяется как произведение:

$$P_{\lambda} = P_{\lambda m} P_{\lambda a} P_{\lambda oz} P_{\lambda в. п.}, \quad (13.5)$$

где $P_{\lambda m}$, $P_{\lambda a}$, $P_{\lambda oz}$ и $P_{\lambda в. п.}$ — коэффициенты прозрачности соответственно молекулярной, аэрозольной, озонной атмосферы и атмосферы водяного пара.

Величина τ_{λ} связана с коэффициентом прозрачности атмосферы P_{λ} соотношением

$$P_{\lambda} = e^{-\tau_{\lambda}}. \quad (13.6)$$

Для монохроматических солнечных потоков приняты обозначения S_{λ} и $S_{0\lambda}$.

Спектральный коэффициент направленного пропускания атмосферы определяется из соотношения

$$q_{\lambda} = I_{\lambda}/I_{0\lambda} = P_{\lambda}^m. \quad (13.7)$$

Энергетические потери (%) направленного потока, прошедшего m масс атмосферы, составляют

$$(1 - q_{\lambda}) \cdot 100 = (1 - P_{\lambda}^m) \cdot 100; \quad (13.8)$$

P_{λ} и q_{λ} — безразмерные величины, причем $0 \leq P_{\lambda} \leq 1$; $0 \leq q_{\lambda} \leq 1$.

Для горизонтального потока излучения, прошедшего слой длиной l , ввиду того, что плотность воздуха вдоль направления распространения остается постоянной, $\rho(l) = \rho = \text{const}$, формулы (13.1) — (13.3) примут следующий вид:

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} e^{-\tau_{\lambda}} = I_{0\lambda} P_{\lambda}^l, \quad (13.9)$$

$$\tau_{\lambda} = \alpha_{\lambda} l, \quad (13.10)$$

$$P_{\lambda} = e^{-\alpha_{\lambda}} = 10^{-a_{\lambda}}. \quad (13.11)$$

Коэффициенты прозрачности, обусловленные молекулярным и аэрозольным рассеянием, описываются соответственно формулами

$$P_{\lambda m} = e^{-\sigma_{\lambda m}}, \quad (13.12)$$

$$P_{\lambda a} = e^{-\sigma_{\lambda a}}. \quad (13.13)$$

Спектральный коэффициент направленного пропускания и энергетические потери (%) потока, прошедшего слой длиной l , составляют:

$$q_\lambda = I_\lambda / I_{0\lambda} = e^{-\tau_\lambda} = P_\lambda^l, \quad (13.14)$$

$$(1 - p_\lambda^l) 100. \quad (13.15)$$

Формулы (13.5) и (13.6) справедливы и для горизонтальных потоков радиации. Коэффициенты прозрачности рассчитываются для единицы пути (обычно для 1 км) горизонтального луча в соответствии с единицами измерения $\sigma_{\lambda m}$ и $\sigma_{\lambda a}$.

Ослабление интегрального потока прямой солнечной радиации S , дошедшего до поверхности Земли, оценивается по формуле (5.8).

Общее ослабление солнечной радиации $\Delta S_{\text{общ}}$ при прохождении ею m оптических масс атмосферы в основном обуславливается молекулярным рассеянием ΔS_m , аэрозольным ослаблением (главным образом, рассеянием) ΔS_a и поглощением водяным паром $\Delta S_{\text{в.п.}}$:

$$\Delta S_{\text{общ}} = \Delta S_m + \Delta S_a + \Delta S_{\text{в.п.}}, \quad (13.16)$$

$$\Delta S_{\text{общ}} = S_0 - S_n, \quad (13.17)$$

где S_n — прямая радиация, наблюдаемая у поверхности Земли. Величина ΔS_m рассчитывается теоретически, в частности, при $m = 2$ она равна $0,25 \text{ кВт/м}^2$; $\Delta S_{\text{в.п.}}$ обычно определяется по эмпирическим формулам. С. В. Зверевой получены следующие формулы для вычисления $\Delta S_{\text{в.п.}}$ (кВт/м^2):

$$\Delta S_{\text{в.п.}} = 0,166 (m\omega_\infty)^{0,43} \text{ при } m\omega_\infty = 0,005 \dots 1 \text{ см,}$$

$$\Delta S_{\text{в.п.}} = 0,141 (m\omega_\infty)^{0,36} \text{ при } m\omega_\infty = 0,1 \dots 0,4 \text{ см,}$$

$$\Delta S_{\text{в.п.}} = 0,129 (m\omega_\infty)^{0,27} \text{ при } m\omega_\infty = 0,4 \dots 10 \text{ см,} \quad (13.18)$$

где ω_∞ — содержание водяного пара в столбе атмосферы единичного сечения в сантиметрах слоя осаждаемой воды.

На основании формул (13.18) построен график зависимости $\Delta S_{\text{в.п.}}$ от $m\omega_\infty$, упрощающей приведение расчетов (приложение 36).

Аэрозольное ослабление находится из (13.16) как остаточный член:

$$\Delta S_a = \Delta S_{\text{общ}} - \Delta S_m - \Delta S_{\text{в.п.}} \quad (13.19)$$

Закон Буге применительно к ослаблению солнечных световых потоков в атмосфере записывается аналогично (5.8):

$$E_\perp = E_0 P^m, \text{ или } E_\perp = E_0 P_i^{Tm}, \quad (13.20)$$

$$E_{\text{гор}} = E_0 P^m \sin h_\odot, \text{ или } E_{\text{гор}} = E_0 P_i^{Tm} \sin h_\odot, \quad (13.21)$$

Здесь $E_\perp$ и $E_{\text{гор}}$ — освещенности, создаваемые прямой солнечной радиацией у поверхности Земли соответственно на площадке,

перпендикулярной солнечным лучам, и на горизонтальной площадке; E_0 — световая солнечная постоянная (135 000 лк), P — интегральный световой коэффициент прозрачности, T — фактор мутности, $h_\odot$ — высота Солнца, P_i — интегральный коэффициент прозрачности идеальной атмосферы. Приведем значения P , рассчитанные при различных оптических массах атмосферы:

m	1	2	3	4	5	6	8	10
P_i	0,907	0,921	0,928	0,934	0,939	0,943	0,949	0,954

По исследованиям Е. А. Поляковой и О. Д. Бартеневой, коэффициент прозрачности для интегрального солнечного потока P_a (актинометрический), связан с коэффициентом прозрачности для световых потоков P_c уравнением регрессии

$$P_c = 1,09P_a - 0,11. \quad (13.22)$$

Коэффициент направленного пропускания равен

$$q_\lambda = \frac{E_\perp}{E_0} = \frac{E_{\text{гор}}}{E_0 \sin h_\odot} = P^m. \quad (13.23)$$

Поскольку $P = P_i^T$, то

$$T = \lg P / \lg P_i, \quad (13.24)$$

причем

$$T = 1 + W + R, \quad (13.25)$$

где W — влажная мутность, R — остаточная мутность

$$R = \sigma_a / \sigma_m. \quad (13.26)$$

Если $R > 1$, то $\sigma_a > \sigma_m$, т. е. преобладает аэрозольное ослабление. Если $R < 1$, то $\sigma_a < \sigma_m$, т. е. преобладает молекулярное ослабление.

Сведения о естественной освещенности в каком-либо пункте, где измерения освещенности не производились, можно получить путем пересчета результатов актинометрических измерений в этом пункте с помощью светового эквивалента радиации.

Световым эквивалентом радиации K называется отношение освещенности к одновременно измеренной энергетической освещенности. Численные значения K , по данным ГГО, приводятся в приложении 31.

Задачи

13.1. Вычислить освещенность горизонтальной поверхности Земли и коэффициент пропускания атмосферы при высоте Солнца $19,3^\circ$, если коэффициент прозрачности атмосферы равен 0,71. Использовать приложение 6.

13.2. Используя данные предыдущей задачи, вычислить фактор мутности и остаточную мутность, а также определить, какое

ослабление — молекулярное или аэрозольное — будет преобладать, если влажная мутность в пункте наблюдения составила 0,9.

13.3. В безоблачный день прямая солнечная радиация, измеренная при массах атмосферы 2, 3, 4 и 5, равнялась соответственно 0,82; 0,68; 0,59 и 0,54 кВт/м². Вычислить при заданных массах атмосферы: а) освещенность площадки на Земле, перпендикулярной солнечным лучам, используя световой эквивалент солнечной радиации K (приложение 31); б) освещенность горизонтальной поверхности Земли; в) коэффициенты прозрачности для светового потока; г) коэффициенты пропускания; какую часть (%) светового солнечного потока задерживают в отдельности: только первая, только вторая, только третья, только четвертая, только пятая масса атмосферы? Использовать приложение 6.

Ответить на вопросы: 1) Почему каждая последующая масса атмосферы ослабляет (задерживает) меньшую долю светового потока по сравнению с предыдущей и коэффициент прозрачности увеличивается с увеличением числа пройденных масс? 2) Соответствуют ли эти изменения коэффициента прозрачности фактическим изменениям мутности атмосферы? 3) Наблюдалось ли бы это явление, если бы измерения были выполнены с монохроматическими потоками солнечной радиации?

13.4. Приведенные к массе атмосферы 2 средние годовые значения прямой солнечной радиации в Ташкенте, в Ленинградской области (Павловск) и на дрейфующих арктических станциях (СП-4, СП-5, СП-6 и СП-7) были равны: 0,84, 0,87 и 0,80 кВт/м²; среднее годовое содержание водяного пара в единичном столбе атмосферы над этими пунктами по данным радиозондирования составляло 1,85, 1,45 и 1,10 см. Принимая во внимание, что солнечная постоянная равна 1,38 кВт/м² и ослабление солнечной радиации за счет молекулярного рассеяния (при $m = 2$) составляет 0,25 кВт/м², вычислить в кВт/м² и в процентах от общего ослабления: общее ослабление солнечной радиации, ослабление за счет молекулярного рассеяния и за счет поглощения паром, а также аэрозольное ослабление на этих станциях. Почему в Ташкенте ослабление паром больше, чем в Павловске и на дрейфующих станциях? Почему на дрейфующих станциях аэрозольное ослабление играет такую большую роль? Что представляет собою аэрозоль на дрейфующих станциях?

13.5. Решить задачу 13.4 для станций Антарктики, на которых средние годовые значения прямой солнечной радиации, приведенные к массе 2, и содержание водяного пара по измерениям в период 1956—1958 гг. равнялись: на ст. Мирный 0,93 кВт/м² и 0,35 см, на ст. Оазис 1,03 кВт/м² и 0,20 см и на ст. Пионерская 0,91 кВт/м² и 0,06 см. Ст. Пионерская расположена на склоне антарктического плато на высоте 2700 м над уровнем моря и характеризуется сильными стоковыми ветрами, поднимающими в воздух большое количество снежной пыли. Почему на ст. Пионерской мало поглощение паром и велико ослабление аэрозолями? Что представляет собою аэрозоль на ст. Пионерской? Сравнить

полученные результаты с ответами к предыдущей задаче и объяснить их различие.

13.6. После извержения вулкана Агунг на о. Бали (Индонезия) в марте 1963 г. на всех антарктических станциях в конце марта и в апреле (когда в Антарктику проникли с воздушными течениями облака вулканической пыли и пепла) резко уменьшились потоки прямой солнечной радиации. Абсолютные минимумы коэффициентов прозрачности при $m=2$ составили 0,615 на ст. Восток, 0,703 на ст. Мирный и 0,700 на ст. Новолазаревская (в антарктическом оазисе). Вычислить в кВт/м² и процентах от общего ослабления аэрозольное ослабление, обусловленное вулканическими пеплом и пылью, на этих станциях, если содержание водяного пара составляло 0,034 см на ст. Восток; 0,125 см на ст. Мирный и 0,297 на ст. Новолазаревская. Сравнить полученные ответы с аэрозольным ослаблением на этих станциях до извержения вулкана (см. ответ к задаче 13.5).

13.7. Средние месячные потоки прямой солнечной радиации, приведенные к $m=2$ и нормальному давлению, составили: в Павловске (в августе) 0,82 кВт/м², на ст. Мирный (в январе) 0,92 кВт/м², на ст. Оазис (в феврале) 1,01 кВт/м², на ст. Пионерская (в ноябре) 0,91 кВт/м². Вычислить коэффициенты прозрачности для интегрального солнечного потока P_a ; коэффициенты прозрачности для световых солнечных потоков P_c . На сколько процентов различаются P_a и P_c , если за 100 % принять значения P_c ? Почему во всех пунктах, т. е. при разных состояниях замутнения атмосферы, оказалось, что $P_c < P_a$? Объясните причину этого.

13.2. Основные фотометрические (световые) величины и единицы их измерения

Силой света I источника называется поток излучения, испускаемый источником в единицу времени в единицу телесного угла и оцениваемый по зрительному восприятию. Единицей силы света является *кандела* (кд).

Световым потоком Φ или $d\Phi$ называется световая энергия, посылаемая источником света в некоторый телесный угол $d\omega$ в единицу времени и численно равная произведению силы света источника на этот телесный угол (рис. 13.1):

$$d\Phi = I d\omega. \quad (13.27)$$

Единицей светового потока является *люмен* (лм).

Полный световой поток Φ , испускаемый изотропным источником силой света I во все направления, равен

$$\Phi = 4\pi I, \quad (13.28)$$

поскольку полный телесный угол $\omega = 4\pi$ ср.

Световой поток можно выразить через поток излучения $f(\lambda)$ с помощью функции видности $V(\lambda)$ (рис. 13.2):

$$\Phi = K \int_{0,38}^{0,78} f(\lambda) V(\lambda) d\lambda, \quad (13.29)$$

где K — световая эффективность потока излучения, равная 621 лм/Вт для $\lambda = 0,556$ мкм. На эту длину волны (желто-зеленые лучи) приходится наибольшая чувствительность глаза человека. Коэффициент видности $V(\lambda)$ для этих лучей принят равным единице.

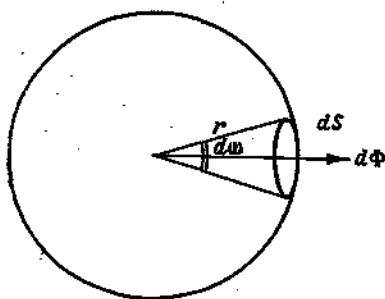


Рис. 13.1. К определению светового потока.

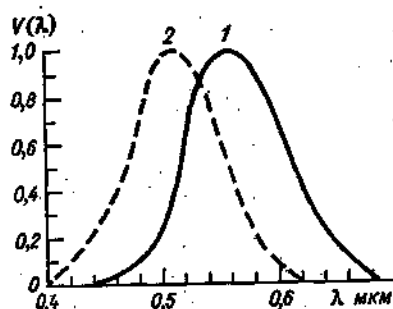


Рис. 13.2. Кривая видности.
1 — дневное зрение; 2 — сумеречное зрение.

Световой поток есть сумма монохроматических потоков излучения, умноженных на соответствующие им коэффициенты видности.

Яркостью B_θ светящегося элемента в некотором направлении θ (рис. 13.3) называется сила света, испускаемая в этом направлении с единицы видимой поверхности:

$$B_\theta = \frac{d\Phi}{dS \cos \theta d\omega}, \quad (13.30)$$

где $dS \cos \theta$ — видимая поверхность светящегося элемента. Выразив $d\Phi/d\omega$ через I , получим

$$B_\theta = \frac{I}{dS \cos \theta}. \quad (13.31)$$

Единицей яркости служит кандела на квадратный метр (кд/м²).

Светимостью R называется полный световой поток $d\Phi$, испускаемый светящимся элементом dS во все направления с единицы поверхности (рис. 13.4):

$$R = d\Phi/dS. \quad (13.32)$$

Единицей светимости является люмен на квадратный метр ($\text{лм}/\text{м}^2$).

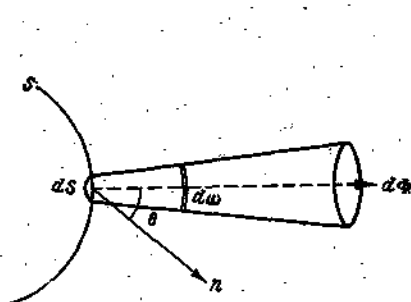


Рис. 13.3. К определению яркости.

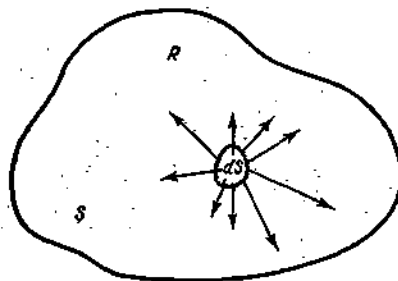


Рис. 13.4. К определению светимости.

Освещенностью E поверхности называется полный световой поток $d\Phi$, падающий на единицу площади dS (рис. 13.5):

$$E = d\Phi/dS. \quad (13.33)$$

Единицей освещенности является люкс (лк), $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм}/\text{м}^2$.

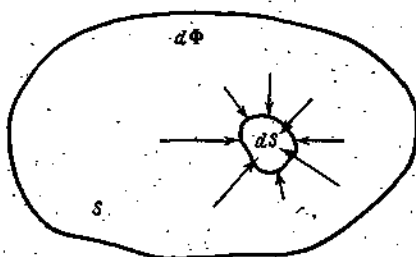


Рис. 13.5. К определению освещенности.

Для источников, свет которых падает на поверхность под углом θ ,

$$E = I \cos \theta / r^2. \quad (13.34)$$

Освещенность площадки $dE_{\perp}$, если свет на нее падает перпендикулярно, связана с яркостью малого элемента поверхности B , создающего эту освещенность и видимого из точки измерения освещенности под малым телесным углом $d\omega$, соотношением

$$dE_{\perp} = B d\omega. \quad (13.35)$$

Для малых телесных углов $d\omega$ можно записать $dS \cos \theta = \pi r_2^2$ (рис. 13.6); тогда

$$d\omega = \pi r_2^2 / r_1^2 = \pi \operatorname{tg}^2 \alpha \approx \pi \alpha^2, \quad (13.36)$$

где α — малый плоский угол (в радианах), под которым из точки A , где измеряется освещенность, виден радиус малого светящегося элемента.

Существуют поверхности, яркость которых одинакова во всех направлениях $B_0 = B = \text{const}$. В первом приближении такими

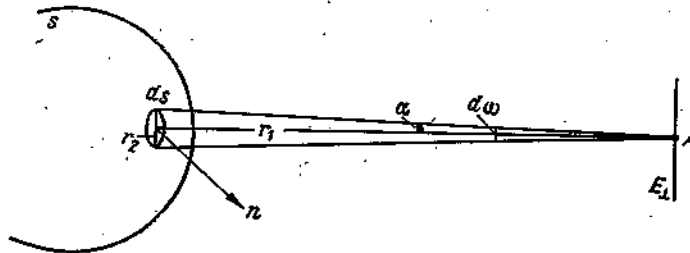


Рис. 13.6. Соотношение между яркостью и освещенностью.

поверхностями являются: а) искусственные матовые поверхности; б) дневное и ночное небо, равномерно покрытое слоистообразными облаками, при наличии снежного покрова (ночное небо в отсутствие Луны и полярных сияний); в) естественные ландшафты, освещенные рассеянным светом при наличии слоистых форм облаков и снежного покрова; г) лунная поверхность, д) такие самосветящиеся тела, как Солнце, раскаленные твердые тела с шероховатой поверхностью. У всех этих тел излучаемый поток пропорционален косинусу угла падения (косинусные излучатели), и яркость их одинакова во всех направлениях. Для них выполняется соотношение

$$R = \pi B. \quad (13.37)$$

Задачи

13.7. Вычислить яркость и светимость поля, покрытого свежесвыпавшим снегом, если альбедо снега 0,85, а небо равномерно покрыто слоистообразными облаками, создающими освещенность 80 000 лк. Какой световой поток падает на площадь снежного поля размером 1 га?

13.8. На пшеничное поле площадью 5 га падает световой поток 10^8 лм. Альбедо поля 0,18. Вычислить освещенность, яркость и светимость этого поля в пасмурный день.

13.9. Доказать, что светимость R поверхностей, яркость которых во всех направлениях одинакова ($B = B_0 = \text{const}$), связана с яркостью B соотношением: $R = \pi B$.

13.10. Доказать, что яркость лунного диска в данном направлении B_0 равна освещенности на Земле, создаваемой Луной на

площадке, перпендикулярной лунным лучам, деленной на телесный угол $d\omega$, под которым из места измерения освещенности виден лунный диск.

13.11. Световая солнечная постоянная, т. е. освещенность, создаваемая Солнцем на Земле на площадке, перпендикулярной солнечным лучам, при отсутствии атмосферы, равна 135 000 лк. Вычислить яркость солнечного диска, если его угловой радиус равен $16'$.

13.12. Воспользовавшись необходимыми данными из предыдущей задачи и считая Солнце протяженным источником, вычислить светимость солнечной поверхности и полный световой поток, испускаемый Солнцем. Использовать приложение 21.

13.13. Вычислить световые солнечные постоянные для всех планет Солнечной системы, используя световую солнечную постоянную для Земли 135 000 лк и радиусы орбит планет, приведенные в приложении 21. Сравнить результаты со средней освещенностью горизонтальной поверхности Земли в Павловске (приложение 24). Какой приблизительно высоте Солнца или какому времени суток на Земле соответствуют полученные для каждой планеты максимальные значения освещенности?

13.14. Определить световые солнечные постоянные для Луны в моменты ее нахождения на самом большом и на самом малом расстояниях от Солнца, если эти расстояния составляют соответственно $149,9 \cdot 10^6$ и $149,1 \cdot 10^6$ км. На сколько процентов отличаются полученные значения?

13.15. Вычислить полный световой поток, испускаемый всей поверхностью Солнца, используя значение световой солнечной постоянной для Земли и необходимые данные из приложения 21.

13.16. Определить силу света Солнца, если его считать точечным источником света. Необходимые данные взять из предыдущей задачи.

13.17. Поток излучения Солнца, если считать его абсолютно черным телом с температурой 6000 К, равен $4,5 \cdot 10^{26}$ Вт. Вычислить массу, теряемую Солнцем каждую секунду за счет излучения такого потока. Использовать формулу (19.25).

13.18. Если Солнце, масса которого составляет $1,985 \cdot 10^{30}$ кг, будет продолжать излучать энергию и соответственно терять массу с неизменной интенсивностью $5 \cdot 10^6$ т/с, то за какое время масса Солнца уменьшится вдвое?

13.19. Какую долю от общего потока излучения Солнца получает Земля, если расстояние между центрами Солнца и Земли равно $1,5 \cdot 10^8$ км? Сколько солнечной массы попадает на освещенную половину земного шара каждую секунду? (См. ответ к задаче 13.17.)

13.20. Решить задачу 13.17 для Земли, если поток ее излучения равен $2 \cdot 10^{17}$ Вт. Изменяется ли со временем масса Земли, если учесть массу, теряемую ею за счет потока излучения, и массу, получаемую от Солнца? (См. ответ к задаче 13.19.)

13.21. Вычислить яркость и светимость лунного диска, а также полный световой поток отраженного света, посылаемый полной Луной, если световая лунная постоянная равна 0,35 лк. Использовать приложение 21.

13.3. Молекулярное рассеяние

Монохроматический лучистый поток j_λ , рассеянный под углом θ малой сферической частицей объемом v , согласно теории Релея, определяется по формуле

$$j_\lambda = \frac{9\pi^2 v^2 I_\lambda}{\lambda^4 r^2} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \left(\frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \right). \quad (13.38)$$

Здесь I_λ — падающий на частицу лучистый поток; r — расстояние до рассеивающей частицы; m — комплексный показатель преломления частицы: $m = n - ix$, где n — показатель преломления, i — показатель поглощения.

Объемный коэффициент молекулярного рассеяния воздуха, для которого можно принять $m = n$, по теории Релея—Кабанна равен

$$\sigma_m(\lambda, z) = \frac{32\pi^3 (n-1)^2}{3N(z) \lambda^4} \left(\frac{6+6d}{6-7d} \right), \quad (13.39)$$

где $N(z)$ — число молекул воздуха в единице объема на высоте z ; $(n-1)$ — оптический индекс рефракции; d — фактор деполяризации (или средний коэффициент оптической анизотропии) молекул воздуха, равный 0,035. Поэтому множитель $(6+6d)/(6-7d)$ в (13.39) равен 1,061.

Оптическая толщина (плотность) молекулярной однородной атмосферы высотой H описывается выражением

$$\tau_m = \frac{32\pi^3 (n-1)^2 1,061 H}{3N\lambda^4} \frac{P}{P_0} = \sigma_m \frac{P}{P_0} H, \quad (13.40)$$

где P и P_0 — давление воздуха у поверхности Земли и нормальное давление соответственно ($P_0 = 1013,2$ гПа).

Выражение для нормированной индикатрисы молекулярного рассеяния имеет вид

$$k_m(\theta) = \frac{3}{16\pi} (1 + \cos^2 \theta). \quad (13.41)$$

Объемный коэффициент молекулярного рассеяния $\sigma_m(\lambda, z)$ может быть представлен в виде

$$\sigma_m(\lambda, z) = \sigma_m^0(\lambda) N(z), \quad (13.42)$$

а в случае обратного молекулярного рассеяния — в виде

$$\sigma_{\text{лм}}(\lambda, z) = k_{\text{лм}} \sigma_m(\lambda, z) = \sigma_{\text{лм}}^0(\lambda) N(z). \quad (13.43)$$

Величины $\sigma_m^0(\lambda)$ и $\sigma_{\text{лм}}^0(\lambda)$ называются *поперечными сечениями общего молекулярного рассеяния и рассеяния назад* соответственно:

$$\sigma_m^0(\lambda) = \frac{32\pi^3 (n-1)^2 1,061}{3\lambda^4 N_0^2}, \quad (13.44)$$

$$\sigma_{\text{лм}}^0(\lambda) = \frac{32\pi^3 (n-1)^2 1,061 \cdot 0,119}{3\lambda^4 N_0^2}, \quad (13.45)$$

где N_0 — число молекул в единице объема воздуха у поверхности Земли при нормальных условиях ($N_0 = 2,55 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$).

Задачи

13.22. Отношение длин волн красного (0,76 мкм) и фиолетового (0,38 мкм) лучей равно 2. Во сколько раз приблизительно различаются поперечные сечения молекулярного рассеяния; объемные коэффициенты молекулярного рассеяния; плотности потоков света, рассеянного единицами объема вперед и назад? Для каких лучей они больше?

13.23. Поперечник рассеивающих комплексов, обусловленных флуктуациями плотности воздуха, уменьшился в 2, 10, 100 раз. Как и во сколько раз изменится объемный коэффициент молекулярного рассеяния?

13.24. Вычислить нормированные индикатрисы молекулярного рассеяния для следующих направлений рассеяния: а) вперед; б) назад; в) под углом 90° ; г) под углом 270° ; д) под углом 60° .

13.25. Во сколько раз различаются поперечные сечения молекулярного рассеяния и вклады за счет молекулярного рассеяния назад — эхо-сигналы, поступающие с любых высот от излучений лазерных источников, длины волн которых различаются ровно в 2 раза: а) четвертая и вторая гармоники ОКГ (оптического квантового генератора) на иттрий-алюминиевом гранате; б) вторая гармоника на иттрий-алюминиевом гранате и ОКГ на стекле с неодимом. Использовать приложение 30. Почему ответы в обоих случаях не равны 16, хотя длины волн различаются в 2 раза? Что можно сказать о соотношении индексов рефракции этих ОКГ?

13.26. Решить задачу 13.25 для ОКГ на стекле с неодимом и газового ОКГ на смеси углекислого газа и азота. В какой из задач — в настоящей или в предыдущей — различие в показателях преломления излучений ОКГ больше?

13.27. Сравнить потери энергии излучения двух ОКГ с длинами волн 0,53 и 1,06 мкм на горизонтальных приземных трассах длиной 10 и 30 км, если объемные коэффициенты молекулярного рассеяния для них равны соответственно $1,41 \cdot 10^{-2}$ и $9,05 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-1}$. Для какого из этих двух ОКГ практически можно пренебречь молекулярным ослаблением луча даже на трассе длиной 30 км и все ослабление считать только аэрозольным?

13.28.* Вычислить оптические толщины однородной идеальной атмосферы, в которой ослабление лучистых потоков обусловлено только молекулярным рассеянием, для фиолетовых, желто-зеленых и красных лучей при следующих условиях у поверхности Земли: $P = 1013,2$ гПа, $t = 15^\circ\text{C}$. Число молекул в единице объема $2,687 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$, высота однородной атмосферы $H = 8434,4$ м. Оптические индексы рефракции для указанных лучей приведены в табл. 27 (приложение 41). Длины волн фиолетовых и красных лучей различаются в 2 раза. Почему оптические толщины различаются в 17 раз? Варианты исходных данных см. табл. 27 (приложение 41).

13.29.* Используя результаты предыдущей задачи, вычислить для однородной идеальной атмосферы коэффициенты прозрачности, обусловленные молекулярным рассеянием, для фиолетовых, желто-зеленых и красных лучей. Сколько процентов энергии лучей каждого цвета могло бы дойти до земной поверхности в идеальной атмосфере, если бы Солнце было в зените? Сколько процентов теряется за счет рассеяния? На какие цвета приблизительно приходятся оптические центры (цвет смеси лучей) прямого солнечного и рассеянного света после прохождения одной массы атмосферы? К красному или к фиолетовому концу спектра будут перемещаться оптические центры пучков прямого и рассеянного света при увеличении числа масс атмосферы? Какие явления в природе подтверждают правильность ответов на вопросы данной задачи? Варианты исходных данных см. табл. 27 (приложение 41).

13.30. Решить задачу 13.28 для крайних лучей солнечного спектра — ультрафиолетовых ($\lambda = 0,3$ мкм) и инфракрасных ($\lambda = 4,0$ мкм). Использовать табл. 27 (приложение 41).

13.31. Используя результаты предыдущей задачи, вычислить коэффициенты прозрачности, обусловленные молекулярным рассеянием, для УФ и ИК лучей солнечного спектра. Сколько процентов энергии УФ и ИК лучей теряется за счет молекулярного рассеяния при прохождении одной массы атмосферы? В каких лучах выгоднее фотографировать далекие объекты: в УФ, видимых или в ИК лучах? Почему? Учитывая большую изменчивость спектрального коэффициента прозрачности в диапазоне длин волн солнечного спектра, как определить интегральный коэффициент прозрачности для всего солнечного потока?

13.32. Какой горизонтальный путь должен пройти поток лучей с $\lambda = 0,55$ мкм, чтобы потеря его энергии за счет молекулярного рассеяния составила 98 %, если объемный коэффициент молекулярного рассеяния для данной длины волны равен $1,162 \cdot 10^{-2} \text{ км}^{-1}$. Считая длину волны 0,55 мкм наиболее характерной для светового потока, ответьте, на каком расстоянии световые потоки от любых наземных предметов полностью рассеиваются (с точностью до 2 %) даже в идеально чистой и сухой атмосфере? Иначе говоря, какова максимальная дальность видимости в горизонтальном направлении в идеально чистой и сухой атмосфере?

13.4. Аэрозольное ослабление

Объемный коэффициент аэрозольного рассеяния σ_a выражается формулой

$$\sigma_a = \pi a^2 K(\rho, m) N, \quad (13.46)$$

где N — число аэрозольных частиц в единице объема; $K(\rho, m)$ — функция безразмерного параметра $\rho = 2\pi a/\lambda$ и комплексного показателя преломления частиц m ; a — радиус частицы; λ — длина волны.

Распределение капель облаков, туманов и осадков по размерам $f(a)$ в наиболее общем виде представляется четырехпараметрической функцией, предложенной К. С. Шифриным:

$$f(a) = A a^\mu e^{-ba^c}, \quad (13.47)$$

где A — нормирующий множитель, μ , b и c — параметры, постоянные для данного распределения. Экспериментальная проверка показала, что $c \approx 1$. Малые значения параметра μ (1, 2) характерны для широких, а большие (8—10) для узких спектров распределения частиц по размерам, что видно из формулы (13.49).

Полуширина гамма-распределения Δ равна

$$\Delta = (a_{\max} - a_{\min})/a_m \quad (13.48)$$

и связана с параметром μ соотношением К. С. Шифрина

$$\Delta = 2,48/\sqrt{\mu}, \quad (13.49)$$

где a_m — модальный радиус, $a_{\max}$ и $a_{\min}$ — максимальный и минимальный радиусы, для которых $f(a_{\max, \min}) = \frac{1}{2} f(a_m)$.

Распределение крупных частиц дымки ($a > 0,1$ мкм) по размерам удовлетворительно аппроксимируется формулой Юнге

$$f(a) = A a^{-\beta}, \quad (13.50)$$

где A — масштабный множитель, β — эмпирическая константа, изменяющаяся в пределах от 2 до 5 в зависимости от времени и места. Показатель β характеризует крутизну крупнокапельной ветви кривой распределения частиц по размерам.

Расчеты общих коэффициентов аэрозольного ослабления $\sigma_a(\lambda)$ для наиболее типичных параметров микроструктуры водяных облаков и туманов (приложение 25) и атмосферной дымки (приложение 26) выполнены в Сибирском отделении АН СССР под руководством В. Е. Зуева. Коэффициенты $\sigma_a(\lambda)$ при других значениях метеорологической дальности видимости S_m можно получить простым пересчетом данных, приведенных в приложениях 25 и 26, поскольку величина $\sigma_a(\lambda)$ обратно пропорциональна S_m .

Значения $\sigma_a(\lambda)$ для атмосферной дымки, которая характеризуется более узким спектром частиц с юнговским распределением по размерам ($a_{\min} = 0,1$ мкм и $a_{\max} = 1,0$ мкм) для значений

параметра $\beta = 3,5$ для излучений в ИК области спектра, можно вычислить по формуле

$$\alpha_a(\lambda) = \frac{3,91}{S_m} \omega(\lambda), \quad (13.51)$$

где $\omega(\lambda) = \alpha_a(\lambda)/\alpha_a(0,5)$; значения $\omega(\lambda)$ приведены в приложении 27.

Поскольку строгие расчеты $\alpha_a(\lambda)$ и $\sigma_a(\lambda)$ довольно сложны даже при известных параметрах микроструктуры атмосферного аэрозоля (обычно его характеристики и вертикальное распределение неизвестны), для оценок $\alpha_a(\lambda)$ и $\sigma_a(\lambda)$ используют эмпирические формулы. Например, для вычисления $\sigma_a(\lambda)$ применяются формулы Кошмидера

$$\sigma_a(\lambda) = \frac{3,91}{S_m} \left(\frac{0,55}{\lambda} \right)^{0,585 S_m^{1/3}} \quad (13.52)$$

и К. С. Шифрина и И. Н. Минина

$$\sigma_a(\lambda) = \left[\frac{3,91}{S_m} - 0,0116 \right] \left(\frac{0,55}{\lambda} \right), \quad (13.53)$$

где $\sigma_a(\lambda)$ измеряется в км^{-1} , а S_m — в километрах.

Задачи

13.33. Вычислить оптическую толщину стандартной молекулярной атмосферы для $\lambda = 0,55$ мкм у поверхности Земли и на высотах 6 и 30 км. Расчет τ_m выполнить по формуле (13.2), произведя численное интегрирование по слоям: 1) от 0 до 6 км через 2 км; 2) от 6 до 30 км через 4 км; 3) от 30 до 50 км через 10 км. Использовать приложение 28.

13.34. Решить задачу 13.33. для стандартной аэрозольной атмосферы. Использовать приложение 28.

13.35. Решить задачу 13.33 для стандартной озонной атмосферы. Использовать приложение 28.

13.36. Используя результаты задач 13.33—13.35, вычислить общую оптическую толщину стандартной атмосферы у поверхности Земли и на высотах 6 и 30 км для длины волны 0,55 мкм. Сколько процентов от общей оптической толщины стандартной атмосферы на данных высотах составляют оптические толщины молекулярной, аэрозольной и озонной атмосфер? Результаты представить в виде таблицы:

Высота, км	τ_m		τ_a		τ_{oz}		$\tau_{общ}$
	значение	%	значение	%	значение	%	

Какая оптическая толщина является максимальной: у поверхности Земли, на высоте 6 км или на высоте 30 км?

13.37. Используя таблицу с результатами из предыдущей задачи, вычислить для стандартной атмосферы для длины волны 0,55 мкм (при $m=1$) общий коэффициент прозрачности и коэффициенты прозрачности, обусловленные молекулярным, аэрозольным и озонным ослаблением в отдельности, а также потери солнечной энергии за счет этих ослаблений у поверхности Земли, на высотах 6 и 30 км.

13.38. Вычислить коэффициенты пропускания для слоя облаков толщиной 100 м и потери энергии при прохождении этого слоя волнами видимой части спектра — от 0,38 до 0,78 мкм. Значительно ли изменяются коэффициенты аэрозольного ослабления и пропускания, а также потери энергии излучения для всех длин волн видимой части спектра? Как называется такое ослабление? Почему некоторые облака и многие туманы имеют белый цвет? Использовать приложение 25.

13.39. Решить задачу 13.38 для крайних лучей в солнечном спектре: УФ лучей с $\lambda=0,31$ мкм и ИК лучей с $\lambda=5,0$ мкм. На сколько процентов различаются энергетические потери УФ и ИК лучей? Имеется ли существенное преимущество в фотографировании или зондировании облаков с помощью ИК лучей в сравнении с видимыми?

13.40. Над большим аэродромом образовался туман с наиболее вероятным радиусом капель $a=1$ мкм и характерным узким спектром распределения капель ($\mu=10$). Через некоторое время при сохранении среднего радиуса капель неизменным спектр распределения капель тумана по размерам стал широким ($\mu=2$). Какой путь в тумане должны пройти инфракрасные лучи с длиной волны 10 мкм в начальной и конечной стадиях тумана, чтобы на этом пути энергия данной длины волны уменьшалась и составила 1 % энергии волны, входящей в слой тумана. Коэффициент аэрозольного ослабления в таком тумане (гамма-распределение, $S_m=0,2$ км) в начальной стадии составлял 1 км^{-1} , в конечной 4 км^{-1} . Во сколько раз уменьшается путь луча ($\lambda=10$ мкм) в тумане только за счет изменения спектра распределения капель от узкого до широкого при сохранении других характеристик микро-структуры (a и S_m) неизменными?

13.41. Какой станет длина пути инфракрасного луча ($\lambda=10$ мкм) в тумане, описанном в предыдущей задаче, если в конечной стадии тумана капли укрупнятся и наиболее вероятным станет размер 10 мкм, а спектр распределения капель останется узким ($\mu=10$)? Коэффициент аэрозольного ослабления для такого тумана в конечной стадии равен 24 км^{-1} . Как изменится длина пути луча в тумане только за счет укрупнения капель (другие характеристики распределения не изменялись: $\mu=10$, $S_m=0,2$ км).

13.42. Какой путь в облаке или тумане с наиболее типичной микро-структурой (гамма-распределение; $a=6$ мкм; $\mu=2$; $S_m=$

$= 0,2$ км) должны пройти электромагнитные лучи с длинами волн $0,31$ и $0,69$ мкм (ОКГ на рубине), чтобы их энергетические потери составили бы 99% . Использовать приложение 25. Какие оптические толщины проходят лучи на таком пути в облаке?

13.43. Какой горизонтальный путь в приземном слое атмосферы могут пройти электромагнитные лучи с длинами волн $0,31$ и $0,69$ мкм при наличии дымки с наиболее типичными параметрами микроструктуры (юнговское распределение; $\beta = 4$; $a_{\min} = 0,05$ мкм; $a_{\max} = 5,0$ мкм; $S_m = 10$ км), чтобы энергетические потери на этом пути составили бы 99% . Использовать приложение 26. Какие оптические толщины проходят эти лучи в данном случае? Сравните ответы данной задачи и предыдущей. Почему длины пути лучей в облаке практически одинаковы, а в атмосфере сильно различаются? Почему оптические толщины для обеих длин волн оказались в облаке и в атмосфере при дымке одинаковыми?

13.44. Какой путь в облаке или тумане с наиболее типичной микроструктурой (гамма-распределение; $a = 6$ мкм; $\mu = 2$; $S_m = 0,2$ км) должны пройти инфракрасные лучи с длинами волн $5,27$ и $10,6$ мкм, чтобы их энергетические потери достигли 99% . Какие оптические толщины проходят данные лучи на таком пути в облаке? Использовать приложение 25.

13.45. Какой горизонтальный путь в приземном слое атмосферы при наличии дымки с наиболее типичными параметрами микроструктуры (юнговское распределение; $\beta = 4$; $a_{\min} = 0,05$ мкм; $a_{\max} = 5,0$ мкм; $S_m = 10$ км) должны пройти инфракрасные лучи с длинами волн $5,27$ и $10,6$ мкм, чтобы их энергетические потери составили 99% . Какие оптические толщины при этом проходят данные лучи в атмосфере? Использовать приложение 26. Сравните ответы к данной задаче и задачам 13.42—13.44. Почему пути всех лучей в облаке практически одинаковы, а в атмосфере при дымке значительно различаются? Какова оптическая толщина слоя облака или тумана, который могут «пробить» любые электромагнитные волны (УФ, видимого или ИК областей спектра), в том числе и любые излучения ОКГ из этих диапазонов? Чем определялась оптическая толщина в задачах 13.42—13.45, как в облаках, так и в атмосфере при дымке?

13.46. Какие оптические толщины должны пройти электромагнитные волны любой длины в любой ослабляющей среде, чтобы их энергетические потери составили: 50 ; 75 ; 95 ; $99,5$; $99,9\%$?

13.47. Пользуясь эмпирическими формулами Кошмидера, а также Шифрина и Минина, вычислить коэффициенты аэрозольного рассеяния излучения ОКГ на рубине ($\lambda = 0,69$ мкм) при следующих значениях метеорологической дальности видимости: 1 , 2 , 5 , 10 , 20 , 50 км. На сколько процентов максимально различаются результаты: а) при плохой видимости; б) при отличной видимости?

13.48. Вычислить коэффициенты аэрозольного рассеяния излучения лазера на рубине ($\lambda = 0,69$ мкм) при метеорологической дальности видимости 1 , 2 , 5 , 10 , 20 , 50 км, используя приложе-

ние 26, составленное для $S_m = 10$ км и считая, что величина σ_a обратно пропорциональна S_m . Результаты занести в таблицу, в первую и вторую строки которой записать результаты из предыдущей задачи. Вычислить в процентах относительную разность значений σ_a , рассчитанных по формулам Кошмидера, а также Шифрина и Минина и по более точным данным, приведенным в приложении 26. Какая из формул дает результаты ближе к более точным данным? По какой формуле легче выполнять расчеты?

13.5. Лазерное зондирование атмосферы

В качестве примера использования оптических методов зондирования, основанных на измерении яркости рассеянного света, поступающего от различных слоев или оптических толщин атмосферы, остановимся только на лазерном. Этот метод быстро развивается, поскольку большая мощность, направленность, монохроматичность и поляризованность луча лазера делают его чрезвычайно перспективным.

Регистрируемая приемником лидара* с расстояния z от локатора мощность эхо-сигнала, обусловленная рассеянием в атмосфере, пропорциональна объемному коэффициенту рассеяния назад $\sigma_n(z)$. Последний в свою очередь (в отсутствие резонансного рассеяния и рассеяния на электронах) пропорционален объемным коэффициентам молекулярного $\sigma_m(z)$ и аэрозольного $\sigma_a(z)$ рассеяния и модулям индикатрис рассеяния назад, соответствующих этим рассеяниям $\kappa_{nm}(z)$ и $\kappa_{na}(z)$:

$$\sigma_n(z) = \kappa_n(z) \sigma(z) = \kappa_{nm}(z) \sigma_m(z) + \kappa_{na}(z) \sigma_a(z). \quad (13.54)$$

Главная задача и трудность состоят в разделении коэффициентов молекулярного и аэрозольного рассеяния. Если коэффициенты обратного молекулярного рассеяния вычислить по вертикальному профилю стандартной атмосферы, то по зарегистрированному профилю эхо-сигнала лазерного импульса можно получить информацию о вертикальном профиле объемного коэффициента аэрозольного рассеяния назад, часто называемого обратным рассеянием. Такая информация дает представление о наличии аэрозольных слоев, об их стратификации и динамике. Однако из нее нельзя получить однозначную информацию о профиле объемного коэффициента аэрозольного рассеяния. Это можно сделать только, если имеется дополнительная информация о некоторых параметрах атмосферного аэрозоля (спектре размеров, форме, химическом составе и др.).

Исследования, проведенные в ИОА СО АН СССР, в ЦАО и рядом иностранных ученых, показали, что для разных типов обла-

* Слово лидар составлено из первых букв английского названия установки light detection and ranging.

ков и туманов с наиболее вероятными параметрами микроструктуры имеет место линейная зависимость между $\sigma_{\text{ла}}(z)$ и $\sigma_{\text{а}}(z)$:

$$\sigma_{\text{ла}}(z) = K\sigma_{\text{а}}(z), \quad (13.55)$$

где коэффициент K — нормированная индикатриса рассеяния для направления 180° , которую называют также *лидарным отношением*. Величина K варьирует в сравнительно небольших пределах. Средние значения K для разных форм облаков, полученные Кэрриером*, приведены в приложении 29.

По восстановленному профилю $\sigma(z)$ можно вычислить распределение водности облака $q(z)$ и концентрацию средних капель $N_{\text{к}}(z)$, если задана или известна функция распределения облачных капель по размерам. В случае наиболее типичного для облаков и туманов гамма-распределения (при отношении оптического поперечника сечения к геометрическому, равному 2) $q(z)$ и $N_{\text{к}}(z)$ вычисляются по формулам

$$q(z) = \frac{2\sigma(z)(\mu+3)\bar{a}\rho}{3(\mu+1)}, \quad (13.56)$$

$$N_{\text{к}}(z) = \frac{\sigma(z)(\mu+1)}{2\pi\bar{a}^3(\mu+2)}, \quad (13.57)$$

где μ — параметр гамма-распределения капель по размерам, $\bar{a}$ — средний радиус капель, ρ — плотность воды.

Интенсивность аэрозольных слоев, обнаруживаемых при вертикальном лазерном зондировании удобно характеризовать с помощью величины D , представляющей собой отношение объемного коэффициента рассеяния назад к объемному молекулярному коэффициенту рассеяния назад, т. е.

$$D = \frac{\sigma_{\text{л общ}}}{\sigma_{\text{лм}}} = \frac{\sigma_{\text{лм}} + \sigma_{\text{ла}}}{\sigma_{\text{лм}}}, \quad (13.58)$$

отсюда

$$\sigma_{\text{ла}}/\sigma_{\text{лм}} = D - 1. \quad (13.59)$$

Задачи

13.49. Вертикальное зондирование атмосферы с помощью ОКГ на рубине ($\lambda = 0,69$ мкм) было проведено Катерле в Баварских Альпах в 1968 г. По эхо-сигналам, пришедшим с разных высот, были получены следующие значения суммарного коэффициента обратного рассеяния:

z км	8	12	16	20
$\sigma_{\text{л общ}}$ м ⁻¹ · ср ⁻¹	$8,72 \cdot 10^{-7}$	$3,60 \cdot 10^{-7}$	$3,39 \cdot 10^{-7}$	$7,29 \cdot 10^{-8}$
z км	24	28	32	
$\sigma_{\text{л общ}}$ м ⁻¹ · ср ⁻¹	$2,57 \cdot 10^{-8}$	$1,25 \cdot 10^{-8}$	$8,01 \cdot 10^{-9}$	
z км	36	40	44	
$\sigma_{\text{л общ}}$ м ⁻¹ · ср ⁻¹	$3,34 \cdot 10^{-9}$	$2,23 \cdot 10^{-9}$	$1,16 \cdot 10^{-9}$	

* Applied Optics, 1967, vol. 6, № 7.

Используя приложение 23, вычислить объемные коэффициенты обратного аэрозольного рассеяния и значения D на всех указанных высотах. Построить вертикальный профиль D (по оси ординат отложить высоту от 0 до 44 км, по оси абсцисс — D от 1 до 4,5). На каких высотах в этот день наблюдались аэрозольные слои? Во сколько раз аэрозольное рассеяние больше молекулярного в максимуме концентрации аэрозольного слоя? На каких высотах наблюдавшееся обратное рассеяние можно практически считать молекулярным?

13.50. Выполнить задание задачи 13.49, используя результаты лазерного зондирования атмосферы в Карадаге в 1971 г., если значения суммарных объемных коэффициентов обратного рассеяния излучения ОКГ на рубине ($\lambda = 0,69$ мкм) на различных высотах:

z км	16	18	20	22
σ_{Σ} общ $\text{м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$	$9,65 \cdot 10^{-8}$	$7,70 \cdot 10^{-8}$	$6,80 \cdot 10^{-8}$	$7,03 \cdot 10^{-8}$
z км	24	26	28	
σ_{Σ} общ $\text{м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$	$4,45 \cdot 10^{-8}$	$2,26 \cdot 10^{-8}$	$1,25 \cdot 10^{-8}$	

Если объемные коэффициенты обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния одинаковы, то будут ли одинаковы соответствующие объемные коэффициенты? Для какого типа рассеяния объемный коэффициент будет больше и почему?

13.51. Летом 1966 г. в Норвегии проводилось зондирование серебристых облаков лазером на рубине ($\lambda = 0,69$ мкм). Усиление эхо-сигналов лазерных импульсов наблюдалось на высотах 66—75 км. В одну из ночей, когда серебристые облака были видны в зените, максимальный отраженный сигнал пришел от тонкого слоя с высоты около 68 км. Этому сигналу соответствовал объемный коэффициент обратного рассеяния $2,54 \cdot 10^{-8} \text{ км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$. Установить соответствовало ли значение эхо-сигнала только молекулярному рассеянию или оно было больше и говорило о присутствии аэрозольных частиц, составляющих серебристые облака? Во сколько раз обратное рассеяние серебристым облаком на этой высоте больше обратного молекулярного? Чему равнялось D на высоте серебристого облака? Использовать приложения 23 и 30.

13.52. Эхо-сигналы лазерного импульса, принятые от облаков двух различных форм, оказались одинаковыми. Лидарное отношение для первого облака равно 0,050, для второго 0,033. В каком из этих двух облаков объемный коэффициент аэрозольного рассеяния и оптическая толщина больше и во сколько раз? Где лазерный луч сможет «пробить» большую оптическую толщину облака?

13.53. Импульсным ОКГ на рубине ($\lambda = 0,69$ мкм) зондировалось облако Си I тип. с высотой нижней границы 1850 м. По значениям сигнала, отраженного от облака, оценивались коэффициенты рассеяния назад от нижней части облака, находящегося на расстоянии 3710 м от приемника ($1,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$), от центральной части облака на расстоянии 3760 м ($2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$), от верхней части облака на расстоянии 3800 м ($2,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$).

Вычислить общие объемные коэффициенты рассеяния для этих трех точек облака и для трех видов индикатрисы рассеяния, которым соответствуют следующие нормированные индикатрисы для угла 180° : а) $\kappa_{\lambda,1} = 0,0085$ (теоретическая индикатриса для монодисперсного облака с радиусом капель $a = 5$ мкм); б) $\kappa_{\lambda,2} = 0,025$ (теоретическая индикатриса для полидисперсного облака с гамма-распределением капель по размерам, $\mu = 2$, $a = 5$ мкм); в) $\kappa_{\lambda,3} = 0,075$ (экспериментальная индикатриса, полученная в камере туманов при исследовании рассеяния излучения ОКГ на рубине. Найти средние арифметические оптические толщины облака для трех видов индикатрисы рассеяния. Определить энергетические потери излучения ОКГ на рубине при прохождении через облако в вертикальном направлении для трех индикатрис.

Почему объемные коэффициенты рассеяния для первого вида индикатрисы оказались самыми большими? Проследите, как влияет вид индикатрисы рассеяния на оптические толщины облака и соответственно на энергетические потери излучения ОКГ. Объясните причины такого влияния. Во сколько раз уменьшаются потери энергии излучения ОКГ при переходе от первого вида индикатрисы к третьему?

13.54. Учитывая, что в видимой части спектра аэрозольное рассеяние во всех облаках и туманах носит нейтральный характер, и используя результаты предыдущей задачи, определить метеорологическую дальность видимости в средней части облака для трех рассмотренных видов индикатрисы рассеяния. Использовать формулу (16.1). Существенно ли влияет форма индикатрисы аэрозольного рассеяния на метеорологическую дальность видимости в облаке? Почему индикатрисе первого вида соответствует самая маленькая S_m ?

13.55. Объемные коэффициенты рассеяния, полученные при зондировании облака Си лучом лазера: в нижней части облака $2,3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$, в средней $5,33 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$ и в верхней $3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$. Спектр распределения капель по размерам был узким ($\mu = 10$ для гамма-распределения). Средний радиус капель 5 мкм. Вычислить водность облака и число капель в единице объема в нижней, средней и верхней частях облака.

13.56. Во сколько раз изменятся водность и число капель в единице объема в облаке, описанном в предыдущей задаче, если при сохранении среднего размера капель (5 мкм) спектр распределения капель станет широким ($\mu = 2$)?

13.57. Лазером на стекле с неодимом ($\lambda = 1,06$ мкм) зондировалась нижняя часть облака Ns — от его нижней границы, находящейся от лазера на расстоянии 1850 м, до точки внутри облака, расположенной на расстоянии 1950 м от лазера, где произошло затухание лазерного луча. Эхо-сигналы лазерных импульсов, пересчитанные на объемные коэффициенты рассеяния назад: у нижней границы облака $2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ и в точке затухания лазерного луча $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$. Вычислить в этих

двух точках облака объемные коэффициенты рассеяния, водность облака и среднее число капель в единице объема; считая, что распределение капель по размерам характеризуется гамма-распределением с параметром $\mu = 3$; средний радиус капель 8 мкм; отношение оптического поперечника капель к геометрическому равно 2. Использовать приложение 29.

13.58. Эхо-сигналы лазерных импульсов при зондировании облаков *Ns*, *As*, *St II* и *Cu cong.* ОКГ на рубине ($\lambda = 0,69$ мкм) соответствовали объемным коэффициентам рассеяния назад: $6,03 \cdot 10^{-3}$; $4,52 \cdot 10^{-3}$; $4,76 \cdot 10^{-3}$ и $3,01 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$. При зондировании облаков *St I*, *Cb*, *Sc* и *Cu hum.* ОКГ на стекле с неодимом ($\lambda = 1,06$ мкм) были получены объемные коэффициенты обратного рассеяния: $3,08 \cdot 10^{-3}$; $2,19 \cdot 10^{-3}$; $2,08 \cdot 10^{-3}$ и $1,00 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ соответственно. Вычислить объемные коэффициенты рассеяния и метеорологическую дальность видимости в различных облаках, приняв во внимание, что в облаках и туманах аэрозольное ослабление в видимой и близкой ИК областях практически имеет нейтральный характер. Почему для слоистообразных облаков *Ns*, *As*, *St* характерна самая маленькая дальность видимости, хотя водность этих облаков меньше, чем кучевообразных *Cu hum.*, *Cu cong.*, *Cb*? Использовать приложение 29 и формулу (16.1).

13.59. Лазером на второй гармонике иттрий-алюминиевого граната ($\lambda = 0,532$ мкм) зондировался радиационный туман. Коэффициенты рассеяния назад, полученные по импульсам эхо-сигналов в тумане вблизи земной поверхности и у верхней границы тумана на высоте 50 м, были равны $5,7 \cdot 10^{-4}$ и $4,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ соответственно. Определить: а) объемные коэффициенты рассеяния тумана в двух точках зондирования, если средняя нормированная индикатриса аэрозольного рассеяния для угла рассеяния 180° равна 0,030; б) водность тумана и число капель среднего размера в единице объема, если имеется гамма-распределение капель тумана по размерам с параметром $\mu = 6$, средний радиус капель тумана у поверхности Земли 9 мкм, а на верхней границе тумана 7 мкм.

Глава 14

ЯРКОСТЬ И ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА, РАССЕЯННОГО АТМОСФЕРОЙ

14.1. Яркость небесного свода

Спектральную яркость в любой точке небесного свода, обусловленную однократным рассеянием солнечного света в атмосфере, для небольших оптических толщин ($\tau(\lambda) \leq 0,3$) можно определить по формуле К. С. Шифрина

$$B_1 = \frac{S_{0\lambda}}{4\pi} \tau(\lambda) \kappa_1(\theta) \sec z. \quad (14.1)$$

Здесь $S_{0\lambda}$ — спектральная солнечная постоянная; θ — угол рассеяния (угловое расстояние точки небосвода от Солнца); $\tau(\lambda)$ — оптическая толщина атмосферы, определяемая прозрачностью; $\kappa'_1(\theta)$ — нормированная индикатриса рассеяния, характеризующая угловое распределение рассеянного света в относительных единицах; z — зенитное расстояние точки небосвода. Произведение $\tau(\lambda)\kappa'_1(\theta) = \kappa_1(\theta)$ представляет собой функцию рассеяния или абсолютную индикатрису рассеяния, рассчитанную на всю высоту атмосферы.

При измерениях яркости неба можно определить только общую индикатрису рассеяния $\kappa(\theta)$, в которую кроме $\kappa_1(\theta)$ входят еще добавочные члены, обусловленные кратным рассеянием света $\kappa_2(\theta)$ и светом, отраженным от земной поверхности и участвующим в кратном рассеянии $\kappa_A(\theta)$:

$$\kappa(\theta) = \kappa_1(\theta) + \kappa_2(\theta) + \kappa_A(\theta). \quad (14.2)$$

Индикатрису $\kappa(\theta)$, так же как и κ_1/θ , рассчитанную на всю атмосферу, называют *индикатрисой яркости*, так как ее характер обуславливает распределение яркости по небосводу.

Таким образом, общая яркость неба B является суммой:

$$B = B_1 + B_2 + B_A, \quad (14.3)$$

где B_2 — яркость неба, обусловленная кратным рассеянием света, и B_A — яркость неба, обусловленная светом, отраженным от земной поверхности. Величину B_A можно вычислить по эмпирической формуле Г. Ш. Лившица, полагая, что она одинакова во всех точках альмукантарата Солнца*:

$$B_A = \frac{17,75B(90) - 13,14B(60)}{4,59}, \quad (14.4)$$

где $B(90)$ и $B(60)$ — яркость неба в точках, лежащих на альмукантарате Солнца, на угловых расстояниях от него 90 и 60°.

Равенство (14.1) выполняется при высокой прозрачности атмосферы и малом альбедо подстилающей поверхности, когда основной вклад в яркость неба вносит рассеяние первого порядка. Учитывая крайнюю изменчивость атмосферного аэрозоля (его концентрации, спектра размеров, свойств), а следовательно, и функций $\kappa_1(\theta)$, $\kappa_2(\theta)$ и $\kappa(\theta)$, расчеты по формулам (14.1)–(14.3) выполняют обычно для заданных моделей атмосферного аэрозоля.

Для определения яркости неба чаще прибегают к непосредственным ее измерениям с помощью фотометров, в которых обычно сравниваются яркость неба B и яркость экрана $B_{\text{эк}}$, освещенного лучами Солнца и имеющего альбедо $A_{\text{эк}}$:

$$B = \frac{n_{\text{эк}} A_{\text{эк}}}{n_{\text{экп}}} S_{0\lambda} P^m \odot (r_0/r)^2. \quad (14.5)$$

* Альмукантарат Солнца — круг на небосводе, параллельный горизонту и проходящий через Солнце.

Здесь B и $B_{\text{эк}}$ могут быть выражены в абсолютных единицах ($\text{Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм})$) или в относительных (единицах яркости неба в зените); $n_{\text{н}}$ и $n_{\text{эк}}$ — отсчеты прибора при наблюдении неба и экрана; $(r_0/r)^2$ — поправка на приведение к среднему расстоянию между центрами Земли и Солнца. Фотометры снабжены набором фильтров в видимой части спектра.

Измерив яркость неба B в нескольких точках и яркость экрана, можно определить индикатрису рассеяния $\kappa(\theta)$, рассчитанную на всю высоту атмосферы:

$$\kappa(\theta) = \frac{BA_{\text{эк}}}{B_{\text{эк}} \pi m_{\odot}}. \quad (14.6)$$

Е. В. Пясковская-Фесенкова на основании многолетних наблюдений установила средние и наиболее вероятные значения отношения функции рассеяния $\kappa(\theta)$ к оптической толщине атмосферы τ для визуальной области спектра. Наиболее строгой взаимосвязь $\kappa(\theta)$ и τ является для угла рассеяния $\theta = 57^\circ$:

$$\frac{\kappa(\theta)}{\tau} = \frac{1}{4\pi}. \quad (14.7)$$

Это соотношение с точностью до нескольких процентов выполняется для всех реально наблюдаемых индикатрис, так как именно под углом 57° любые индикатрисы пересекаются со сферической при равных оптических толщинах атмосферы.

В момент наступления максимума яркости околосолнечного ореола оптическая толщина атмосферы τ ($\tau = -\ln P$) всегда однозначно связана с массой атмосферы в направлении на Солнце $m_{\text{мах}}$:

$$\tau = -\ln P = 1/m_{\text{мах}}. \quad (14.8)$$

Учитывая, что $S = S_0 e^{-\tau m}$ и что в момент наступления максимума яркости ореола $m = m_{\text{мах}}$ и $\tau = 1/m_{\text{мах}}$, получаем

$$S = S_0 e^{-1}. \quad (14.9)$$

Таким образом, в момент наступления максимума яркости ореола солнечная радиация в месте наблюдения одинакова при любом коэффициенте прозрачности атмосферы. В этот момент она в e раз меньше, чем солнечная радиация на внешней границе атмосферы.

Задачи

14.1. Измерения спектральной яркости безоблачного неба в Алма-Ате 7 сентября 1965 г. выполнялись визуальным фотометром с фильтром с эффективной длиной волны $0,593 \text{ мкм}$. Коэффициент прозрачности атмосферы для этой длины волны составлял $0,80$; зенитное расстояние Солнца 60° ; альbedo серого экрана $0,30$. Отношение отсчетов прибора при наблюдении неба и экрана ($n_{\text{н}}/n_{\text{эк}}$) для точек неба, лежащих на альмукантарате Солнца на

угловых расстояниях от него 45, 90, 135 и 180°, равнялось соответственно 1,07; 0,44; 0,36 и 0,37. Вычислить яркость неба в этих точках, учитывая, что $S_{0\lambda} = 0,1689 \text{ Вт/(см}^2 \cdot \text{мкм)}$, а поправочный множитель $(r_0/r)^2$ для 7 сентября равен 1,016. Использовать приложение 6.

Как изменяется яркость неба при приближении к Солнцу? Какая функция в формуле (14.1) ответственна за возникновение этого максимума яркости неба? Объяснить, как возникает около-солнечный ореол.

14.2. Измерения спектральной яркости неба проводились при тех же условиях, что и в предыдущей задаче, на двух угловых расстояниях от Солнца (ψ): 45 и 180° при изменении зенитного угла наблюдаемой точки неба от 0 до 75° с интервалом 15°. Отношения отсчетов прибора по небу к отсчетам по экрану:

при $\psi = 45^\circ$		при $\psi = 180^\circ$	
z°	$n_n/n_{\text{эк}}$	z°	$n_n/n_{\text{эк}}$
0	0,30	0	0,30
15	0,39	15	0,23
30	0,56	30	0,22
45	0,79	45	0,25
60	1,08	60	0,37
75	1,52	75	0,69

Вычислить яркость неба во всех точках.

Как изменяется яркость неба от зенита к горизонту? В каком из азимутов ψ нарастание яркости при приближении к горизонту происходит более интенсивно? Почему? Какая функция в формуле (14.1) ответственна за возникновение пригоризонтного максимума яркости неба? В какой из рассмотренных точек небесного свода наблюдается минимум яркости? Почему?

14.3. Вычислить и построить индикатрису яркости, т. е. индикатрису рассеяния, рассчитанную на всю высоту атмосферы и не освобожденную от влияния кратного рассеяния и отражения света от земной поверхности, на основании измерений яркости неба, проведенных в Алма-Ате 24 октября 1952 г. с помощью визуального фотометра В. Г. Фесенкова с фильтром $\lambda = 0,577 \text{ мкм}$. Яркость неба измерялась в точках, лежащих на альмукантарате Солнца на угловых расстояниях θ от Солнца:

θ°	...	10	15	20	40	60	80	90	100	120	140
$n_n/n_{\text{эк}}$	...	0,548	0,398	0,352	0,219	0,156	0,125	0,119	0,120	0,135	0,124

Альбедо экрана 0,50; коэффициент прозрачности атмосферы 0,896; зенитное расстояние Солнца 71,9°.

Решение. Вычислим радиусы-векторы индикатрисы рассеяния:

$$\kappa(\theta) = \frac{0,5}{3,14 \cdot 3,19} \frac{n_n}{n_{\text{эк}}} = 5 \cdot 10^{-2} n_n/n_{\text{эк}}.$$

Таким образом,

θ°	10	15	20	40	60
$\kappa(\theta)$	0,0274	0,0199	0,0176	0,0109	0,0078
θ°	80	90	100	120	140
$\kappa(\theta)$	0,0062	0,0059	0,0060	0,0068	0,0062

Рекомендуемый масштаб при построении индикатрисы 1 см — $0,25 \cdot 10^{-2} \kappa(\theta)$, поэтому для построения в рекомендуемом масштабе умножим $\kappa(\theta)$ на $4 \cdot 10^2$. Получим следующие радиусы-векторы $\kappa(\theta)$: 10,97; 8,70; 7,04; 4,18; 3,12; 2,50; 2,38; 2,40; 2,70; 2,48.

Построим индикатрису рассеяния в виде полярной диаграммы. Из центра полярной диаграммы следует провести лучи под углами θ , соответствующими угловым расстояниям от Солнца до точек неба, в которых измерялась яркость. Горизонтальную ось, направленную слева направо, примем за $\theta=0^\circ$. Отсчет

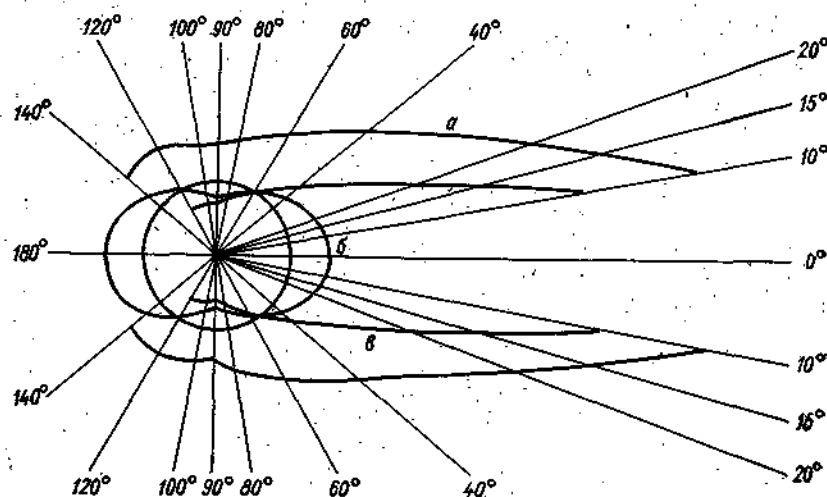


Рис. 14.1. Рассчитанные на всю атмосферу индикатрисы яркости: общая (а); молекулярного (б) и аэрозольного (в) рассеяния.

углов рассеяния будем вести в направлении против часовой стрелки. Из центра полярной диаграммы вдоль каждого луча отложим радиус-вектор, равный $\kappa(\theta)$ в этом направлении. Концы радиусов-векторов соединим плавной линией. Так строится верхняя половина индикатрисы рассеяния. Нижняя ее половина является зеркальным отражением верхней и строится аналогично, только отсчет углов от $\theta=0^\circ$ ведется по часовой стрелке.

Полученная индикатриса изображена на рис. 14.1.

14.4. Используя результаты предыдущей задачи, вычислить и построить индикатрисы молекулярного $\kappa_m(\theta)$ и аэрозольного $\kappa_a(\theta)$ рассеяния. Построение выполнить на рисунке к предыдущей задаче.

Решение. Под углом рассеяния, близким к 60° , практически все аэрозольные индикатрисы пересекаются со сферической при равных оптических толщинах*. Поэтому на полярной диаграмме (рис. 14.1) в принятом масштабе

$$\kappa_{\text{сфер}} = \kappa_a(60) = \kappa_m(60) = \kappa(60)/2 = 3,12/2 = 1,56 \text{ см.}$$

* Молекулярная и сферическая индикатрисы, строго говоря, пересекаются под углами рассеяния около $55-57^\circ$.

Относительные индикатрисы молекулярного рассеяния $(1 + \cos^2 \theta)$ приведены в табл. 14.1. При угле $\theta = 60^\circ$ $\kappa_m(60) = 1,56$ см, модуль молекулярной индикат-

Таблица 14.1

Результаты вычислений молекулярной и аэрозольной индикатрис рассеяния

θ°	$1 + \cos^2 \theta$	$\kappa_m(\theta)$ см	$\kappa(\theta)$ см	$\kappa_a(\theta)$ см	θ°	$1 + \cos^2 \theta$	$\kappa_m(\theta)$ см	$\kappa(\theta)$ см	$\kappa_a(\theta)$ см
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
0	2,00	2,50			100	1,03	1,28	2,40	1,12
10	1,97	2,46	10,97	8,51	120	1,25	1,56	2,70	1,14
15	1,93	2,40	8,70	6,30	130	1,41	1,76	—	—
20	1,88	2,34	7,04	4,70	140	1,59	1,98	2,48	0,50
40	1,59	1,98	4,18	2,20	150	1,75	2,18	—	—
60	1,25	1,56	3,12	1,56	160	1,88	2,34	—	—
80	1,03	1,28	2,50	1,22	180	2,00	2,50	—	—
90	1,00	1,25	2,38	1,13					

рисы $\kappa_m(60) = 1,25$. Из соотношения $1,56/1,25$ находим множитель 1,247, на который следует помножить все модули молекулярной индикатрисы, чтобы получить радиусы-векторы этой индикатрисы для разных углов θ в принятом масштабе построения. Полученные таким образом значения $\kappa_m(\theta)$ приведены в 3-й графе табл. 14.1. В 4-й графе помещены значения $\kappa(\theta)$, вычисленные в предыдущей задаче. Аэрозольную индикатрису для каждого угла рассеяния получаем как разность общей и молекулярной индикатрис:

$$\kappa_a(\theta) = \kappa(\theta) - \kappa_m(\theta).$$

Результаты вычислений $\kappa_a(\theta)$ помещены в 5-й графе табл. 14.1. Построенные указанным способом индикатрисы $\kappa_m(\theta)$ и $\kappa_a(\theta)$ также изображены на рис. 14.1.

14.5. Выполнить задание задачи 14.3 по результатам измерений, произведенных 18 июля 1952 г. в Алма-Ате тем же фотометром и в тех же точках небосвода при зенитном расстоянии Солнца $72,3^\circ$; $\rho = 0,865$. Отношения отсчетов при наблюдении яркости неба и экрана при указанных угловых расстояниях от Солнца равнялись соответственно: 1,288; 1,050; 0,795; 0,329; 0,224; 0,172; 0,157; 0,155; 0,168 и 0,183.

14.6. На основании результатов предыдущей задачи выполнить задание задачи 14.4. Сравните индикатрисы рассеяния, построенные в данной задаче и в задаче 14.4. Почему так сильно различаются общие и аэрозольные индикатрисы в эти дни? Почему индикатриса молекулярного рассеяния в данной задаче больше, чем в предыдущей? Сравните массы атмосферы, проходимые лучами Солнца.

14.7. Спектральная яркость неба для $\lambda = 0,577$ мкм по измерениям в Алма-Ате 19 ноября 1952 г. при наличии снежного покрова в точках неба, расположенных на альмукантарате Солнца на угловых расстояниях θ от него:

θ°	10	15	20	40	60	80	90	100	120
$B(\theta)$ отн. ед.	210,4	182,8	157,3	106,9	82,4	70,0	68,4	68,4	74,4

Выполнить задание задачи 14.3, а также построить индикатрису, освобожденную от влияния отражения от земной поверхности. Использовать формулу Г. Ш. Лифшица. Рекомендуемый масштаб для полярной диаграммы $1 \text{ см} = 4 \cdot 10^{-2} B(\theta)$.

14.8. Выполнить задание задачи 14.4 по результатам предыдущей задачи. Составить таблицу, в которую для каждого угла рассеяния занести радиусы-векторы, соответствующие индикатрисам: 1) общей, не освобожденной от влияния отражения солнечного света от снежной поверхности; 2) молекулярной; 3) аэрозольной; 4) яркости неба, обусловленной отражением от земной поверхности. Вычислить для каждого угла рассеяния доли общей яркости неба (в процентах), обусловленные молекулярным и аэрозольным рассеянием, а также отражением от земной поверхности, покрытой снегом. Как изменяются эти доли при переходе от угла рассеяния 10° к углу 90° ?

14.9. Определить оптическую толщину, коэффициент прозрачности атмосферы и плотность потока прямой солнечной радиации в момент наблюдения максимума яркости околосолнечного ореола, если последний наблюдался при высоте Солнца 27° .

14.10. Решить предыдущую задачу для случая, когда максимум яркости ореола имел место при высоте Солнца 14° . Сравнить ответы данной задачи и предыдущей и ответить на следующие вопросы. При увеличении коэффициента прозрачности атмосферы максимум яркости околосолнечного ореола наступает: а) при большей или меньшей высоте Солнца; б) при большей или меньшей массе атмосферы в направлении на Солнце; в) при большей или меньшей оптической толщине атмосферы в направлении на Солнце?

14.2. Поляризация света, рассеянного атмосферой. Форма небесного свода

Степень поляризации света дневного неба (%) по теории Релея—Кабанна описывается формулой

$$p = \frac{\sin^2 \theta}{1,051 + \cos^2 \theta} \cdot 100, \quad (14.10)$$

где θ — угол рассеяния. Эту формулу можно применять только при чрезвычайно высокой прозрачности атмосферы и в областях неба, далеких от Солнца и горизонта.

Более удовлетворительно степень поляризации описывается эмпирической формулой Д. Г. Стамова

$$p = p_{\max} \frac{\sin^4 \theta}{1 - p_{\max} \cos^4 \theta}. \quad (14.11)$$

Здесь $p_{\max}$ — максимальная наблюдаемая степень поляризации, которую можно вычислить по эмпирической формуле Г. В. Розенберга

$$p_{\max} = p_1 - 0,03, \quad (14.12)$$

где p_1 — коэффициент прозрачности атмосферы при $m = 1$.

Мерой сплюснутости небесного свода является угол α , определяющий высоту точки M , которая делит дугу небосвода HZ пополам (рис. 14.2).

Сплюснутость неба можно характеризовать также отношением горизонтальных размеров неба OH к вертикальным OZ :

$$OH/OZ = \operatorname{ctg} \varphi/2. \quad (14.13)$$

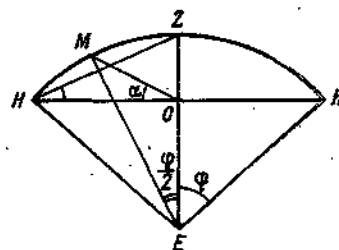


Рис. 14.2. Сплюснутость небесного свода.

Отношение OH/OZ изменяется в зависимости от угла α следующим образом:

α°	18	20	22	24	26	28	30	32
OH/OZ	4,49	3,98	3,55	3,19	2,88	2,60	2,36	2,14

Задачи

14.11. На сколько процентов изменятся и чему будут равны максимальная и минимальная степени поляризации света однократно рассеянного атмосферой, если учесть влияние оптической анизотропии молекул воздуха по Кабанну? Где на небосводе наблюдались бы соответствующие точки? Где фактически наблюдаются и чему равны максимальная и минимальная степени поляризации света, идущего от небосвода, при положении Солнца вблизи горизонта при чистом воздухе?

14.12. Вычислить максимальную степень поляризации и степень поляризации в точках небосвода, лежащих на альмукантате Солнца на угловом расстоянии от него 60° , если коэффициент прозрачности атмосферы равен 0,91.

14.13. Как изменятся ответы предыдущей задачи, если коэффициент прозрачности атмосферы станет равным 0,75?

14.14. Вычислить угол α , при котором горизонтальные размеры небесного свода больше вертикальных в 3,55 раза.

14.15. Днем при сплошной слоистой облачности угловая высота точки, делящей дугу небосвода пополам, оказалась равной 19° . Во сколько раз при этом горизонтальные размеры небосвода кажутся больше вертикальных?

ОСВЕЩЕННОСТЬ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

15.1. Освещенность земной поверхности днем и ночью

Освещенность горизонтальной поверхности Земли, создаваемую прямым солнечным светом, можно вычислить по формуле (13.21).

Высота Солнца $h_{\odot}$ в любой момент суток вычисляется по формуле (5.4). Высота Солнца в истинный полдень

$$h_{\odot} = 90 - \varphi + \delta_{\odot}, \quad (15.1)$$

высота Солнца в полночь

$$h_{\odot} = -(90 - \varphi - \delta_{\odot}) = \varphi + \delta_{\odot} - 90, \quad (15.2)$$

где φ — широта места, $\delta_{\odot}$ — склонение Солнца (см. приложения 5 и 35).

Освещенность горизонтальной поверхности земли E_D , создаваемая рассеянным светом от всего небосвода, яркость которого всюду одинакова и равна B_n , описывается формулой

$$E_D = \pi B_n. \quad (15.3)$$

В первом приближении это равенство выполняется при слоисто-образных облаках, закрывающих небо полностью, и при наличии снежного покрова.

При таком рассеянном освещении, если отражение света происходит по закону Ламберта, яркость естественных ландшафтов B_n связана с освещенностью E_D соотношением

$$\pi B_n = A E_D, \quad (15.4)$$

где A — альбедо данного ландшафта.

Измерения освещенности во всем мире проводятся на сравнительно небольшом числе станций, в основном в обсерваториях. В любом пункте, где осуществляются актинометрические измерения, данные об освещенности получают путем пересчета энергетической освещенности прямой, рассеянной или суммарной радиацией на соответствующие величины освещенности, с помощью *светового эквивалента радиации* (приложение 31).

В предлагаемых далее задачах освещенность горизонтальной поверхности прямым E_s и рассеянным E_D солнечным светом вычисляются каждая в отдельности только в том случае, если облачность не превышает 3 баллов. Если количество облаков более 3 баллов, то вычисляется суммарная радиация и по ней суммар-

ная освещенность. Суммы освещенности прямым и рассеянным солнечным светом, а также суммарной освещенности, составленные за час, день, месяц, сезон, вегетационный период, год, называются *количеством освещения*. Они характеризуют *световой климат (режим) каждого района*.

Задачи

15.1. Вычислить освещенность Солнцем горизонтальной поверхности на о. Диксон в день летнего солнцестояния в полдень и в полночь, если широта острова $73,5^\circ$, а среднее месячное значение коэффициента прозрачности атмосферы 0,79. Использовать приложения 5 и 6.

15.2. Какая поверхность — горизонтальная или вертикальная — в полдень в день осеннего равноденствия будет больше освещена прямыми солнечными лучами на о. Хейса (широта $80,5^\circ$) и во сколько раз? Использовать приложения 5 и 6.

15.3. Какова максимальная возможная освещенность горизонтальной поверхности в полдень в день весеннего равноденствия на экваторе; в Ленинграде (60° с. ш.); на ст. Восток в Антарктиде ($78,5^\circ$ ю. ш.); на ст. Амундсен-Скотт в Антарктиде (90° ю. ш.). Во сколько раз освещенность на экваторе больше, чем в Ленинграде и на ст. Восток? Ослабление света в атмосфере не учитывать. Использовать приложение 5.

15.4. Вычислить освещенность горизонтальных площадок в районах, перечисленных в предыдущей задаче, с учетом ослабления света в атмосфере, если средние месячные коэффициенты прозрачности атмосферы соответственно равны 0,70; 0,79; 0,80; 0,84. Использовать приложения 5 и 6. Во сколько раз освещенность на экваторе больше, чем в Ленинграде и на ст. Восток? Почему изменилось соотношение освещенностей по сравнению с ответами к предыдущей задаче, хотя в Антарктиде и Ленинграде прозрачность воздуха больше, чем на экваторе.

15.5. Доказать, что освещенность горизонтальной площадки на земной поверхности E_D , освещенной всем небосводом, яркость которого всюду одинакова и равна B_n , описывается формулой $E_D = \pi B_n$.

15.6. Допустим, что небосвод имеет вид не купола, а бесконечной плоскости, параллельной земной поверхности, и что яркость его B_n равномерна во всех направлениях. Доказать, что освещенность горизонтальной площадки на земной поверхности E_D , создаваемая таким небосводом, будет определяться в виде $E_D = \pi B_n$.

15.7. Средняя яркость неба, полностью покрытого равномерным по яркости слоем облаков N_s , равна 1000 кд/м². Вычислить яркость луга с выгоревшей травой и озимого поля с зеленой травой, считая, что они отражают по закону Ламберта, если их альбедо соответственно равны 0,19 и 0,26.

15.8. Вычислить среднюю яркость небосвода, покрытого сплошным слоем слоистых непросвечивающих облаков, днем, если

освещенность земной поверхности при наличии снежного покрова равна 10 500 лк.

15.9. Средняя освещенность горизонтальной поверхности рассеянным светом в Павловске по данным Н. Н. Калитина при наличии и отсутствии снежного покрова:

	$h_{\odot}^{\circ}$							
	0	5	10	15	25	35	45	55
При отсутствии снега	0,5	2,7	4,6	6,1	8,4	10,6	12,6	14,5
При наличии снега	1,6	4,0	5,8	7,2	9,6	11,9	14,0	15,5

Вычислить процент увеличения освещенности рассеянным светом за счет снежного покрова, принимая освещенность без снега за 100 %. Как изменяется влияние снежного покрова на освещенность при увеличении высоты Солнца?

15.10. Какую освещенность создает прямой солнечный свет на поле, покрытом травой, если яркость поля равна $3,5 \cdot 10^3$ кд/м², а альбедо 0,22. Считать, что трава отражает по закону Ламберта.

15.11. Освещенность снежных и фирновых полей на склонах гор Кавказа в летний полдень может достигать 120 000 лк. Определить яркость и светимость снежных полей, если коэффициент отражения снега равен 0,85.

15.12. Световая лунная постоянная равна 0,35 лк. Определить максимально возможную освещенность на Земле от полной Луны в зените, если коэффициент прозрачности идеальной атмосферы 0,91.

15.13. Вычислить освещенность горизонтальной поверхности Земли лунным светом в момент полнолуния, если высота Луны 60°, а коэффициент прозрачности атмосферы 0,77. Использовать данные задачи 15.12.

15.14. Средняя яркость ночного безлунного неба в 1 ч равнялась 10^{-4} кд/м². Определить освещенность земной поверхности, создаваемую за счет свечения, возникающего в земной атмосфере, если вклады источников освещения в это время при отсутствии Луны следующие: ночное свечение неба 60 %; свет звезд 22 %; зодиальный и галактический свет 18 %.

15.15. Что имеет большую яркость (должно казаться светлее) — вспаханное черноземное поле с альбедо 0,05, освещенное Солнцем ($E_s = 100\,000$ лк), или свежавыпавший снег с альбедо 0,90, освещенный полной Луной в зените ($E_{\text{л}} = 0,25$ лк)? Во сколько раз различаются яркости?

15.16. В каких пределах меняется освещенность, создаваемая полярными сияниями различной интенсивности, на площадке, перпендикулярной световому потоку, испускаемому полярным сиянием, если яркость полярных сияний меняется от 10^{-7} до 10^{-1} кд/м². Максимальная площадь, охваченная полярным сиянием, достигает

$\frac{1}{4}$ небосвода. Что больше, максимальная (минимальная) освещенность, создаваемая полярным сиянием, или освещенность от Луны? Звезд? Ночного свечения неба?

15.17. Прямая и рассеянная солнечная радиация на о. Врангеля 4 июля 1964 г. составила соответственно 0,91 и 0,22 кВт/м². Высота Солнца во время измерений 37,3°, облачность ☉², 6/0 Ас, Сі. Вычислить суммарную освещенность в момент измерения радиации. Использовать приложение 31.

15.18. Прямая и рассеянная солнечная радиация 25 июня 1974 г. на площадке ЛГМИ в Даймише составила соответственно 0,85 и 0,21 кВт/м². Высота Солнца в момент измерения 43° облачность ☉² 2/2 Си hup. Вычислить прямую, рассеянную и суммарную освещенность, используя световые эквиваленты радиации (приложение 31).

15.19. Действительные средние месячные суммы суммарной и рассеянной освещенности горизонтальной поверхности в 10⁷ лк в двух пунктах — Ташкенте ($\approx 41,5^\circ$ с. ш.) и Каргополе ($\approx 61,5^\circ$ с. ш.):

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Ташкент												
$\sum E_Q$	32	42	64	90	126	139	142	127	90	64	37	26
$\sum E_D$	18	22	32	39	44	38	37	33	30	25	17	15
Каргополь												
$\sum E_Q$	4	12	41	64	84	94	88	61	29	12	4	1
$\sum E_D$	4	10	25	37	43	48	44	33	20	10	4	1

Вычислить: 1) количество освещения в обоих пунктах по четырем сезонам и годовое количество освещения отдельно для E_Q и E_D ; 2) доли рассеянного количества освещения от суммарного (в процентах) за каждый сезон и за год. Ответить на вопросы: 1) В каких пределах меняется роль рассеянной освещенности на обеих станциях? 2) Чем объяснить столь большие различия в сезонных количествах освещения на этих станциях? 3) Как объяснить, что количество рассеянного освещения в Каргополе летом больше, чем в Ташкенте, а в другие сезоны наоборот?

15.2. Сумерки. Явления, наблюдаемые во время сумерек

Высота нижней границы слоя атмосферы, еще освещенного прямыми солнечными лучами во время сумерек (т. е. еще участвующего в рассеянии света) вычисляется по формулам:

в направлении на зенит $AB = H$ (рис. 15.1)

$$H = R(\sec \varphi - 1), \quad (15.5)$$

в направлении на горизонт $DC = h$

$$h = R(\sec \varphi/2 - 1), \quad (15.6)$$

где R — радиус Земли; φ — центральный угол, равный углу погружения Солнца.

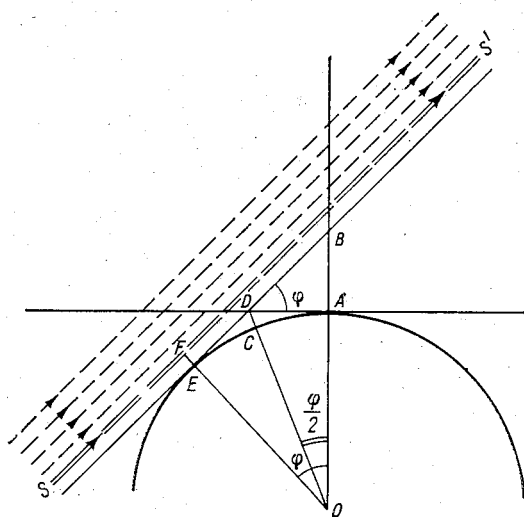


Рис. 15.1. Схема сумерек. Положение сумеречного луча.

Высота эффективного рассеивающего слоя в направлении на зенит равна высоте слоя, на который падает в каждый момент сумерек сумеречный луч. Сумеречный луч SS' (см. рис. 15.1) проходит над местом захода Солнца (точка E) на высоте около 20 км.

Высота Солнца над горизонтом или глубина погружения под горизонт в любой момент суток вычисляется по формуле (5.4).

Продолжительность сумерек можно определить по формуле (5.4) как разность часовых углов Солнца, соответствующих началу и концу каждого вида сумерек. *Гражданские сумерки* начинаются с момента исчезновения верхнего края диска Солнца под горизонтом, кончаются при $\varphi = -7^\circ$; *навигационные сумерки* продолжаются от $\varphi = -7^\circ$ до $\varphi = -12^\circ$; *астрономические сумерки* — от $\varphi = -12^\circ$ до $\varphi = -18^\circ$.

Задачи

15.20. В. И. Черняев и М. В. Вукс во время экспедиции на Эльбрус в 1936 г. впервые наблюдали в спектре сумеречного неба яркую «вспышку» линии натрия. На каких высотах в атмосфере в направлении на зенит располагается максимум слоя, содержащего атомы натрия, если наиболее яркое свечение натрия отмечалось при изменении зенитного расстояния Солнца от $97^{\circ}09'$ до $98^{\circ}28'$?

15.21. При измерении степени поляризации света от неба в сумерки во время экспедиции на Эльбрус в 1936 г. И. А. Хвостиковым и сотрудниками были обнаружены два глубоких минимума степени поляризации рассеянного света, которые наблюдались при зенитных расстояниях Солнца 100° и $106^{\circ}30'$. Определить высоты эффективных рассеивающих слоев (в направлении на зенит), ответственных за это явление, на которые падает сумеречный луч при таких углах погружения Солнца. Как называются эти слои атмосферы и почему в них заметно уменьшается степень поляризации?

15.22. Вычислить высоты слоев в атмосфере, которые исключаются из участия в рассеянии света в направлении на горизонт и на зенит в конце гражданских, навигационных и астрономических сумерек. На каких высотах лежат в эти моменты сумерек центры эффективных рассеивающих слоев?

15.23. Серебристые облака становятся видимыми на фоне быстро темнеющего неба в сумерки, когда сами облака еще освещены солнечными лучами. Время появления облаков соответствует глубине погружения Солнца под горизонт около 5° . При какой максимальной глубине погружения Солнца серебристые облака еще будут видны, если они располагаются в околоразенитной части неба? Высота облаков над земной поверхностью изменяется от 75 до 90 км.

15.24. В ночь с 30 июня на 1 июля 1908 г., когда в атмосферу Земли проник так называемый Тунгусский метеорит, серебристые облака наблюдались на огромной территории от Атлантического океана до Средней Азии и Байкала. Таким образом, южная граница района, в котором наблюдались серебристые облака, простиралась примерно до 40° с. ш. В течение какого времени их можно было наблюдать на широте 40° , если серебристые облака видны при глубинах погружения Солнца от 5 до 18° . Использовать приложения 5 и 35.

15.25. Используя условия предыдущей задачи, вычислить максимальную широту, до которой можно было в эту ночь наблюдать серебристые облака. Почему они не были видны в более высоких широтах?

15.26. В какие часы можно наблюдать серебристые облака в Ленинграде (60° с. ш.) 25 августа, если они видны при глубине погружения Солнца под горизонт от 5 до 18° . Использовать приложения 5 и 35.

15.27. Полярное сияние, освещенное Солнцем во время сумерек, наблюдалось 18 марта 1974 г. на 70° с. ш. Сияние имело вид пульсирующих полос, простирающихся от северной части горизонта до околозенитной области неба. Наблюдатель отметил, что сияние стало бледнеть и пропадать в околозенитной области в 20 ч 25 мин, а по мере погружения Солнца — и в других частях небосвода. Вычислить максимальную высоту светящегося слоя в направлении на зенит. Использовать приложения 5 и 35.

15.28. Ночное свечение атмосферы представляет собой непрерывное свечение атомов и молекул атмосферных газов на высотах 100—300 км. С какой минимальной глубины погружения Солнца прекратится во всем этом слое диссоциирующее воздействие ультрафиолетового излучения Солнца, вызывающего ночное свечение атмосферы?

15.29. На основе фотографий края Земли и ее сумеречного ореола, полученных В. В. Николаевой-Терешковой с космического корабля «Восток-6» 17 июня 1963 г., определены следующие значения объемного коэффициента рассеяния атмосферной дымки $\sigma(z)$ на различных высотах:

z км	5	7,5	10	11,5	12,5	15	17,5	19,5	20	22,5	25
$\sigma(z)$ 10^{-3} км $^{-1}$	0	0	0,9	1,5	0,9	1,7	3,2	4,5	4,0	0,6	0

Построить вертикальный профиль $\sigma(z)$. На каких высотах лежат максимумы концентрации аэрозольных слоев? Какова их вертикальная протяженность? Оценить вертикальную оптическую толщину каждого из этих слоев и общую их толщину. Установлено, что аэрозольный слой на высотах 16—24 км состоит в основном из капелек раствора серной кислоты размером 0,1—1 мкм с концентрацией примерно 1 см^{-3} . Для каких облаков эти аэрозольные частицы могут служить ядрами конденсации? С каким геофизическим явлением и почему связано появление данного типа облаков, а также усиление аэрозольных слоев на этих высотах и увеличение яркости и окраски ряда других зоревых явлений?

15.30. На основании результатов предыдущей задачи вычислить: а) энергетические потери лучей, проходящих сквозь этот аэрозольный слой, например сумеречных лучей, наблюдаемых на Земле; б) энергетические потери лазерного или прожекторного лучей, пересекающих этот слой дважды, при зондировании более высоких слоев атмосферы. Виден ли этот аэрозольный слой с Земли? Почему он становится видимым во время сумерек? Оценить приближенно, во сколько раз увеличивается оптическая толщина этого слоя во время сумерек, когда свет ореола пронизывает аэрозольный слой в косом направлении (близком к горизонтальному) и оптическая толщина слоя возрастает примерно в $225/\sqrt{\Delta z}$ раз, где Δz — геометрическая толщина слоя (км).

ДАЛЬНОСТЬ ВИДИМОСТИ ДАЛЕКИХ ПРЕДМЕТОВ И ОГНЕЙ

16.1. Пороги световой чувствительности глаза, влияющие на видимость предметов

Порогом контрастной чувствительности глаза ε называется минимальный яркостный контраст, при котором еще можно увидеть предмет, т. е. отличить его от фона. При достаточном (дневном) освещении и достаточных угловых размерах предмета (не менее $20'$ или не менее $15 \times 15'$): $\varepsilon = 0,2$ для дальности потери видимости; $\varepsilon = 0,05$ для дальности обнаружения предмета; $\varepsilon = 0,07-0,09$ для дальности опознавания предмета.

Порог световой чувствительности глаза к точечному источнику света, или, короче, порог световой чувствительности глаза $E_{св}$ — минимальная освещенность зрачка глаза наблюдателя (блеск), при которой он еще видит этот источник. В лабораторных условиях для одиночного огня при полной темновой адаптации глаза $E_{св} = 5 \cdot 10^{-9}$ лк. В полевых условиях: $E_{св} = 2,7 \cdot 10^{-7}$ лк для одиночного огня в темное время; $E_{св} = 10^{-6}$ лк для групповых огней в темное время; $E_{св} = 10^{-3}$ лк для групповых огней в светлое время.

Абсолютный порог световосприятия Φ_{min} — мощность светового излучения, которое производит световое раздражение сетчатки глаза человека в условиях полной темновой адаптации. По измерениям С. И. Вавилова, $\Phi_{min} = 3,1 \cdot 10^{-18}$ Вт для длины волны $\lambda = 0,507$ мкм (зеленый свет), к которой глаз наиболее чувствителен при полной темновой адаптации. Такое значение Φ_{min} соответствует световому потоку примерно 10^{-13} лм.

Острота зрения $V = 1/\delta_{min}$ (δ_{min} — минимальный разрешаемый угол, равный $1-2'$, если условия освещения и контраст предметов с фоном достаточны). (Минимальный разрешаемый угол в хорошем современном телескопе имеет порядок $0,12''$.)

Задачи

16.1. Вычислить, какое минимальное число квантов в секунду зеленого света ($0,507$ мкм) должен испускать источник, чтобы этот свет увидел человек, находящийся в условиях полной темновой адаптации?

16.2. С какого самого большого расстояния можно увидеть темной ночью горящий фонарь «летучая мышь» силой света в 1 кд, если наблюдение выполняется в полевых условиях; если бы можно было осуществить этот опыт в лабораторных условиях

(ослабление света в атмосфере не учитывать)? Во сколько раз изменяется дальность видимости огня только за счет изменения порога световой чувствительности глаза при переходе от лабораторных условий к полевым?

16.3. Вычислить абсолютный порог световосприятия, выраженный в единицах светового потока, падающего на зрачки глаза человека, находящегося в лаборатории, в условиях полной темновой адаптации глаза, если порог световой чувствительности глаза составляет $5 \cdot 10^{-9}$ лк. Диаметр зрачка глаза 6 мм.

16.4. Считая разрешающую способность глаза равной $1'$, а телескопа $0,12''$, вычислить расстояние между вершинами двух гор на Луне, на которых их можно видеть отдельно. Принять, что освещенность предметов и их контраст с фоном достаточны и не влияют на разрешающую способность глаза. Расстояние до Луны 384 000 км.

16.5. Какова должна быть минимальная ширина объектов на Марсе, называемых иногда «каналами», чтобы их можно было увидеть в телескоп с разрешающей способностью $0,12''$ в моменты противостояния Земли и Марса, когда расстояние между ними составляет $78 \cdot 10^6$ км. Являются ли эти объекты «каналами» в нашем земном понятии?

16.2. Метеорологическая дальность видимости

Метеорологическая дальность видимости S_m днем вычисляется по формулам:

$$S_m = 1,7/a, \quad (16.1)$$

$$S_m = 3,9/\alpha, \quad (16.2)$$

$$S_m = \lg \varepsilon / \lg P, \quad (16.3)$$

где a и α — коэффициенты ослабления, $a = 0,4343 \alpha$, (рассчитываются на единицу длины пути, m^{-1} или km^{-1}), P — коэффициент прозрачности в горизонтальном направлении (см. формулу (13.11)), ε — порог контрастной чувствительности глаза ($\varepsilon = 0,02$ для дальности потери видимости).

Коэффициент прозрачности идеальной атмосферы (с учетом только молекулярного рассеяния) для всей вертикальной толщи атмосферы описывается выражением

$$P_t = e^{-\sigma_m H}, \quad (16.4)$$

а в горизонтальном направлении (на единицу длины, обычно 1 км)

$$\int P_t = e^{-\sigma_m}. \quad (16.5)$$

Здесь σ_m — объемный коэффициент молекулярного рассеяния, H — высота однородной атмосферы.

В формулах 16.1—16.5, а также и во всех следующих формулах данной главы все характеристики ослабления радиации в атмосфере: α , α , P , S_m , P_i , σ_m — относятся к интегральным потокам.

Метеорологическая дальность видимости в облаках и туманах оценивается по следующим эмпирическим формулам:

Г. М. Забродского для S_c и S_t соответственно

$$S_m = 34,1/q^{0,63}, \quad (16.6)$$

$$S_m = 42,7/q^{0,72}, \quad (16.7)$$

Е. А. Поляковой для тумана

$$S_m = 59,2/q^{0,54}. \quad (16.8)$$

Здесь q — водность (г/м^3).

Коэффициент ослабления α при выпадении осадков практически равен объемному коэффициенту рассеяния σ (так же как и в облаках). По эмпирическим формулам Е. А. Поляковой α выражается через интенсивность выпадающих осадков I (мм/ч):

$$\alpha = 0,21I^{0,74} \quad (16.9)$$

при дожде, а метеорологическая дальность видимости, согласно (16.2), в этом случае равна

$$S_m = 18,6I^{-0,74}, \quad (16.10)$$

при снегопаде

$$\alpha = 3,21I^{0,91}, \quad (16.11)$$

$$S_m = 1,21I^{-0,91}. \quad (16.12)$$

Задачи

16.6. Вычислить коэффициент прозрачности и коэффициенты ослабления α и α , рассчитанные на 1 км и 1 м, если $S_m = 10$ км. Сколько процентов светового потока задерживается слоем воздуха длиной 1 км и 1 м?

16.7. Метеорологическая дальность видимости в тумане равна 200 м. Вычислить коэффициент ослабления α , рассчитанный на 1 м, и потери световой энергии при прохождении светом слоя длиной 100 м. При какой длине пути потери световой энергии в данном тумане составят 98 %.

16.8. При определении метеорологической дальности видимости прибором опытный наблюдатель получил $S_m = 2$ км, а начинающий наблюдатель этим же прибором получил $S_m = 1,2$ км. Определить порог контрастной чувствительности зрения нового наблюдателя.

16.9. Определить максимальную метеорологическую дальность видимости и коэффициент прозрачности в горизонтальном направ-

лении в идеальной атмосфере, в которой все ослабление лучистого потока обуславливается только молекулярным рассеянием. Коэффициент прозрачности всей толщи атмосферы (при $m = 1$) 0,907, температура воздуха у поверхности Земли 0°C , давление воздуха нормальное. Атмосферу считать однородной. Почему нельзя увидеть достаточно высокий предмет любой яркости и цвета с расстояния, большего, чем полученное значение $S_{\text{м max}}$.

16.10. Решить задачу 16.9 при температуре воздуха у поверхности Земли -20°C . Почему P_i и $S_{\text{м max}}$ получились меньше, чем в задаче 16.9?

16.11. Решить задачу 16.9 при температуре воздуха у поверхности Земли 20°C . Сравнить полученные значения с ответами к задачам 16.9 и 16.10. В каком диапазоне варьирует $S_{\text{м max}}$ при изменении температуры воздуха у земной поверхности от -20 до 20°C ?

16.12. Вычислить метеорологическую дальность видимости, коэффициент ослабления α , рассчитанный на 1 м и 1 км, и энергетические потери в видимом диапазоне в облаке St с водностью $0,15 \text{ г/м}^3$ на трассе длиной 100 м.

16.13. Как изменятся ответы предыдущей задачи, если вместо St будет облако Sc? Объяснить причину различий в ответах.

16.14. Как изменятся ответы задачи 16.12, если вместо St будет туман? К оптическим характеристикам каких облаков — St или Sc — ближе по значению оптические характеристики тумана?

16.15. Вычислить метеорологическую дальность видимости и коэффициент аэрозольного ослабления в радиационном тумане. Водность тумана $0,025 \text{ г/м}^3$, распределение капель по размерам — гамма-распределение, $\mu = 7$, средний радиус капель 2 мкм.

16.16. Решить задачу 16.15 при условии, что туман, описанный в предыдущей задаче, усилился: водность его стала равной $0,150 \text{ г/м}^3$, средний радиус капель 4 мкм, $\mu = 3$.

16.17. Вычислить объемный коэффициент аэрозольного рассеяния и соответствующую метеорологическую дальность видимости в км и баллах во время дождя, если его минимальная интенсивность $0,3 \text{ мм/ч}$.

16.18. Решить задачу 16.17 при максимальной интенсивности дождя 57 мм/ч . Каков диапазон изменения метеорологической дальности видимости при выпадении дождей разной интенсивности?

16.19. Сравнить энергетические потери горизонтальных потоков (например, излучений ОКГ) на трассе длиной 1 км при минимальной и максимальной интенсивности дождя (см. задачи 16.17 и 16.18).

16.20. Вычислить объемный коэффициент аэрозольного ослабления и метеорологическую дальность видимости в км и баллах при слабом снегопаде интенсивностью $0,1 \text{ мм/ч}$.

16.21. Решить задачу 16.20 для сильного снегопада интенсивностью 3 мм/ч . Сравнить диапазоны изменения $S_{\text{м}}$ при сильных и слабых дождях и снегопадах (задачи 16.7—16.21).

16.3. Дальность видимости огней

Освещенность, создаваемая ночью огнем силой света I , находящимся на расстоянии l , вычисляется по формуле Аллара

$$E = \frac{I}{l^2} e^{-\alpha l}, \quad (16.13)$$

где α — коэффициент ослабления. В момент потери видимости огня $l = S_{\text{ог}}$ и $E = E_{\text{св}}$:

$$E_{\text{св}} = \frac{I}{S_{\text{ог}}^2} e^{-\alpha S_{\text{ог}}}. \quad (16.14)$$

Подставляя в (16.14) α из формулы (16.2) и логарифмируя, получим:

$$\ln S_{\text{ог}} + \frac{3,9}{2S_m} S_{\text{ог}} = \frac{1}{2} (\ln I - \ln E_{\text{св}}). \quad (16.15)$$

Уравнение (16.15) относительно $S_{\text{ог}}$ не решается алгебраически. Для определения $S_{\text{ог}}$ построены номограммы с разными значениями порога световой чувствительности глаза $E_{\text{св}}$ (для белых огней): для одиночных огней в темное время суток номограмма В. А. Березкина, $E_{\text{св}} = 2,7 \cdot 10^{-7}$ лк (приложение 37), и номограмма В. А. Гаврилова с расширенным пределом для силы света огня, $E_{\text{св}} = 2 \cdot 10^{-7}$ лк (приложение 38); для групповых огней: в темное время суток, $E_{\text{св}} = 10^{-6}$ лк (приложение 39) и в светлое время суток, $E_{\text{св}} = 10^{-3}$ лк (приложение 40).

Номограммы можно использовать не только при том значении $E_{\text{св}}$, для которого они построены, но и при любом другом. Для этого необходимо увеличить (или уменьшить) заданную силу света I соответственно новой задаваемой пороговой освещенности $E_{\text{св}}$, т. е. увеличить (или уменьшить) I во столько раз, во сколько раз новый порог $E_{\text{св}}$ меньше (или больше) того порога, для которого составлена данная номограмма.

Блеквеллом получена эмпирическая формула, с помощью которой можно определить $E_{\text{св}}$ в зависимости от яркости фона $B_{\text{ф}}$:

$$\lg E_{\text{св}} = 0,887 \lg B_{\text{ф}} - 6,95. \quad (16.16)$$

Все номограммы можно применять и для цветных огней (сигналов), используя пороги световой чувствительности глаза (лк) для точечных цветных огней (сигналов):

Цвет огня (сигнал)	Яркость фона	
	$5 \cdot 10^{-3}$ кд/м ² (снежный покров при свете луны)	10^4 кд/м ² (снежный покров в полдень при тумане)
Белый	$2 \cdot 10^{-7}$	10^{-3}
Красный	$4,5 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$
Желтый	$11 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-4}$
Зеленый	$5,5 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$
Синий	$5 \cdot 10^{-7}$	

Пример. Определим дальность видимости красного огня, имеющего силу света $4 \cdot 10^4$ кд при $S_m = 50$ км и яркости фона $5 \cdot 10^{-2}$ кд/м². При такой яркости фона пороговая освещенность для красного света равна $0,45 \cdot 10^{-6}$ лк. Это значение больше пороговой освещенности для белого света, принятой при построении номограммы В. А. Гаврилова, в 2,25 раза. Следовательно, сила света красного огня должна быть уменьшена в 2,25 раза, т. е. она будет составлять $1,78 \cdot 10^4$ кд. Этой силе света по номограмме В. А. Гаврилова (при $S_m = 50$ км) соответствует дальность видимости огня 50 км.

Задачи

16.22. Какой должна быть минимальная сила света огня морского маяка, чтобы штурман судна мог его заметить ночью с расстояния не менее 5 км при следующих условиях: 1) ослабление света в атмосфере не учитывается; 2) в идеальной атмосфере при максимально возможной метеорологической дальности видимости 321 км (при температуре воздуха у Земли 15°C); 3) в реальной атмосфере при отличной метеорологической дальности видимости ($S_m = 50$ км). Существенно ли различаются значения минимальной силы света огня для указанных трех случаев?

16.23. Решить задачу 16.22 при следующих значениях метеорологической дальности видимости: 10, 5, 2 и 1 км. Сравните с ответами к предыдущей задаче. В каких пределах изменяется необходимая минимальная сила света огня при изменении метеорологической дальности видимости от 50 км до 1 км? Чем объясняется резкое увеличение необходимой минимальной силы света при $S_m = 2$ и 1 км? Каким метеорологическим условиям соответствуют эти значения S_m ?

16.24. Судно шло к берегу, и, как обычно бывает ночью при хорошей видимости, с расстояния более 25 км штурман увидел огонь маяка, сила света которого равнялась $1,8 \cdot 10^9$ кд. Затем начался интенсивный снегопад, снизивший видимость до 800 м. Маяк стал не виден, но судно продолжало идти прежним курсом. На каком расстоянии от берега (5, 4, 3, 2 или 1 км) штурман снова увидит свет маяка?

16.25. Сила света прожектора маяка равна $1,8 \cdot 10^9$ кд. Расстояние до берега составляло около 60 км, когда штурману теплохода показалось, что он видит свет маяка. Мог ли он действительно увидеть свет маяка с такого расстояния при метеорологической дальности видимости 25 км?

Определение дальности видимости огней по номограммам

16.26. Решить задачу 16.23 по номограмме В. А. Березкина (приложение 37).

16.27. Видимость в тумане 800 м. С какого расстояния машинист тепловоза заметит белый свет светофора, сила света которого равна 500 кд? Использовать приложение 38.

16.28. Туман, упомянутый в предыдущей задаче, уплотнился. Видимость снизилась до 500, 200 и 100 м. С каких расстояний

теперь сможет машинист увидеть белый огонь, сила света которого равна 500 кд?

16.29. Решить задачу 16.27 для красного и зеленого огней. Использовать приложение 38.

16.30. Решить задачу 16.28 для красного и зеленого огней. Использовать приложение 38.

16.31. Сила света мощных зенитных прожекторов с параболическими отражателями диаметром 1,5 м достигает $7 \cdot 10^8$ кд. На каком расстоянии может быть виден свет такого прожектора в тумане ночью при $S_m = 400$ м? Использовать приложение 38.

16.4. Посадочная дальность видимости

Посадочную дальность видимости днем можно вычислять по формуле

$$S_{\text{пос}} = 0,62 S_m \lg \frac{V_0 + E_{\text{max}}/B_{\text{ВПП}} - 1}{E_{\text{max}}/B_{\text{ВПП}}}. \quad (16.17)$$

Здесь S_m — метеорологическая дальность видимости; $V_0 = K_0/\varepsilon$ — отношение истинного контраста взлетно-посадочной полосы (ВПП) с окружающим фоном (K_0) к порогу контрастной чувствительности глаза (ε) (средние сезонные значения V_0 приведены в приложении 35); $E_{\text{max}}/B_{\text{ВПП}} = 1,5$ для сухой ВПП и $E_{\text{max}}/B_{\text{ВПП}} = 2,0$ для мокрой ВПП.

Посадочную дальность видимости ночью можно вычислить по формуле (16.15). Практически она определяется с помощью номограмм, рассчитанных на основании формулы (16.15) и приведенных в приложениях 37—40. Все сказанное в п. 16.3 об использовании номограмм такого типа применимо и к определению $S_{\text{пос}}$ ночью или других параметров, определяющих эту величину.

Для обеспечения безопасности посадки самолетов при снижении в облаках летчику надо знать, на какой высоте он выйдет из облака, чтобы иметь достаточную наклонную посадочную дальность видимости $S_{\text{накл}}$, так как в момент пролета ближней приводной радиостанции он должен увидеть ВПП. Угол наклона глиссады снижения β с горизонтом составляет 2—3°.

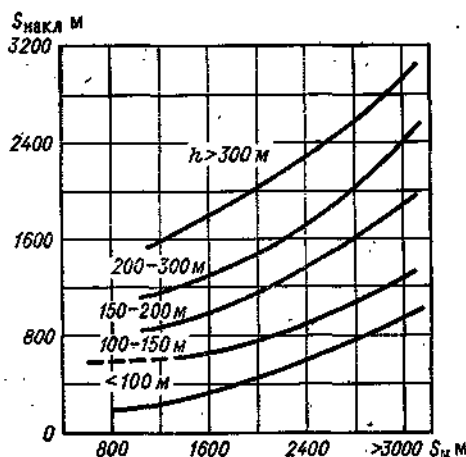


Рис. 16.1. Номограмма для определения $S_{\text{накл}}$ в зависимости от S_m и высоты h нижней границы облаков.

Для определения $S_{\text{накл}}$ в зависимости от метеорологической дальности видимости и высоты нижней границы облаков в практике работы аэропортов часто используется номограмма, приведенная на рис. 16.1.

Высота обнаружения ВПП определяется по формуле

$$H = \sin \beta S_{\text{накл}} = 0,05 S_{\text{накл}}. \quad (16.18)$$

Задачи

16.32. Определить $S_{\text{пос}}$ для самолета, приземляющегося днем при густой дымке и слабом дожде на мокрую ВПП, окруженную пожелтевшей травой. Значение S_m , измеренное регистратором прозрачности, составило 1500 м.

16.33. Решить задачу 16.32 при отсутствии осадков (ВПП сухая) и при той же S_m . Почему $S_{\text{пос}}$ стала больше; какие параметры изменились по сравнению с задачей 16.32?

16.34. Вычислить $S_{\text{пос}}$ для самолета, приземляющегося днем при дожде умеренной интенсивности 5,2 мм/ч на ВПП, окруженную молодой зеленой травой.

16.35. Решить задачу 16.34 при отсутствии дождя, но при прежней S_m . Почему увеличилась $S_{\text{пос}}$?

16.36. Вычислить $S_{\text{пос}}$ для самолета, приземляющегося днем зимой на ВПП, частично покрытую пятнами снега, если фоном ВПП является полностью заснеженное поле. По данным регистратора прозрачности $S_m = 2000$ м. В момент приземления самолета шел умеренный снег. Почему $S_{\text{пос}}$ получилась меньше, чем в задаче 16.32, несмотря на то, что S_m была больше? Какие параметры, влияющие на $S_{\text{пос}}$, изменились и как это сказалось на значении $S_{\text{пос}}$?

16.37. Решить задачу 16.36 при отсутствии выпадения снега. За счет чего $S_{\text{пос}}$ увеличилась при том же S_m ?

16.38. Как изменится $S_{\text{пос}}$ в задаче 16.36, если интенсивность выпадающего снега уменьшится до 0,2 мм/ч? Почему $S_{\text{пос}}$ остается такой маленькой, хотя S_m увеличилась до 5,23 км?

16.39. Определить $S_{\text{пос}}$ для самолета, приземляющегося днем на мокрую ВПП, окруженную ярко-зеленой травой, если в момент приземления осадки не выпадали и $S_m = 3$ км?

16.40. Решить задачу 16.39 для сухой ВПП. Почему $S_{\text{пос}}$ получилась больше, чем в предыдущей задаче? Почему $B_{\text{max}}/B_{\text{ВПП}}$ для мокрой ВПП больше, чем для сухой?

16.41. Снижение самолета происходило при облаках $S_{\text{ср.}}$ с высотой нижней границы 130 м. Метеорологическая дальность видимости равнялась 1100 м. В каком диапазоне значений будет находиться наклонная дальность видимости и высота обнаружения ВПП? Использовать номограмму, приведенную на рис. 16.1.

16.42. Определить диапазон значений наклонной дальности видимости и высоты обнаружения ВПП для летчика, снижающегося по глассе в облаках $St_{ор}$ с высотой нижней границы 100—150 м, если $S_m = 1400$ м. Использовать номограмму, приведенную на рис. 16.1.

16.34. Решить задачу 16.42, если высота нижней границы облаков уменьшилась до 50—100 м, а S_m — до 1200 м.

16.44. Сила света каждого из оранжевых огней светового горизонта ВПП составляет $1,3 \cdot 10^5$ кд. С какого расстояния увидит их пилот приземляющегося самолета ночью при S_m , равной 10, 5 и 1 км? Порог световой чувствительности для оранжевого огня считать средним арифметическим красного и желтого огней.

16.45. Сила света каждого красного ограничительного огня в конце ВПП равна $4,8 \cdot 10^4$ кд. На каком максимальном расстоянии увидит их летчик ночью при выпадении дождя, снизившего метеорологическую дальность видимости до 1,5 км?

16.46. Какую минимальную силу света должны иметь ночью белые групповые огни на аэродроме, чтобы обеспечить посадочную дальность видимости, необходимую для самолетов разных типов: не менее 500 м; 1; 1,5; 2 и 3 км, если метеорологическая дальность видимости в густой дымке равна 1 км.

16.47. Решить задачу 16.46 для тумана с метеорологической дальностью видимости 500 м. Использовать приложение 38. Учитывая максимальную силу света огней приближения и огней на ВПП, оценить значения $S_{пос}$, которые невозможно обеспечить при таких значениях S_m .

16.48. Днем при густой дымке, тумане или интенсивных осадках для обеспечения безопасности посадки самолетов включают огни высокой интенсивности. Определить минимальную силу света белых групповых огней днем в слабом тумане с $S_m \approx 1$ км, необходимую для обеспечения посадочной дальности видимости, требуемой для самолетов разных типов: не менее 500 м; 1; 1,5; 2 и 3 км. Решить по одной из номограмм (приложения 37—40). Сравнить с ответами к задаче 16.46. Существенно ли увеличивается минимальная требуемая сила света при переходе от ночных условий к дневным? Учитывая максимальную силу света огней приближения и огней на ВПП, оценить значения $S_{пос}$, которые невозможно обеспечить даже при такой S_m .

16.49. Решить задачу 16.48 для тумана с $S_m = 500$ м. Использовать приложение 40.

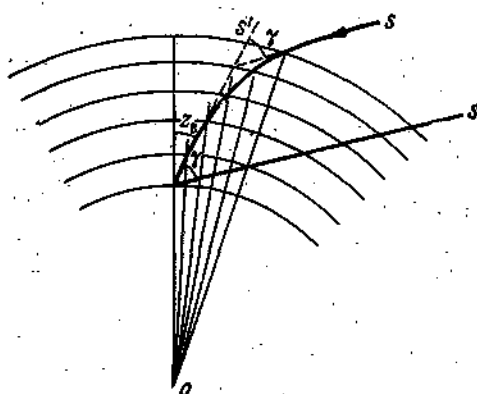
16.50. Вычислить, во сколько раз изменяется порог световой чувствительности глаза при переходе от дневного освещения с яркостью неба (фона) $40\,000$ кд/м² к ночному в безлунную ночь, когда яркость фона равна 4 кд/м². Во сколько раз надо увеличить силу света огней высокой интенсивности днем по сравнению с ночью, чтобы обеспечить то же самое значение посадочной дальности видимости?

РЕФРАКЦИЯ СВЕТА В АТМОСФЕРЕ

17.1. Астрономическая рефракция

Углом астрономической рефракции называется угол между направлением на действительное (S) и видимое (S') положение светила (рис. 17.1). Угол астрономической рефракции γ для зенитных расстояний светил не более 60° может быть вычислен по следующим формулам:

$$\gamma = 16,09 \frac{p}{T} \operatorname{tg} z_v, \quad (17.1)$$



где γ выражено в секундах дуги, p — давление (гПа), T — температура воздуха (К), z_v — видимое зенитное расстояние светила. При нормальном давлении (1013,2 гПа) и температуре воздуха 10°C

$$\gamma = 57'' \operatorname{tg} z_v. \quad (17.2)$$

В мореходной практике при любой высоте светил γ вычисляется по формуле

$$\gamma = \gamma_0 + \Delta\gamma_t + \Delta\gamma_p, \quad (17.3)$$

где γ_0 — угол астрономической рефракции при нормальном давлении и температуре воздуха 10°C (приложение 32), $\Delta\gamma_t$ и $\Delta\gamma_p$ — поправки к углу рефракции на температуру и давление в пункте измерения, отличающиеся от тех, для которых вычислено γ_0 (приложение 33).

Истинная высота светила h определяется по формуле

$$h = h_v - \gamma, \quad (17.4)$$

если измерения выполнены с поверхности Земли или

$$h = h_v - \gamma - n, \quad (17.5)$$

если измерения выполняются на некоторой высоте H над поверхностью Земли, например на палубе корабля. Здесь h_v — видимая

(кажущаяся) высота светила; n — наклонение видимого горизонта в угловых минутах:

$$n = 1,766 \sqrt{H}, \quad (17.6)$$

где H — высота наблюдателя (м).

Одним из следствий астрономической рефракции является увеличение продолжительности дня.

Продолжительность дня, т. е. промежуток времени между восходом Солнца (появлением над горизонтом верхнего края диска Солнца) и заходом Солнца (исчезновением под горизонтом его верхнего края), можно рассчитать как разность часовых углов Солнца (τ_0), соответствующих этим моментам восхода и захода Солнца, причем $\cos \tau_0$ вычисляется по формуле (5.4), а значения δ_0 и τ_0 определяются по приложениям 5 и 34. Высота центра Солнца h_0 в моменты видимого восхода и захода равна $-16'$ без учета рефракции и $-51'$ с учетом среднего значения угла рефракции.

Пример. Определим, на сколько удлинится день за счет рефракции на широте 80° 8 марта.

По приложению 5, $\delta_0 = -5^\circ$. Без учета рефракции

$$\begin{aligned} \cos \tau_0 &= \frac{\sin(-16') - \sin 80^\circ \sin(-5^\circ)}{\cos 80^\circ \cos(-5^\circ)} = \\ &= \frac{-0,00465 + 0,086}{0,173} = \frac{0,08135}{0,173} = 0,471. \end{aligned}$$

По приложению 34, Солнце восходит в 5 ч 49 мин и заходит в 18 ч 10 мин; продолжительность дня Δ_1 составляет 12 ч 21 мин.

С учетом рефракции

$$\cos \tau_0 = \frac{-0,0148 + 0,086}{0,173} = \frac{0,0712}{0,173} = 0,412.$$

Солнце восходит в 4 ч 23 мин и заходит в 19 ч 37 мин; продолжительность дня Δ_2 равна 15 ч 14 мин. Увеличение дня за счет рефракции $\Delta_2 - \Delta_1$ составляет 2 ч 46 мин.

Задачи

17.1. Вычислить истинную высоту звезды и поправку на рефракцию, если при наблюдении с палубы судна высотой 16 м над поверхностью воды измеренная высота звезды оказалась равной $31^\circ 21'$. Давление и температура воздуха в момент измерения составляли 1013,2 гПа и $20,5^\circ\text{C}$.

17.2. Как изменится поправка на рефракцию в предыдущей задаче, если давление и температуру воздуха в момент измерения будут равны 1035,0 гПа и -40°C ?

17.3. Для определения места нахождения судна в океане наблюдали момент прохождения звезды через меридиан места. Отсчет по вертикальному кругу теодолита в этот момент был равен $40^\circ 10'$; склонение звезды $20^\circ 25' 30''$; давление и температура

воздуха 1020,3 гПа и $-10,0^{\circ}\text{C}$. Вычислить широту, на которой находилось судно.

17.4. На антарктической станции Лита Америка ($78^{\circ}16'$ ю. ш.) 15 сентября давление и температура воздуха составляли 990,0 гПа и -55°C . Вычислить увеличение продолжительности дня за счет рефракции ($\Delta\gamma_t = 10'1'',3$). Использовать приложения 5, 32—34.

17.5. На сколько увеличивается день за счет рефракции в Ленинграде 23 декабря, если температура и давление воздуха в этот день -20°C и 1030 гПа? Использовать приложения 5, 32—34.

17.6. Решить задачу 17.5 для широты 88° для дня весеннего равноденствия: а) при среднем угле рефракции $36'$; б) при угле рефракции, соответствующем $t = -20^{\circ}\text{C}$ и $p = 1030$ гПа. За счет чего удлинение дня стало значительно больше, чем в задаче 17.5? На сколько удлиняется день только за счет изменения температуры и давления по сравнению с нормальными?

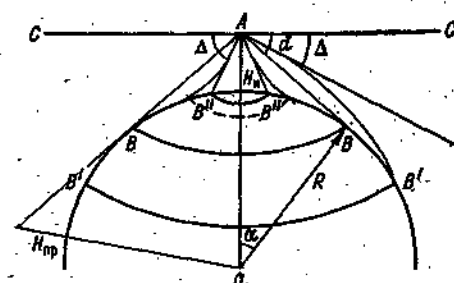
17.7. Температура струй воздуха, проходящих между звездой и глазом наблюдателя изменяется от -10 до 10°C . Давление воздуха 1035,2 гПа. На какой угол смещается звезда при мерцании, если ее высота над горизонтом равна $31^{\circ}30'$?

17.8. На сколько минут сплюсывается диск Солнца при заходе в летний день при температуре воздуха 30°C и давлении 980,0 гПа и в зимний день при температуре -20°C и давлении 1040,0 гПа?

17.9. В какое время года и где можно дольше всего видеть зеленый луч: на экваторе, в средних или в полярных широтах? Почему? Берду во время экспедиции к Южному полюсу однажды удалось наблюдать зеленый луч в течение 35 минут! В какое время года, суток и при каких метеорологических условиях это могло произойти?

17.2. Земная рефракция

Дальность видимого горизонта (км) определяется по формулам (рис. 17.2):



без учета рефракции

$$D_0 = 3,57 \sqrt{H_n}, \quad (17.7)$$

Рис. 17.2. Земная рефракция.

СС — математический горизонт, АВ — геометрический (геодезический) горизонт, $H_{пр}$ — высота предмета, H_n — высота наблюдателя, R — радиус Земли.

с учетом средней рефракции

$$D = AB' = 3,82 \sqrt{H_n}, \quad (17.8)$$

где H_n — высота глаза наблюдателя (м).

Дальность обнаружения горизонта лучом радиолокационной системы $D_{\text{РЛС}}$ (км) с учетом средней рефракции радиоволн определяется по формуле

$$D_{\text{РЛС}} = 4,08 \sqrt{H_{\text{РЛС}}}, \quad (17,9)$$

где $H_{\text{РЛС}}$ в метрах.

Геометрическая (геодезическая) дальность видимости предмета $D_{\text{пр}}$ (км) и дальность обнаружения предмета лучом РЛС $D_{\text{РЛС пр}}$ (км) с учетом средней рефракции запишутся соответственно в виде

$$D_{\text{пр}} = 3,82 (\sqrt{H_{\text{н}}} + \sqrt{H_{\text{пр}}}), \quad (17,10)$$

$$D_{\text{РЛС пр}} = 4,08 (\sqrt{H_{\text{н}}} + \sqrt{H_{\text{пр}}}), \quad (17,11)$$

где $H_{\text{н}}$ и $H_{\text{пр}}$ выражены в метрах.

Геодезическая депрессия горизонта d в градусах описывается выражением

$$d = 57,3 \sqrt{2H/R}. \quad (17,12)$$

Депрессия горизонта вследствие рефракции Δ вычисляется по формулам

$$d^2 - \Delta^2 = 2(n_{\text{в}} - n_{\text{н}}), \quad (17,13)$$

или

$$d^2 - \Delta^2 = 0,454 (\rho_0 - \rho_{\text{н}}), \quad (17,14)$$

где $n_{\text{в}}$ и $n_{\text{н}}$ — показатели преломления воздуха, а ρ_0 и $\rho_{\text{н}}$ — плотность воздуха соответственно у поверхности Земли и на высоте H .

Задачи

17.10. Где и во сколько раз геометрическая дальность видимости одного и того же предмета больше — на Земле или на Луне? На Земле или на Юпитере? Чему равнялась бы геометрическая дальность видимости любого предмета, если бы Земля стала плоской? Использовать приложение 21.

17.11. Вычислить радиус видимого горизонта для наблюдателя ростом 1,64 м.

17.12. На каком расстоянии от наблюдателя находится слой облаков *As cast.*, видимых у горизонта, если их средняя высота равна 4 км? Сколько баллов составляет метеорологическая дальность видимости в условиях данной задачи?

17.13. Высота нижней границы полярного сияния 120 км. С какого расстояния можно было бы его увидеть, если бы не было ослабления света в атмосфере?

17.14. Искусственное свечение натриевого облака в сумерки было создано с помощью специального устройства на ракете, выбросившей несколько килограммов натрия на высоте около 80 км. Желтый свет флюоресцирующего натриевого облака был хорошо

виден не только в месте запуска ракеты, но и, как утверждали наблюдатели метеостанций, на расстояниях до 500 км. Показать, возможно ли это.

17.15. Высота полета космического корабля «Союз-8» над земной поверхностью менялась в пределах от 205 км в перигее до 223 км в апогее. Вычислить геометрическую дальность видимости для космонавтов В. А. Шаталова и А. С. Елисеева при нахождении корабля в перигее и апогее.

17.16. Используя условия и результаты предыдущей задачи, определить минимальные размеры предметов на Земле, которые может увидеть космонавт в перигее и в апогее орбиты, если разрешающая способность глаза около $1'$ (ослабление света в атмосфере не учитывать). Можно ли увидеть с таких высот город; квартал домов в городе; такую реку, как Нева, ширина которой во многих местах превышает 250 м?

17.17. На сколько км расширяется и на сколько минут повышается горизонт за счет рефракции для наблюдателя, летящего в самолете на высоте 3 км, при следующих метеорологических условиях: у поверхности Земли $t = 20^\circ\text{C}$, $p = 1000$ гПа, на высоте 3 км $t = 2^\circ\text{C}$, $p = 700$ гПа?

17.18. Определить дальность обнаружения маяка с помощью радиолокационной системы и визуально, если высота маяка 30 м, а высота антенны РЛС или борта судна 16 м. Чем можно объяснить разницу в ответах?

17.19. Наблюдатель отчетливо увидел на горизонте берег острова с домами и строениями. Был ли это мираж или наблюдатель действительно видел остров, если расстояние до острова около 20 км, а высота строений на его берегу примерно 10 м? Если это был мираж, то какой — верхний или нижний? Над какими морями — теплыми или холодными — и в каких районах земного шара чаще всего наблюдаются такие миражи?

17.20. Летом 1918 г. на берегу Финского залива за Ораниенбаумом проф. П. И. Броунов часто наблюдал во второй половине дня миражи в виде прямых и перевернутых изображений о. Котлин с Кронштадтом, Толбухина маяка и противоположного берега Финского залива. Температура воды в заливе была $15\text{--}18^\circ\text{C}$, температура воздуха около $25\text{--}30^\circ\text{C}$. Какие это были миражи — верхние или нижние? При каком распределении плотности воздуха с высотой возникают эти миражи? Была ли в этот момент дальность видимого горизонта больше или меньше геодезической?

17.21. На внутриконтинентальной антарктической станции Восток средние месячные температуры воздуха и поверхности снега в декабре 1958 г. равнялись соответственно $-33,2$ и $-31,6^\circ\text{C}$. В течение этого месяца очень часто наблюдались миражи. Какого типа это были миражи? При каком распределении плотности воздуха с высотой они возникают? Поднятие или опускание видимого горизонта наблюдается в это время?

17.22. В один из июльских дней 1952 г. участники Пахта-Аральской экспедиции ГГО наблюдали мираж. Температура поверхно-

сти почвы на площадке в полупустыне в районе Ташкента была $45,2^{\circ}\text{C}$, температура воздуха $34,9^{\circ}\text{C}$. Какой это был мираж? Какой своей стороной — выпуклой или вогнутой — были обращены к земной поверхности световые лучи, создававшие этот мираж? Расширение или сужение видимого горизонта наблюдалось при этом?

17.23. Яков Санников, русский промышленник-зверобой, участвовал в исследовании группы Новосибирских островов. Весной 1911 г. с северного берега о. Котельный он увидел неизвестный гористый остров в Ледовитом океане, названный позднее Землей Санникова. Этот остров в данном месте океана также видел и даже зарисовал его контур Э. Толь. Однако, несмотря на последующие усиленные поиски Земли Санникова морскими и воздушными экспедициями, найти ее не удалось. По мнению ряда ученых, островом Санникова был мираж, который неоднократно появлялся в одном и том же месте. Если это так, то какого типа это был мираж? Мог ли существовать остров, изображение которого видели Санников и Толь?

17.24. В ранние утренние часы воздух над южной частью Желтевского озера довольно прохладный, так как эта часть озера, окруженного высокими гористыми берегами, находится в тени. В это время воздух над северной частью озера, берег которого уже сильно нагрет солнцем, оказывается значительно теплее. На озере часто наблюдается такой мираж: одновременно видны лодка и рядом ее изображение. По мере приближения лодки к берегу ее изображение с такой же скоростью удаляется от берега. К какому типу относится этот мираж? Как расположены при этом слои с одинаковой плотностью воздуха, в которых произошло внутреннее отражение лучей, создавших подобный мираж?

Глава 18

ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ОБЛАКАХ

18.1. Венцы

Зависимость между угловым радиусом θ_k темных колец в венцах и размером элементов облака выражается следующими формулами:

для жидкокапельных облаков

$$\sin \theta_k = (k + 0,22) \frac{\lambda}{2r}, \quad (18.1)$$

для кристаллических облаков

$$\sin \theta_k = \frac{k\lambda}{d}. \quad (18.2)$$

Здесь k — номер темного кольца ($k = 1, 2, 3$ и т. д.), r — радиус капель облака (мкм), d — толщина кристаллов облака (мкм), λ — длина волны условного «белого» света (среднее арифметическое красного ($\lambda = 0,70$ мкм) и синего ($\lambda = 0,45$ мкм) света), равная 0,57 мкм. Измерения размеров венцов делаются по четко очерченному красному краю любого кольца, считая, что сразу за ним и лежит минимум этого условного белого света.

Задачи

18.1. В темную безлунную ночь, когда все небо было покрыто пеленой тонких Cs, вокруг Марса и ярких звезд появились венцы в виде ореолов, радиусы красного края которых составляли $0^\circ 35'$. Вычислить толщину кристалликов в Cs.

18.2. Когда край гряды Ас закрыл диск Луны, вокруг Луны появился венец в виде ореола, окруженного еще двумя радужными кольцами. Радиус красного края наружного кольца был равен $4^\circ 30'$. Через некоторое время оба наружных кольца пропали и остался только ореол, радиус которого уменьшился до $2^\circ 20'$. Какой процесс происходит с капельками данного облака?

18.3. Кольцом Бишопа называли красновато-коричневый венец, появляющийся вокруг Солнца после интенсивных извержений вулканов. Радиус ореола достигал $22^\circ 30'$. Вычислить преобладающий размер вулканических пылинок, образовавших этот венец, если принять их: а) за кристаллики, б) за круговые диски одинакового размера. Кольцо Бишопа по своему размеру очень близко к кругу гало радиусом 22° . Как доказать, что это был венец, а не круг гало?

18.4. В ночь падения так называемого Тунгусского метеорита с 30 июня на 1 июля 1908 г. на небе в большом количестве появились серебристые облака. Кребсу удалось пронаблюдать дифракционное кольцо (кольцо Бишопа — см. предыдущую задачу) на серебристых облаках. Захваченные в 1962 г. специальным ракетным устройством аэрозольные частицы из слоя серебристых облаков оказались твердыми частицами (состоящими из железа и никеля), покрытыми быстро испаряющейся ледяной оболочкой. Размер твердых ядер этих частиц варьировал от 0,01 до 0,20 мкм. Каковы пределы изменений толщины ледяной оболочки аэрозольных частиц в серебристых облаках?

18.5. Преобладающий размер кристалликов в виде толстых шестиугольных пластинок в Cs составляет 200 мкм. Чему равен угловой радиус ореола, который может возникнуть за счет дифракции света вокруг таких пластинок? Можно ли такой венец наблюдать одновременно вокруг Луны, звезд или планет? Почему?

18.6. Яркая gloria, состоящая из нескольких концентрических радужных колец, появилась вокруг тени самолета, отброшенной на это облако. Определить радиус капелек облака, если угловой размер второго, красного, кольца был $5^\circ 11'$.

18.2. Радуги

Солнечный луч, проходя через дождевую каплю, испытывает два преломления (при входе и выходе из капли) и k внутренних отражений (рис. 18.1). Угол отклонения луча от первоначального направления описывается выражением

$$D_k = k\pi + 2[i - (k+1)r], \quad (18.3)$$

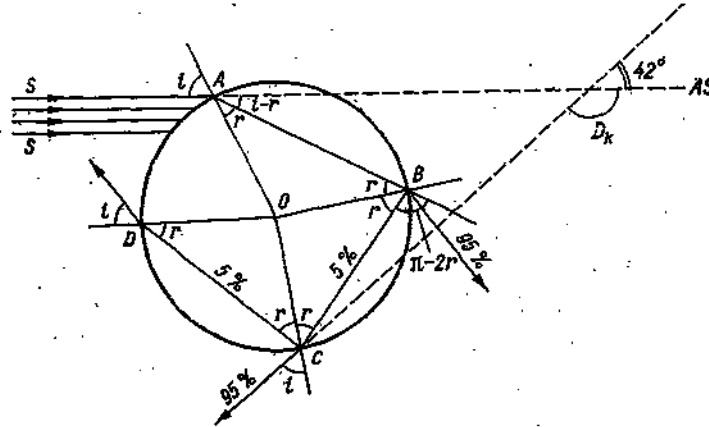


Рис. 18.1. Ход луча в капле дождя при образовании первой и второй радуг.

где i — угол падения луча на каплю, r — угол преломления.

Достаточную интенсивность для образования радуг имеют только лучи, испытавшие минимальное отклонение при прохожде-

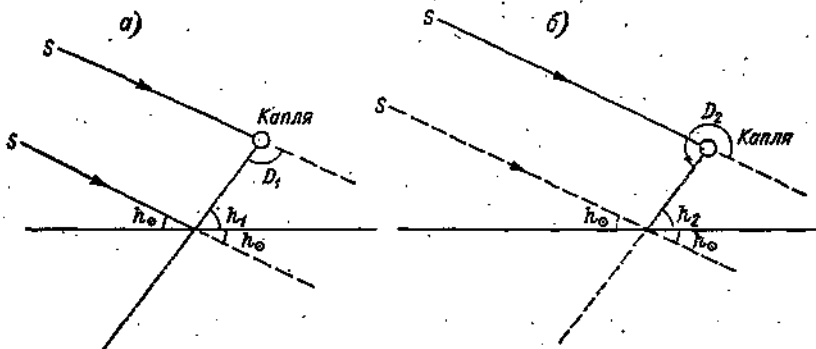


Рис. 18.2. Высота дуги первой (а) и второй (б) радуг над горизонтом.

нии капли. Угол падения и соответствующий ему угол преломления для таких лучей вычисляются по формулам

$$\sin^2 i = \frac{(k+1)^2 - n^2}{(k+1)^2 - 1}; \quad (18.4)$$

$$\sin i = n \sin r, \quad (18.5)$$

где n — показатель преломления воды; $k = 1, 2, 3, 4, \dots$ — число отражений луча внутри капли и одновременно номер (порядок) радуги.

Высота дуги первой h_1 и второй h_2 радуг над горизонтом, как видно из рис. 18.2, могут быть определены по формулам

$$h_1 = 180 - D_1 - h_{\odot}, \quad (18.6)$$

$$h_2 = D_2 - 180 - h_{\odot}. \quad (18.7)$$

Задачи

18.7. Где на небосводе появится радуга, образованная солнечными лучами, испытавшими в каплях дождя два внутренних отражения? Вычислить угловые радиусы красной и фиолетовой дуг, расположение цветов в радуге и высоту ее над горизонтом в момент восхода или захода Солнца. Использовать табл. 28 (приложение 41).

18.8. Решить задачу 18.7 для первой радуги.

18.9. Как изменится высота над горизонтом радуг, описанных в задачах 18.7 и 18.8, если Солнце поднялось на высоту 20° . Можно ли эти радуги видеть в любое время дня? Почему?

18.10. Какой была бы угловая ширина первой и второй радуг, описанных в задачах 18.7 и 18.8, если бы Солнце было точечным источником света? Определить, какова в действительности угловая ширина этих радуг, учитывая, что угловой диаметр Солнца равен $32'$. Использовать ответы задач 18.7 и 18.8. Какого цвета дуги окаймляют темную полосу на небосводе между второй и первой основными радугами, если капли выпадающего дождя крупные (мелкие)? Вычислить угловую ширину этой полосы.

18.11.* Вокруг какой точки на небесном своде должна располагаться радуга, образованная солнечными лучами, испытавшими в каплях дождя k внутренних отражений? Вычислить угловой радиус дуги заданного света. Варианты исходных данных см. табл. 28 (приложение 41).

18.12. Около водопадов и фонтанов случалось видеть редкие виды радуг — радуги вокруг Солнца. Нарисуйте возможные дуги прохождения солнечных лучей через капли дождя при образовании таких радуг. Почему эти радуги видны очень редко? При каком числе отражений внутри капли появляются радуги, центром которых является: а) источник света; б) точка, диаметрально противоположная источнику света?

18.13. Определить угловые радиусы красной и фиолетовой дуг, угловую ширину и расположение цветов в радуге редкого вида, описанной в предыдущей задаче. Сделать расчет для $k = 3$. На какую часто наблюдаемую радугу похожа эта необычная радуга? Чем она отличается от нее? Использовать табл. 28 (приложение 41).

18.3. Гало

Для солнечных или лунных лучей, прошедших через кристалл (ледяную призму) и испытавших минимальное отклонение $D_{\min}$ от своего первоначального направления распространения, выполняется соотношение (рис. 18.3)

$$\sin\left(\frac{D_{\min} + A}{2}\right) = n \sin \frac{A}{2}, \quad (18.8)$$

где n — показатель преломления льда, A — преломляющий угол кристалла.

Для лучей, испытавших максимальное отклонение $D_{\max}$ после прохождения призмы, выполняется соотношение

$$\sin(D_{\max} + A - 90) = n \sin(A - R), \quad (18.9)$$

$$n \sin R = 1,$$

где R — угол преломления, соответствующий тому углу падения, при котором лучи испытывают максимальное отклонение.

Если лучи падают на кристалл наклонно, образуя с его главной осью угол падения h , а κ — соответствующий ему угол преломления, то формулы (18.8) и (18.9) записываются в виде

$$\sin\left(\frac{D_{\min} + A}{2}\right) = n \frac{\cos \kappa}{\cos h} \sin \frac{A}{2}, \quad (18.10)$$

$$\sin(D_{\max} + A - 90) = n \frac{\cos \kappa}{\cos h} \sin(A - R), \quad (18.11)$$

$$n \sin R = 1.$$

Углы h и κ связаны между собою соотношением

$$\sin h = n \sin \kappa. \quad (18.12)$$

Задачи

18.14.* Солнечные лучи проходят через слой тонких облаков Cs, состоящих преимущественно из кристаллов в виде правильных удлиненных ледяных столбиков. Для таких кристаллов наиболее типична горизонтальная ориентация главных осей. Где на небе и какого вида гало может появиться в момент восхода или захода Солнца, если его лучи входят в боковые грани кристаллов и выходят также через боковые грани, отсчитанные через одну от первых. Вычислить, на каком минимальном угловом расстоянии

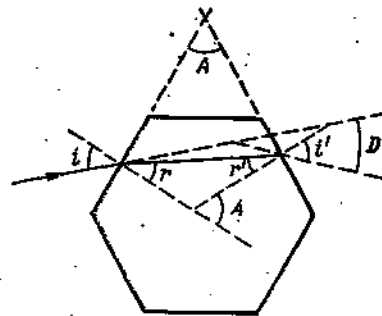


Рис. 18.3. Ход луча в ледяной призме.

от Солнца будет находиться красный край паргелия? Использовать табл. 29, варианты 1—3 (приложение 41).

18.15. Решить задачу 18.14 для случаев, когда главные оси кристаллов расположены: а) вертикально, б) хаотично. Какое из гало, описанных в настоящей и предыдущей задачах, наблюдается наиболее часто и почему? Определить для этого вида гало угловой радиус красного и фиолетового краев, угловую ширину и расположение цветов. Использовать табл. 29 (приложение 41).

18.16.* Решить задачу 18.14 для гало, образованного солнечными лучами, которые входили в основания кристаллов, а выходили через боковые грани. Использовать табл. 29, варианты 16—18 (приложение 41).

18.17. Решить задачу 18.15 для преломляющего угла ледяных кристаллов 90° .

18.18.* Каким будет угловой радиус круга гало 22° (или 46°), если Солнце поднимется над горизонтом на 10° . Расчет выполнить для лучей красного цвета. Использовать табл. 29, варианты 4—15, 19—27 (приложение 41).

18.19. Куда обращены и на какое угловое расстояние от ложных солнц простираются их «хвосты»? Вычислить максимальное отклонение лучей и длину хвостов ложных солнц для среднего показателя преломления световых лучей ($n = 1,31$). Почему хвосты ложных солнц белые, т. е. не имеют радужной окраски, как сами ложные солнца?

Глава 19

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АТМОСФЕРЫ

19.1. Ионы в атмосфере. Ионная проводимость воздуха

Уравнение баланса легких ионов в идеально чистом воздухе при равной концентрации положительных и отрицательных легких ионов ($n_+ = n_- = n$) записывается в виде

$$dn/dt = q - \alpha n^2, \quad (19.1)$$

где n_+ и n_- — концентрация положительных и отрицательных легких ионов; q — интенсивность ионизации (число пар ионов, создаваемых за 1 с в 1 м³, с⁻¹·м⁻³); α — коэффициент рекомбинации (воссоединения) легких ионов противоположного знака. При нормальных метеорологических условиях в чистом воздухе $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-6}$ см³/с = $1,6 \cdot 10^{-12}$ м³/с.

При установлении ионизационного равновесия концентрация легких ионов не изменяется, поэтому

$$dn/dt = 0 \text{ и } q = \alpha n^2, \quad (19.2)$$

откуда

$$n = \sqrt{q/a}. \quad (19.3)$$

Время жизни легкого иона определяется по формуле

$$\tau = n/q = 1/an. \quad (19.4)$$

После прекращения действия ионизаторов ($q = 0$) концентрация легких ионов уменьшается со временем по закону

$$n_t = \frac{n_0}{1 + an_0 t}, \quad (19.5)$$

где n_0 — начальная концентрация легких ионов.

Уравнение баланса легких ионов в реальной запыленной атмосфере имеет вид

$$dn/dt = q - \beta n, \quad (19.6)$$

где β — коэффициент рассеяния (исчезновения) легких ионов; β зависит от концентрации легких и тяжелых ионов и нейтральных ядер. Среднее значение β колеблется в пределах $(1-30) \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$.

При установлении ионизационного равновесия ($dn/dt = 0$):

$$q = \beta n, \text{ т. е. } n = q/\beta. \quad (19.7)$$

Время жизни легкого иона в запыленной атмосфере

$$\tau = n/q = 1/\beta. \quad (19.8)$$

Концентрация легких ионов при $q = 0$ убывает по экспоненциальному закону:

$$n_t = n_0 e^{-\beta t}. \quad (19.9)$$

Скорость установившегося движения легких ионов u в электрическом поле напряженностью E описывается выражением

$$u = \omega E, \quad (19.10)$$

где ω — подвижность ионов.

Ионная проводимость воздуха λ , обусловленная движением легких ионов (с концентрациями n_+ и n_-) и тяжелых ионов (с концентрациями N_+ и N_-), определяется по формуле

$$\lambda = en_+\omega_+ + en_-\omega_- + eN_+W_+ + eN_-W_- = \lambda_+ + \lambda_-. \quad (19.11)$$

Здесь e — заряд легкого или тяжелого иона, равный $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, W_+ и W_- — подвижности тяжелых ионов; λ_+ и λ_- — так называемые полярные проводимости.

Проводимость и число ионов измеряют с помощью цилиндрических конденсаторов с принудительной аспирацией воздуха. Начальный потенциал V_0 внутреннего электрода, соединенного с элек-

трометром, по истечении t секунд аспирации уменьшается до V_t . Проводимость рассчитывается по формуле

$$\lambda = \frac{(c + c_0) \varepsilon_0}{ct} \ln \frac{V_0}{V_t}, \quad (19.12)$$

где c и c_0 — емкости конденсатора и электрометра, ε_0 — электрическая постоянная, равная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м. Коэффициент рассеяния заряда с изолированного проводника $a_{\pm}$ и число легких ионов n вычисляются по формулам

$$a_{\pm} = 4\pi\lambda_{\mp}, \quad (19.13)$$

$$n = \frac{c + c_0}{e\Phi t} (V_0 - V_t), \quad (19.14)$$

где Φ — объем воздуха, просасываемый через конденсатор в единицу времени.

Время установления ионизационного равновесия (время релаксации $T_{\text{рел}}$) определяется в виде

$$T_{\text{рел}} = \varepsilon_0 / \lambda. \quad (19.15)$$

Задачи

19.1. Концентрация легких ионов над океаном равна $4 \cdot 10^8$ пар ионов в 1 м^3 . Вычислить интенсивность ионизации, при которой устанавливается ионизационное равновесие в чистом воздухе. Сколько пар ионов воссоединяется в 1 м^3 каждую секунду? Если концентрация ионов будет больше (меньше) $4 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$, то большее или меньшее число пар ионов должны создавать ионизаторы для поддержания ионного равновесия? Как изменяется скорость рекомбинации легких ионов при возрастании (уменьшении) концентрации легких ионов?

19.2. Вычислить время жизни легкого иона в чистом воздухе, если концентрация ионов равна $4 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$. Как и за счет каких процессов изменяется время жизни легкого иона, если концентрация легких ионов возрастает (убывает)? Будут ли присутствовать, кроме легких ионов, также тяжелые ионы и нейтральные ядра?

19.3. Определить время жизни легкого иона в запыленном воздухе городского здания, когда постоянная рассеяния легких ионов β равна предельному значению $30 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$. Оценить диапазон изменения времени жизни легкого иона в зависимости от степени загрязнения воздуха, если β изменяется в пределах $(1-30) \times 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$.

19.4. Через какой промежуток времени число легких ионов в изолированном объеме уменьшится в 2 раза только за счет рекомбинации их друг с другом, если в начальный момент концентрация ионов каждого знака составляла $3 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$?

19.5. Решить задачу 19.4 для случая запыленного воздуха, в котором коэффициент исчезновения легких ионов равен $3 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$. Сравнить с ответом задачи 19.4.

19.6. Над океаном в 1 м^3 воздуха содержится $6,5 \cdot 10^8$ положительных и $5 \cdot 10^8$ отрицательных легких ионов. Их средние подвижности равны соответственно $1,3 \cdot 10^{-4}$ и $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Определить: полярные проводимости, общую проводимость воздуха, удельное сопротивление воздуха над океаном. Во сколько раз воздух как изолятор хуже янтаря, если удельное сопротивление янтаря $5 \cdot 10^{14} \text{ См} \cdot \text{м}$. Почему над поверхностью океана больше положительных ионов, чем отрицательных?

19.7. Вычислить общую проводимость воздуха над сушей, а также проводимости, создаваемые движением легких и тяжелых ионов в отдельности и их доли (%) от общей проводимости. Концентрации ионов над сушей: $n_+ = 7 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$ и $n_- = 5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$; $N_{\pm} = 8 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$. Подвижности ионов: $w_+ = 1,35 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; $w_- = 1,83 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $W_{\pm} = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

19.8. Известно, что подвижность ионов зависит, помимо других факторов, также от атмосферного давления. Оцените изменение подвижности ионов и проводимости воздуха при замене циклона с давлением в центре 950 гПа антициклоном с давлением 1070 гПа.

19.9. Вычислить полярную проводимость и коэффициент рассеяния положительного заряда, которые измерялись аспирационным методом. Внутренний электрод цилиндрического конденсатора был заряжен положительно до потенциала 160 В. За 10 мин просасывания воздуха потенциал уменьшился вдвое. Емкости цилиндрического конденсатора и электрометра равны соответственно $1,2 \cdot 10^{-11}$ и $0,5 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}$.

19.10. Концентрация ионов измерялась с помощью счетчика ионов. Внутренний электрод счетчика ионов сначала был заряжен отрицательно до потенциала 200 В. За 10 мин аспирации потенциал уменьшился до 180 В. Затем прибор перезарядили положительно до 240 В и через 10 мин аспирации потенциал уменьшился до 230 В. Скорость аспирации счетчика ионов $0,35 \text{ м}^3$ воздуха в минуту; емкости конденсатора и электрометра соответственно $2,15 \cdot 10^{-11}$ и $2,80 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}$. Определить концентрацию ионов каждого знака и заряды единицы объема воздуха.

19.11. Тяжелый атмосферный ион массой $5 \cdot 10^{-19} \text{ г}$ находится в вертикальном электрическом поле напряженностью 120 В/м. В каком соотношении находятся вес иона и кулонова сила, действующая на ион со стороны электрического поля?

19.12. По теории Ланжевена, подвижность ионов пропорциональна отношению заряда к массе. Какова подвижность электрона, если при условиях предыдущей задачи подвижность легкого иона, состоящего из 10 молекул воды, равна $1,35 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$?

19.13. Какой должна быть интенсивность ионизации, чтобы обеспечить постоянную концентрацию легких ионов обоих знаков, равную 500 см^{-3} ? Прилипанием ионов к нейтральным частицам пренебречь.

19.14. Какой должна быть концентрация нейтральных ядер, чтобы обеспечить постоянную концентрацию легких ионов, равную 300 см^{-3} , при интенсивности ионизации $10 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$?

19.15. Концентрации легких ионов и нейтральных ядер в момент прекращения действия ионизатора равны соответственно 400 и 2000 см^{-3} . За какое время число легких ионов уменьшится в 100 раз только за счет прилипания?

19.16. За какое время число легких ионов уменьшится в 100 раз только за счет рекомбинации при условиях предыдущей задачи? Сравните эффективность рекомбинации и прилипания.

19.17. Самолетные измерения Краакевича над Гренландией позволили представить электропроводность воздуха как функцию высоты:

$$\lambda(z) = 2,72 \cdot 10^{-14} \exp\left(\frac{z-6}{3,5}\right),$$

где z — высота (км). Какова электропроводность на высоте 40 км ? Сравнить полученное значение с электропроводностью морской воды, равной $3,3 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

19.18. Вертикальный профиль проводимости воздуха приближенно можно описать экспонентой $\lambda(z) = \lambda_0 \exp(\alpha z)$, где $\lambda_0 = 2 \cdot 10^{-14} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, z — высота (км), $\alpha = 0,4 \text{ км}^{-1}$. Каково удельное сопротивление всей тропосферы (средняя высота 11 км)?

19.19. По условиям предыдущей задачи рассчитать общее для всей Земли сопротивление слоя, расположенного между тропосферой и земной поверхностью. Площадь поверхности земного шара $510 \cdot 10^6 \text{ км}^2$.

19.20. Определить время релаксации электрического состояния атмосферы, если концентрация ионов обоих знаков 300 см^{-3} , а их подвижность $2 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$?

19.21. Сравнить время релаксации атмосферы у поверхности Земли и на нижней границе области E ионосферы (100 км), если проводимость воздуха на этих уровнях соответственно $2 \cdot 10^{-14}$ и $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$.

19.22. С какой скоростью движутся легкие ионы в электрическом поле у поверхности Земли в Ленинграде зимой, когда напряженность поля равна 250 В/м , а средние значения подвижностей ионов $w_+ = 1,35 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ и $w_- = 1,83 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Сравнить скорость ионов и вертикальную скорость воздуха при тепловой и динамической конвекции?

19.23. Какой должна быть напряженность электрического поля, чтобы скорость движения легких ионов достигла примерно 8 м/с ? Наблюдаются ли в атмосфере такие поля? При каких условиях? Среднюю подвижность ионов принять равной $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

19.24. Решить задачу 19.22 для тяжелых ионов, если их подвижность равна $2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

19.25. По теории Ланжевена, подвижность иона обратно пропорциональна его массе. Во сколько раз будут различаться скорости движения в электрическом поле иона радиусом 10^{-8} м и облачной капли радиусом 10 мкм ?

19.26. На основании ответов задач 19.2, 19.22 и 19.24 вычислить, как далеко от места своего возникновения успеют уйти легкие

ионы за время их жизни? В каком направлении будут перемещаться ионы каждого знака в нормальном электрическом поле у поверхности Земли? На какое расстояние за это же время уйдут тяжелые ионы?

19.2. Ионизаторы атмосферы

Основными ионизаторами приземного слоя воздуха являются излучения радиоактивных веществ, содержащихся в атмосфере и земной коре, и космические лучи. Важную роль играет также ионизация при разрядах молний и при возникновении «токов с острий», хотя эти процессы кратковременны и происходят в ограниченных участках атмосферы. В верхней тропосфере и стратосфере космические лучи становятся практически единственным источником ионизации, а в ионосфере ведущая роль в ионизации переходит к ультрафиолетовому, рентгеновскому и корпускулярному излучениям Солнца.

Энергия, необходимая для ионизации (*работа ионизации*) U , измеряется в электронвольтах (эВ) и определяется по формуле

$$U = eV, \quad (19.16)$$

где V — потенциал ионизации, e — заряд электрона (приложение 1 и 22).

При ионизации за счет фотоэлектрического эффекта (*фотоионизация*):

$$h\nu \geq U, \text{ т. е. } h\nu \geq eV. \quad (19.17)$$

Здесь h — постоянная Планка (приложение 1).

При ионизации за счет кинетической энергии быстро летящей частицы (*ударная ионизация*)

$$mv^2/2 \geq eV, \quad (19.18)$$

где m и v — масса и скорость частицы, совершающей работу ионизации.

Ионизирующая способность частицы или кванта энергии (фотона) — число пар ионов, создаваемых на 1 см пробега.

Ионизационные потери — средняя энергия, расходуемая ионизатором на образование одной пары ионов.

Постоянная радиоактивного распада λ^* связана с периодом полураспада $T_{1/2}$ соотношением

$$T_{1/2} = 0,693/\lambda^*. \quad (19.19)$$

Длина пробега α -частицы в воздухе R_α при нормальных метеорологических условиях рассчитывается по формуле

$$R_\alpha = 9,8 \cdot 10^{-28} v_\alpha^2, \quad (19.20)$$

где R_α выражено в сантиметрах, а v_α — начальная скорость α -частицы (см/с).

Частицы космических лучей и β -частицы радиоактивного распада, обладая очень высокими энергиями, движутся со скоростями, приближающимися к скорости света. Поэтому правильно оценить их характеристики (массу, время жизни, путь в атмосфере) можно только с учетом теории относительности, основные формулы которой приводятся ниже.

Зависимость массы движущегося тела m от кинетической энергии T , которой оно обладает, и от массы покоя этого тела m_0 выражается в виде

$$m = m_0 + T/c_0^2, \quad (19.21)$$

где c_0 — скорость электромагнитных волн в пустоте.

Зависимость массы движущегося тела m от скорости движения v описывается формулой

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c_0^2}}. \quad (19.22)$$

Длина l тела, движущегося со скоростью v относительно некоторой системы отсчета, связана с длиной l_0 тела, неподвижного в этой системе, соотношением

$$l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c_0^2}. \quad (19.23)$$

Промежуток времени Δt в системе, движущейся со скоростью v по отношению к наблюдателю, связан с промежутком времени Δt_0 в системе, неподвижной для наблюдателя, соотношением

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2/c_0^2}}. \quad (19.24)$$

Полная энергия тела или системы равна

$$\Phi = mc_0^2, \text{ откуда } m = \Phi/c_0^2. \quad (19.25)$$

Формула (19.25) является общим законом, связывающим массу тела (системы) с энергией. Из нее следует, что всякое изменение энергии ведет к изменению массы тела, и наоборот. Величина $\sqrt{1 - v^2/c_0^2}$, входящая в формулу (19.22) — (19.24), называется *релятивистской поправкой*.

Задачи

19.27. Вычислить скорость движения и ионизирующую способность α -частицы, вылетающей при распаде атомов радия, а также общее число пар ионов, создаваемых ею на всем пути пробега, если при нормальных условиях у поверхности Земли длина ее пробега в воздухе равна 3,26 см, кинетическая энергия 5,0 МэВ, ионизационные потери 36,6 эВ, масса α -частицы $6,653 \cdot 10^{-24}$ г.

19.28. Решить задачу 19.27 для α -частиц, образующихся при радиоактивном распаде ядер атомов тория С. Эти α -частицы характеризуются максимальной кинетической энергией, достигающей 8,95 МэВ. Путь пробега их в воздухе при нормальных метеорологических условиях составляет 8,7 см, а ионизационные потери 34,6 эВ.

19.29. Частицы, выбрасываемые при β -распаде ядер атомов тория С, имеют следующие характеристики: кинетическая энергия

10 МэВ, длина пробега в воздухе около 30 м, ионизационные потери 36,0 эВ; масса покоя электрона $9,11 \cdot 10^{-28}$ г. Вычислить: а) отношение скорости таких частиц к скорости света; б) относительное увеличение их массы $((m - m_0)/m_0)$ при движении с такой скоростью; в) общее число пар ионов, создаваемых β -частицей на всем пути пробега; г) ионизирующую способность. Сравните полученные ответы с ответами к задаче 19.27. Какая из частиц радиоактивного распада (α или β) обладает большей ионизирующей способностью? Большей проникающей способностью?

19.30. Решить задачу 19.29 для электронов, образующихся при β -распаде, если они обладают минимальной кинетической энергией 15 КэВ, длина их пробега в воздухе около 2 м. Имеет ли смысл применять к движению таких частиц формулы теории относительности?

19.31. Максимальная кинетическая энергия α -частиц, образующихся при радиоактивном распаде достигает 10 МэВ. Вычислить путь ее пробега в воздухе при нормальных условиях, отношение массы движения к массе покоя, скорость частицы в долях от скорости света и в м/с. Имеет ли смысл вводить релятивистскую поправку, чтобы охарактеризовать движение любой α -частицы?

19.32. Вычислить периоды полураспада трех радиоактивных эманаций, играющих важную роль в ионизации воздуха в нижней тропосфере: радона, торона и актинона, если их постоянные радиоактивного распада равны соответственно $2,097 \cdot 10^{-6}$; $1,270 \cdot 10^{-2}$ и $0,177$ с $^{-1}$. Какая из этих эманаций играет главную роль в ионизации воздуха и почему?

19.33. Средняя интенсивность ионизации космическими частицами у поверхности Земли равна $1,8 \cdot 10^6$ с $^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$, а радиоактивными ионизаторами, которые практически ионизируют воздух только над сушей, около 10^7 с $^{-1} \cdot \text{м}^{-3}$. Если бы воздух был идеально чистым, то какой была бы концентрация легких ионов над океаном и над сушей? В действительности же концентрация легких ионов над океаном только немного меньше, чем над сушей, несмотря на то что интенсивность ионообразования над океаном в 5 раз меньше, чем над сушей. Чем это можно объяснить?

19.34. Средние концентрации легких ионов над океаном и над сушей составляют $4 \cdot 10^8$ и $5 \cdot 10^8$ пар ионов в 1 м 3 . Используя данные об интенсивности ионообразования над океаном и над сушей из предыдущей задачи, вычислить реальные коэффициенты рассеяния (исчезновения) легких ионов над океаном и сушей. Почему скорость исчезновения легких ионов над сушей так велика?

19.35. Определить, каким могло бы быть время жизни легкого иона над сушей и над океаном, если бы воздух был идеально чистым? Какова действительная продолжительность жизни легкого иона в реальном запыленном воздухе? Использовать ответы к задачам 19.33 и 19.34.

19.36. Средняя кинетическая энергия первичных протонов космических лучей равна 10^9 эВ. Вычислить скорость этих протонов в м/с и в долях от скорости света. Как и во сколько раз изменя-

ется масса протонов при движении с такой скоростью по сравнению с их массой покоя?

19.37. Максимальная зарегистрированная энергия первичных протонов в космических лучах достигала 10^{20} эВ. Решить задачу 19.36 для таких протонов.

19.38. Мюоны (μ -мезоны), в основном составляющие жесткую компоненту космических лучей, расходуют свою энергию главным образом на ионизацию тропосферного воздуха. Их масса покоя в 206,76 раза больше массы покоя электрона (см. приложение 1), время жизни в покое $2,21 \cdot 10^{-6}$ с. Мюоны наблюдались даже в глубоких шахтах и под водой до глубины 1000 м. Возникают же они в атмосфере на высотах 10 км и более. Вычислить путь, который мюон мог бы пройти, двигаясь даже со скоростью света (без учета релятивистской поправки); время жизни мюона в движении по часам наблюдателя на Земле; путь, который мюон пройдет за это время, если его кинетическая энергия $1,5 \cdot 10^9$ эВ. Успеет ли мюон достичь земной поверхности?

19.39. Решить задачу 19.38 для мюона, кинетическая энергия которого достигла 10^{12} эВ. Во сколько раз увеличиваются время жизни такой частицы и ее путь в атмосфере?

19.40. Время жизни в покое π -мезона, входящего в состав жесткой компоненты космических лучей, равно $1,22 \cdot 10^{-8}$ с. На сколько процентов скорость π -мезона отличается от скорости света? Во сколько раз увеличивается время жизни этого мезона в движении (по часам наблюдателя на Земле), если его полная энергия в 10 раз больше энергии покоя? Какой путь пройдет π -мезон от места своего возникновения? Почему его путь так короток, хотя время жизни увеличилось в 10 раз?

19.41. Из условий предыдущей задачи определить, во сколько раз уменьшается длина мезона при его движении с такой скоростью?

19.42. Как и во сколько раз изменяются: а) время жизни; б) путь в атмосфере; в) масса; г) длина любой элементарной частицы, если скорость ее движения составляет 0,955 скорости света?

19.43. Основным ионизатором воздуха в ионосфере являются ультрафиолетовое и рентгеновское излучения Солнца. Вычислить максимальные длины волн, энергия квантов которых достаточна для фотоионизации основных газов, составляющих воздух на этих высотах: O_2 , O, N_2 , N, H_2 , H, NO. Какой из перечисленных газов легче всего ионизируется? Обычно ионизация в атмосфере происходит ступенчатым путем. Какие кванты — с большей или меньшей длиной волны — могут совершать ступенчатую ионизацию? Использовать приложение 22.

19.44. Вычислить минимальные скорости электронов, при которых их энергия достаточна для ударной ионизации газов, перечисленных в приложении 22. Каково происхождение электронов, движущихся в атмосфере с такими или большими скоростями? Использовать приложение 1.

19.45. Как и во сколько раз изменятся ответы к предыдущей задаче, если ударная ионизация будет совершаться протонами? Имеются ли в атмосфере потоки таких энергичных протонов?

19.46. Квазинейтральный поток солнечного ветра, состоящий из протонов и электронов, выброшенных из областей солнечных пятен, достигает земной атмосферы и вызывает полярные сияния спустя 15—30 ч после прохождения пятна или группы пятен через центральный солнечный меридиан. С какой скоростью летят наиболее быстрые и наиболее медленные протоны и электроны? Обладают ли они достаточной скоростью для совершения ударной ионизации атмосферных газов? Сравните полученные ответы с ответами к задачам 19.44 и 19.45. Использовать приложения 21 и 22.

19.47. Вычислить максимальную энергию (эВ) протонов и электронов солнечного ветра и сравнить ее со средней энергией протонов космических частиц (задача 19.36). Использовать ответы к предыдущей задаче.

19.3. Ионосфера

Поскольку основные области ионосферы можно считать квазинейтральной плазмой, то концентрация положительных ионов в ионосфере n_+ равна концентрации электронов N . Поэтому при установлении динамического равновесия между интенсивностью образования электронов q и числом электронов, рекомбинирующих с положительными ионами в единицу времени, можно записать аналогично (19.3)

$$N = \sqrt{q/\alpha}, \quad (19.26)$$

где N и α — наблюдаемые на данном уровне электронная концентрация и коэффициент рекомбинации электронов. После прекращения действия ионизаторов концентрация электронов убывает со временем по закону, аналогичному (19.5),

$$N_t = \frac{N_0}{1 + \alpha N_0 t}, \quad (19.27)$$

где N_0 и N_t — электронные концентрации в начальный момент времени и по истечении времени t .

Электронная концентрация N (м^{-3}) на данном уровне связана с критической частотой радиоволны $f_{\text{кр}}$ (Гц), направленной вертикально и испытывающей отражение на данном уровне, соотношением

$$N = \frac{4\pi^2 \epsilon_0 m}{e^2} f_{\text{кр}}^2 = 1,24 \cdot 10^{-2} f_{\text{кр}}^2, \quad (19.28)$$

где e и m — заряд и масса электрона, ϵ_0 — электрическая постоянная (см. приложение 1). Из 19.28 следует, что

$$f_{\text{кр}} = \sqrt{80,7N}. \quad (19.29)$$

Высота h слоя ионосферы, от которого произошло отражение радиоволны, определяется по формуле

$$h = c_0 \Delta t / 2, \quad (19.30)$$

где c_0 — скорость радиоволны в вакууме, Δt — промежуток времени между моментами выпуска радиоволны и приема отраженного сигнала.

Удельная электропроводность ионосферы λ (См/м)

$$\lambda = 7,12 \cdot 10^{-7} \frac{N\eta}{f_{кр}^2}, \quad (19.31)$$

где η — число столкновений электрона за 1 с.

Для радиоволны, падающей на ионосферу наклонно под углом падения i , соотношения между N (м⁻³) и $f_{кр}$ (Гц) запишутся в виде

$$N = \frac{4\pi^2 \epsilon_0 m (1 - n^2)}{e^2} f_{кр}^2 = 1,24 \cdot 10^{-2} (1 - n^2) f_{кр}^2, \quad (19.32)$$

$$f_{кр} = \sqrt{\frac{80,7}{1 - n^2}} N, \quad (19.33)$$

где n — показатель преломления в месте отражения радиоволны:

$$n = \sin i = c_0 / c, \quad (19.34)$$

c_0 и c — скорость радиоволн в вакууме и в ионосфере (фазовая скорость) на уровне с электронной концентрацией N .

Задачи

19.48. Через какое время после захода Солнца концентрация электронов в области D уменьшится в 100 раз, если перед заходом она составляла $5 \cdot 10^2$ см⁻³, а коэффициент рекомбинации электронов с ионами $8 \cdot 10^{-6}$ см³/с. Учитывая, что плотность воздуха в области D достаточно велика (10^{14} — 10^{15} молекул в 1 см³), ответьте на вопрос, будет ли оставшаяся концентрация электронов больше или меньше полученной при решении задачи? Сохраняется ли область D ночью?

19.49. Решить задачу 19.48 для области E летом, когда электронная концентрация перед заходом Солнца равна $6 \cdot 10^4$ см⁻³, а $\alpha = 2 \cdot 10^{-8}$ см³/с. Пропадает ли эта область ночью, как область D , несмотря на то что концентрация электронов и ионов в ней на два порядка больше, чем в области D ? Почему?

19.50. Концентрация электронов в областях F_1 и F_2 летом перед заходом Солнца составляла $2 \cdot 10^5$ и $2 \cdot 10^6$ см⁻³, коэффициенты рекомбинации ночью $4 \cdot 10^{-9}$ и $3 \cdot 10^{-11}$ см³/с. На сколько процентов

уменьшится концентрация электронов в этих областях через 6 ч после захода Солнца?

19.51.* Радиосигнал с частотой $4,02 \cdot 10^6$ Гц был направлен вертикально вверх ночью (или днем) радиоустановкой ионосферной станции и был принят назад через $1,14 \cdot 10^{-3}$ с. Определить: высоту слоя в ионосфере, в котором произошло отражение радиосигнала; концентрацию электронов в месте отражения; название этой области ионосферы; длину волны радиосигнала, отразившегося от этой области; длины волн, на которых можно осуществлять наземную радиосвязь с помощью этой области; длины волн, на которых можно было бы осуществлять связь с межпланетными космическими кораблями, если бы выше области ионосферы, от которой отразился радиосигнал, не имелось областей с более высокой концентрацией электронов? Варианты исходных данных см. табл. 30 (приложение 41).

19.52. Определить электронную концентрацию в области E днем и ночью и вычислить минимальные длины волн, на которых может осуществляться радиосвязь с помощью этой области днем и ночью, если критические частоты изменяются от $6,0 \cdot 10^6$ Гц днем до $6,4 \cdot 10^5$ Гц ночью.

19.53. Область D , хорошо отражая длинные и сверхдлинные радиоволны, образует вместе с земной поверхностью сферический волновод, в котором эти радиоволны распространяются на большие расстояния около земной поверхности. Определить максимальные частоты и минимальные длины волн, которые могут распространяться в этом волноводе, если максимальная концентрация электронов в области D в течение дня колеблется от 10^2 до $6 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$?

19.54. В отдельные моменты наблюдалось отражение от ионосферы радиоволн весьма различной длины: от 10 км до 10 м (УКВ). Во сколько раз концентрация электронов в области ионосферы, отразившей радиоволны длиной 10 м, больше (или меньше), чем в области, отразившей волны длиной 10 км? От каких областей ионосферы могло происходить отражение радиоволн длиной 10 км и 10 м?

19.55. Максимальная удельная электропроводность воздуха у земной поверхности летом над сушей обычно не превышает $5 \cdot 10^{-14}$ См/м. Во сколько раз электропроводность у Земли меньше, чем в области E ионосферы, если критические частоты для этой области днем равны $3,75 \cdot 10^6$ Гц, а число столкновений электронов $2,5 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$?

19.56. Решить задачу 19.55 для области ионосферы F_2 , в которой отмечается самая высокая концентрация электронов, достигающая днем $6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, если $f_{\text{кр}} = 6 \cdot 10^6$ Гц, число столкновений электронов $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

19.57. Вычислить критические частоты и длины радиоволн, которые можно использовать для наземной радиосвязи, рассчитанной на отражение от области с электронной концентрацией $5 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$, при разных направлениях падения радиоимпульсов на

эту область: вертикальном и наклонном под углами падения 30 и 45°. При каком падении радиоволны на область ионосферы с заданной концентрацией, она способна отражать более короткие длины волн: вертикальном или наклонном; с большим или меньшим углом падения?

19.58. Частота радиопульса, посылаемого в ионосферу ионосферной станцией, равна $4 \cdot 10^5$ Гц. Направления падения радиоволн на области ионосферы: а) вертикальное, б) наклонное под углом 30°, в) наклонное под углом падения 45°. Вычислить концентрацию электронов в местах отражения радиоволн для трех рассматриваемых случаев. Для какого из радиопульсов одинаковой частоты условия отражения более благоприятные (для отражения достаточно меньшая электронная концентрация): вертикального или наклонного; с большим или меньшим углом падения? Какой из лучей одинаковой частоты — вертикальный или наклонный — должен подняться выше, чтобы произошло его полное внутреннее отражение?

19.59. Как изменяется скорость радиоволн по мере поднятия их в ионосферу от нижней границы ионосферы и до места их отражения? На основании ответов предыдущей задачи определить больше или меньше скорость радиоволн в местах их отражения в ионосфере скорости этих радиоволн в вакууме и во сколько раз? Какие скорости получены в данной задаче — фазовые или групповые?

19.60. В разное время наблюдалось отражение от полярных сияний радиоволн широкого диапазона частот — от СВЧ и УВЧ вплоть до 144 МГц. Какой должна быть максимальная концентрация электронов в слоях атмосферы, охваченных полярным сиянием, чтобы от этих слоев могли отразиться такие короткие радиоволны? Определить длину лучей в полярном сиянии, имеющем форму дуги с выраженной лучистой структурой, если радиосигналы, отраженные от верхнего края лучей, поступали через $8,00 \cdot 10^{-3}$ с, а от нижнего — через $5,33 \cdot 10^{-3}$ с после момента послышки исходного сигнала?

19.61. Какой должна быть концентрация электронов в ионосфере, чтобы от нее могли бы отражаться световые волны? Если бы такая концентрация существовала в ионосфере в действительности, как бы выглядело наше небо? Могли бы мы видеть Солнце, звезды и другие небесные светила?

19.62. Вычислить в процентах степень ионизации воздуха вблизи земной поверхности в области ионосферы F_2 , если у земли содержится $5 \cdot 10^3$ пар легких ионов и $5 \cdot 10^4$ пар тяжелых ионов в 1 см^3 , а молекулярная плотность воздуха равна $2,55 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. В области F_2 концентрация электронов днем достигает $6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, а молекулярная плотность $5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3}$. На сколько нейтральных молекул приходится одна ионизированная у поверхности Земли и в области F_2 ?

19.63. Ионосфера в областях E и F является квазинейтральной плазмой, в которой концентрации ионов и электронов приближи-

тельно одинаковы. Во сколько раз электронная проводимость больше ионной в области F_2 , если основными ионами в ней являются O^+ и N^+ .

19.64. Максимальная энергия ядер атомов водорода, выбрасываемых при солнечных хромосферных вспышках средней интенсивности, обычно не превышает 50 кэВ. Через сколько времени после начала такой вспышки следует ожидать магнитной бури, нарушения радиосвязи и появления полярных сияний?

19.65. Внезапное ионосферное возмущение, проявившееся в прекращении радиосвязи в коротковолновом диапазоне одновременно на всем освещенном полушарии Земли, началось в 12 ч 15 мин и продолжалось 20 мин. Когда началась солнечная вспышка, его вызвавшая? Возрастание какого излучения Солнца во время вспышек является причиной таких возмущений?

Глава 20

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ И ТОКИ В АТМОСФЕРЕ

20.1. Основные соотношения для электрического поля тропосферы

Ввиду малой проводимости воздуха электрическое поле в тропосфере и нижней стратосфере можно охарактеризовать с помощью основных уравнений электростатики.

Напряженность электрического поля E связана с градиентом потенциала dV/dz , с поверхностной плотностью зарядов на земной поверхности σ и с плотностью объемных зарядов в атмосфере ρ следующими соотношениями:

$$E = -dV/dz, \quad (20.1)$$

$$E = \sigma/\epsilon_0, \quad (20.2)$$

$$\frac{dE}{dz} = -\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho(z), \quad (20.3)$$

$$\rho(z) = e \Delta n = e(n_+ - n_-). \quad (20.4)$$

Здесь ϵ_0 — электрическая постоянная, n_+ и n_- — концентрация положительных и отрицательных ионов; e — заряд иона.

Напряженность электрического поля в безоблачную погоду уменьшается с высотой чаще всего по экспоненциальному закону:

$$E_z = E_0 e^{-\alpha z}, \quad (20.5)$$

где E_z и E_0 — напряженность поля на высоте z и у поверхности Земли; α — показатель экспоненты. Численное значение α изменя-

ется во времени и в пространстве и может быть разным в различных слоях атмосферы.

Напряженность поля у земной поверхности, создаваемая монополярным облаком Сб, имеющим заряд $Q_{об}$, центр тяжести которого расположен на высоте z над землей поверхностью, вычисляется по формуле

$$E = \frac{2Q_{об}z}{4\pi\epsilon_0(z^2 + l^2)^{3/2}}, \quad (20.6)$$

где l — расстояние до центра заряда облака (вдоль земной поверхности). Напряженность поля, создаваемая биполярным облаком, является алгебраической суммой напряженностей, создаваемых каждым зарядом в отдельности.

Энергия электрического поля W описывается выражением

$$W = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} v, \quad (20.7)$$

где v — объем поля, ϵ — диэлектрическая постоянная среды (для воздуха равна 1).

Задачи

20.1. Среднее значение градиента потенциала электрического поля атмосферы у поверхности Земли равно 130 В/м. Вычислить поверхностную плотность электрических зарядов на Земле и общий заряд Земли. Использовать приложение 21.

20.2. Вычислить напряженность электрического поля атмосферы на высотах 5, 10 и 100 км, считая, что это поле создается только зарядом самой Земли. Быстро ли уменьшалась бы напряженность поля в тропосфере и стратосфере, если бы заряд Земли был единственным источником поля? Происходит ли это в действительности?

20.3. В безоблачную погоду средние значения градиента потенциала электрического поля атмосферы на разных высотах над поверхностью Земли:

z км	0	3	6	9
dV/dz В/м	130	20	10	5

Вычислить среднюю плотность объемного положительного заряда воздуха и преобладание числа положительных ионов над отрицательными в единице объема в слоях: 0—3, 3—6, 6—9 км. Как изменяется с высотой плотность объемных зарядов?

20.4. Используя результаты задачи 20.3, вычислить: 1) свободный объемный положительный заряд единичного столба атмосферы сечением 1 м² и высотой 9 км; 2) на сколько общее число положительных ионов больше числа отрицательных в указанном единичном столбе воздуха; 3) общий положительный заряд тропосферы высотой 9 км (сравнить его с зарядом Земли).

20.5. Результаты радиозондовых измерений электрического поля атмосферы (В/м) на двух станциях Японии 14 июня 1967 г.:

Станция	Высота, км						
	1	2	3	5	8	10	16
Саппоро	175	142	90	16	7	2	1
Кагосима	129	96	58	5	4	2	0

Пользуясь этими данными, определить графически потенциал и горизонтальную составляющую напряженности электрического поля на высоте 15 км, если расстояние между этими пунктами 1760 км.

20.6. Используя данные о напряженности поля на разных высотах, приведенные в предыдущей задаче, вычислить показатель экспоненты α в нижнем 5-км слое в Саппоро и в Кагосиме.

20.7. Унитарная вариация градиента потенциала электрического поля атмосферы наиболее отчетливо проявляется над всеми океанами. Максимум наблюдается в 17—18 ч, а минимум в 3—4 ч по гринвичскому времени. Средние годовые значения максимума и минимума равны соответственно 165 и 115 В/м. Вычислить средние поверхностные плотности заряда на поверхности океана в моменты наступления максимума и минимума градиента потенциала.

20.8. Определить плотность и силу тока, который должен течь к поверхности Мирового океана, чтобы обеспечить изменение плотности поверхностного заряда океана, наблюдающееся в моменты наступления максимума и минимума градиента потенциала. Площадь Мирового океана принять равной $3,61 \cdot 10^8$ км². Использовать ответы к задаче 20.7.

20.9. Монополярное облако Сб имеет заряд —30 Кл; центр тяжести заряда Сб находится на высоте 2,5 км. Вычислить напряженность поля, создаваемого облаком у поверхности Земли под облаком и на расстоянии 10 км от него. На каком расстоянии поле, создаваемое облаком, становится равным нормальному электрическому полю атмосферы?

20.10. Чувствительность прибора для измерения градиента потенциала равна 5 В/м. На каком расстоянии такой прибор, помещенный у поверхности Земли, обнаружит приближающееся грозовое облако, описанное в задаче 20.9?

20.11. Решить задачу 20.9 для биполярного облака Сб. Центр тяжести нижнего отрицательного заряда (—30 Кл) находится на высоте 2,5 км, центр тяжести положительного заряда (30 Кл) — на высоте 6,5 км. Какой из зарядов облака создает большую напряженность и почему? Во сколько раз поле, создаваемое этим зарядом, больше поля, создаваемого верхним зарядом?

20.12. Многочисленные самолетные измерения Е. В. Чубариной показали, что в безоблачную погоду напряженность электрического поля по мере поднятия над земной поверхностью уменьшается по экспоненциальному закону (формула (20.5)). Значение

показателя экспоненты α оказалось равным в Ленинграде $0,9 \text{ км}^{-1}$, в Киеве $0,6 \text{ км}^{-1}$ и в Ташкенте $0,5 \text{ км}^{-1}$. Вычислить напряженность поля в этих городах на высоте 5 км, если средние градиенты потенциала у поверхности Земли в Ленинграде — 180 В/м , в Киеве — 160 В/м и в Ташкенте — 130 В/м .

20.13. Облачная капля радиусом 10 мкм имеет заряд $500 e$ (e — элементарный заряд) и находится в вертикальном электрическом поле напряженностью 150 В/м . Определить соотношение между силой тяжести и силой Кулона, действующей на каплю.

20.14. Вычислить энергию электрического поля нижнего 100-м слоя атмосферы, приняв среднюю напряженность равной 100 В/м . Сравнить эту энергию с кинетической энергией атмосферы, составляющей по расчетам Е. П. Борисенкова $4 \cdot 10^{20} \text{ Дж}$.

20.15. По измерениям А. Х. Филиппова в Иркутске, напряженность электрического поля атмосферы изменяется в течение года от 280 В/м в феврале до 80 В/м в июле. Как изменяется энергия этого поля от зимы к лету?

20.16. Какую напряженность электрического поля нужно создать, чтобы уравновесить силу тяжести, действующую на облачную каплю радиусом 5 мкм и несущую заряд $300 e$? Наблюдается ли в облаках поля с такими значениями напряженности?

20.17. Идея магнитогидродинамического генератора (для прямого преобразования кинетической энергии в электрическую) состоит в том, что струя ионизированного газа пропускается через пространство с поперечным магнитным полем. При этом по закону электромагнитной индукции возникает электрическое поле, равное векторному произведению скорости газа на напряженность магнитного поля. То же самое происходит при горизонтальном переносе воздуха в магнитное поле Земли. Какова напряженность возникающего электрического поля при скорости ветра 10 м/с и магнитном поле 15 А/м ?

20.18. Вычислить, во сколько раз напряженность электрического поля, создаваемого солнечным излучением, больше (или меньше) средней напряженности нормального электрического поля у земной поверхности, равного 130 В/м . Средняя энергетическая освещенность земной поверхности прямой солнечной радиацией в идеальной атмосфере составляет $1,22 \text{ кВт/м}^2$. Решать задачу с помощью вектора Пойнтинга.

20.19. Во сколько раз напряженность магнитного поля, создаваемого солнечным излучением у земной поверхности, больше (или меньше) напряженности нормального магнитного поля, в среднем равного 40 А/м ? Использовать данные задачи 20.18.

20.2. Электрические токи в атмосфере. Грозовые разряды

Плотности токов, текущих в атмосфере, вычисляются по следующим формулам:

плотность тока проводимости

$$j_{\lambda} = \lambda E; \quad (20.8)$$

плотность тока конвекции

$$j_p = \rho v_v, \quad (20.9)$$

где v_v — скорость вертикального переноса;

вертикальная составляющая плотности тока конвекции, обусловленной турбулентным переносом объемного заряда ρ ,

$$j_{pT} = -k_z \frac{\partial \rho}{\partial z}, \quad (20.10)$$

где k_z — вертикальный коэффициент турбулентности;

плотность горизонтального тока адвекции

$$j_{adv} = \rho v_{гор}, \quad (20.11)$$

где $v_{гор}$ — скорость ветра;

плотность тока смещения

$$j_{смещ} = \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}, \quad (20.12)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Напряженность электрического поля, создаваемого молниевым разрядом, описывается выражением

$$E_m = \frac{hQ}{2\pi\epsilon_0 r^3} + \frac{h}{2\pi\epsilon_0 c r^2} \frac{dQ}{dt} + \frac{h}{2\pi\epsilon_0 c^2 r} \frac{d^2 Q}{dt^2}, \quad (20.13)$$

где Q — заряд, нейтрализуемый в канале молнии длиной h , c — скорость света. Первое слагаемое — электростатическая составляющая поля, второе — радиационная его составляющая, третье — поле электромагнитного излучения. При этом $dQ/dt = i$ — ток в канале молнии.

Приведем некоторые вспомогательные формулы электростатики, необходимые для решения ряда задач:

емкость шара радиусом R

$$e = 4\pi\epsilon_0 R, \quad (20.14)$$

емкость сферического конденсатора

$$c = \frac{4\pi\epsilon_0 Rr}{R-r}, \quad (20.15)$$

где R и r — радиусы внешнего и внутреннего шаров.

Задачи

20.20. Средние значения градиента потенциала электрического поля атмосферы и проводимости воздуха у земной поверхности в Ленинграде летом равны 110 В/м и $2,50 \cdot 10^{-11}$ Ом⁻¹м⁻¹. Вычислить плотность тока проводимости. Электричество какого знака приносит к Земле ток проводимости?

20.21. Считая полученную в предыдущей задаче плотность тока проводимости типичной средней для всего земного шара, вычислить: а) какое количество электричества приносит ток проводимости к поверхности земного шара за 1 с, 1 ч и 1 сут? б) суммарный ток проводимости, текущий из атмосферы на Землю? в) за какой промежуток времени ток проводимости мог бы уничтожить отрицательный заряд земной поверхности (570 000 Кл), если бы плотность этого тока оставалась постоянной по мере убывания заряда Земли? Использовать приложение 21.

20.22. По расчетам А. Х. Филиппова, суммарный ток проводимости на земную поверхность равен 1600 А. Найти сопротивление между электросферой и Землей, если разность потенциалов составляет 300 кВ?

20.23. Область атмосферы выше 20 км обладает достаточно высокой проводимостью, чтобы служить эквипотенциальной поверхностью. Определить емкость сферического конденсатора, образованного земной поверхностью и электросферой, при высоте электросферы 20 км и 40 км.

20.24. По условиям предыдущей задачи найти заряд сферического конденсатора «электросфера—Земля», если разность потенциалов на его обкладках 250 кВ. Как зависит этот заряд от высоты электросферы?

20.25. Вычислить плотность тока конвекции, если средние концентрации легких ионов $n_+ = 5,80 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$ и $n_- = 5,30 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$, а вертикальная скорость конвективных движений обычно не превышает 2 см/с. Во сколько раз ток конвекции меньше среднего тока проводимости (см. задачу 20.20)? Типично ли для тока конвекции такое же постоянство во времени и охват поверхности всего земного шара, как для тока проводимости?

20.26. Вычислить максимальную плотность и силу тока конвекции в грозовых облаках, если скорость вертикальных движений достигает 30 м/с, а объемная плотность зарядов, по исследованиям И. М. Имянитова, в среднем равна $1,5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/м}^3$ и увеличивается на два порядка в отдельных частях грозовых облаков. Поперечники областей, для которых характерны такие вертикальные скорости, в облаках составляют в среднем около 10 км. Во сколько раз плотность таких токов больше (или меньше) средней плотности тока проводимости (см. задачу 20.20)? Какой из этих токов имеет решающее значение для обмена зарядами между атмосферой и Землей? Почему?

20.27. По измерениям на горе Юнгфрау в Альпах (3578 м) плотность вертикального тока проводимости равнялась $13,3 \cdot 10^{-12} \text{ А/м}^2$. Напряженность электрического поля при этом составляла 149 В/м. Определить проводимость воздуха и проанализировать причины изменения проводимости и тока с высотой.

20.28. Вычислить плотность тока смещения в атмосфере, если за 10 мин напряженность электрического поля изменилась от 76 до 198 В/м. Сравнить с типичным значением плотности тока проводимости.

20.29. При разряде молнии за 0,2 с напряженность электрического поля изменилась от -600 до $15\,000$ В/м. Какой ток смещения возникнет на металлической крыше площадью 40 м^2 ?

20.30. Во сколько раз плотность тока адвекции, создаваемого горизонтальным переносом объемных зарядов ветром со скоростью 5 м/с , больше (или меньше) плотности горизонтальной составляющей тока проводимости? Значения градиента потенциала, проводимости и объемного заряда у земной поверхности принять равными 110 В/м ; $2,5 \cdot 10^{-14}\text{ См/м}$ и $2,3 \cdot 10^{-11}\text{ Кл/м}^3$. Горизонтальная составляющая тока проводимости обычно на два порядка меньше вертикальной.

20.31. Максимальная скорость стокового ветра на ст. Мирный (Антарктида) в июле достигала 56 м/с . Вычислить плотность адвективного тока при метели, когда за счет трения снежинок о покрытую снегом и льдом поверхность возникал объемный заряд $5 \cdot 10^{-8}\text{ Кл/м}^3$. Во сколько раз плотность такого тока больше нормального тока проводимости? Определить силу тока, который течет на металлическую крышу площадью 49 м^2 , если угол ее наклона к горизонту равен 30° .

20.32. Максимальная протяженность зоны обложного дождя, выпадающего из облаков теплого фронта $As-Ns$, в средних широтах достигала в длину (вдоль линии фронта) 2000 км и в ширину 250 км . Общее количество осадков за 18 ч составило 10 мм . Вычислить: а) количество положительного электричества, принесенного каплями дождя на поверхность Земли на всю площадь зоны обложных осадков; б) силу и плотность тока, создаваемого во время такого обложного дождя. Средний радиус капель дождя равен 1 мм , заряд отдельной капли $1,1 \cdot 10^{-12}\text{ Кл}$. Сравнить полученное значение плотности тока со средней плотностью тока проводимости. Могут ли эти осадки, связанные лишь с одним теплым фронтом, полностью компенсировать заряд Земли?

20.33. Вычислить силу и плотность тока, создаваемого разрядами молний на Землю. Согласно исследованиям В. П. Колоколова, каждую секунду на земном шаре происходит 118 разрядов молний. Из них только 31% составляют разряды на Землю, а 69% — межоблачные разряды. Сколько электричества приносят молнии на земную поверхность за 1 с , 1 ч и 1 сут , если за один разряд молнии переносится в среднем 20 Кл , причем около 85% всех молний несут к Земле отрицательное электричество и 15% — положительное. Сравнить ответы с аналогичными данными для тока проводимости (см. задачу 20.20). Компенсируют ли молнии утечку отрицательного заряда Земли, вызываемую током проводимости? Какой другой ток (кроме молний) доставляет Земле большой отрицательный заряд?

20.34. Вычислить суммарную мощность молниевых разрядов (мощность «грозовой машины» земного шара): а) всех разрядов, происходящих в атмосфере; б) разрядов на Землю. Средняя сила тока в канале молнии равна $20\,000\text{ А}$, разность потенциалов на концах молниевых разряда 10^7 В , средняя продолжительность

разряда 0,2 с. Сравнить мощность молниевых разрядов на всей Земле с мощностью таких крупных электростанций, как Куйбышевская и Волжская (примерно $4 \cdot 10^6$ кВт). Вычислить электрическую энергию, реализуемую в молниях за год, и сравнить ее с годовой выработкой электроэнергии во всем мире, которая составляет около $2 \cdot 10^{19}$ Дж. (О числе разрядов молний см. задачу 20.33.)

20.35. За один разряд молнии переносится в среднем 15 Кл электричества; разность потенциалов между облаками и Землей не превышает 10^8 В. Если бы удалось перехватить энергию, реализуемую в молнии, на сколько времени ее хватило бы на питание электрических бытовых установок (освещение, телевизоры, холодильники и пр.) 200-квартирного дома, если каждая квартира потребляет около 250 Вт. Имеет ли смысл создавать установки для перехвата энергии молний, если в средних широтах на площадь в 1 км² молния ударяет 1 раз в 2 года, а в тропических широтах (в «мировых очагах» гроз) 85—90 % молниевых разрядов внутри-облачные?

20.36. Плотность объемного заряда у земной поверхности равна $2 \cdot 10^{-11}$ Кл/м³, а на высоте 100 м уменьшается вдвое. Найти плотность тока конвекции, если средний по слою коэффициент турбулентности 1 м²/с.

20.37. Плотность объемного заряда в кучевом облаке изменяется от $5,4 \cdot 10^{-11}$ Кл/м³ на нижней границе облака до $4,2 \times 10^{-11}$ Кл/м³ на высоте 1,5 км над нижней границей облака; плотность конвективного тока $3,8 \cdot 10^{-12}$ А/м². Вычислить коэффициент турбулентности в облаке.

20.38. В атмосфере течет ток проводимости плотностью 4×10^{-12} А/м². До какого потенциала зарядится этим током за 1 ч изолированный от Земли автомобиль «Жигули», имеющий поверхность 17 м² и электроемкость 300 пФ? Утечкой заряда и искажением поля пренебречь.

20.39. Зональный перенос воздуха осуществляется поперек горизонтальной компоненты магнитного поля Земли, напряженностью 15 А/м. Но при движении проводника (а атмосфера обладает проводимостью) в магнитном поле возникает ток. Определить направление и силу этого тока для типичных значений проводимости и скорости ветра в приземном слое.

20.40. Оценить порядок величины индуцированного напряжения на самолете ТУ-154, если скачок напряженности поля от близкой грозы равен 10 000 В/м. Принять, что поверхностная плотность заряда во всех частях самолета одинакова. Размеры самолета и его электроемкость принять ориентировочно.

20.41. Брюс и Голд получили следующую эмпирическую зависимость тока главного удара молнии от времени:

$$I(t) = I_0 [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)],$$

где $I_0 = 28$ кА; $\alpha = 4,4 \cdot 10^4$ с⁻¹; $\beta = 4,6 \cdot 10^5$ с⁻¹. Построить график зависимости тока от времени и проанализировать характер раз-

вития канала молнии. Через какое время после начала разряда ток достигает максимума?

20.42. По условиям предыдущей задачи определить заряд, нейтрализуемый в канале молнии за время от 0 до 100 мкс.

20.43. Сравнить электростатическую и электромагнитную составляющие поля, создаваемого молнией на расстоянии 50 км. Центр заряда в облаке, равного 20 Кл, был расположен на высоте 3 км. Крутизна тока в канале молнии равна 10 кА/мкс.

20.44. Уверенный, громкий прием радиопередач современным приемником осуществляется при напряженности электромагнитного поля радиостанции 10 МВ/м. В каком соотношении находятся уровень помехи и сигнала радиостанции, если помеха создается молнией на расстоянии 30 км. Крутизна тока молнии 15 кА/мкс.

Глава 21

ЭЛЕМЕНТЫ АТМОСФЕРНОЙ АКУСТИКИ

21.1. Характеристики звуковых колебаний

Акустические колебания, как и всякий волновой процесс, характеризуются частотой ν , длиной волны λ и скоростью распространения v , которые связаны между собой соотношением

$$v = \nu\lambda. \quad (21.1)$$

Акустическими звуковыми частотами являются следующие:

$\nu > 20\,000$ Гц	20 000—2300	2300—44	44—16	$\nu < 16$ Гц
Ультразвуки	Свисты	Звуки человеческого голоса	Шумы	Инфразвуки

Скорость распространения звуковых колебаний в некоторой среде определяется по формуле

$$v = \sqrt{E/\rho}. \quad (21.2)$$

Здесь E — модуль Юнга среды (модуль объемной упругости), определяемый соотношением

$$E = 1/\beta, \quad (21.3)$$

где β — коэффициент объемного сжатия среды, ρ — плотность среды.

Скорость звуковых колебаний в газе равна

$$v = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}} = \sqrt{\frac{\kappa R^* T}{\mu}}, \quad (21.4)$$

где $\kappa = c_p/c_v$ (c_p и c_v — удельные теплоемкости газа при постоянном давлении и постоянном объеме); p и ρ — давление и плотность газа; T — абсолютная температура; μ — относительная молекулярная масса газа; R^* — универсальная газовая постоянная; значения κ ; μ ; R^* см. в приложении 1.

Интенсивность, или сила звука I , есть поток энергии, приходящийся на единичную площадку в единицу времени. Выражается в Вт/м².

Уровень интенсивности, или уровень громкости, звука L_2 связан с интенсивностью звука I соотношением

$$L_2 = 10 \lg I/I_0, \quad (21.5)$$

где I_0 — *нулевой уровень интенсивности, или стандартный порог слышимости*, т. е. минимальная сила звука, при которой звук еще воспринимается органами слуха человека. Порог слышимости зависит от частоты звука, достигая минимального значения при частотах 700—6000 Гц. *Стандартный порог слышимости I_0* принят равным 10^{-12} Вт/м² при $\nu = 1000$ Гц. Уровень интенсивности выражается в *децибелах (дБ)* или, чтобы отличить его от уровня звукового давления, в *фонах (фон)*. Фон равен уровню интенсивности звука, для которого уровень звукового давления равногромкого с ним звука с частотой 1000 Гц равен 1 дБ.

Уровень звукового давления L_1 (дБ) связан с амплитудой звукового давления Δp (Н/м²) соотношением

$$L_1 = 20 \lg \frac{\Delta p}{\Delta p_0}, \quad (21.6)$$

где Δp_0 — амплитуда звукового давления при нулевом уровне громкости, равная $2 \cdot 10^{-5}$ Н/м².

Задачи

21.1. Вычислить пределы длин звуковых волн, воспринимаемых ухом человека, от самых высоких свистов до самых низких шумов. Скорость звука в воздухе при 0 °С равна 331 м/с.

21.2. Каковы пределы длин звуковых волн, создаваемых голосом человека, если самая высокая нота, взятая французской певицей Мадо Робен, имела частоту 2300 Гц, а самая низкая, взятая басами (Каспаром Феснером в XVIII в. и Норманом Аклиным из Англии в наше время) — частоту 44 Гц.

21.3. Глубина моря, измеренная эхолотом, оказалась равной 2850 м. Промежуток времени между выпуском звуковой волны и приемом отраженного от дна сигнала равен 3,8 с. Определить

плотность морской воды. Коэффициент объемного сжатия воды принять равным $4,315 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{Н}$.

21.4. Относительные молекулярные массы двух инертных газов — гелия и ксенона относятся как 1 : 32,8. В каком из этих газов скорость звука больше и во сколько раз? Сравнить полученные скорости со скоростью звука в воздухе.

21.5. Плотность медного стержня 8600 кг/м^3 , коэффициент объемного сжатия $8,47 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$. Вычислить скорость звука в медном стержне.

21.6. Решить задачу 21.5 для стального стержня, плотность которого 7700 кг/м^3 , а коэффициент объемного сжатия $4,63 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$. Что для звуковых колебаний является наиболее, а что наименее «прозрачным»: воздух, вода или твердое тело?

21.7. Используя ответы к задачам 21.5 и 21.6, вычислить длины звуковых волн в медном и стальном стержнях для частоты 1000 Гц . Во сколько раз длины звуковых волн в медном и стальных стержнях и в воде ($v \approx 1500 \text{ м/с}$) больше (или меньше), чем в воздухе?

21.8. Уровни звукового давления при взлете реактивного самолета (на расстоянии 25 м от него) и в салоне автомобиля «Жигули», движущегося со скоростью 50 км/ч , различаются на 70 дБ . Каково соотношение амплитуд звукового давления от этих источников шума?

21.9. Сила звука от самолета, летящего на небольшой высоте, больше силы звука в железнодорожном вагоне примерно в $100\,000$ раз. Насколько различаются их уровни громкости?

21.10. Уровни громкости Ниагарского водопада и в комнате в тихой квартире различаются на 40 фон. Каково соотношение интенсивности этих звуков?

21.11. Уровень звукового давления равен 1 дБ . Определить уровень громкости и амплитуду звукового давления.

21.12. Интенсивность звука в непосредственной близости от взлетающего турбореактивного самолета превышает стандартный порог слышимости в 10^{13} раз. Чему равен уровень громкости этого самолета?

21.13. Уровень громкости некоторого источника шума равен 1 фону. Определить интенсивность звука и уровень звукового давления.

21.14. Интенсивность звука увеличилась в 10 раз. На сколько при этом увеличивается уровень громкости?

21.15. Амплитуда звукового давления увеличилась в 10 раз. На сколько при этом увеличивается уровень звукового давления?

21.16. На сколько увеличивается уровень громкости и уровень звукового давления, если интенсивность звука возрастает в 10 , 10^2 , 10^4 и 10^6 раз?

21.17. Интенсивность звука увеличилась в 10 , 10^2 , 10^4 и 10^6 раз. Во сколько раз при этом увеличивается амплитуда звукового давления?

21.18. Интенсивность звука от реактивного самолета, пролетающего на расстоянии около 50 м , равна 10 Вт/м^2 , а на расстоянии

100 м от места запуска ракеты «Сатурн» интенсивность звука достигает и превышает 1000 Вт/м^2 . На сколько различаются их уровни громкости и во сколько раз одна амплитуда звуковых давлений больше другой?

21.2. Распространение звуковых колебаний в атмосфере

Скорость распространения звуковых колебаний (м/с) в воздухе описывается выражениями:
в сухом воздухе

$$v = \sqrt{\kappa RT} = 20,1 \sqrt{T}, \quad (21.7)$$

во влажном воздухе

$$v = 20,1 \sqrt{T_v}, \quad (21.8)$$

где T — температура воздуха (К), T_v — виртуальная акустическая температура:

$$T_v = T (1 + 0,275e/p), \quad (21.9)$$

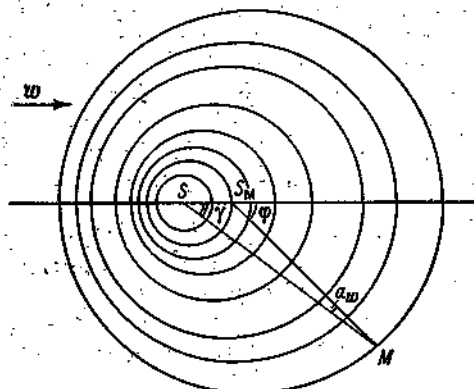


Рис. 21.1. Влияние ветра на скорость звука и положение источника звука.

вычисления скорости звука в воздухе с учетом его температуры и влажности используется формула

$$v = 331 + 0,6t + 0,07e, \quad (21.10)$$

где t — температура воздуха ($^{\circ}\text{C}$).

Влияние ветра на скорость распространения звуковых колебаний пояснено на рис. 21.1. В точке S находится источник звука. За то время пока звуковые волны из точки S дойдут до наблюдателя в точке M , ветер перенесет центр возникших звуковых волн в точку S_M и наблюдателю в точке M будет казаться, что звуковая волна пришла к нему из точки S_M . Скорость распространения звуковых колебаний с учетом скорости ветра w равна

$$v_w = v + w \cos \varphi, \quad (21.11)$$

где φ — угол между направлением ветра и направлением на кажущееся положение источника звука (точка S_M).

Угловой поправкой на аберрацию звука, т. е. на снос звуковой волны ветром, называется угол α_w между направлениями на истинное и на кажущееся положения источника звука.

Ввиду того что $v \gg w$, угол $\varphi \approx \gamma$ и

$$\sin \alpha_w = (w/v) \sin \varphi. \quad (21.12)$$

Число Маха (Ма) есть отношение скорости движения летательного аппарата $v_{\text{ла}}$ или другого летящего тела к скорости звука в окружающей среде:

$$\text{Ма} = v_{\text{ла}}/v. \quad (21.13)$$

Соотношение энергии падающего звукового луча I^2 и преломленного луча D^2 при падении звуковой волны на границу вода—воздух выражается формулой

$$F = \frac{D^2}{I^2} = 0,001189 \sqrt{1 - 17,9 \operatorname{tg}^2 i}, \quad (21.14)$$

где i — угол падения звукового луча на поверхность воды.

Радиус зоны слышимости R , или расстояние от источника звука до начала звуковой тени (рис. 21.2), при положительном вертикальном температурном градиенте γ_t ($^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}$) определяется по формуле

$$R = 2 \sqrt{T_0 H / \gamma_t}, \quad (21.15)$$

где T_0 — температура воздуха у поверхности Земли (К); H — высота источника звука (м).

Задачи

21.19. Средняя месячная температура самого холодного месяца на станциях антарктического плато (Амундсен-Скотт, Восток) достигает -70°C , в то время как в антарктических оазисах в летние месяцы температура повышается до 30°C . На сколько различаются скорости звука на этих станциях (в м/с и %)?

21.20. Как изменилась бы разность между виртуальной акустической и кинетической температурами воздуха, содержащего насыщенный водяной пар, если бы объем воздуха, находящийся у поверхности Земли при давлении 1000 гПа и температуре 25°C , поднялся бы на высоту поверхности 300 гПа (около 8,5 км), где температура воздуха -25°C , (использовать приложение 2). Где различие между T_v и T больше — у поверхности Земли или на высотах? В какое время года различиями этих температур можно пренебречь и когда с ними следует считаться?

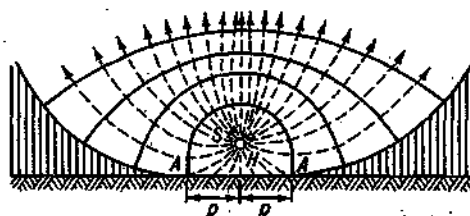


Рис. 21.2. Траектории звуковых лучей при падении температуры воздуха с высотой.

21.21. Для определения температуры воздуха в стратосфере запускают ракету с гранатами, взрывающимися при достижении определенной высоты. Звук от взрыва гранаты на высоте 32 км пришел на 13,2 с позже, чем от взрыва на высоте 28 км. Найти температуру воздуха на высоте 30 км.

21.22. Ежедневно в Петропавловской крепости в Ленинграде в 12 ч производится пушечный выстрел. Когда звук выстрела будет услышан в Смольном, в Главной геофизической обсерватории (ГГО) и на о. Декабристов, если все три пункта находятся на расстоянии около 5 км от Петропавловской крепости, а их расположение показано на рис. 21.3. Скорость ветра равна 8 м/с, температура воздуха -20°C .

21.23. Максимальная скорость восточного ветра на ст. Оазис в Антарктике в разгар зимы (в июне) достигала 50 м/с при температуре воздуха -35°C . Наблюдателю в точке М (см. рис. 21.1) казалось, что звук от прогреваемого двигателя турбореактивного самолета пришел к нему из точки S_M . Угол между направлением ветра и кажущимся положением самолета был равен 70° . Вычислить угловую поправку на абберацию звука.

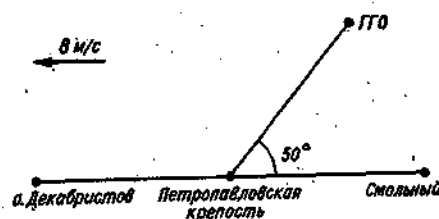


Рис. 21.3.

21.24. На каком расстоянии от склона горы находилось орудие, отраженный звук выстрела из которого артиллеристы услышали через 8 с. Температура воздуха составляла $20,5^{\circ}\text{C}$.

21.25. Решить задачу 21.24 для случая, когда температура воздуха была -27°C .

21.26. При извержении вулкана Кракатау (в Зондском проливе) возникла ударная волна, которая несколько раз обошла вокруг земного шара, что нашло отражение в записях барографов многих метеорологических станций мира. По этим записям установили, что волна, возникшая над Кракатау в 10 ч, пришла на противоположную сторону Земли — в Бразилию первый раз в 12 ч, во второй раз в 1 ч следующих суток. С какой скоростью распространялась ударная волна? Как и почему изменяется скорость ударных волн по мере удаления от места зарождения?

21.27. Как различаются максимальные допустимые скорости полета самолета над Северным Ледовитым океаном на уровне тропопавзы (10 км) летом и зимой, если температура воздуха на этой высоте летом -40°C , а зимой -75°C . Максимальное значение Ma для данного типа самолета 0,8.

21.28. Самолет из Дели в Москву летел на высоте 15 км. На сколько км/ч может быть увеличена максимальная допустимая скорость полета самолета при подходе к Москве по сравнению с ее значением над Дели, если температура воздуха на высоте 15 км

над Дели составляла -80°C , а над Москвой -45°C . Максимальное значение M_a для данного типа самолета равно 2.

21.29. Определить радиус зоны слышимости у поверхности Земли зимой от взрыва, произведенного на высоте 10 км с целью определения температуры воздуха, если вертикальный градиент температуры и температура у поверхности Земли $0,06^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ и -30°C соответственно.

21.30. Решить задачу 21.29 при условии, что $\gamma = 1,5^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$, а $t = 30^{\circ}\text{C}$. Почему так уменьшается радиус зоны слышимости летом по сравнению с зимой?

21.31. Какая часть (%) звуковой энергии, падающей из воздуха на поверхность воды, отражается назад в воздух и какая часть проходит в воду при вертикальном падении звуковых лучей?

21.32. Вычислить минимальный угол падения звуковых лучей на поверхность воды, при котором звуковая энергия полностью отражается назад в воздух. Почему звуковые лучи плохо проходят из воздуха в воду и наоборот?

21.33. Гром от внутриоблачного грозового разряда на высоте 2,5 км был услышан через 5 с после вспышки молнии. Определить: 1) на каком расстоянии произошел этот разряд; 2) на каком расстоянии он будет восприниматься как зарница. Температура воздуха у поверхности Земли $20,5^{\circ}\text{C}$, давление 995,6 гПа, относительная влажность 92 %, вертикальный градиент температуры $1,2^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$; ветер отсутствует. Использовать приложение 2.

Приложения

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Некоторые константы, используемые при решении задач

Константы в формуле Брента (5.22), по Т. Г. Берлянд и М. Е. Берлянду:
 $D=0,61$; $G=0,05$.

Коэффициенты m_i в формуле (6.4): $m_0=1,67$; $m_5=26,67$; $m_{10}=43,34$; $m_{15}=26,67$; $m_{20}=1,67$.

Коэффициенты r_i в формуле (6.16): $r_0=0,164$; $r_5=0,0666$; $r_{10}=0,0350$; $r_{15}=0,0312$; $r_{20}=0,008$.

Нормальное ускорение свободного падения $g=9,80665$ м/с².

Облачные коэффициенты в формуле (5.30), по Н. Г. Евфимову (для Павловска): $C_n=0,076$; $C_c=0,052$; $C_s=0,022$.

Облачный коэффициент в формуле (5.29), по М. Е. Берлянду, $c=0,50-0,82$; $c_{cp}=0,76$.

Объемный коэффициент теплового расширения газов $\alpha=1/273,15=3,66 \cdot 10^{-3}$ (°C)⁻¹.

Период суточного вращения Земли $T \approx 24$ ч = 86 400 с.

Постоянная Стефана—Больцмана $\sigma=5,67032 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Радиус Земли $R_z=6371$ км.

Радиус Солнца $R_\odot=695,6 \cdot 10^3$ км.

Расстояние между центрами Солнца и Земли: среднее $R_\odot=149 \cdot 10^6$ км, 2 января (Земля в перигелии) $R_{\odot p}=147 \cdot 10^6$ км, 4 июля (Земля в афелии) $R_{\odot a}=152 \cdot 10^6$ км.

Солнечная постоянная $S_0=1,38$ кВт/м².

Сухоадиабатический градиент $\gamma_a=0,01$ °C/м.

Удельная газовая постоянная водяного пара: $R_n=461,51$ Дж/(кг·К).

Удельная газовая постоянная сухого воздуха $R_a=287,05$ Дж/(кг·К).

Универсальная газовая постоянная $R=8,31 \cdot 10^3$ Дж/(кмоль·К).

Удельная теплоемкость сухого воздуха при постоянном давлении $c_p=1005$ Дж/(кг·К).

Удельная теплоемкость сухого воздуха при постоянном объеме $c_v=718$ Дж/(кг·К).

Число Авогадро $N=6,023 \cdot 10^{23}$ кмоль⁻¹.

Постоянная Больцмана $k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Молярная масса сухого воздуха $M=28,97$ кг/кмоль.

Молярная масса водяного пара $\mu=18,02$ кг/кмоль.

Удельная теплота парообразования (конденсации)

$$C=(2501 \cdot 10^3 - 2,72 \cdot 10^3 t) \text{ Дж/кг.}$$

Удельная теплота сублимации

$$C_s=(2834,6 \cdot 10^3 - 1,51 \cdot 10^3 t) \text{ Дж/кг.}$$

Теплота плавления льда $c_{пл}=c_a - c$.

Молекулярная теплопроводность воздуха при температуре t °C

$$\lambda=(24,16+0,67t) \cdot 10^{-3} \text{ Дж/(м·с·К).}$$

Плотность воздуха при нормальных условиях $\rho_0=1,292$ кг/м³.

Угловая скорость вращения Земли $\omega=7,27 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹.

Скорость света в вакууме $3 \cdot 10^8$ м/с.

Электрическая постоянная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Электронвольт: 1 эВ = $1,62 \cdot 10^{-19}$ Дж.

Атомная единица массы равна 1/16 доли массы изотопа атома кислорода, т. е. 1 а. е. м. = $1,662 \cdot 10^{-24}$ г.

Заряд электрона $1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Масса покоя электрона $9,11 \cdot 10^{-31}$ кг = $5,49 \cdot 10^{-4}$ а. е. м.

Масса покоя протона $1,672 \cdot 10^{-24}$ кг = $1,672 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,00759 а. е. м.

Масса покоя α -частицы $6,653 \cdot 10^{-24}$ кг = $6,653 \cdot 10^{-27}$ кг = 4,003 а. е. м.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Давление насыщенного водяного пара (гПа) при разных температурах воздуха

t °C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Над плоской поверхностью чистой воды

—40	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17
—39	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19
—38	0,23	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21
—37	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24	0,24	0,23
—36	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27	0,26	0,26	0,26
—35	0,31	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,30	0,29	0,29	0,29
—34	0,35	0,34	0,34	0,34	0,33	0,33	0,33	0,32	0,32	0,32
—33	0,38	0,38	0,37	0,37	0,37	0,36	0,36	0,36	0,35	0,35
—32	0,42	0,42	0,41	0,41	0,40	0,40	0,40	0,39	0,39	0,38
—31	0,46	0,46	0,45	0,45	0,44	0,44	0,44	0,43	0,43	0,42
—30	0,51	0,50	0,50	0,49	0,49	0,48	0,48	0,48	0,47	0,47
—29	0,56	0,55	0,54	0,54	0,53	0,53	0,53	0,52	0,52	0,51
—28	0,61	0,61	0,60	0,60	0,59	0,58	0,58	0,57	0,57	0,56
—27	0,67	0,67	0,66	0,65	0,65	0,64	0,64	0,63	0,62	0,62
—26	0,74	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70	0,70	0,69	0,68	0,68
—25	0,81	0,80	0,79	0,78	0,78	0,77	0,76	0,76	0,75	0,74
—24	0,88	0,87	0,87	0,86	0,85	0,84	0,84	0,83	0,82	0,81
—23	0,96	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,91	0,90	0,89
—22	1,05	1,04	1,04	1,03	1,02	1,01	1,00	0,99	0,98	0,97
—21	1,15	1,14	1,13	1,12	1,11	1,10	1,09	1,08	1,07	1,06
—20	1,25	1,24	1,23	1,22	1,21	1,20	1,19	1,18	1,17	1,16
—19	1,37	1,35	1,34	1,33	1,32	1,31	1,30	1,29	1,28	1,26
—18	1,49	1,47	1,46	1,45	1,44	1,43	1,41	1,40	1,39	1,38
—17	1,62	1,60	1,59	1,58	1,56	1,55	1,54	1,53	1,51	1,50
—16	1,76	1,74	1,73	1,72	1,70	1,69	1,67	1,66	1,65	1,63
—15	1,91	1,90	1,88	1,86	1,85	1,83	1,82	1,80	1,79	1,77
—14	2,08	2,06	2,04	2,02	2,00	1,99	1,98	1,96	1,94	1,93
—13	2,25	2,23	2,21	2,20	2,18	2,16	2,14	2,13	2,11	2,09
—12	2,44	2,42	2,40	2,38	2,36	2,34	2,33	2,31	2,29	2,27
—11	2,64	2,62	2,60	2,58	2,56	2,54	2,52	2,50	2,48	2,46
—10	2,86	2,84	2,82	2,80	2,77	2,75	2,73	2,71	2,69	2,66
—9	3,10	3,07	3,05	3,02	3,00	2,98	2,95	2,93	2,91	2,88
—8	3,35	3,32	3,30	3,27	3,25	3,22	3,20	3,17	3,15	3,12
—7	3,62	3,59	3,56	3,53	3,51	3,48	3,45	3,43	3,40	3,37
—6	3,90	3,88	3,85	3,82	3,79	3,76	3,73	3,70	3,67	3,65
—5	4,21	4,18	4,15	4,12	4,09	4,06	4,03	4,00	3,97	3,94
—4	4,54	4,51	4,48	4,44	4,41	4,38	4,34	4,31	4,28	4,25
—3	4,90	4,86	4,82	4,79	4,75	4,72	4,68	4,65	4,61	4,58
—2	5,27	5,24	5,20	5,16	5,12	5,08	5,05	5,01	4,97	4,93
—1	5,68	5,64	5,59	5,55	5,51	5,47	5,43	5,39	5,35	5,31
—0	6,11	6,06	6,02	5,98	5,93	5,89	5,85	5,80	5,76	5,72
0	6,11	6,15	6,20	6,24	6,29	6,33	6,38	6,42	6,47	6,52
1	6,57	6,61	6,66	6,71	6,76	6,81	6,85	6,90	6,95	7,00
2	7,05	7,10	7,16	7,21	7,26	7,31	7,36	7,41	7,47	7,52
3	7,57	7,63	7,68	7,74	7,79	7,85	7,90	7,96	8,01	8,07

t °C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
4	8,13	8,19	8,24	8,30	8,36	8,42	8,48	8,54	8,60	8,66
5	8,72	8,78	8,84	8,90	8,96	9,03	9,09	9,15	9,22	9,28
6	9,35	9,41	9,48	9,54	9,61	9,67	9,74	9,81	9,88	9,94
7	10,01	10,08	10,15	10,22	10,29	10,36	10,43	10,50	10,58	10,65
8	10,72	10,79	10,87	10,94	11,02	11,09	11,17	11,24	11,32	11,40
9	11,47	11,55	11,63	11,71	11,79	11,87	11,95	12,03	12,11	12,19
10	12,27	12,35	12,44	12,52	12,60	12,69	12,77	12,86	12,94	13,03
11	13,12	13,21	13,29	13,38	13,47	13,56	13,65	13,74	13,83	13,92
12	14,02	14,11	14,20	14,30	14,39	14,48	14,58	14,68	14,77	14,87
13	14,97	15,07	15,16	15,26	15,36	15,46	15,56	15,67	15,77	15,87
14	15,98	16,08	16,18	16,29	16,39	16,50	16,61	16,72	16,82	16,93
15	17,04	17,15	17,26	17,37	17,49	17,60	17,71	17,83	17,94	18,06
16	18,17	18,29	18,40	18,52	18,64	18,76	18,88	19,00	19,12	19,24
17	19,37	19,49	19,61	19,74	19,86	19,99	20,11	20,24	20,37	20,50
18	20,63	20,76	20,89	21,02	21,15	21,29	21,42	21,55	21,69	21,83
19	21,96	22,10	22,24	22,38	22,52	22,66	22,80	22,94	23,08	23,23
20	23,37	23,52	23,66	23,81	23,96	24,10	24,25	24,40	24,55	24,71
21	24,86	25,01	25,17	25,32	25,48	25,63	25,79	25,95	26,11	26,27
22	26,43	26,59	26,75	26,92	27,08	27,24	27,41	27,58	27,75	27,91
23	28,08	28,25	28,43	28,60	28,77	28,94	29,12	29,30	29,47	29,65
24	29,83	30,01	30,19	30,37	30,55	30,74	30,92	31,11	31,30	31,48
25	31,67	31,86	32,05	32,24	32,43	32,62	32,82	33,01	33,21	33,41
26	33,61	33,81	34,01	34,21	34,41	34,61	34,82	35,03	35,23	35,44
27	35,65	35,86	36,07	36,28	36,49	36,71	36,92	37,14	37,35	37,57
28	37,79	38,01	38,24	38,46	38,68	38,91	39,13	39,36	39,59	39,82
29	40,05	40,28	40,52	40,75	40,98	41,22	41,46	41,70	41,94	42,18
30	42,43	42,67	42,92	43,16	43,41	43,66	43,91	44,16	44,41	44,67
31	44,92	45,18	45,44	45,70	45,96	46,22	46,48	46,75	47,01	47,28
32	44,55	47,82	48,09	48,36	48,63	48,91	49,18	49,46	49,74	50,02
33	50,30	50,39	50,87	51,16	51,44	51,73	52,02	52,31	52,61	52,90
34	53,20	53,49	53,79	54,09	54,39	54,70	55,00	55,31	55,61	55,92
35	56,23	56,54	56,86	57,17	57,49	57,81	58,13	58,45	58,77	59,09
36	59,42	59,75	60,07	60,40	60,74	61,07	61,40	61,74	62,08	62,42
37	62,76	63,10	63,45	63,79	64,14	64,40	64,84	65,19	65,55	65,90
38	66,26	66,62	66,98	67,34	67,71	68,07	68,44	68,81	69,18	69,56
39	69,93	70,31	70,68	71,06	71,45	71,82	72,21	72,60	72,99	73,38
40	73,77	74,17	74,56	74,96	75,36	75,76	76,17	76,57	76,98	77,39

Над плоской поверхностью чистого льда

—40	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
—39	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13
—38	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14
—37	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16	0,16
—36	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18
—35	0,22	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20
—34	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24	0,24	0,23	0,23	0,23	0,23
—33	0,28	0,27	0,27	0,27	0,27	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25
—32	0,31	0,30	0,30	0,30	0,30	0,29	0,29	0,29	0,28	0,28
—31	0,34	0,34	0,33	0,33	0,33	0,32	0,32	0,32	0,31	0,31
—30	0,38	0,38	0,37	0,37	0,36	0,36	0,36	0,35	0,35	0,34
—29	0,42	0,42	0,41	0,41	0,40	0,40	0,40	0,39	0,39	0,38
—28	0,47	0,46	0,46	0,45	0,45	0,44	0,44	0,43	0,43	0,43
—27	0,52	0,51	0,51	0,50	0,50	0,49	0,49	0,48	0,48	0,47
—26	0,57	0,57	0,56	0,55	0,55	0,54	0,54	0,53	0,53	0,52
—25	0,63	0,63	0,62	0,61	0,61	0,60	0,60	0,59	0,58	0,58

t °C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
-24	0,70	0,69	0,68	0,68	0,67	0,66	0,66	0,65	0,64	0,64
-23	0,77	0,76	0,76	0,75	0,74	0,73	0,73	0,72	0,72	0,71
-22	0,85	0,84	0,83	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79	0,79	0,78
-21	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,89	0,88	0,87	0,86
-20	1,03	1,02	1,01	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,96	0,95
-19	1,14	1,12	1,11	1,10	1,09	1,08	1,07	1,06	1,05	1,04
-18	1,25	1,24	1,22	1,21	1,20	1,19	1,18	1,17	1,16	1,15
-17	1,37	1,36	1,35	1,33	1,32	1,31	1,30	1,28	1,27	1,26
-16	1,50	1,49	1,48	1,46	1,45	1,44	1,42	1,41	1,40	1,38
-15	1,65	1,64	1,62	1,61	1,59	1,58	1,56	1,55	1,53	1,52
-14	1,81	1,79	1,78	1,76	1,75	1,73	1,71	1,70	1,68	1,67
-13	1,98	1,96	1,95	1,93	1,91	1,90	1,88	1,86	1,84	1,83
-12	2,17	2,15	2,13	2,11	2,09	2,08	2,06	2,04	2,02	2,00
-11	2,37	2,35	2,33	2,31	2,29	2,27	2,25	2,23	2,21	2,19
-10	2,60	2,57	2,55	2,53	2,51	2,48	2,46	2,44	2,42	2,40
-9	2,84	2,82	2,79	2,76	2,74	2,71	2,69	2,67	2,64	2,62
-8	3,10	3,07	3,04	3,02	2,99	2,96	2,94	2,91	2,89	2,86
-7	3,38	3,35	3,32	3,29	3,26	3,24	3,21	3,18	3,15	3,12
-6	3,68	3,65	3,62	3,59	3,56	3,53	3,50	3,47	3,44	3,41
-5	4,01	3,98	3,95	3,91	3,88	3,85	3,81	3,78	3,75	3,72
-4	4,37	4,33	4,30	4,26	4,22	4,19	4,15	4,12	4,08	4,05
-3	4,76	4,72	4,68	4,64	4,60	4,56	4,52	4,48	4,45	4,41
-2	5,17	5,13	5,09	5,04	5,00	4,96	4,92	4,88	4,84	4,80
-1	5,62	5,58	5,53	5,48	5,44	5,39	5,35	5,30	5,26	5,22
0	6,11	6,06	6,01	5,96	5,91	5,86	5,81	5,76	5,72	5,67

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Коэффициент сжимаемости влажного воздуха *

t °C	p гПа	Относительная влажность, %				
		0	25	50	75	100
10,0	1000,0	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9995
	1050,0	0,9995	0,9995	0,9995	0,9995	0,9994
20,0	1000,0	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9995
	1050,0	0,9996	0,9996	0,9996	0,9995	0,9995
30,0	1000,0	0,9997	0,9997	0,9996	0,9996	0,9995
	1050,0	0,9997	0,9997	0,9996	0,9996	0,9995

* Переработанное извлечение из Международных метеорологических таблиц ВМО № 168 ТР.94, табл. 4.12-5.— Обнинск, 1975.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Значения K_1 при разных Δt и Δu , по Л. В. Дубровину *

Δu м/с	Δt °C									
	-2,0	-1,9	-1,8	-1,7	-1,6	-1,5	-1,4	-1,3	-1,2	-1,1
0,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0,6	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0,7	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
0,8	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
0,9	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
1,0	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
1,1	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05
1,2	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
1,3	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
1,4	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07
1,5	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08
1,6	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09
1,7	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10
1,8	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11
1,9	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11
2,0	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12
2,1	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13
2,2	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14
2,3	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15
2,4	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16
2,5	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17
2,6	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18
2,7	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19
2,8	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20
2,9	0,19	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21
3,0	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22
3,1	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23
3,2	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24
3,3	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25
3,4	0,24	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26
3,5	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27

Δu м/с	Δt °C									
	-1,0	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1
0,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
0,4	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0,5	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03

* Руководство по теплобалансовым наблюдениям.—Л.: Гидрометеоздат, 1977, с. 120—123.

Δu м/с	Δt °C									
	-1,0	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1
0,6	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04
0,7	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05
0,8	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06
0,9	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07
1,0	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,08
1,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,08	0,09
1,2	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,10
1,3	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,09	0,10	0,11
1,4	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,11	0,12
1,5	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,12	0,13
1,6	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,12	0,13	0,14
1,7	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,13	0,14	0,15
1,8	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,15	0,16
1,9	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,16	0,17
2,0	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17	0,18
2,1	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,18	0,19
2,2	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,17	0,18	0,19	0,20
2,3	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,20	0,21
2,4	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,20	0,21	0,22
2,5	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,20	0,20	0,21	0,22	0,23
2,6	0,18	0,19	0,19	0,20	0,20	0,21	0,21	0,22	0,23	0,24
2,7	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,24	0,26
2,8	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,25	0,27
2,9	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,26	0,28
3,0	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27	0,29
3,1	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,30
3,2	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	0,29	0,31
3,3	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,30	0,32
3,4	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,30	0,30	0,32	0,34
3,5	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29	0,30	0,30	0,31	0,32	0,34

Δu м/с	Δt °C										
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,3	0,03	0,05	0,06	0,08	0,09	0,10	0,10	0,12	0,12	0,13	0,14
0,4	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,14
0,5	0,05	0,07	0,08	0,09	0,10	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,14
0,6	0,06	0,08	0,09	0,10	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14
0,7	0,07	0,09	0,10	0,11	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15
0,8	0,08	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15
0,9	0,09	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16
1,0	0,10	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,17

Δu м/с	Δt °C										
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1,1	0,11	0,13	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18
1,2	0,12	0,14	0,15	0,16	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,19
1,3	0,14	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,20	0,20
1,4	0,15	0,16	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,21
1,5	0,16	0,17	0,18	0,19	0,19	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22
1,6	0,17	0,18	0,19	0,20	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23
1,7	0,18	0,19	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24
1,8	0,19	0,20	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25
1,9	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,26
2,0	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27
2,1	0,22	0,23	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28
2,2	0,23	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29
2,3	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,30
2,4	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28	0,29	0,30	0,30	0,30	0,30	0,31
2,5	0,26	0,28	0,28	0,29	0,29	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,32
2,6	0,27	0,28	0,29	0,30	0,30	0,31	0,32	0,32	0,32	0,32	0,33
2,7	0,28	0,30	0,30	0,31	0,32	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34
2,8	0,29	0,30	0,31	0,32	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,35	0,35
2,9	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35	0,36	0,36
3,0	0,31	0,32	0,33	0,34	0,34	0,35	0,36	0,36	0,36	0,37	0,37
3,1	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,36	0,36	0,37	0,37	0,38	0,38
3,2	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,37	0,37	0,38	0,38	0,39	0,39
3,3	0,34	0,35	0,36	0,37	0,37	0,38	0,38	0,39	0,39	0,40	0,40
3,4	0,35	0,36	0,38	0,38	0,39	0,39	0,40	0,40	0,40	0,41	0,41
3,5	0,36	0,38	0,38	0,39	0,40	0,40	0,40	0,41	0,41	0,42	0,42

Δu м/с	Δt °C									
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
0,3	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,20	0,21	0,22	0,23
0,4	0,14	0,15	0,16	0,16	0,17	0,18	0,18	0,19	0,20	0,21
0,5	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19
0,6	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19
0,7	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19
0,8	0,16	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,20
0,9	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20
1,0	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,21
1,1	0,18	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22
1,2	0,19	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22
1,3	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23
1,4	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24
1,5	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25

Δu м/с	Δt °C									
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
1,6	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26
1,7	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27
1,8	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28
1,9	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29
2,0	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,30
2,1	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30	0,31
2,2	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,32
2,3	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
2,4	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,33
2,5	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,34
2,6	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,35
2,7	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,35	0,36	0,36	0,36	0,36
2,8	0,35	0,35	0,36	0,36	0,36	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
2,9	0,36	0,36	0,36	0,37	0,37	0,37	0,38	0,38	0,38	0,38
3,0	0,37	0,37	0,38	0,38	0,38	0,38	0,39	0,39	0,39	0,40
3,1	0,38	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,40	0,40	0,40	0,41
3,2	0,39	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,41	0,41	0,41	0,42
3,3	0,40	0,41	0,41	0,41	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
3,4	0,41	0,42	0,42	0,42	0,42	0,43	0,43	0,43	0,43	0,44
3,5	0,43	0,43	0,43	0,43	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Склонение Солнца в истинный полдень в 1984 г.*

Число	Месяц					
	I	II	III	IV	V	VI
1	-23 05	-17 23	-7 36	4 32	15 04	22 03
2	-23 00	-17 06	-7 13	4 55	15 22	22 11
3	-22 55	-16 49	-6 50	5 18	15 40	22 19
4	-22 49	-16 32	-6 27	5 41	15 57	22 26
5	-22 43	-16 14	-6 04	6 04	16 15	22 33
6	-22 37	-15 56	-5 40	6 26	16 32	22 39
7	-22 30	-15 37	-5 17	6 49	16 48	22 45
8	-22 23	-15 19	-4 54	7 12	17 05	22 51
9	-22 15	-15 00	-4 30	7 34	17 21	22 56
10	-22 06	-14 41	-4 07	7 56	17 37	23 01
11	-21 58	-14 21	-3 43	8 18	17 52	23 05
12	-21 48	-14 02	-3 20	8 40	18 08	23 09
13	-21 39	-13 42	-2 56	9 02	18 23	23 13
14	-21 29	-13 21	-2 32	9 24	18 37	23 16
15	-21 18	-13 02	-2 09	9 45	18 52	23 19

* Астрономический ежегодник СССР на 1984 г.—Л.: Наука, 1981.

Число	Месяц					
	I	II	III	IV	V	VI
16	-21 08	-12 41	-1 45	10 07	19 06	23 21
17	-20 56	-12 20	-1 21	10 28	19 19	23 23
18	-20 45	-11 59	-0 58	10 49	19 33	23 24
19	-20 33	-11 38	-0 34	11 10	19 46	23 26
20	-20 20	-11 17	-0 10	11 30	19 58	23 26
21	-20 08	-10 56	0 13	11 51	20 11	23 27
22	-19 54	-10 34	0 37	12 11	20 23	23 26
23	-19 41	-10 12	1 01	12 31	20 34	23 26
24	-19 27	-9 50	1 24	12 51	20 46	23 25
25	-19 13	-9 28	1 48	13 11	20 57	23 24
26	-18 58	-9 06	2 12	13 30	21 07	23 22
27	-18 43	-8 44	2 35	13 49	21 17	23 20
28	-18 29	-8 21	2 59	14 08	21 27	23 17
29	-18 12	-7 58	3 22	14 27	21 37	23 14
30	-17 56	—	3 45	14 46	21 46	23 11
31	-17 40	—	4 09	—	21 55	—

Число	Месяц					
	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	23 07	18 02	8 18	-3 10	-14 25	-21 48
2	23 03	17 47	7 56	-3 34	-14 44	-21 57
3	22 58	17 31	7 34	-3 57	-15 03	-22 06
4	22 53	17 15	7 12	-4 20	-15 22	-22 14
5	22 48	16 59	6 50	-4 43	-15 40	-22 22
6	22 42	16 43	6 27	-5 06	-15 58	-22 29
7	22 36	16 26	6 05	-5 29	-16 16	-22 36
8	22 29	16 09	5 43	-5 52	-16 34	-22 43
9	22 22	15 52	5 20	-6 15	-16 51	-22 49
10	22 15	15 35	4 57	-6 38	-17 08	-22 55
11	22 07	15 17	4 35	-7 00	-17 25	-23 00
12	21 59	14 59	4 12	-7 23	-17 41	-23 05
13	21 50	14 41	4 49	-7 45	-17 57	-23 09
14	21 41	14 23	3 26	-8 08	-18 13	-23 13
15	21 32	14 04	3 03	-8 30	-18 28	-23 16
16	21 22	13 45	2 40	-8 52	-18 44	-23 19
17	21 12	13 26	2 16	-9 14	-18 58	-23 21
18	21 02	13 07	1 53	-9 36	-19 13	-23 23
19	20 51	12 47	1 30	-9 58	-19 27	-23 25
20	20 40	12 28	1 07	-10 19	-19 41	-23 26
21	20 29	12 08	0 43	-10 41	-19 54	-23 26
22	20 17	11 48	0 20	-11 02	-20 07	-23 27
23	20 05	11 28	-0 03	-11 23	-20 20	-23 26
24	19 53	11 07	-0 27	-11 44	-20 33	-23 25
25	19 40	10 47	-0 50	-12 05	-20 44	-23 24

Число	Месяц					
	VII	VIII	IX	X	XI	XII
26	19 27	10 26	-1 13	-12 26	-20 56	-23 22
27	19 13	10 05	-1 37	-12 46	-21 07	-23 20
28	19 00	9 44	-2 00	-13 06	-21 18	-23 17
29	18 46	9 22	-2 24	-13 26	-21 28	-23 14
30	18 31	9 01	-2 47	-13 46	-21 38	-23 10
31	18 17	8 39	—	-14 06	—	-23 06

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Таблица Бемпорада (значения m при разных высотах Солнца $h_{\odot}^{\circ}$)*

$h_{\odot}^{\circ}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	39,6	27,0	19,8	15,4	12,4	10,4	8,9	7,8	6,9	6,18
10	5,60	5,12	4,72	4,37	4,08	3,82	3,59	3,39	3,21	3,05
20	2,90	2,77	2,65	2,55	2,45	2,36	2,27	2,20	2,12	2,06
30	2,00	1,94	1,88	1,83	1,78	1,74	1,70	1,66	1,62	1,59
40	1,55	1,52	1,49	1,46	1,44	1,41	1,39	1,37	1,34	1,32
50	1,30	1,28	1,27	1,25	1,24	1,22	1,20	1,19	1,18	1,17
60	1,15	1,14	1,13	1,12	1,11	1,10	1,09	1,09	1,08	1,07
70	1,06	1,06	1,05	1,05	1,04	1,04	1,03	1,03	1,02	1,02
80	1,015	1,012	1,010	1,007	1,005	1,004	1,002	1,002	1,001	1,00
90	1,00									

* Руководство гидрометеорологическим станциям по актинометрическим наблюдениям.— Л.: Гидрометеонздат, 1971.

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Поправки ΔS (кВт/м²) при разных S и в различные даты *

Даты		S	ΔS	S	ΔS	S	ΔS
Первое полугодие	Второе полугодие						
1.01—13.02	23.11—31.12	0,12—0,58	-0,01	0,59—0,81	-0,02	0,82—1,05	-0,03
14.02—7.03	1—22.11	<0,18	0,00	0,18—0,87	-0,01	>0,87	-0,02
8—25.03	14.10—31.10	<0,36	0,00	>0,36	-0,01	—	—
26.03—11.04	26.09—13.10	При всех значениях S поправка $\Delta S=0$					
12—30.04	8.09—25.09	<0,36	0,00	>0,36	0,01	—	—
1—21.05	17.08—7.09	<0,18	0,00	0,18—0,87	0,01	>0,87	0,02
22.05—30.06	1.07—16.08	0,12—0,58	0,01	0,59—0,81	0,02	0,82—1,05	0,03

* Таблица С. И. Сивкова, пересчитанная в кВт/м². Руководство гидрометеорологическим станциям по актинометрическим наблюдениям.— Л.: Гидрометеонздат, 1971.

ПРИЛОЖЕНИЕ 8 *

Таблица для приведения S_p к высоте Солнца $h_{\odot} = 30^\circ$

$h_{\odot}$						$S_{p, 30}$ кВт/м ²	$h_{\odot}$					
10	13	16	19	22	25		36	42	48	54	60	70
0,18	0,24	0,31	0,36	0,40	0,44	0,49	0,54	0,59	0,64	0,67	0,70	0,72
0,20	0,27	0,33	0,39	0,43	0,47	0,52	0,57	0,62	0,67	0,70	0,73	0,75
0,22	0,30	0,36	0,41	0,45	0,49	0,54	0,60	0,66	0,70	0,73	0,75	0,77
0,25	0,33	0,39	0,43	0,48	0,52	0,57	0,63	0,68	0,73	0,75	0,78	0,80
0,28	0,35	0,41	0,46	0,51	0,54	0,60	0,66	0,70	0,75	0,77	0,80	0,82
0,31	0,38	0,44	0,49	0,54	0,57	0,63	0,68	0,73	0,77	0,80	0,82	0,84
0,33	0,40	0,47	0,52	0,57	0,60	0,66	0,71	0,76	0,80	0,82	0,84	0,86
0,36	0,43	0,50	0,55	0,59	0,63	0,68	0,74	0,77	0,81	0,84	0,86	0,88
0,38	0,46	0,53	0,58	0,62	0,66	0,70	0,77	0,80	0,83	0,86	0,88	0,89
0,41	0,49	0,56	0,61	0,65	0,68	0,74	0,79	0,82	0,85	0,88	0,90	0,91
0,44	0,52	0,59	0,63	0,68	0,71	0,77	0,82	0,85	0,88	0,90	0,92	0,94
0,47	0,54	0,61	0,66	0,70	0,74	0,80	0,84	0,88	0,91	0,93	0,94	0,96
0,50	0,58	0,64	0,70	0,74	0,77	0,82	0,87	0,90	0,93	0,95	0,96	0,98
0,54	0,61	0,67	0,73	0,77	0,80	0,85	0,90	0,93	0,95	0,97	0,99	1,00
0,56	0,64	0,70	0,75	0,80	0,84	0,88	0,92	0,95	0,97	0,99	1,00	1,02
0,59	0,67	0,73	0,79	0,83	0,87	0,91	0,94	0,97	0,98	1,01	1,03	1,04
0,62	0,70	0,77	0,82	0,85	0,89	0,94	0,97	0,99	1,01	1,03	1,05	1,06
0,66	0,74	0,80	0,85	0,89	0,92	0,96	0,99	1,01	1,03	1,05	1,07	1,08
0,69	0,77	0,84	0,89	0,92	0,95	0,99	1,02	1,04	1,06	1,07	1,09	1,10
0,73	0,81	0,88	0,92	0,96	0,98	1,02	1,05	1,06	1,08	1,10	1,11	1,12
0,77	0,84	0,91	0,96	0,98	1,02	1,05	1,07	1,09	1,10	1,12	1,13	1,14
0,82	0,89	0,95	0,99	1,01	1,04	1,07	1,10	1,12	1,13	1,14	1,15	1,17
0,87	0,94	0,98	1,02	1,05	1,07	1,10	1,12	1,14	1,16	1,17	1,18	1,19

* Сокращенная таблица С. И. Сивкова, пересчитанная в кВт/м². Руководство гидрометеорологических станций по актиметрическим наблюдениям.— Л.: Гидрометеиздат, 1971.

ПРИЛОЖЕНИЕ 9 *

Коэффициент прозрачности P_2 , приведенный к $m=2$, в зависимости от $S_{p, 30}$

$S_{p, 30}$ кВт/м ²	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,3	0,466	0,474	0,481	0,489	0,496	0,503	0,510	0,518	0,524	0,531
0,4	0,538	0,545	0,551	0,558	0,564	0,571	0,577	0,583	0,589	0,596
0,5	0,602	0,608	0,613	0,619	0,625	0,631	0,637	0,642	0,648	0,653
0,6	0,659	0,664	0,670	0,675	0,681	0,686	0,691	0,696	0,702	0,707
0,7	0,712	0,717	0,722	0,727	0,732	0,737	0,742	0,747	0,751	0,756
0,8	0,761	0,766	0,770	0,775	0,780	0,784	0,789	0,793	0,798	0,803
0,9	0,807	0,812	0,816	0,820	0,825	0,829	0,834	0,838	0,842	0,846
1,0	0,851	0,855	0,859	0,864	0,868	0,872	0,876	0,880	0,884	0,888

* Пересчитанная в кВт/м² таблица С. И. Сивкова. Методические указания по определению характеристик прозрачности атмосферы.— Л.: ГГО, 1965.

ПРИЛОЖЕНИЕ 10

Значения σT^4 (кВт/м²) для разных температур ($\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-11}$ кВт/(м²·К⁴))

t °C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-60	0,12	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
-50	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12
-40	0,17	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14
-30	0,20	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17
-20	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20
-10	0,27	0,27	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24
-0	0,32	0,31	0,31	0,30	0,30	0,29	0,29	0,28	0,28	0,28
0	0,32	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35	0,36
10	0,36	0,37	0,37	0,38	0,39	0,39	0,40	0,40	0,41	0,41
20	0,42	0,42	0,43	0,43	0,44	0,45	0,45	0,46	0,47	0,47
30	0,48	0,49	0,49	0,50	0,50	0,51	0,52	0,52	0,53	0,54
40	0,55	0,55	0,56	0,57	0,57	0,58	0,59	0,60	0,60	0,61
50	0,62	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,67	0,68	0,69
60	0,70	0,71	0,72	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76	0,77	0,78

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

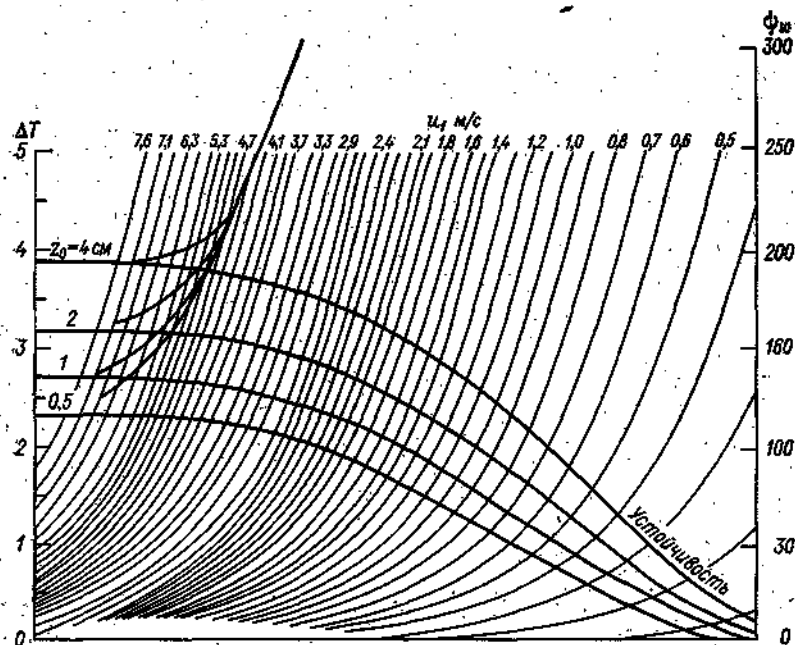
Параметры химических соединений (ядер конденсации)

Вещество	μ кг/кмоль	$\rho \cdot 10^3$ кг/м ³	$\rho_p \cdot 10^3$ кг/м ³	n_p	
				t=0 °C	t=10 °C
NaCl	58	2,14	1,21	0,357	0,357
NaNO ₃	84,99	2,25	1,38	0,727	0,799
(NH ₄) ₂ SO ₄	132,16	1,77	1,42	0,710	0,727
CaCl ₂	110,98	2,15		0,595	0,650

Примечание. ρ_p — плотность насыщенного раствора, n_p — концентрация соли насыщенных растворов веществ в воде.

ПРИЛОЖЕНИЕ 12

Номограмма Монина—Казанского



ПРИЛОЖЕНИЕ 13

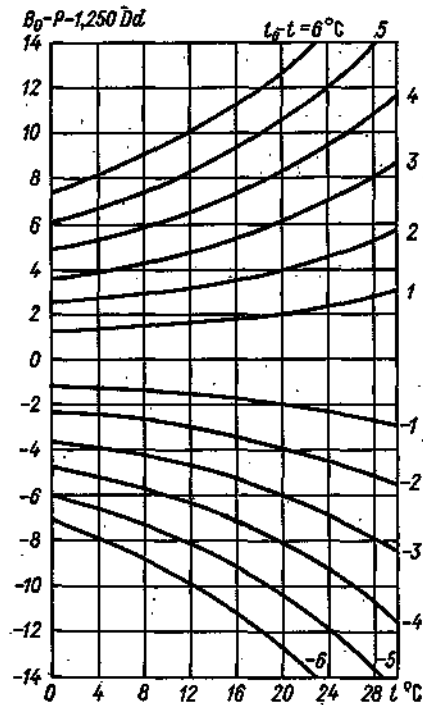
Некоторые параметры воды и льда

t °C	$\rho_{\text{л}}$ кг/м³	Теплота фазового перехода, Дж/кг		Поверхностная энергия, Дж/м²	
		C	C _c	$\sigma_{\text{п-в}}$	$\sigma_{\text{п-л}}$
30		$2,42 \cdot 10^6$		$71,2 \cdot 10^{-3}$	
20		2,45		72,8	
10		2,47		74,2	
0	917	2,50	$2,83 \cdot 10^6$	75,6	80,5
-5	918	2,51	2,84	76,4	80,9
-10	918	2,52	2,85	77,1*	81,3
-15	919	2,54	2,86	77,6*	81,7
-20	920	2,55	2,87	78,6*	82,2
-30	921	2,58	2,88	80,0*	83,1
-40	923	$2,61 \cdot 10^6$	$2,89 \cdot 10^6$	81,5*	84,0

Примечание: Значения $\sigma_{\text{п-в}}$ заимствованы из учебника Л. Т. Матвеева «Курс общей метеорологии» (1976 г.), кроме отмеченных звездочкой, которые получены путем линейной экстраполяции; значения $\sigma_{\text{п-л}}$ — по Л. Г. Качурину.

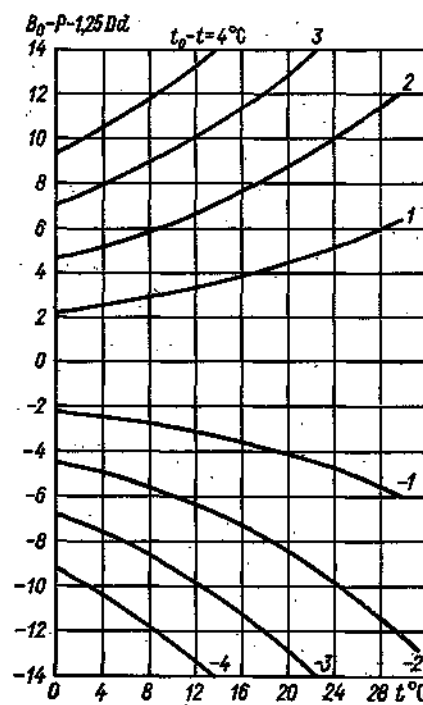
ПРИЛОЖЕНИЕ 14

Номограмма для определения разности температур увлажненной поверхности почвы и воздуха при скорости ветра 1 м/с



ПРИЛОЖЕНИЕ 15

Номограмма для определения разности температур увлажненной поверхности почвы и воздуха при скорости ветра 5 м/с



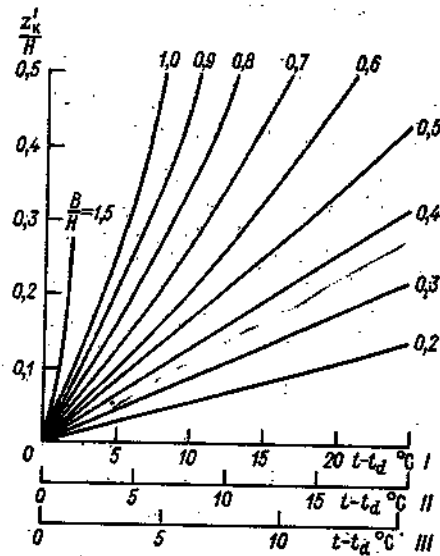
ПРИЛОЖЕНИЕ 16

Значения B ($5,30 \cdot 10^{-5}$ м)

t °C	γ °C/100 м								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
-40	87,63	32,43	19,80	14,28	11,16	9,15	7,77	6,74	5,96
-30	111,55	37,49	22,47	16,05	12,49	10,23	8,65	7,50	6,62
-20	143,06	43,47	25,53	18,03	13,98	11,41	9,61	8,33	7,34
-10	196,19	50,14	28,75	20,17	15,52	12,63	10,63	9,20	8,10
0	—	57,96	32,43	22,47	17,20	13,94	11,62	10,10	8,88
10	—	67,16	36,34	25,07	19,00	15,34	12,86	11,06	9,71
20	—	78,20	39,79	27,83	21,00	16,88	14,12	12,12	10,63
30	—	91,31	46,00	30,82	23,23	18,52	15,43	13,25	11,62
40	—	106,03	51,52	34,04	25,30	20,22	16,81	14,40	12,65

ПРИЛОЖЕНИЕ 17

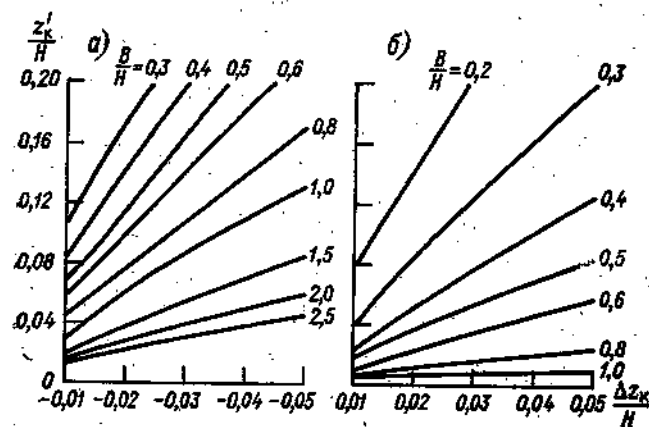
Номограмма для расчета высоты нижней границы облаков при $\omega=0$



I) $t_d > 15^\circ\text{C}$, II) $t_d = -15 \dots 15^\circ\text{C}$,
III) $t_d < -15^\circ\text{C}$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 18

График для определения поправки Δz_k на вертикальную скорость



а) $\eta=2$, б) $\eta=-2$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 19

Температура капли и значения $E_K - e$ при $p=900$ гПа

f %	t_K °C	$E_K - e$ гПа	f %	t_K °C	$E_K - e$ гПа	f %	t_K °C	$E_K - e$ гПа
$t=0,0$ °C			71	3,7	1,33	58	6,1	2,26
98	-0,1	0,06	68	3,5	1,45	56	5,9	2,38
95	-0,3	0,15	66	3,3	1,57	54	5,7	2,49
92	-0,5	0,29	64	3,1	1,68	52	5,5	2,61
88	-0,7	0,41	61	2,9	1,80	50	5,3	2,73
85	-0,9	0,52	59	2,7	1,91	$t=12,0$ °C		
82	-1,1	0,64	56	2,5	2,03	99	11,9	0,06
78	-1,3	0,75	54	2,3	2,15	97	11,7	0,17
75	-1,5	0,87	52	2,1	2,26	95	11,5	0,29
72	-1,7	0,99	49	1,9	2,38	92	11,3	0,41
69	-1,9	1,10	$t=10,0$ °C			90	11,1	0,52
66	-2,1	1,22	99	9,9	0,06	88	10,9	0,64
63	-2,3	1,33	97	9,7	0,17	86	10,7	0,75
59	-2,5	1,45	94	9,5	0,29	84	10,5	0,87
56	-2,7	1,57	92	9,3	0,41	82	10,3	0,99
53	-2,9	1,68	90	9,1	0,52	80	10,1	1,10
50	-3,1	1,80	88	8,9	0,64	78	9,9	1,22
$t=6,0$ °C			85	8,7	0,75	76	9,7	1,33
99	5,9	0,06	83	8,5	0,87	74	9,5	1,45
96	5,7	0,17	81	8,3	0,99	72	9,3	1,57
94	5,5	0,29	79	8,1	1,10	70	9,1	1,68
91	5,3	0,41	77	7,9	1,22	68	8,9	1,80
88	5,1	0,52	75	7,7	1,33	66	8,7	1,91
86	4,9	0,64	73	7,5	1,45	65	8,5	2,03
83	4,7	0,75	70	7,3	1,57	63	8,3	2,15
81	4,5	0,87	68	7,1	1,68	61	8,1	2,26
78	4,3	0,99	66	6,9	1,80	59	7,9	2,38
76	4,1	1,10	64	6,7	1,91	57	7,7	2,49
73	3,9	1,22	62	6,5	2,03	55	7,5	2,61
			60	6,3	2,15	53	7,3	2,73
						52	7,1	2,84

ПРИЛОЖЕНИЕ 20

Коэффициент соударения $\mathcal{E}$ для облачных капель разных размеров при $t=0$ °C и $p=900$ гПа

R мкм	r мкм							
	2	3	4	6	8	10	15	20
15	0,03	0,05	—	—	—	—	—	—
25	0,01	0,02	0,05	0,23	—	—	—	—
40	0,004	0,01	0,04	0,29	0,55	—	—	—
70	0,02	0,03	0,11	0,40	0,65	0,83	1,12	—
100	0,03	0,07	0,18	0,47	0,67	0,83	1,08	1,26

R км	r км							
	2	3	4	6	8	10	15	20
150	0,07	0,14	0,28	0,55	0,72	0,84	1,04	1,16
200	0,10	0,21	0,35	0,61	0,76	0,86	1,01	1,11
300	0,15	0,31	0,45	0,68	0,80	0,89	1,00	1,06
400	0,17	0,37	0,51	0,72	0,84	0,91	1,00	1,06
600	0,17	0,40	0,54	0,74	0,85	0,91	0,99	1,02
1000	0,15	0,37	0,52	0,74	0,83	0,90	0,97	1,00
1400	0,11	0,34	0,49	0,71	0,83	0,89	0,96	0,96
1800	0,08	0,29	0,45	0,68	0,80	0,86	0,98	0,95
2400	0,04	0,22	0,39	0,62	0,75	0,83	0,93	0,97
3000	0,02	0,16	0,33	0,55	0,71	0,81	0,91	0,95

ПРИЛОЖЕНИЕ 21

Некоторые астрономические данные о Солнце, Луне и планетах солнечной системы

Название	Радиус, км	Среднее расстояние от Солнца, 10 ⁶ км	Название	Радиус, км	Среднее расстояние от Солнца, 10 ⁶ км
Солнце	700 000		Юпитер	71 820	777,8
Меркурий	2 420	57,87	Сатурн	60 250	1426,1
Венера	6 200	108,14	Уран	26 700	2867,7
Земля	6 378	149,50	Нептун	24 800	4494
Марс	3 390	227,79	Плутон	<6 500	9508

Примечание. Среднее расстояние от Луны до Земли составляет 384 000 км.

ПРИЛОЖЕНИЕ 22

Потенциалы ионизации основных атмосферных газов

Газ	NO	O ₂	O	N ₂	N	He	H ₂	H
Потенциал ионизации, В	9,25	12,2	13,6	15,5	14,5	24,6	15,4	13,6

ПРИЛОЖЕНИЕ 23

Число молекул N в 1 м^3 воздуха по модели CJRA (1961 г.) и объемные коэффициенты молекулярного общего рассеяния σ_m и рассеяния назад $\sigma_{\text{лм}}$ на различных высотах над поверхностью Земли для $\lambda=0,69 \text{ мкм}$

$z \text{ км}$	0	4	8	12	16	20
$N \text{ м}^{-3}$	2,55 25	1,70 25	1,11 25	6,56 24	3,53 24	1,85 24
$\sigma_m \text{ м}^{-1}$	4,69 —6	2,15 —6	2,04 —6	1,21 —6	6,49 —7	3,40 —7
$\sigma_{\text{лм}} \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$	5,58 —7	2,56 —7	2,42 —7	1,44 —7	7,72 —8	4,05 —8
$z \text{ км}$	24	28	32	36	40	44
$N \text{ м}^{-3}$	9,76 23	5,22 23	2,82 23	1,53 23	8,46 22	4,76 22
$\sigma_m \text{ м}^{-1}$	1,80 —7	9,60 —8	5,18 —8	2,81 —8	1,56 —8	8,75 —9
$\sigma_{\text{лм}} \text{ м}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$	2,14 —8	1,14 —8	8,16 —9	3,34 —9	1,86 —9	1,05 —9
$z \text{ км}$	56	68	80	100	110	120
$N \text{ м}^{-3}$	1,01 22	2,39 21	4,03 20	9,98 18	1,99 18	5,15 17
$z \text{ км}$	130	150	200	250	300	350
$N \text{ м}^{-3}$	1,48 17	3,63 16	8,05 15	2,42 15	8,48 14	3,41 14

Примечание. Второе число в графе — показатель степени десяти. Например, 2,55 25 означает $2,55 \cdot 10^{25}$.

ПРИЛОЖЕНИЕ 24

Суммарная освещенность горизонтальной поверхности Земли в Павловске, по данным Н. Н. Калитина

Безоблачные дни											
$h_{\odot}^{\circ}$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50 55
$E \cdot 10^3 \text{ лк}$	0,5	4,2	10,4	17,8	25,0	33,0	41,8	50,0	57,8	68,1	77,0 86,9
Сумерки											
$-h_{\odot}^{\circ}$	0	1,0	2,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	8,5		
$E \text{ лк}$	674	520	120	27	7,3	2,6	1,05	0,36	0,15		

ПРИЛОЖЕНИЕ 25

Коэффициенты $\alpha_a(\lambda)$ для наиболее вероятных значений параметров микроструктуры облаков и туманов (наименьший радиус $a=6 \text{ мкм}$, гамма-распределение, параметр $\mu=2$) при $S_m=0,2 \text{ км}$ (по В. Е. Зуеву)

$\lambda \text{ мкм}$	0,31	0,51	0,69	0,81	1,06	2,00	4,55	5,27	10,6
$\alpha_a(\lambda) \text{ км}^{-1}$	19,5	19,6	19,7	19,7	19,9	20,3	21,6	22,2	19,6

ПРИЛОЖЕНИЕ 26

Коэффициенты $\alpha_a(\lambda)$ для наиболее вероятных параметров микроструктуры атмосферной дымки ($\beta=4$, юнговское распределение, $a_{\text{min}}=0,05 \text{ мкм}$ и $a_{\text{max}}=5,0 \text{ мкм}$) при $S_m=10 \text{ км}$ в приземном слое атмосферы (по В. Е. Зуеву)

$\lambda \text{ мкм}$	0,31	0,63	0,69	0,81	1,06	2,00	4,55	5,27	10,6
$\alpha_a(\lambda) \text{ км}^{-1}$	0,65	0,32	0,29	0,25	0,18	0,09	0,04	0,03	0,01

ПРИЛОЖЕНИЕ 27

Значения $\omega(\lambda)$ при наиболее часто встречающихся параметрах атмосферной дымки $\sigma_{\min}=0,1$ мкм и $\sigma_{\max}=1,0$ мкм (по В. Е. Зуеву)

λ мкм	$\omega(\lambda)$		λ мкм	$\omega(\lambda)$	
	$\beta=3$	$\beta=5$		$\beta=3$	$\beta=5$
2,0	0,1667	0,0485	7,0	0,0198	0,0167
5,0	0,0261	0,0133	10,0	0,0177	0,0179
6,04	0,1884	0,0872	12,0	0,0505	0,0522

ПРИЛОЖЕНИЕ 28

Модель чистой стандартной атмосферы (США)* для $\lambda=0,55$ мкм

Высота, км	σ_M км ⁻¹	σ_a км ⁻¹	σ_{O_3} км ⁻¹
0	1,162 —2 **	1,58 —1	3,28 —4
1	1,055 —2	6,95 —2	3,00 —4
2	9,552 —3	3,00 —2	2,70 —4
3	8,628 —3	1,26 —2	2,30 —4
4	7,775 —3	5,69 —3	2,08 —4
5	6,988 —3	2,53 —3	2,03 —4
6	6,264 —3	8,69 —4	1,99 —4
8	4,989 —3	1,11 —4	2,10 —4
10	3,924 —3	2,05 —5	3,22 —4
12	2,960 —3	1,74 —5	5,71 —4
14	2,162 —3	2,05 —5	8,80 —4
16	1,580 —3	5,37 —5	9,48 —4
18	1,154 —3	6,32 —5	1,12 —3
19	9,868 —4	7,11 —5	1,31 —3
20	8,436 —4	6,79 —5	1,51 —3

Высота, км	σ_M км ⁻¹	σ_a км ⁻¹	σ_{O_3} км ⁻¹
22	6,121 —4	6,32 —5	1,81 —3
24	4,453 —4	4,11 —5	1,78 —3
26	3,250 —4	2,05 —5	1,50 —3
28	2,379 —4	1,74 —5	1,13 —3
30	1,747 —4	1,50 —5	8,31 —4
32	1,286 —4	0,00	6,27 —4
34	9,381 —5	0,00	4,44 —4
36	6,886 —5	0,00	3,32 —4
38	5,092 —5	0,00	2,33 —4
40	3,791 —5	0,00	1,71 —4
42	2,841 —5	0,00	1,09 —4
44	2,143 —5	0,00	6,84 —5
46	1,626 —5	0,00	4,10 —5
48	1,249 —5	0,00	2,57 —5
50	9,743 —6	0,00	1,71 —5

* Handbook of Geophysics and Space Environment, U. S. Air. Force, 1967.

** Второе число в графе — показатель степени десяти.

ПРИЛОЖЕНИЕ 29

Средние значения K для различных форм облаков для излучений ОКГ
(по расчетам Корриера)

Форма облаков	λ мкм		Форма облаков	λ мкм		Форма облаков	λ мкм	
	0,69	1,06		0,69	1,06		0,69	1,06
Sc	0,042	0,044	St II	0,047	0,045	Cu cong.	0,043	0,051
As	0,042	0,045	St I	0,034	0,044	Cb	0,050	0,049
Ns	0,046	0,049	Cu hum.	0,041	0,046			

ПРИЛОЖЕНИЕ 30

Поперечные сечения молекулярного общего рассеяния σ_m° и рассеяния назад $\sigma_{\lambda m}^\circ$ для излучений ОКГ, наиболее часто применяемых при исследовании атмосферы

λ мкм . . .	0,265	0,3371	0,3472	0,5320	0,6328
Тип ОКГ	Четвертая гармоника на иттрий-алюминиевом гранате	Газовый ОКГ на молекулярном азоте	Вторая гармоника ОКГ на рубине	Вторая гармоника ОКГ на иттрий-алюминиевом гранате	Газовый гелий-неоновый ОКГ
σ_m° см ²	9,71 —26	3,45 —26	3,18 —26	5,53 —27	2,68 —27
$\sigma_{\lambda m}^\circ$ см ² /ср	1,15 —26	4,11 —27	3,82 —27	6,64 —28	3,22 —28
λ мкм . . .	0,6943	1,06	2,36	10,6	
Тип ОКГ	ОКГ на рубине	ОКГ на стекле с неодимом	ОКГ на флюорите с диспрозием	Газовый ОКГ на смеси углекислого газа и азота	
σ_m° см ²	1,84 —27	3,35 —28	1,35 —29	3,32 —32	
$\sigma_{\lambda m}^\circ$ см ² /ср	2,20 —28	4,01 —29	1,62 —30	3,99 —33	

Примечание. Второе число в графе — показатель степени десяти. Например, 9,71—26 означает 9,71·10⁻²⁶.

ПРИЛОЖЕНИЕ 31

Световой эквивалент солнечной радиации K (10^3 лк/кВт·м⁻²) в зависимости от высоты Солнца $h_{\odot}$ и облачности

Радиация	Облачность, баллы	$h_{\odot}^{\circ}$			
		30	40	50	60
Прямая	0—3 ($\odot^2$)	89±4	94±4	98±4	100±4
Суммарная	0—6 ($\odot^2$) · 1—10 ($\odot$)	97±6	100±4	101±4	102±4
Рассеянная	0—6 ($\odot^2$)		117±17		
Рассеянная (суммарная)	3—10 ($\odot^0$); 7—10 (П)		103±10		

ПРИЛОЖЕНИЕ 32

Угол астрономической рефракции γ_0 (в минутах дуги) при $t=10^{\circ}\text{C}$ и $p=1013,2$ гПа

$h_{\odot}^{\circ}$	—0,10	0,0	0,10	0,30	1	3	10	30	90
γ_0	36,8	34,4	32,3	28,7	24,3	14,3	5,3	1,7	0,0

ПРИЛОЖЕНИЕ 34

Косинусы часового угла Солнца $\tau_{\odot}$ (в единицах времени)

Часы	Минуты							
	0	4	8	12	16	20	24	28
0	—1,000	—1,000	—0,999	—0,999	—0,998	—0,996	—0,995	—0,993
1	—0,966	—0,961	—0,956	—0,951	—0,946	—0,940	—0,934	—0,927
2	—0,866	—0,857	—0,848	—0,839	—0,829	—0,819	—0,809	—0,799
3	—0,707	—0,695	—0,682	—0,669	—0,656	—0,643	—0,629	—0,616
4	—0,500	—0,485	—0,469	—0,454	—0,438	—0,423	—0,407	—0,391
5	—0,259	—0,242	—0,225	—0,208	—0,191	—0,174	—0,156	—0,139
6	0,000	0,017	0,035	0,052	0,070	0,087	0,105	0,122
7	0,259	0,276	0,292	0,309	0,326	0,342	0,358	0,375
8	0,500	0,515	0,530	0,545	0,559	0,574	0,588	0,602
9	0,707	0,719	0,731	0,743	0,755	0,766	0,777	0,788
10	0,866	0,875	0,883	0,891	0,899	0,906	0,914	0,921
11	0,966	0,970	0,974	0,978	0,982	0,985	0,988	0,990
Часы	60	56	52	48	44	40	36	32
	Минуты							

ПРИЛОЖЕНИЕ 33

Поправки (в минутах дуги) к углу астрономической рефракции γ_0 на изменение температуры воздуха Δt , и на изменение давления воздуха Δp

γ_0°	Температура, °C			Давление, гПа			
	-20	10	30	980	1000	1020	1040
-0,10	8,0	0	-4,2	-1,3	-0,5	0,2	1,0
0,0	7,3	0	-3,8	-1,2	-0,5	0,2	1,0
1	4,4	0	-2,3	-0,8	-0,4	0,2	0,7
2	2,9	0	-1,6	-0,6	-0,3	0,1	0,5

Продолжение прилож. 34

Минуты								Часы
32	36	40	44	48	52	56	60	
-0,990	-0,988	-0,985	-0,982	-0,978	-0,974	-0,970	-0,966	23
-0,921	-0,914	-0,906	-0,899	-0,891	-0,883	-0,875	-0,866	22
-0,788	-0,777	-0,766	-0,755	-0,743	-0,731	-0,719	-0,707	21
-0,602	-0,588	-0,574	-0,559	-0,545	-0,530	-0,515	-0,500	20
-0,375	-0,358	-0,342	-0,326	-0,309	-0,292	-0,276	-0,259	19
-0,122	-0,105	-0,087	-0,070	-0,052	-0,035	-0,017	0,000	18
0,139	0,156	0,174	0,191	0,208	0,225	0,242	0,259	17
0,391	0,407	0,423	0,438	0,454	0,469	0,485	0,500	16
0,616	0,629	0,643	0,656	0,669	0,682	0,695	0,707	15
0,799	0,809	0,819	0,829	0,839	0,848	0,857	0,866	14
0,927	0,934	0,940	0,946	0,951	0,956	0,961	0,966	13
0,993	0,995	0,996	0,998	0,999	0,999	1,000	1,000	12
28	24	20	16	12	8	4	0	Часы
Минуты								

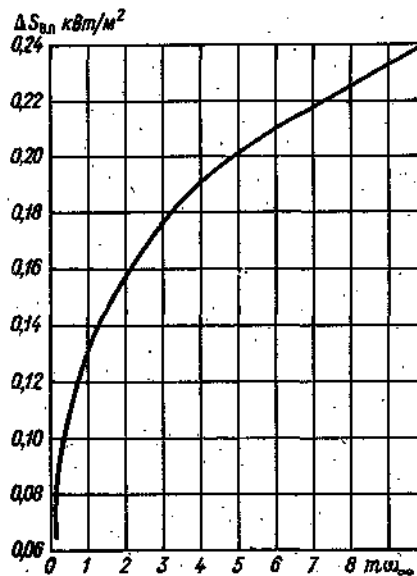
ПРИЛОЖЕНИЕ 35

Сезонные средние значения V_0 бетонных ВПП
для светлого времени суток при любых условиях освещения
(по В. А. Гаврилову)

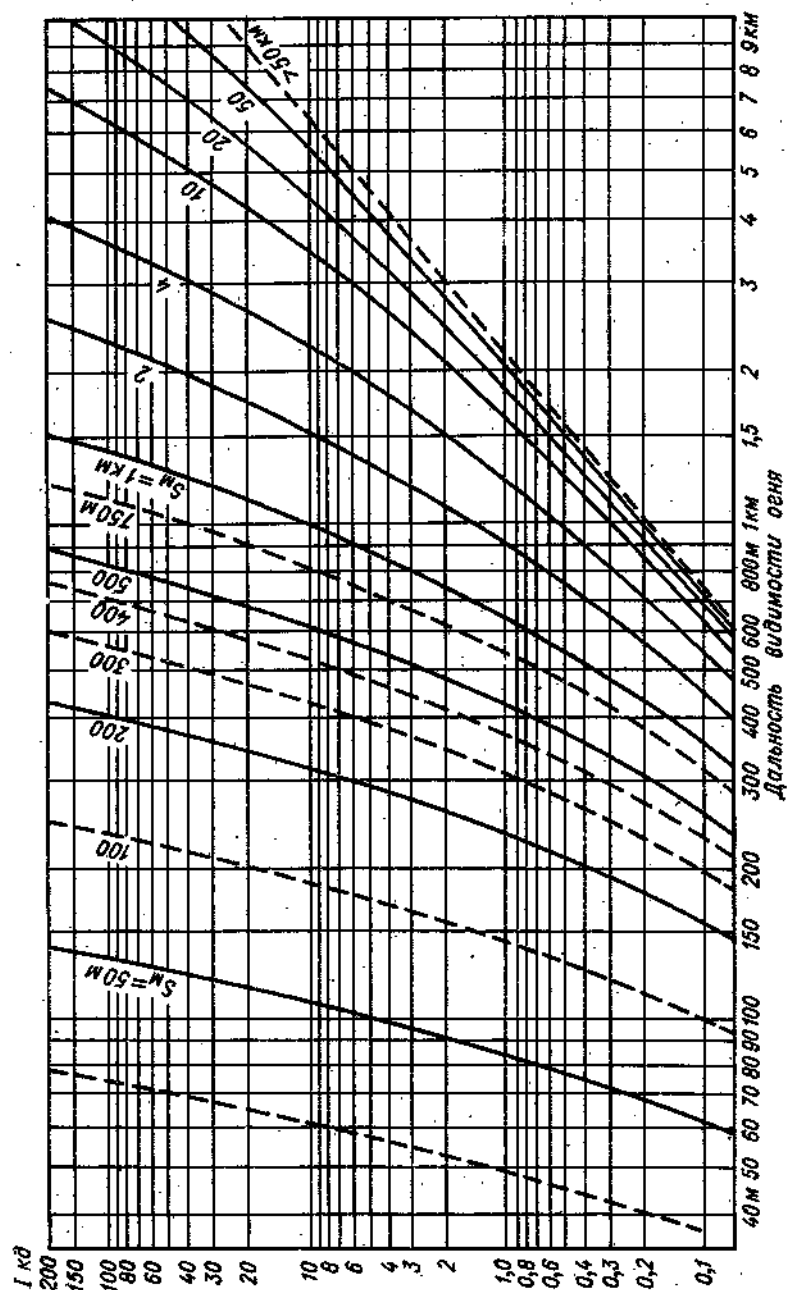
Фон	Состояние ВПП	V_0	
		Без осадков	Осадки
Ярко-зеленая молодая трава	Сухая	14,0	8,0
То же	Мокрая	10,0	6,0
Желто-зеленая или побуревшая, или пожелтевшая трава	Сухая	10,0	6,0
То же	Мокрая	9,0	5,7
Желто-бурая (прошлогодняя) трава	Сухая	10,0	5,7
Пятна снега	Без снега, сухая	8,0	5,0
Снег различной белизны, пятна снега	Пятна снега	4,0	2,0

ПРИЛОЖЕНИЕ 36

Зависимость величин солнечной радиации, поглощенной водяным паром
($\Delta S_{в.п.}$), от содержания водяного пара в единичном столбе атмосферы $m \omega_{\infty}$
(в сантиметрах слоя сконденсированной воды) (по С. В. Зверевой)

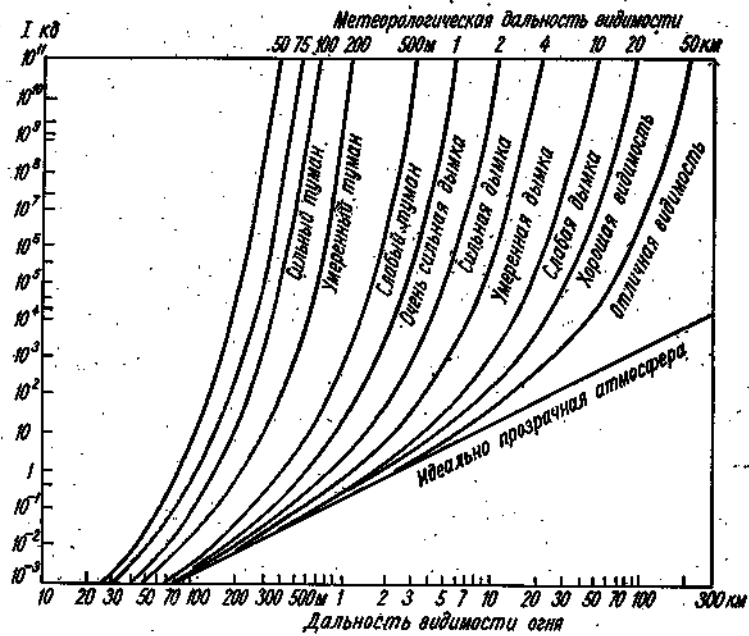


1 Kd

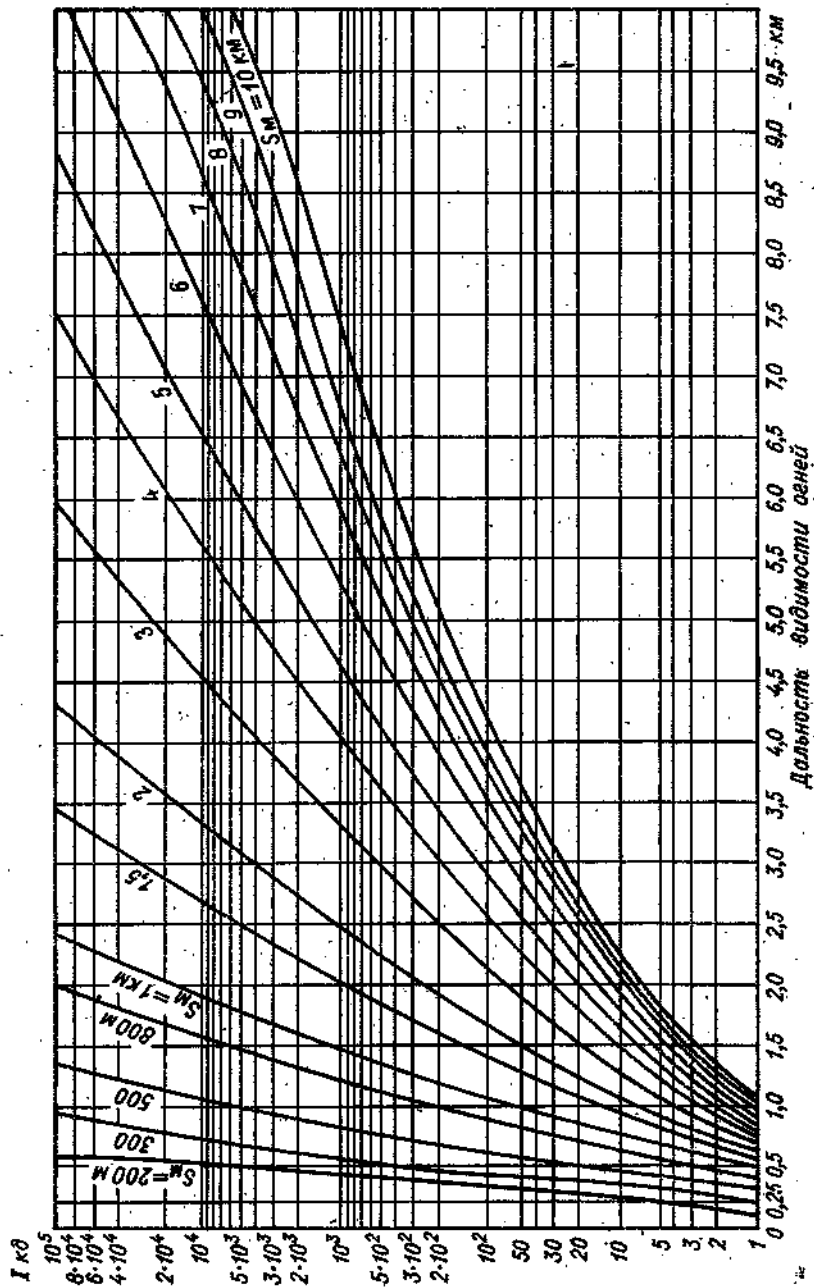


ПРИЛОЖЕНИЕ 38

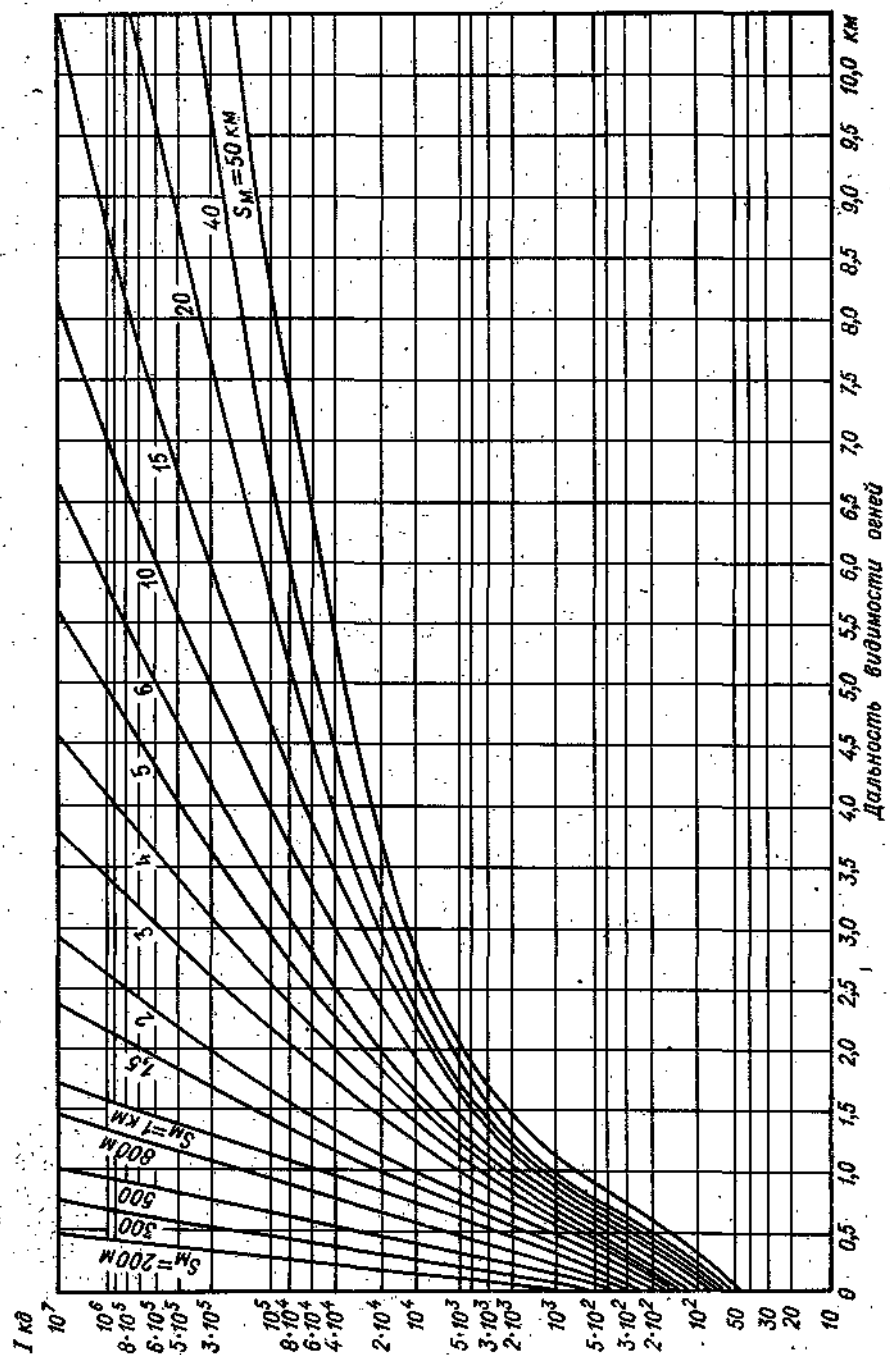
Номограмма В. А. Гаврилова для определения дальности видимости одиночного
 белого огня в темное время суток для $E_{св} = 2 \cdot 10^{-7}$ лк (яркость фона
 $5 \cdot 10^{-2}$ кд/м²)



ПРИЛОЖЕНИЕ 39
 Номограмма для определения дальности видимости групповых огней в темное время суток для $E_{0,2} = 10^{-6}$ лк



Номограмма для определения дальности видимости групповых огней
в светлое время суток для $E_{0,2} = 10^{-3}$ лк



ПРИЛОЖЕНИЕ 41

Варианты исходных данных к задачам

Таблица 1

№ п/п	h, мм рт. ст.	Δh , мм рт. ст.	t °C	Δt °C	№ п/п	h, мм рт. ст.	Δh , мм рт. ст.	t °C	Δt °C
1	730,0	1,6	10,0	0,5	16	733,0	1,3	12,7	0,3
2	730,9	1,1	10,5	0,0	17	733,6	1,0	13,2	0,3
3	731,8	1,4	11,0	-0,4	18	733,2	1,4	13,7	-0,2
4	732,7	1,5	12,5	0,1	19	730,6	1,3	10,3	0,2
5	733,3	1,0	13,0	0,5	20	731,4	1,2	10,8	-0,3
6	733,9	1,2	13,5	0,0	21	732,3	1,7	12,3	-0,1
7	730,2	1,5	10,1	0,4	22	733,0	1,2	12,8	0,4
8	731,0	1,0	10,6	-0,1	23	733,7	1,0	13,3	0,2
9	731,9	1,5	11,1	-0,3	24	733,4	1,5	13,8	-0,3
10	732,9	1,4	12,6	0,2	25	730,8	1,2	10,4	0,1
11	733,4	0,9	13,1	0,4	26	731,6	1,3	10,9	-0,4
12	733,0	1,3	13,6	-0,1	27	732,5	1,6	12,4	0,0
13	730,4	1,4	10,2	0,3	28	733,1	1,1	12,9	0,5
14	731,2	1,1	10,7	-0,2	29	733,8	1,1	13,4	0,1
15	732,1	1,6	12,2	-0,2	30	733,5	1,6	13,9	-0,4

Таблица 2

№ п/п	t °C	t' °C	p гПа	№ п/п	t °C	t' °C	p гПа
1	19,4	12,7	1026,7	16	16,4	10,1	1017,7
2	18,5	11,8	1017,8	17	19,7	11,8	1021,1
3	17,4	10,7	1028,9	18	13,9	6,1	1026,0
4	16,5	10,9	1018,3	19	16,3	9,8	1016,4
5	17,6	9,8	1022,4	20	14,2	8,1	1022,7
6	18,9	11,7	1016,7	21	16,3	11,2	1034,2
7	26,3	19,2	1018,9	22	19,8	14,2	1033,4
8	22,1	14,7	1024,7	23	13,6	7,8	1024,6
9	20,1	12,3	1017,3	24	19,2	12,3	1021,4
10	16,4	9,8	1024,1	25	18,3	12,1	1017,1
11	12,3	6,1	1022,7	26	26,2	16,4	1019,3
12	17,6	11,2	1023,4	27	27,4	14,3	1040,2
13	16,2	10,8	1024,3	28	19,4	10,1	1027,7
14	21,3	17,5	1037,2	29	18,2	11,7	1021,1
15	18,2	11,1	1031,1	30	21,3	11,5	1017,2

Таблица 3

№ п/п	p гПа	t °C	№ п/п	p гПа	t °C	№ п/п	p гПа	t °C
1	1000,0	-30,0	11	600,0	10,0	21	400,0	-30,0
2	800,0	-20,0	12	400,0	20,0	22	200,0	10,0
3	600,0	-10,0	13	200,0	-10,0	23	1000,0	20,0
4	400,0	0,0	14	1000,0	0,0	24	800,0	30,0
5	1000,0	-20,0	15	800,0	10,0	25	600,0	-30,0
6	800,0	-10,0	16	600,0	20,0	26	400,0	-20,0
7	600,0	0,0	17	400,0	30,0	27	1000,0	30,0
8	400,0	10,0	18	1000,0	10,0	28	800,0	-30,0
9	1000,0	-10,0	19	800,0	20,0	29	600,0	-20,0
10	800,0	0,0	20	600,0	30,0	30	400,0	-10,0

Таблица 4

№ п/п	p гПа	t °C	e гПа	№ п/п	p гПа	t °C	e гПа
1	840,0	5,0	8,4	16	910,0	15,0	9,1
2	890,0	11,0	8,9	17	870,0	10,0	8,7
3	850,0	6,0	8,5	18	920,0	16,0	9,2
4	900,0	12,0	9,0	19	880,0	11,0	8,8
5	860,0	7,0	8,6	20	930,0	17,0	9,3
6	910,0	13,0	9,1	21	840,0	9,0	8,4
7	870,0	8,0	8,7	22	890,0	15,0	8,9
8	920,0	14,0	9,2	23	850,0	10,0	8,5
9	880,0	9,0	8,8	24	900,0	16,0	9,0
10	930,0	15,0	9,3	25	860,0	11,0	8,6
11	840,0	7,0	8,4	26	910,0	17,0	9,1
12	890,0	13,0	8,9	27	870,0	12,0	8,7
13	850,0	8,0	8,5	28	920,0	18,0	9,2
14	900,0	14,0	9,0	29	880,0	13,0	8,8
15	860,0	9,0	8,6	30	930,0	19,0	9,3

Примечание. Остальные исходные данные в каждом варианте те же, что и в основной задаче.

Таблица 5

№ п/п	p гПа	t °C	Температура, °C			№ п/п	p гПа	t °C	Температура, °C		
			на стан-ции	z км					на стан-ции	z км	
				3,68	7,32					3,68	7,32
1	937,1	40	-30,1	-52,2	-74,3	16	957,0	90	3,8	-18,4	-40,6
2	942,6	60	-20,6	-42,8	-66,5	17	962,5	50	14,3	-7,9	-29,8
3	948,1	80	-11,1	-33,4	-55,7	18	968,0	70	26,9	4,7	-17,5
4	954,8	80	-1,6	-23,8	-45,5	19	940,4	55	-24,4	-46,6	-68,5
5	960,3	40	10,1	-12,2	-34,4	20	945,9	75	-14,9	-36,9	-58,8
6	965,8	60	22,7	0,5	-21,4	21	951,4	95	-5,4	-27,6	-49,8
7	938,2	45	-28,2	-50,4	-72,7	22	958,1	95	5,9	-16,3	-38,5
8	943,7	65	-18,7	-40,8	-66,7	23	963,6	55	16,4	-5,8	-27,9
9	949,2	85	-9,2	-31,6	-53,4	24	969,1	75	29,0	6,8	-15,1
10	955,9	85	1,7	-20,4	-42,7	25	941,5	35	-22,5	-44,7	-66,3
11	961,4	45	12,2	-9,8	-32,1	26	947,0	30	-13,0	-35,4	-57,3
12	966,9	65	24,8	2,6	-19,2	27	953,7	50	-3,5	-25,6	-47,5
13	939,3	50	-26,3	-48,0	-70,2	28	959,2	70	8,0	-14,1	-36,3
14	944,8	70	-16,8	-39,1	-61,1	29	964,7	30	20,6	-1,1	-23,4
15	950,3	90	-7,3	-29,2	-51,4	30	970,2	70	31,1	9,0	-13,2

Примечание. Остальные исходные данные те же, что и в основной задаче.

Таблица 6

№ п/п	B кВт/м ²	P кВт/м ²	$t_{0,2}$ °C	$t_{0,5}$ °C	$t_{1,0}$ °C	$t_{2,0}$ °C	$\phi_{0,2}$ гПа	$\phi_{0,5}$ гПа	$\phi_{1,0}$ гПа	$\phi_{2,0}$ гПа	$u_{0,2}$ м/с	$u_{0,5}$ м/с	$u_{1,0}$ м/с	$u_{2,0}$ м/с
1	0,55	0,08	20,6	20,4	19,9	19,8	9,4	8,9	8,4	8,0	1,7	2,3	2,5	3,0
2	0,49	0,05	17,3	17,0	16,7	16,4	11,3	10,8	10,2	10,0	0,3	0,7	1,1	1,6
3	0,59	0,06	17,0	16,9	16,6	16,2	12,6	12,4	12,2	11,2	2,2	2,6	2,9	3,2
4	0,29	0,03	18,0	17,5	17,2	17,0	11,8	11,6	11,5	11,1	1,0	1,2	1,4	1,7
5	0,49	0,04	16,1	15,8	15,5	15,3	10,5	9,6	9,5	8,7	1,9	2,2	2,4	2,7
6	0,52	0,06	19,4	18,9	18,6	18,3	18,9	18,3	17,4	17,2	0,4	0,8	1,0	1,3
7	0,45	0,08	27,9	27,2	26,9	26,4	16,9	16,2	16,1	15,9	1,1	1,4	1,7	1,9
8	0,28	0,05	24,7	24,5	24,3	23,9	20,1	19,3	18,9	18,7	2,0	2,7	3,0	3,5
9	0,46	0,08	22,1	21,9	21,6	21,4	11,4	11,1	10,2	10,1	0,7	0,9	1,2	1,6
10	0,45	0,06	23,7	23,5	23,2	23,0	12,1	11,7	11,1	10,9	1,1	1,5	1,6	1,9
11	0,41	0,08	22,5	22,1	21,8	21,7	18,2	17,0	16,7	16,4	1,4	1,6	1,8	2,1
12	0,54	0,08	21,6	21,1	20,8	20,7	13,0	12,4	12,1	11,6	1,3	1,4	1,7	1,9
13	0,30	0,04	18,9	18,5	18,4	18,0	14,2	14,0	13,9	13,7	1,3	1,4	1,5	1,8
14	0,21	0,04	17,4	17,2	16,8	16,6	13,4	13,2	13,0	12,9	1,1	1,1	1,2	1,4
15	0,46	0,07	17,2	16,8	16,4	16,2	16,8	16,3	16,1	15,7	0,9	1,1	1,3	1,6
16	0,50	0,10	18,6	18,2	17,9	17,8	13,6	13,0	12,2	11,8	1,1	1,7	2,1	2,3
17	0,52	0,08	21,8	21,3	20,6	20,2	19,1	18,8	18,7	18,4	0,4	0,9	1,4	1,7
18	0,45	0,09	20,4	20,1	19,6	19,5	11,0	10,4	10,3	9,9	1,3	1,8	2,0	2,2
19	0,31	0,07	20,6	20,6	20,4	20,1	18,6	18,3	17,9	17,6	1,3	1,7	2,0	2,2
20	0,44	0,04	17,0	16,3	15,7	15,5	10,8	10,4	10,3	10,0	0,6	1,0	1,5	1,7
21	0,30	0,03	21,7	21,2	20,9	20,7	10,1	9,9	9,9	9,6	1,0	1,3	1,4	1,6
22	0,52	0,08	22,0	21,2	20,8	20,6	10,3	9,9	9,6	9,4	1,3	1,8	2,0	2,2
23	0,49	0,06	15,9	15,2	14,9	14,6	11,8	11,6	11,2	11,0	1,4	1,7	2,0	2,2
24	0,31	0,01	18,5	18,2	18,1	17,8	10,7	10,3	9,6	9,4	0,6	0,9	1,0	1,2
25	0,40	0,04	20,7	20,6	20,3	19,8	10,4	10,1	9,8	9,6	1,2	1,4	1,6	1,9
26	0,38	0,06	20,0	19,7	19,4	19,1	11,7	11,3	10,9	10,5	0,7	1,0	1,3	1,5
27	0,45	0,08	19,7	19,2	19,0	18,8	11,6	11,2	10,6	10,2	1,3	1,5	1,8	2,1
28	0,17	0,03	15,1	15,8	15,6	15,5	15,2	14,8	14,6	14,3	1,3	1,7	2,2	2,4
29	0,36	0,05	15,5	15,3	15,0	14,8	14,4	13,7	13,3	12,7	0,3	0,9	1,2	1,5
30	0,48	0,09	19,2	18,9	18,6	18,2	17,9	17,1	16,6	16,1	1,2	1,6	2,3	2,5

Таблица 7

№ п/п, дата	Срок, ч	t _{0,5} °C	t _{2,0} °C	u _{0,5} м/с	u _{2,0} м/с	№ п/п, дата	Срок, ч	t _{0,5} °C	t _{2,0} °C	u _{0,5} м/с	u _{2,0} м/с
1 3.06 1957 г.	1 7 10 13 16 19 1*	5,7 10,6 14,1 17,1 17,6 14,9 7,7	6,0 10,4 13,8 16,6 17,6 14,8 7,8	1,8 2,2 2,4 1,7 5,0 5,1 1,9	2,6 3,1 3,3 3,9 5,8 6,7 3,1	5 17.08 1957 г.	1 7 10 13 16 19 1*	17,2 20,1 24,6 27,6 27,7 24,6 17,3	17,7 20,1 24,3 27,2 27,7 24,8 17,7	0,0 1,7 2,6 2,6 2,2 0,4 1,0	1,8 3,2 3,7 3,7 3,6 1,4 1,9
2 5.06 1957 г.	1 7 10 13 16 19 1*	10,3 9,6 14,3 15,2 13,5 11,0 10,2	10,4 9,5 13,7 14,8 13,6 11,2 10,4	1,5 1,4 1,8 2,6 3,0 2,3 2,6	1,9 1,7 2,3 3,3 4,3 3,3 3,5	6 18.07 1957 г.	1 7 10 13 16 19 1*	17,3 20,5 25,5 26,1 27,0 22,1 18,2	17,7 20,4 25,4 26,0 27,0 22,5 18,3	1,0 1,5 1,8 2,4 0,6 1,8 1,2	1,9 2,1 2,9 4,5 1,9 3,3 2,2
3 7.06 1957 г.	1 7 10 13 16 19 1*	9,4 10,7 13,4 16,1 12,7 11,9 8,0	9,5 10,5 13,0 14,8 12,0 11,9 8,1	0,9 3,5 4,5 4,1 1,7 3,4 2,0	1,6 4,7 5,8 5,5 2,4 4,4 2,8	7 22.07 1957 г.	1 7 10 13 16 19 1*	16,0 21,5 23,2 28,3 27,4 19,2 17,2	16,6 21,4 23,0 27,3 27,4 19,3 17,4	0,0 1,7 0,9 2,3 1,2 0,0 0,0	1,0 2,8 2,8 4,8 3,3 1,6 1,1
4 9.07 1957 г.	1 7 10 13 16 19 1*	11,0 13,4 16,6 19,9 16,6 17,1 9,8	11,2 13,3 16,4 19,1 16,6 17,2 10,0	1,0 1,2 2,1 1,2 1,9 1,2 0,8	1,6 1,6 3,0 1,8 2,6 1,7 1,4	8 1.08 1957 г.	1 7 10 13 16 19 1*	15,1 16,8 19,2 23,5 21,4 18,1 15,7	15,6 16,9 19,1 23,4 21,4 18,3 15,9	0,4 1,5 0,9 1,5 0,8 1,2 0,6	1,4 2,2 1,5 3,1 1,7 1,9 1,2

* Следующие сутки.

№ п/п, дата	Срок, ч	t _{0,5} °C	t _{2,0} °C	u _{0,5} м/с	u _{2,0} м/с	№ п/п, дата	Срок, ч	t _{0,5} °C	t _{2,0} °C	u _{0,5} м/с	u _{2,0} м/с
9 2.08 1957 г.	1	15,7	15,9	0,6	1,2	13 15.05 1958 г.	1	3,6	3,7	2,2	3,6
	7	16,1	15,9	0,8	1,2		7	7,4	6,9	1,9	2,7
	10	20,5	20,3	0,5	1,6		10	11,3	10,5	2,5	3,6
	13	17,0	16,0	1,2	2,2		13	12,6	11,9	1,5	2,0
	16	19,6	19,5	2,1	2,9		16	13,8	13,3	0,9	1,3
	19	18,1	18,0	0,0	0,5		19	10,1	10,1	2,8	4,1
10 6.08 1957 г.	1*	14,5	14,8	0,3	1,1	14 27.05 1958 г.	1*	7,4	7,5	1,7	2,7
	1	13,5	13,6	1,4	2,3		1	20,5	21,2	3,4	4,9
	7	16,7	16,7	1,7	2,5		7	21,5	21,6	2,9	4,3
	10	19,0	18,8	1,9	2,6		10	27,9	27,6	3,0	4,2
	13	19,8	19,6	2,3	3,3		13	30,4	30,3	4,2	6,0
	16	17,0	16,8	1,9	2,7		16	29,2	29,0	2,5	3,8
11 9.08 1957 г.	19	16,0	16,0	0,9	1,7	15 8.06 1958 г.	19	20,4	20,8	1,2	2,4
	1*	11,5	11,9	1,0	1,9		1*	14,0	14,2	2,3	3,1
	1	7,1	7,5	1,0	2,0		1	7,5	7,7	0,6	1,5
	7	11,0	10,8	1,0	1,6		7	10,0	9,8	1,9	2,3
	10	12,7	12,7	1,9	3,6		10	11,2	11,0	0,8	1,1
	13	15,8	15,0	1,5	2,0		13	11,6	11,1	2,2	2,6
12 9.08 1958 г.	16	13,3	12,8	0,3	0,6	16 13.06 1958 г.	16	12,8	12,1	2,3	3,6
	19	12,6	12,3	0,1	0,6		19	11,0	10,8	1,9	3,1
	1*	6,5	7,2	0,1	1,2		1*	8,0	8,3	2,2	3,4
	1	-0,3	0,0	0,3	1,2		1	6,1	6,5	0,3	1,3
	7	3,9	3,6	0,6	1,0		7	11,7	11,6	2,1	3,2
	10	8,9	8,5	1,0	1,3		10	12,5	12,1	3,8	5,1
	13	10,9	9,9	1,9	2,8		13	13,4	13,1	3,3	5,5
	16	10,2	9,8	0,4	0,8		16	14,3	13,7	2,8	3,8
	19	7,3	7,1	1,5	2,2		19	12,4	12,1	1,9	3,3
	1*	3,8	3,7	1,5	2,2		1*	6,9	7,4	0,8	2,0

* Следующие сутки.

№ п/п, дета	Срок, ч	t _{0,5} °C	t _{2,0} °C	u _{0,5} м/с	u _{2,0} м/с	№ п/п, дета	Срок, ч	t _{0,5} °C	t _{2,0} °C	u _{0,5} м/с	u _{2,0} м/с
17 15.06 1958 г.	1	8,1	8,4	1,4	2,5	21 3.07 1958 г.	1	14,4	14,5	1,0	1,6
	7	10,2	9,8	1,3	1,8		7	16,8	16,5	1,8	2,5
	10	9,3	8,6	3,0	4,2		10	19,8	19,4	1,9	2,7
	13	9,5	9,0	2,7	4,5		13	21,5	21,0	1,4	2,8
	16	9,4	9,1	2,0	3,1		16	21,1	20,9	1,3	1,6
	19	10,0	9,9	2,0	3,2		19	19,5	19,4	1,0	1,6
18 26.06 1958 г.	1*	4,8	5,3	0,9	1,9	22 12.07 1958 г.	1*	13,5	13,6	0,0	0,5
	1	13,0	13,1	2,4	3,3		1	7,6	8,5	0,0	1,2
	7	17,5	17,2	0,4	0,7		7	12,8	12,9	1,9	2,8
	10	21,0	20,6	0,3	1,9		10	15,5	15,3	3,3	5,0
	13	22,7	22,5	2,6	4,0		13	17,1	16,8	3,1	5,5
	16	22,5	22,1	2,0	3,2		16	18,1	18,1	2,6	4,3
19 1.07 1958 г.	19	20,4	20,5	2,1	2,8	23 13.07 1958 г.	19	15,8	15,9	1,8	2,7
	1*	12,5	12,6	2,6	3,2		1*	9,1	9,4	1,2	2,1
	1	14,8	15,0	1,9	2,8		1	9,1	9,4	1,2	2,1
	7	18,5	18,4	1,9	2,6		7	12,9	12,8	1,7	2,5
	10	19,7	19,4	2,9	4,2		10	19,0	18,3	1,8	2,6
	13	21,7	21,2	3,7	5,2		13	21,3	20,5	1,9	2,7
20 2.07 1958 г.	16	23,9	23,9	3,7	5,2	24 30.07 1958 г.	16	21,1	20,7	1,7	2,8
	19	21,4	21,7	2,7	3,8		19	18,0	18,1	0,1	1,1
	1*	15,6	15,9	1,2	1,9		1*	13,3	13,7	0,0	1,2
	1	15,6	15,9	1,2	1,9		1	16,9	17,8	0,0	1,2
	7	17,8	17,7	2,0	2,6		7	19,0	19,3	0,0	1,2
	10	21,8	21,7	1,9	3,0		10	23,1	22,7	1,4	2,5
	13	22,9	22,7	2,1	3,5		13	24,8	24,3	0,4	1,5
	16	21,5	21,5	3,0	4,4		16	25,5	25,0	1,2	1,9
	19	18,6	19,0	2,8	4,1		19	22,4	22,4	0,0	1,5
	1*	14,4	14,5	1,0	1,6		1*	13,3	13,4	0,0	0,8

* Следующие сутки.

№ п/п, дата	Срок, ч	t _{0,5} °C	t _{2,0} °C	u _{0,5} м/с	u _{2,0} м/с	№ п/п, дата	Срок, ч	t _{0,5} °C	t _{2,0} °C	u _{0,5} м/с	u _{2,0} м/с
25 2.08 1958 г.	1	12,7	12,8	1,6	2,3	28 18.09 1958 г.	1	3,0	3,1	1,4	1,8
	7	14,6	14,7	2,4	4,1		7	8,7	8,8	1,6	2,7
	10	17,9	17,3	1,6	3,4		10	12,4	12,2	4,0	5,2
	13	20,1	19,5	2,0	4,4		13	12,0	11,9	3,6	5,5
	16	19,9	19,4	1,6	2,8		16	12,5	12,2	3,8	4,2
	19	17,9	17,9	1,1	2,6		19	12,1	12,2	3,3	4,5
26 9.09 1958 г.	1*	15,9	16,0	2,0	3,7	29 5.10 1958 г.	1*	11,8	11,8	2,2	2,5
	1	10,6	10,8	2,2	3,4		1	8,2	8,2	0,6	1,0
	7	9,3	9,0	1,2	2,4		7	7,7	7,5	1,5	2,4
	10	9,8	9,2	2,4	3,5		10	10,7	10,4	1,6	2,1
	13	11,6	11,1	2,4	4,5		13	14,3	14,0	2,2	3,1
	16	11,4	11,1	2,8	4,1		16	12,6	12,4	1,0	1,8
27 17.09 1958 г.	19	9,2	9,2	0,9	1,5	30 7.10 1958 г.	19	10,0	9,8	1,7	2,4
	1*	6,6	6,8	0,8	1,4		1*	10,3	10,4	1,3	1,8
	1	3,5	3,6	0,0	0,5		1	11,7	11,7	2,3	3,1
	7	4,3	4,3	0,1	0,5		7	8,2	8,0	1,4	1,9
	10	7,0	6,9	1,4	1,7		10	10,1	9,8	1,7	2,4
	13	7,8	7,5	0,6	1,4		13	12,4	12,3	1,3	2,8
	16	8,2	8,0	0,9	1,7		16	13,0	12,9	1,6	2,1
	19	5,4	5,9	1,6	2,7		19	10,3	10,3	1,3	1,9
	1*	3,0	3,1	1,4	1,8		1*	9,7	9,9	1,8	2,6

* Следующие сутки.

Таблица 8

№ п/п	p гПа	t °C	f %	№ п/п	p гПа	t °C	f %
1	1028,8	30,0	40	16	1011,0	18,5	60
2	1014,7	28,0	50	17	980,7	12,0	50
3	1006,0	26,0	60	18	999,6	12,5	60
4	1000,7	24,0	70	19	979,6	10,0	80
5	1000,3	0,0	50	20	981,0	12,5	70
6	998,4	22,0	80	21	999,2	3,2	50
7	995,2	20,0	70	22	974,8	8,0	60
8	1000,2	15,0	50	23	984,2	30,8	52
9	985,0	30,5	43	24	970,9	6,0	40
10	1010,2	27,5	70	25	1005,0	30,0	50
11	990,7	18,0	60	26	1010,3	27,5	30
12	971,6	13,8	70	27	970,1	4,0	40
13	989,3	16,0	55	28	980,0	18,4	70
14	984,7	14,0	40	29	1001,0	24,9	60
15	987,5	28,6	72	30	998,0	19,1	75

Таблица 9

№ п/п		Уровень, гПа						
		1020,0	950,0	850,0	700,0	600,0	500,0	400,0
1	t	35,0	21,0	9,0	4,0	0,0	0,0	2,1
	t_d	22,0	10,1	2,9	1,1	-1,9	-1,9	-5,0
2	t	28,1	10,1	2,9	1,1	-1,9	-1,9	-5,0
	t_d	13,8	6,0	-4,4	-13,8	-7,0	-5,3	-8,3
3	t	13,8	6,0	-7,4	-13,8	-7,0	-5,3	-8,3
	t_d	0,2	-2,8	-8,5	-24,7	-11,0	-11,5	-10,9
4	t	32,1	15,7	8,8	-13,8	-11,0	-11,5	-10,0
	t_d	17,2	2,3	-5,4	-16,2	-14,8	-16,9	-16,0
5	t	17,2	2,3	-5,4	-16,2	-14,8	-16,9	-16,0
	t_d	2,4	-8,1	-16,2	-22,5	-20,0	-22,0	-51,0
6	t	2,4	-8,1	-16,2	-26,9	-20,0	-22,0	-51,0
	t_d	-10,5	-22,3	-29,8	-29,9	-20,9	-34,9	-55,6
7	t	-10,5	-22,3	-29,8	-37,8	-42,3	-32,8	-23,6
	t_d	-23,2	-25,8	-31,4	-41,6	-46,2	-41,6	-34,8
8	t	33,6	24,8	15,5	7,2	6,4	9,7	10,3
	t_d	19,7	10,0	8,2	3,5	0,1	0,7	7,2
9	t	26,4	10,0	8,2	-0,5	0,1	0,7	7,2
	t_d	14,5	1,0	-7,0	-11,1	-14,3	-12,8	-3,2
10	t	14,5	1,0	-7,0	-11,1	-14,3	-12,8	3,2
	t_d	4,7	-2,0	-10,2	-13,7	-18,5	-16,8	-8,4
11	t	17,2	-2,0	-10,2	-13,7	-18,5	-16,8	-8,4
	t_d	6,7	-9,2	-16,0	-16,0	-27,0	-18,4	-17,1

№ п/п		Уровень, гПа						
		1020,0	950,0	850,0	700,0	600,0	500,0	400,0
12	t	20,0	-9,2	-16,0	-16,0	-27,0	-18,4	-17,1
	t _d	3,8	-14,7	-18,1	-23,8	-29,7	-24,9	-20,8
13	t	3,8	-14,7	-18,1	-23,8	-29,7	-24,9	-20,8
	t _d	-9,7	-18,3	-27,7	-37,3	-37,7	-35,5	-27,6
14	t	-9,7	-18,3	-27,7	-37,3	-37,7	-35,5	-27,6
	t _d	-23,0	-23,7	-29,4	-39,0	-40,3	-36,2	-30,1
15	t	31,8	16,2	9,6	-0,8	0,8	7,0	3,2
	t _d	18,2	10,7	2,7	-13,5	-5,0	0,8	2,1
16	t	18,2	10,7	2,7	-13,5	-5,0	0,8	2,1
	t _d	7,8	-1,8	-9,4	-25,4	-19,1	-6,6	-2,4
17	t	7,8	-1,8	-9,4	-25,4	-19,1	-6,6	-2,4
	t _d	-8,1	-14,9	-22,0	-27,1	-24,0	-13,9	-8,2
18	t	5,3	-14,9	-22,0	-27,1	-24,0	-13,9	-8,2
	t _d	-9,8	-18,0	-25,3	-29,2	-27,1	-18,4	-8,2
19	t	2,6	-18,0	-25,3	-29,2	-27,1	-18,4	-8,2
	t _d	-9,8	-20,0	-31,0	-40,0	-39,8	-35,0	-17,6
20	t	0,8	-10,0	-21,0	-30,0	-19,8	-15,0	-17,6
	t _d	-15,8	-21,7	-24,0	-31,1	-35,3	-25,8	-19,7
21	t	29,2	18,3	11,5	7,2	4,8	7,6	6,0
	t _d	19,5	14,5	8,5	0,9	1,5	3,2	4,3
22	t	26,6	14,5	8,5	0,9	1,5	3,2	4,3
	t _d	14,2	6,9	-1,7	-5,8	-2,3	0,9	1,9
23	t	23,7	6,9	-1,7	-5,8	-2,3	0,9	1,9
	t _d	12,5	1,2	-8,3	-8,1	-4,3	-3,7	0,7
24	t	20,5	1,2	-8,3	-8,1	-4,3	-3,7	-0,7
	t _d	4,6	-2,6	-10,7	-10,0	-9,5	-6,7	-4,0
25	t	17,8	-2,6	-10,7	-10,0	-9,5	-6,7	-4,0
	t _d	3,8	-6,1	-13,8	-12,1	-10,6	-8,3	-4,4
26	t	8,4	-5,2	-11,8	-25,7	-28,5	-27,6	-27,6
	t _d	-0,8	-10,5	-17,0	-29,0	-32,9	-30,9	-28,9
27	t	26,9	15,5	10,3	3,0	0,8	7,9	5,4
	t _d	17,0	9,7	5,4	0,2	-5,0	2,1	0,5
28	t	10,5	2,6	-12,8	-17,3	-26,7	-20,6	-13,5
	t _d	1,0	-9,1	-15,9	-21,2	-28,5	-25,0	-14,9
29	t	22,4	13,6	3,8	-9,2	-4,4	-7,7	-4,6
	t _d	8,9	5,7	-3,3	-13,0	-7,8	-8,5	-6,2
30	t	15,8	6,1	-2,7	-15,5	-20,0	-20,0	-17,0
	t _d	6,5	1,3	-8,7	-17,2	-22,0	-26,1	-19,7

Таблица 10

Значения $\sum_{\tau} S$ (МДж/м²)

№ п/п	Пункт	Месяц	Интервал, ч							
			0-1	3-4	6-7	9-10	12-13	15-16	18-19	21-22
1	Иркутск	VI	0	0,13	1,09	1,55	1,80	1,42	0,75	0
		XII	0	0	0,17	0,25	0,08	0	0	0
2	Карадаг	I	0	0	0,42	0,59	0,84	0,42	0	0
		VII	0	0	1,55	2,26	2,14	1,84	0,80	0
3	Владивосток	VI	0	0	0,38	0,80	1,09	0,88	0,33	0
		XII	0	0	0	1,80	2,09	0,21	0	0
4	Тбилиси	VI	0	0	1,17	2,00	2,26	1,59	0,04	0
		XII	0	0	0	0,88	1,05	0,33	0	0
5	Якутск	V	0	0,13	1,00	1,30	1,26	1,00	0,59	0
		XI	0	0	0	0,25	0,75	0,08	0	0
6	Воейково	I	0	0	0	0,13	0,29	0	0	0
		VII	0	0	0,96	1,30	1,42	1,26	0,75	0
7	Иркутск	I	0	0	0	0,54	1,09	0,29	0	0
		VII	0	0	0,88	1,55	1,76	1,47	0,67	0
8	Карадаг	II	0	0	0,04	0,75	0,96	0,71	0	0
		VIII	0	0	1,30	2,30	2,22	1,84	0,33	0
9	Владивосток	I	0	0	0,42	1,80	2,14	1,30	0	0
		VII	0	0	0,21	0,50	0,92	0,80	0,25	0
10	Тбилиси	I	0	0	0	0,80	1,13	0,59	0	0
		VII	0	0	0,92	1,76	2,09	1,93	0,54	0
11	Якутск	IV	0	0	1,00	1,84	1,88	1,59	0,46	0
		X	0	0	0	0,63	0,84	0,50	0	0
12	Воейково	II	0	0	0	0,50	0,75	0,33	0	0
		VIII	0	0	0,84	1,26	1,21	1,09	0,50	0
13	Иркутск	II	0	0	0	1,13	1,55	0,80	0	0
		VIII	0	0	0,75	1,51	1,84	1,42	0,38	0
14	Карадаг	III	0	0	0,04	1,09	1,21	0,96	0	0
		IX	0	0	0,75	2,05	2,14	1,72	0	0
15	Владивосток	II	0	0	0,38	2,01	2,30	1,51	0	0
		VIII	0	0	0,33	0,84	1,17	0,96	0,17	0
16	Тбилиси	II	0	0	0	0,88	1,17	0,88	0	0
		VIII	0	0	0,59	1,67	2,09	1,67	0,21	0
17	Воейково	III	0	0	0,17	1,09	1,34	0,96	0	0
		IX	0	0	0,25	0,75	0,92	0,80	0,04	0
18	Иркутск	III	0	0	0,29	1,72	1,83	1,47	0,04	0
		IX	0	0	0,42	1,38	1,76	1,26	0,08	0
19	Карадаг	IV	0	0	0,59	1,42	1,72	1,38	0,08	0
		X	0	0	0,13	1,42	1,63	1,09	0	0

№ п/п	Пункт	Месяц	Интервал, ч							
			0-1	3-4	6-7	9-10	12-13	15-16	18-19	21-22
20	Владивосток	III	0	0	0,33	1,67	1,84	1,34	0	0
		IX	0	0	0,50	1,42	1,63	1,38	0,04	0
21	Тбилиси	III	0	0	0,08	1,13	1,42	1,05	0	0
		IX	0	0	0,38	1,55	1,93	1,51	0	0
22	Воейково	IV	0	0	0,63	1,26	1,21	1,05	0,25	0
		X	0	0	0	0,33	0,50	0,29	0	0
23	Иркутск	IV	0	0	0,84	1,72	1,84	1,42	0,21	0
		X	0	0	0,08	1,17	1,47	1,00	0	0
24	Владивосток	IV	0	0	0,59	1,34	1,42	1,05	0,08	0
		X	0	0	0,13	1,67	1,88	1,47	0	0
25	Тбилиси	IV	0	0	0,54	1,51	1,76	1,34	0,08	0
		X	0	0	0,13	1,38	1,55	1,05	0	0
26	Воейково	V	0	0,04	1,05	1,38	1,38	1,34	0,84	0
		XI	0	0	0	0,21	0,33	0,04	0	0
27	Иркутск	V	0	0	1,00	1,59	1,67	1,34	0,59	0
		XI	0	0	0	0,54	1,09	0,42	0	0
28	Карадаг	V	0	0	1,05	1,76	1,93	1,67	0,54	0
		XI	0	0	0	0,80	1,13	0,71	0	0
29	Владивосток	V	0	0	0,50	1,13	1,34	1,05	0,25	0
		XI	0	0	0	1,72	1,97	1,30	0	0
30	Тбилиси	V	0	0	0,84	1,63	1,80	1,17	0,25	0
		XI	0	0	0	0,96	1,21	0,80	0	0

Таблица 11

№ п/п	$\lambda_{\odot}$	$\varphi_{\odot}$	S кВт/м ²	№ п/п	$\lambda_{\odot}$	$\varphi_{\odot}$	S кВт/м ²
1	25°01'	12°59'	0,22	16	26°45'	-96°15'	0,24
2	35 59	-150 01	0,42	17	36 17	132 43	0,44
3	45 03	48 47	0,62	18	46 43	-60 17	0,64
4	27 57	-144 03	0,26	19	28 19	168 41	0,28
5	37 06	84 55	0,46	20	38 41	-24 19	0,48
6	47 55	-108 05	0,66	21	48 21	36 39	0,68
7	29 07	120 53	0,30	22	30 39	-156 21	0,32
8	39 53	-72 07	0,50	23	40 23	72 37	0,52
9	49 09	156 51	0,70	24	50 37	-120 23	0,72
10	31 51	-36 09	0,34	25	32 25	108 35	0,36
11	41 11	24 49	0,54	26	42 35	-84 25	0,56
12	51 49	-156 11	0,74	27	52 27	144 33	0,76
13	33 13	60 47	0,38	28	34 33	-48 27	0,40
14	43 47	-132 13	0,58	29	44 29	150 31	0,60
15	53 15	96 45	0,78	30	54 31	-12 29	0,80

№ п/п	Пункт	Σ мес	II	IV	VI	VIII	X	XII
1	Верхоянск	$\sum_{\text{мес}} S'$	42	314	377	222	50	0
		$\sum_{\text{мес}} D$	33	176	293	209	59	0
2	Ашхабад	$\sum_{\text{мес}} S'$	155	251	519	553	301	67
		$\sum_{\text{мес}} D$	130	226	193	172	126	88
3	Игарка	$\sum_{\text{мес}} S'$	8	251	331	218	21	0
		$\sum_{\text{мес}} D$	38	247	310	234	63	0
4	Фергана	$\sum_{\text{мес}} S'$	138	335	582	553	255	42
		$\sum_{\text{мес}} D$	151	243	214	201	159	96
5	Архангельск	$\sum_{\text{мес}} S'$	8	163	276	197	17	0
		$\sum_{\text{мес}} D$	46	239	322	205	50	4
6	Ташкент	$\sum_{\text{мес}} S'$	138	331	107	557	260	63
		$\sum_{\text{мес}} D$	134	218	201	163	134	92
7	Якутск	$\sum_{\text{мес}} S'$	42	301	444	289	50	4
		$\sum_{\text{мес}} D$	63	234	260	205	92	13
8	Тбилиси	$\sum_{\text{мес}} S'$	134	272	465	461	214	71
		$\sum_{\text{мес}} D$	126	239	247	218	142	80
9	Ленинград	$\sum_{\text{мес}} S'$	13	163	301	167	25	0
		$\sum_{\text{мес}} D$	50	159	255	197	59	8

№ п/п	Пункт	Σ мес	II	IV	VI	VIII	X	XII
10	Фрунзе	$\sum_{\text{мес}} A S'$	117	276	511	444	218	50
		$\sum_{\text{мес}} D$	155	218	222	201	130	109
11	Рига	$\sum_{\text{мес}} A S'$	25	201	352	218	42	17
		$\sum_{\text{мес}} D$	67	167	260	214	84	17
12	Махачкала	$\sum_{\text{мес}} A S'$	54	234	444	406	184	33
		$\sum_{\text{мес}} D$	92	243	218	193	130	67
13	Омск	$\sum_{\text{мес}} A S'$	67	318	410	268	63	17
		$\sum_{\text{мес}} D$	96	205	268	234	100	42
14	Владивосток	$\sum_{\text{мес}} A S'$	209	276	234	226	226	113
		$\sum_{\text{мес}} D$	109	218	251	230	117	84
15	Каунас	$\sum_{\text{мес}} A S'$	54	126	301	197	50	4
		$\sum_{\text{мес}} D$	84	214	285	234	92	29
16	Алма-Ата	$\sum_{\text{мес}} A S'$	109	247	448	394	214	59
		$\sum_{\text{мес}} D$	142	222	239	218	138	88
17	Новосибирск	$\sum_{\text{мес}} A S'$	67	251	368	268	71	13
		$\sum_{\text{мес}} D$	96	201	247	209	88	42
18	Сочи	$\sum_{\text{мес}} A S'$	109	218	465	435	180	50
		$\sum_{\text{мес}} D$	92	201	226	197	113	63

№ п/п	Пункт	Σ мес	II	IV	VI	VIII	X	XII
19	Смоленск	$\sum_{\text{мес}} d S'$	38	134	293	151	42	13
		$\sum_{\text{мес}} D$	80	193	268	247	92	29
20	Карадаг	$\sum_{\text{мес}} d S'$	63	226	469	469	176	38
		$\sum_{\text{мес}} D$	109	234	243	197	130	63
21	Минск	$\sum_{\text{мес}} d S'$	42	151	339	226	67	8
		$\sum_{\text{мес}} D$	80	226	285	230	88	29
22	Астрахань	$\sum_{\text{мес}} d S'$	96	251	494	419	176	35
		$\sum_{\text{мес}} D$	105	205	197	188	105	50
23	Иркутск	$\sum_{\text{мес}} d S'$	84	276	410	364	109	17
		$\sum_{\text{мес}} D$	84	201	243	184	105	42
24	Одесса	$\sum_{\text{мес}} d S'$	84	251	456	427	159	33
		$\sum_{\text{мес}} D$	109	239	268	209	134	59
25	Целиноград	$\sum_{\text{мес}} d S'$	109	226	444	268	100	29
		$\sum_{\text{мес}} D$	105	222	239	214	100	54
26	Южно-Са- халинск	$\sum_{\text{мес}} d S'$	130	214	234	172	147	59
		$\sum_{\text{мес}} D$	147	268	268	247	117	75
27	Комсо- мольск-на- Амуре	$\sum_{\text{мес}} d S'$	109	214	331	281	121	54
		$\sum_{\text{мес}} D$	121	251	272	214	105	54

№ п/п	Пункт	Σ мес	II	IV	VI	VIII	X	XII
28	Кишинев	$\sum_{\text{мес}} d S'$	59	201	389	348	142	25
		$\sum_{\text{мес}} D$	113	234	293	230	121	59
29	Киев	$\sum_{\text{мес}} d S'$	4	159	368	310	96	21
		$\sum_{\text{мес}} D$	96	226	285	226	113	46
30	Хабаровск	$\sum_{\text{мес}} d S'$	163	272	373	281	163	84
		$\sum_{\text{мес}} D$	109	239	276	243	109	63

Таблица 13

Средние месячные значения альбедо (%)

№ п/п	Пункт	II	IV	VI	VIII	X	XII
1	Верхоянск	84	77	18	20	69	73
2	Ашхабад	30	24	26	28	28	26
3	Игарка	79	84	15	20	71	83
4	Фергана	38	29	29	31	30	38
5	Архангельск	73	46	20	22	30	75
6	Ташкент	38	20	22	23	24	55
7	Якутск	83	60	17	18	49	79
8	Тбилиси	20	19	17	18	20	21
9	Ленинград	58	17	17	18	19	47
10	Фрунзе	50	21	20	20	22	50
11	Рига	59	19	18	20	20	51
12	Махачкала	36	17	18	18	18	28
13	Омск	74	28	16	17	23	79
14	Владивосток	69	19	21	20	22	59
15	Каунас	60	20	20	20	20	49
16	Алма-Ата	60	19	21	20	22	59
17	Новосибирск	67	23	16	17	21	69
18	Сочи	28	20	20	22	24	24
19	Смоленск	75	36	25	25	31	73
20	Карадаг	17	15	15	15	15	14
21	Минск	66	21	18	17	21	62
22	Астрахань	30	16	16	18	17	33
23	Иркутск	55	8	12	15	19	58
24	Одесса	27	15	17	16	18	21
25	Целиноград	74	28	19	18	21	56
26	Южно-Сахалинск	72	25	21	22	21	70
27	Комсомольск-на-Амуре	31	16	19	18	19	19
28	Кишинев	31	16	19	18	19	39
29	Киев	47	17	19	20	20	49
30	Хабаровск	59	23	20	21	24	50

Таблица 14

№ п/п, дата	Срок, ч мин	$\alpha_{\odot}$	S кВт/м ²	D кВт/м ²	A	B кВт/м ²	№ п/п, дата	Срок, ч мин	$\alpha_{\odot}$	S кВт/м ²	D кВт/м ²	A	B кВт/м ²
1 9.05	0 30	—	0,00	0,00	—	-0,02	5 23.05	0 30	—	0,00	0,00	—	-0,01
	6 30	19°48'	0,62	0,09	0,16	0,19		6 30	22°24'	0,20	0,17	0,22	0,11
	9 30	40 18	0,84	0,09	0,15	0,43		9 30	43 18	0,91	0,10	0,19	0,47
	12 30	46 36	0,63	0,24	0,15	0,33		12 30	49 00	0,88	0,09	0,18	0,58
	15 30	32 12	0,77	0,11	0,16	0,31		15 30	35 00	0,89	0,08	0,20	0,03
	18 30	10 42	0,49	0,05	0,20	0,01		18 30	13 12	0,03	0,07	0,18	0,01
2 17.05	0 30 *	—	0,00	0,00	—	0,02	6 9.06	0 30 *	—	0,00	0,00	—	-0,09
	0 30	—	0,00	0,00	—	-0,05		0 30	—	0,00	0,00	—	-0,08
	6 30	21 24	0,61	0,10	0,20	0,17		6 30	24 06	0,68	0,10	0,24	0,19
	9 30	42 18	0,75	0,15	0,17	0,44		9 30	45 12	0,80	0,13	0,18	0,45
	12 30	48 42	0,80	0,21	0,16	0,59		12 30	52 18	0,87	0,13	0,17	0,54
	15 30	33 48	0,68	0,18	0,19	0,47		15 30	37 36	0,57	0,17	0,20	0,31
3 18.05	18 30	12 12	0,45	0,06	0,22	0,03	7 11.06	18 30 *	15 36	0,46	0,07	0,25	0,09
	0 30 *	—	0,00	0,00	—	-0,07		0 30 *	—	0,00	0,00	—	-0,06
	0 30	—	0,00	0,00	—	-0,07		0 30	—	0,00	0,00	—	-0,06
	6 30	21 36	0,08	0,11	0,19	0,01		6 30	24 12	0,43	0,14	0,24	0,14
	9 30	42 30	0,61	0,18	0,15	0,43		9 30	45 18	0,59	0,27	0,19	0,40
	12 30	48 48	0,49	0,29	0,17	0,51		12 30	52 24	0,64	0,29	0,21	0,50
4 19.05	15 30	34 00	0,52	0,24	0,20	0,34	8 12.06	15 30	37 36	0,61	0,17	0,22	0,33
	18 30	12 18	0,39	0,07	0,23	0,03		18 30	15 42	0,36	0,09	0,26	0,06
	0 30 *	—	0,00	0,00	—	-0,07		0 30 *	—	0,00	0,00	—	-0,06
	0 30	—	0,00	0,00	—	-0,07		0 30	—	0,00	0,00	—	-0,06
	6 30	21 42	0,62	0,09	0,22	0,19		6 30	24 12	0,46	0,13	0,24	0,16
	9 30	42 36	0,85	0,10	0,17	0,43		9 30	45 24	0,69	0,17	0,20	0,42
	12 30	49 00	0,90	0,10	0,18	0,52		12 30	52 30	0,77	0,17	0,21	0,52
	15 30	34 12	0,82	0,09	0,19	0,32		15 30	37 48'	0,64	0,24	0,22	0,37
	18 30	12 30	0,45	0,06	0,22	0,03		18 30	15 48	0,42	0,08	0,25	0,08
	0 30 *	—	0,00	0,00	—	-0,06		0 30 *	—	0,00	0,00	—	-0,03

№ п/п, даты	Срок, ч мин	h ₀	S кВт/м²	D кВт/м²	A	B кВт/м²	№ п/п, даты	Срок, ч мин	h ₀	S кВт/м²	D кВт/м²	A	B кВт/м²
9 10.07	0 30	—	0,00	0,00	—	-0,06	13 27.07	0 30	—	0,00	0,00	—	-0,04
	6 30	22°42'	0,72	0,06	0,23	0,17		6 30	20 00	0,46	0,12	0,12	0,14
	9 30	44 00	0,85	0,09	0,19	0,43		9 30	41 18	0,71	0,13	0,13	0,39
	12 30	51 48	0,85	0,15	0,20	0,54		12 30	48 54	0,79	0,13	0,13	0,50
	15 30	37 48	0,81	0,15	0,20	0,35		15 30	35 12	0,70	0,17	0,17	0,32
	18 30	15 42	0,37	0,12	0,23	0,01		18 30	13 00	0,27	0,06	0,06	0,06
10 13.07	0 30 *	—	0,00	0,00	—	-0,04	14 29.08	0 30 *	—	0,00	0,00	—	-0,03
	0 30	—	0,00	0,00	—	-0,06		0 30	—	0,00	0,00	—	-0,01
	6 30	22 24	0,62	0,08	0,22	0,16		6 30	12 30	0,28	0,07	0,07	0,03
	9 30	43 36	0,77	0,12	0,19	0,44		9 30	42 48	0,34	0,23	0,23	0,22
	12 30	51 24	0,84	0,11	0,19	0,50		12 30	39 12	0,86	0,26	0,26	0,57
	15 30	37 24	0,77	0,10	0,20	0,32		15 30	26 00	0,73	0,12	0,12	0,26
11 15.07	18 30	15 18	0,56	0,06	0,20	0,06	15 23.05	18 30 *	4 12	0,20	0,03	0,03	-0,03
	0 30 *	—	0,00	0,00	—	-0,04		0 30 *	—	0,00	0,00	—	-0,05
	0 30	—	0,00	0,00	—	-0,06		0 30	—	0,00	0,00	—	-0,15
	6 30	22 06	0,29	0,15	0,15	0,13		6 30	22 18	0,70	0,08	0,08	0,17
	9 30	43 24	0,52	0,23	0,23	0,33		9 30	43 06	0,86	0,10	0,10	0,45
	12 30	51 12	0,65	0,21	0,21	0,45		12 30	49 54	0,87	0,11	0,11	0,50
12 17.07	15 30	37 18	0,60	0,18	0,18	0,28	16 26.05	15 30	36 00	0,46	0,18	0,18	0,14
	18 30	14 54	0,32	0,10	0,10	0,05		18 30	13 12	0,47	0,06	0,06	0,03
	0 30 *	—	0,00	0,00	—	-0,06		0 30 *	—	0,00	0,00	—	-0,04
	0 30	—	0,00	0,00	—	-0,07		0 30	—	0,00	0,00	—	-0,07
	6 30	21 48	0,45	0,16	0,16	0,15		6 30	22 54	0,59	0,09	0,09	0,20
	9 30	43°00'	0,43	0,30	0,30	0,37		9 30	43°48'	0,70	0,14	0,14	0,47
	12 30	50 48	0,59	0,28	0,28	0,50		12 30	50 18	0,68	0,17	0,17	0,56
	15 30	36 54	0,62	0,17	0,17	0,33		15 30	35 24	0,60	0,15	0,15	0,38
	18 30	14 30	0,45	0,08	0,08	0,06		18 30	13 06	0,29	0,08	0,08	0,06
	0 30 *	—	0,00	0,00	—	-0,05		0 30 *	—	0,00	0,00	—	-0,06
	0 30	—	0,00	0,00	—	-0,07		0 30	—	0,00	0,00	—	-0,07
	6 30	21 48	0,45	0,16	0,16	0,15		6 30	22 54	0,59	0,09	0,09	0,20

№ п/п, дата	Срок, ч мин	α	S кВт/м²	D кВт/м³	A	B кВт/м³	№ п/п, дата	Срок, ч мин	α	S кВт/м²	D кВт/м³	A	B кВт/м³
17 1.06	0 30	—	0,00	0,00	—	—0,07	21 19.06	0 30	—	0,00	0,00	—	—0,07
	6 30	23 30	0,77	0,07	0,20	0,20		6 30	24 06	0,75	0,07	0,22	0,18
	9 30	44 36	0,91	0,08	0,15	0,47		9 30	45 18	0,86	0,13	0,18	0,48
	12 30	51 30	0,90	0,10	0,17	0,56		12 30	52 54	0,88	0,12	0,16	0,51
	15 30	36 48	0,87	0,08	0,21	0,38		15 30	38 24	0,82	0,08	0,19	0,30
	18 30	14 42	0,61	0,05	0,24	0,06		18 30	16 12	0,60	0,06	0,25	0,06
18 4.06	0 30*	—	0,00	0,00	—	—0,06	22 30.06	0 30*	—	0,00	0,00	—	—0,06
	0 30	—	0,00	0,00	—	—0,03		0 30	—	0,00	0,00	—	—0,07
	6 30	23 42	0,60	0,11	0,20	0,20		6 30	23 42	0,65	0,10	0,20	0,19
	9 30	44 54	0,74	0,15	0,16	0,45		9 30	45 06	0,80	0,13	0,19	0,45
	12 30	52 00	0,82	0,14	0,16	0,57		12 30	52 54	0,84	0,15	0,20	0,54
	15 30	37 24	0,69	0,16	0,18	0,39		15 30	38 36	0,81	0,10	0,17	0,38
19 13.06	18 30	14 42	0,08	0,07	0,15	0,00	23 1.07	18 30	16 36	0,58	0,06	0,22	0,08
	0 30*	—	0,00	0,00	—	—0,03		0 30*	—	0,00	0,00	—	—0,06
	0 30	—	0,00	0,00	—	—0,08		0 30	—	0,00	0,00	—	—0,06
	6 30	24 18	0,59	0,08	0,21	0,18		6 30	23 36	0,72	0,07	0,22	0,20
	9 30	45 36	0,89	0,08	0,17	0,51		9 30	45 06	0,87	0,10	0,17	0,45
	12 30	53 00	0,91	0,07	0,16	0,61		12 30	52 48	0,90	0,10	0,16	0,56
20 18.06	15 30	38 12	0,82	0,08	0,20	0,36	24 2.07	15 30	38 42	0,81	0,10	0,17	0,37
	18 30	15 54	0,63	0,05	0,22	0,07		18 30	16 42	0,58	0,06	0,21	0,08
	0 30*	—	0,00	0,00	—	—0,04		0 30*	—	0,00	0,00	—	—0,05
	0 30	—	0,00	0,00	—	—0,06		0 30	—	0,00	0,00	—	—0,05
	6 30	23 54	0,73	0,08	0,22	0,20		6 30	23 36	0,67	0,08	0,14	0,21
	9 30	45 12	0,82	0,18	0,17	0,52		9 30	45 00	0,84	0,11	0,16	0,43
	12 30	53 00	0,89	0,10	0,16	0,58		12 30	52 42	0,88	0,10	0,16	0,50
	15 30	38 18	0,84	0,09	0,22	0,34		15 30	38 30	0,82	0,12	0,18	0,37
	18 30	16 12	0,64	0,06	0,26	0,04		18 30	16 24	0,62	0,06	0,21	0,07
	0 30*	—	0,00	0,00	—	—0,07		0 30*	—	0,00	0,00	—	—0,02

№ п/п, дата	Срок, ч. мин	$k_{\odot}$	S кВт/м ²	D кВт/м ²	A	B кВт/м ²	№ п/п, дата	Срок, ч. мин	$k_{\odot}$	S кВт/м ²	D кВт/м ²	A	B кВт/м ²
25 11.07	0 30	—	0,00	0,00	—	—0,07	28 31.08	0 30	—	0,00	0,00	—	—0,05
	6 30	22 42	0,71	0,07	0,24	0,19		6 30	11 36	0,48	0,06	0,26	0,06
	9 30	44 06	0,93	0,08	0,18	0,48		9 30	31 42	0,68	0,13	0,20	0,29
	12 30	51 42	0,96	0,08	0,16	0,57		12 30	38 12	0,74	0,14	0,19	0,38
	15 30	37 48	0,88	0,10	0,21	0,37		15 30	25 18	0,59	0,12	0,21	0,20
	18 30	16 12	0,63	0,06	0,27	0,08		18 30	3 54	0,15	0,01	0,17	—0,03
26 16.07	0 30*	—	0,00	0,00	—	—0,07	29 2.09	0 30*	—	0,00	0,00	—	—0,02
	0 30	—	0,00	0,00	—	—0,03		0 30	—	0,00	0,00	—	—0,04
	6 30	22 06	0,73	0,11	0,22	0,17		6 30	11 18	0,20	0,08	0,24	0,04
	9 30	43 12	0,88	0,12	0,17	0,50		9 30	31 00	0,87	0,07	0,20	0,30
	12 30	51 00	0,97	0,08	0,21	0,59		12 30	37 36	0,88	0,08	0,20	0,40
	15 30	37 12	0,79	0,10	0,18	0,38		15 30	24 18	0,80	0,06	0,21	0,20
27 30.08	18 30	15 18	0,61	0,07	0,24	0,07	30 7.09	18 30	3 18	0,21	0,01	0,25	—0,04
	0 30*	—	0,00	0,00	—	—0,04		0 30*	—	0,00	0,00	—	—0,06
	0 30	—	0,00	0,00	—	—0,06		0 30	—	0,00	0,00	—	—0,06
	6 30	12 06	0,59	0,04	0,25	0,06		6 30	10 06	0,61	0,04	0,24	0,03
	9 30	32 00	0,88	0,06	0,20	0,34		9 30	29 36	0,87	0,06	0,20	0,31
	12 30	38 42	0,93	0,07	0,18	0,40		12 30	35 42	0,90	0,08	0,19	0,40
	15 30	25 42	0,82	0,08	0,22	0,24		15 30	23 06	0,70	0,12	0,21	0,20
	18 30	4 18	0,29	0,02	0,17	—0,06		18 30	1 48	0,03	0,01	0,20	—0,06
	0 30*	—	0,00	0,00	—	—0,05		0 30*	—	0,00	0,00	—	—0,04

* Следующие сутки.

Температура (°C)

№ п/п. Дата	Срок, ч	Глубина, см					№ п/п. Дата	Срок, ч	Глубина, см				
		0	5	10	15	20			0	5	10	15	20
1 31.07—1.08	20	13,2	18,1	17,3	16,8	16,2	5 5.08	0	12,9	18,4	18,6	18,4	18,1
	0	8,1	15,2	16,2	16,3	16,0		4	6,6	15,4	16,4	16,8	17,1
	4	6,4	13,8	14,3	14,9	15,4		8	23,2	17,4	16,4	16,3	16,5
	8	19,8	14,6	14,3	14,4	14,6		12	35,0	23,8	20,5	18,2	17,0
	12	21,1	18,4	16,8	15,6	14,9		16	30,6	26,2	23,6	21,1	19,2
	16	20,2	18,6	17,0	16,5	16,1		20	14,6	20,0	20,4	20,0	19,8
2 2.08	20	11,4	17,8	17,0	16,7	16,5	6 6.08	0	8,5	14,4	16,8	17,3	17,5
	0	8,2	15,8	15,8	16,1	16,1		4	11,6	10,4	11,8	12,6	14,8
	4	5,6	13,6	14,1	14,7	14,8		8	19,7	16,4	15,6	15,8	16,1
	8	19,7	14,8	14,1	13,9	14,6		12	24,2	19,0	17,2	16,4	16,0
	12	34,9	20,7	17,8	15,9	15,0		16	20,7	20,2	18,4	17,4	17,0
	16	28,0	21,8	19,4	17,3	16,8		20	13,7	18,5	17,8	17,4	17,2
3 3.08	20	12,5	19,2	18,4	17,6	17,0	7 7.08	0	7,6	16,6	16,6	17,2	17,6
	0	8,5	16,3	16,4	16,6	17,2		4	5,8	14,9	15,4	15,8	16,1
	4	9,1	9,8	15,2	15,5	16,2		8	21,7	16,2	15,3	15,3	16,1
	8	20,9	15,4	13,8	13,6	13,8		12	29,1	19,5	17,4	15,4	16,1
	12	29,8	25,4	20,8	17,3	16,0		16	27,3	21,3	18,6	17,4	17,0
	16	33,4	26,5	22,4	19,3	17,6		20	15,6	20,0	18,3	18,3	18,0
4 4.08	20	16,0	20,4	20,3	19,6	19,2	8 8.08	0	13,8	18,1	17,8	17,7	17,6
	0	9,5	17,2	17,7	17,8	17,6		4	13,0	17,2	17,0	17,1	16,1
	4	9,5	16,0	16,2	16,6	16,4		8	25,4	18,2	17,0	16,8	16,7
	8	20,0	16,7	15,9	15,9	17,6		12	34,3	23,4	19,2	17,8	17,5
	12	33,0	20,6	17,2	16,9	16,4		16	29,8	23,3	21,0	19,4	17,9
	16	27,4	22,0	20,0	18,5	17,5		20	16,8	21,3	20,3	19,6	19,2

№ п/п, дата	Срок, ч	Глубина, см					№ п/п, дата	Срок, ч	Глубина, см				
		0	5	10	15	20			0	5	10	15	20
9 9.08	0	11,3	18,5	19,1	19,2	18,6	14 14.08	0	13,6	18,3	18,3	18,0	17,8
	4	9,2	17,6	17,8	18,0	17,6		4	11,1	16,4	16,5	17,0	16,9
	8	23,2	18,0	17,2	17,2	17,5		8	20,9	17,1	16,4	16,4	16,4
	12	33,9	20,7	18,9	18,2	18,0		12	30,8	21,3	18,5	17,3	16,7
	16	27,9	23,2	21,0	19,4	18,3		16	23,4	22,6	20,1	19,2	18,7
10 10.08	20	15,9	21,4	20,4	19,6	19,4	15 15.08	20	15,9	20,4	19,6	19,3	19,0
	0	13,4	19,2	19,1	19,0	18,9		0	10,1	18,3	18,4	18,2	18,1
	4	11,7	17,7	17,8	18,0	18,1		4	12,3	16,7	16,7	17,2	17,4
	8	22,4	18,4	17,5	17,5	17,4		8	20,4	17,8	16,8	16,7	16,5
	12	30,5	21,4	19,1	18,0	17,8		12	27,4	18,6	16,9	16,8	16,7
11 11.08	16	19,4	21,4	19,9	18,8	18,3	16 16.08	16	19,0	19,0	17,8	17,2	16,9
	20	17,2	19,6	19,0	18,7	18,5		20	16,8	18,4	17,7	17,3	17,1
	0	14,5	17,9	18,2	18,1	18,4		0	16,0	17,7	17,2	17,2	17,1
	4	11,0	16,8	17,1	17,4	17,8		4	16,2	17,4	16,9	16,9	16,9
	8	21,0	17,6	16,8	16,9	17,2		8	18,1	17,2	16,6	16,6	16,5
12 12.08	12	26,8	23,1	20,5	18,6	17,8	17 17.08	12	22,3	18,6	17,4	16,6	16,5
	16	28,8	24,2	22,7	20,2	19,0		16	21,3	19,8	18,6	17,6	17,2
	20	15,5	19,8	20,2	20,6	20,3		20	14,1	18,1	17,7	17,6	17,5
	0	11,5	15,1	17,4	18,4	18,4		0	13,1	16,6	16,9	17,0	17,2
	4	10,8	13,8	15,9	17,0	17,3		4	11,8	16,2	16,2	16,4	16,6
13 13.08	8	18,4	16,3	16,0	16,4	17,4	18 18.08	8	16,8	15,6	15,4	15,6	15,8
	12	22,7	18,9	17,4	16,8	16,3		12	21,6	19,2	17,6	16,6	16,4
	16	18,8	19,0	18,8	17,4	17,0		16	21,0	18,4	18,0	17,5	17,0
	20	11,4	17,5	17,4	17,3	17,2		20	11,2	16,2	17,8	17,8	17,7
	0	7,5	15,5	16,0	16,5	18,4		0	8,4	11,3	12,8	14,6	16,0
	4	12,2	15,1	15,0	15,7	16,0		4	6,4	9,4	11,9	13,4	14,4
	8	18,2	16,1	15,4	15,5	16,5		8	17,6	14,4	13,8	14,2	14,3
	12	31,2	20,3	17,5	16,4	16,0		12	19,8	17,0	15,7	15,0	14,5
	16	24,8	22,3	19,8	18,1	17,5		16	19,0	17,7	16,5	15,8	15,3
	20	14,3	19,8	19,1	18,4	18,0		20	10,1	16,8	16,4	16,2	16,0

№ п/п, дата	Срок, ч	Глубина, см					№ п/п, дата	Срок, ч	Глубина, см				
		0	5	10	15	20			0	5	10	15	20
19 19.08	0 4 8 12 16 20	6,4 4,9 17,4 24,8 23,8 10,8	14,6 13,2 13,9 17,6 19,3 17,6	15,1 13,8 13,5 15,7 17,4 17,1	15,5 14,6 13,8 14,8 16,3 16,8	15,8 15,0 13,9 14,2 16,0 16,5	24 24.08	0 4 8 12 16 20	5,5 3,8 18,3 28,4 24,1 9,0	15,7 14,0 14,4 18,2 20,0 18,0	16,6 14,6 14,2 16,2 18,1 17,4	17,2 15,2 14,4 15,4 16,8 17,0	17,5 15,4 14,4 14,6 16,3 16,8
20 20.08	0 4 8 12 16 20	7,3 6,6 19,6 25,2 23,6 13,0	15,0 13,8 14,6 16,5 19,2 17,4	15,6 14,4 14,2 15,2 17,9 17,0	16,4 14,8 14,4 15,0 17,7 16,8	17,0 15,0 14,4 14,9 17,5 16,7	25 25.08	0 4 8 12 16 20	6,7 4,1 18,1 30,5 26,5 14,0	15,6 14,0 14,4 18,6 20,6 18,5	15,8 14,6 14,0 16,3 18,5 18,0	16,1 15,2 15,4 15,4 17,0 17,4	16,3 15,4 14,6 14,9 16,2 17,3
21 21.08	0 4 8 12 16 20	10,4 7,2 20,8 31,5 25,4 13,2	15,6 14,2 15,4 19,7 21,0 18,9	16,8 14,8 14,8 17,2 19,0 18,3	16,6 15,2 14,9 16,0 17,6 17,8	16,5 15,4 14,9 15,6 17,0 17,4	26 26.08	0 4 8 12 16 20	12,0 9,5 19,5 24,5 21,9 15,4	16,0 15,4 15,2 20,4 20,0 17,9	16,5 15,4 15,4 17,3 18,5 18,1	16,4 16,0 15,5 16,5 17,3 17,1	16,4 16,3 15,6 16,2 16,9 17,5
22 22.08	0 4 8 12 16 20	11,4 9,2 19,7 31,1 24,8 11,2	17,0 15,7 15,9 20,1 21,0 18,9	16,9 16,0 15,5 17,5 19,3 18,4	17,0 16,2 15,6 16,4 17,5 18,0	17,5 16,3 15,7 16,0 16,9 17,0	27 27.08	0 4 8 12 16 20	14,2 13,9 19,2 24,7 21,4 17,4	17,4 16,5 17,0 18,6 19,5 18,7	17,4 16,7 16,4 17,2 18,1 17,8	17,3 16,6 16,4 16,6 17,2 17,4	17,2 16,7 16,5 16,0 16,5 17,0
23 23.08	0 4 8 12 16 20	10,4 6,7 18,6 28,0 16,0 8,8	16,2 14,9 15,4 19,0 20,4 17,8	16,8 15,4 15,0 17,0 18,0 17,3	17,1 16,0 14,6 15,8 17,3 17,2	17,3 16,4 15,5 15,4 16,8 17,1	28 28.08	0 4 8 12 16 20	12,6 11,5 19,6 28,6 24,2 14,4	17,6 16,4 16,4 20,1 21,2 19,6	17,2 16,3 16,0 17,9 19,2 18,9	17,1 16,4 16,0 16,9 18,0 18,8	17,0 16,4 16,1 16,3 17,4 18,6

№ п/п, дата	Срок, ч	Глубина, см					№ п/п, дата	Срок, ч	Глубина, см				
		0	5	10	15	20			0	5	10	15	20
29 29.08	0	12,2	18,1	18,0	17,8	17,6	30 30.08	0	11,6	17,6	19,0	18,4	18,1
	4	13,9	16,8	16,6	16,6	16,7		4	10,4	16,2	16,7	16,9	17,0
	8	20,0	17,0	16,6	16,6	16,6		8	20,3	16,8	16,4	16,4	16,4
	12	25,4	19,8	18,0	17,3	16,9		12	27,4	19,4	17,8	17,0	16,5
	16	26,4	21,2	19,2	18,2	18,0		16	22,2	20,4	19,0	18,0	17,8
	20	13,6	19,4	19,0	18,4	18,0	31.08	20	9,8	18,2	18,9	17,9	17,5
								0	7,0	16,1	16,5	16,9	17,1
								4	6,7	14,8	15,3	16,0	16,3

Таблица 16

Температура (°C)

№ п/п	Пункт	Глубина, м	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	Торжок (Калининская обл.)	0,0 1,6 3,2	-10 2,8 5,0	-10 2,3 4,2	-7 2,0 3,8	2 2,0 3,4	12 5,5 4,1	17 9,2 6,1	20 11,6 8,1	17 12,9 9,7	10 11,7 10,2	4 9,1 9,4	-2 6,1 8,0	-8 3,8 6,3
2	Елец (Липецкая обл.)	0,0 1,6 3,2	-9 2,6 5,1	-9 1,5 4,0	-4 1,0 3,1	7 1,8 2,8	17 6,9 4,7	23 11,2 7,8	24 14,0 10,5	21 15,2 12,2	14 13,9 12,6	6 10,8 11,4	-1 7,2 9,3	-6 4,2 6,9
3	Вугуруслан (Оренбургская обл.)	0,0 1,6 3,2	-15 2,7 6,2	-15 1,6 5,0	-8 0,9 4,2	4 1,0 3,7	17 3,2 3,5	24 7,2 4,7	26 10,3 6,4	22 12,2 8,0	13 12,3 9,1	4 10,6 9,4	-5 7,7 8,7	-12 5,1 7,6
4	Ростов-на-Дону	0,0 1,6 3,2	-6 6,7 10,6	-5 5,4 9,3	1 4,7 8,3	11 5,8 7,7	20 9,3 8,3	26 12,8 9,8	28 15,4 11,5	27 17,0 12,9	18 16,9 13,9	10 13,9 14,0	2 12,2 13,3	-3 9,2 12,0

№ п/п	Пункт	Глубина, м	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
5	Алма-Ата	0,0 1,6 3,2	-11 6,1 10,3	-8 4,7 8,9	2 4,2 7,9	12 6,2 7,6	20 9,8 8,4	26 13,0 10,0	29 15,6 11,6	27 17,4 13,2	20 17,4 14,1	9 15,5 14,3	-1 11,8 13,5	-8 8,5 11,9
6	Чарджоу (Турк- менская ССР)	0,0 1,6 3,2	1 11,5 15,9	4 10,7 14,6	10 11,4 14,0	19 13,4 14,0	27 16,8 14,8	33 20,1 16,2	34 22,4 17,7	31 23,5 18,9	24 23,1 19,7	16 21,0 19,8	8 17,9 19,2	3 14,1 17,8
7	Калинин	0,0 1,6 3,2	-10 3,0 5,5	-10 2,5 4,7	-6 2,1 4,1	3 2,2 3,7	12 5,4 4,2	17 9,1 6,1	19 11,7 8,0	17 12,8 9,6	10 11,9 10,1	3 9,3 9,5	-3 6,5 8,2	-8 4,2 6,7
8	Орел	0,0 1,6 3,2	-9 3,6 6,7	-9 2,5 5,7	-5 1,1 5,0	5 2,0 4,4	15 4,9 4,4	21 9,1 5,7	23 12,1 7,5	20 13,5 9,2	12 13,0 10,1	5 10,7 10,1	-2 7,7 9,3	-7 5,1 8,0
9	Казань	0,0 1,6 3,2	-14 3,1 5,3	-14 2,2 4,4	-8 1,6 3,6	3 1,6 3,2	13 4,2 3,2	20 7,8 4,9	22 10,6 6,9	19 12,2 8,6	11 11,9 9,6	3 9,8 9,6	-5 6,8 8,3	-11 4,3 6,8
10	Гигант (Ростов- ская обл.)	0,0 1,6 3,2	-5 8,0 11,5	-5 6,6 10,3	2 5,9 9,4	11 6,8 8,7	20 9,9 9,1	26 12,9 10,3	28 15,5 11,8	27 17,3 13,2	18 17,5 14,3	10 15,8 14,6	3 13,0 14,0	-2 10,1 12,9
11	Павлодар (Казах- ская ССР)	0,0 1,6 3,2	-18 0,3 4,8	-17 -1,1 3,4	-10 -1,6 2,4	5 0,1 1,8	17 4,5 2,5	24 10,4 5,3	26 13,3 8,0	22 14,6 9,8	14 14,0 10,8	3 11,0 10,4	-8 7,0 9,0	-15 3,3 7,0
12	Кизыл-Араат (Туркменская ССР)	0,0 1,6 3,2	0 12,1 17,8	4 11,4 16,3	10 11,6 15,3	18 13,9 15,1	28 18,1 16,1	35 22,3 17,8	37 25,3 19,8	34 27,1 21,5	26 26,6 22,5	17 23,9 22,6	8 19,8 21,6	3 15,4 19,7
13	Кашира 1 (Мос- ковская обл.)	0,0 1,6 3,2	-11 3,1 5,6	-10 2,5 4,8	-6 2,0 4,3	3 1,3 3,2	14 4,0 3,5	19 7,7 5,2	21 10,6 7,2	18 12,3 8,9	11 11,9 9,9	4 9,5 9,6	-3 6,5 8,1	-8 4,4 7,1
14	Курск	0,0 1,6 3,2	-9 3,8 7,3	-8 3,2 6,5	-4 2,5 5,5	7 2,7 4,8	17 6,4 5,2	22 10,1 6,9	24 12,7 8,3	21 13,8 9,5	12 12,9 9,9	6 10,4 9,6	-1 8,0 9,2	-6 5,4 8,2

№ в/п	Пункт	Глубина, м	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
15	Куйбышев	0,0 1,6 3,2	-14 3,7 6,9	-13 2,5 5,9	-8 1,6 5,0	5 1,8 4,3	18 4,2 4,2	25 8,1 5,2	27 11,2 6,7	23 12,8 8,1	14 12,9 9,2	4 10,9 9,7	-4 8,1 9,1	-11 5,4 8,2
16	Элиста (Калининская ССР)	0,0 1,6 3,2	-6 6,6 11,3	-6 5,3 10,1	0 4,6 8,9	10 5,7 8,4	20 9,8 8,9	26 14,0 10,7	29 17,3 12,4	26 19,4 14,4	18 19,4 15,5	10 16,4 15,1	2 12,8 14,6	-3 9,0 13,0
17	Актюбинск (Казахская ССР)	0,0 1,6 3,2	-16 2,1 6,6	-15 0,9 5,1	-8 0,4 4,0	6 1,3 3,4	19 6,4 4,6	25 11,6 7,3	28 15,4 10,0	24 17,1 12,2	15 16,3 13,2	5 12,8 12,8	-4 8,2 2,9	-12 4,7 8,6
18	Ашхабад	0,0 1,6 3,2	1 12,7 16,3	4 11,7 14,9	10 12,2 14,4	19 14,1 14,9	28 17,5 15,9	35 21,3 17,8	37 24,3 20,0	35 25,9 21,7	27 25,3 22,7	17 23,0 22,2	9 19,4 20,9	3 15,5 18,7
19	Вязьма (Смоленская обл.)	0,0 1,6 3,2	-10 3,5 5,9	-10 2,8 5,1	-6 2,4 4,5	3 2,4 4,0	13 5,0 4,3	19 8,2 5,6	20 11,0 7,3	18 12,3 8,7	11 12,0 9,5	4 9,9 9,4	-2 7,0 8,5	-7 4,7 7,1
20	Воронеж	0,0 1,6 3,2	-9 4,6 7,4	-10 3,6 6,4	-4 3,0 5,6	7 3,3 5,0	17 6,5 5,6	23 9,7 7,1	25 12,4 9,0	22 14,0 10,6	14 13,8 11,4	7 11,8 11,3	-1 9,0 10,3	-7 6,5 8,9
21	Еланга (Оренбургская обл.)	0,0 1,6 3,2	-15 3,5 6,7	-15 2,1 5,3	-8 1,4 4,4	4 1,9 4,2	17 4,8 4,1	25 9,0 5,7	26 12,4 8,1	22 14,0 10,0	13 13,9 11,1	4 11,7 11,4	-4 8,5 10,1	-11 5,7 8,9
22	Тихорецк (Краснодарский край)	0,0 1,6 3,2	-4 7,7 11,7	-3 6,6 10,6	3 6,0 9,6	12 7,3 9,0	20 10,3 9,4	26 13,4 10,5	28 16,0 12,0	27 17,9 13,3	20 18,1 14,4	11 16,1 14,8	4 13,3 14,2	-1 10,1 13,0

№ п/п	Пункт	Глубина, м	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
23	Караганда	0,0 1,6 3,2	-16 2,5 6,4	-15 1,4 5,3	-8 0,9 4,4	4 1,4 3,8	16 4,9 4,0	22 9,4 5,6	25 12,7 7,5	22 14,4 9,3	13 13,8 10,2	3 11,3 10,3	-6 7,7 9,3	-14 4,4 7,8
24	Байрам-Али (Туркменская ССР)	0,0 1,6 3,2	2 12,5 17,0	5 11,5 15,6	11 12,3 15,0	20 14,4 15,1	29 18,1 16,2	35 21,9 18,1	37 24,2 19,7	33 25,3 21,2	26 24,7 21,9	16 22,4 21,7	8 19,1 20,6	3 15,4 18,9
25	Тула	0,0 1,6 3,2	-10 3,3 5,7	-10 2,5 4,6	-5 2,1 3,8	4 2,4 3,4	14 5,6 4,3	18 9,3 6,4	21 11,7 8,5	18 13,2 10,3	11 12,4 11,0	4 10,1 10,4	-2 7,3 9,0	-7 4,8 7,2
26	Вазулки (Белго- родская обл.)	0,0 1,6 3,2	-8 5,1 8,6	-8 3,9 7,5	-2 3,1 6,5	9 3,7 5,9	19 7,1 6,3	24 10,4 7,6	26 13,1 9,3	23 14,7 10,8	15 14,6 11,8	7 12,7 12,0	0 10,0 11,3	-5 7,2 10,0
27	Бузулук (Орен- бургская обл.)	0,0 1,6 3,2	-15 2,6 6,1	-15 1,3 4,5	-8 0,8 3,5	5 2,1 3,8	18 5,3 4,1	25 9,3 5,9	27 12,3 8,0	23 13,7 9,5	13 13,2 10,7	4 10,8 10,5	-4 7,6 9,2	-11 4,8 7,6
28	Краснодар	0,0 1,6 3,2	-2 8,3 12,4	-1 6,9 11,2	5 6,4 10,2	13 7,9 9,7	21 11,3 10,2	26 14,8 11,5	29 17,8 13,1	27 19,7 14,6	20 19,6 15,7	12 17,2 15,9	5 14,0 15,2	0 10,6 13,9
29	Усть-Каменогорск (Казахская ССР)	0,0 1,6 3,2	-18 3,6 6,8	-17 2,7 5,8	-10 2,2 5,0	4 2,0 4,3	16 4,4 4,4	23 8,3 5,7	25 11,4 7,4	22 13,2 9,0	14 13,3 10,0	4 11,2 10,2	-8 8,1 9,4	-16 5,5 8,1
30	Телжен (Туркмен- ская ССР)	0,0 1,6 3,2	2 14,8 19,4	6 13,8 18,1	12 14,3 17,4	20 15,8 17,1	29 18,7 17,6	35 22,0 18,9	36 24,5 20,3	33 25,8 21,6	26 25,7 22,6	18 23,9 22,8	10 21,0 22,2	4 17,4 21,0

Таблица 17

№ п/п	Температура, °С		f ₁ %	f ₂ %	№ п/п	Температура, °С		f ₁ %	f ₂ %
	снега	воздуха				снега	воздуха		
1	-3	-2	80	97	16	-40	-40	50	65
2	-3	-3	80	97	17	-40	-35	50	65
3	-5	-5	95	98	18	-43	-42	80	97
4	-10	-10	80	95	19	-43	-43	80	97
5	-12	-10	80	92	20	-45	-42	40	75
6	-15	-15	70	88	21	-45	-45	35	70
7	-15	-12	70	88	22	-48	-44	35	70
8	-20	-20	70	85	23	-48	-48	40	75
9	-20	-15	70	85	24	-48	-50	40	75
10	-25	-25	70	82	25	-50	-50	40	75
11	-25	-20	70	82	26	-52	-50	35	50
12	-30	-30	60	70	27	-52	-52	35	50
13	-30	-25	60	70	28	-55	-50	30	40
14	-35	-35	60	75	29	-55	-55	35	40
15	-35	-30	60	75	30	-60	-52	30	40

Таблица 18

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
n %	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	
№ п/п	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
n %	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
№ п/п	22	23	24	25	26	27	28	29	30		
n %	52	54	56	58	60	62	64	66	68		

Таблица 19

№ п/п	Дата	Срок на- блюдений, ч	u _{0,5} м/с	u _{2,0} м/с	t _{0,5} °С	t _{2,0} °С	e _{0,5} гПа	e _{2,0} гПа
1	3.06	1	1,8	2,6	5,7	6,0	9,7	10,3
		7	2,2	3,1	10,6	10,4	13,8	13,5
		10	2,4	3,3	14,1	13,8	15,5	15,0
		13	1,7	3,9	17,1	16,6	14,0	13,2
		16	5,0	5,8	17,6	17,6	12,9	11,8
		19	5,1	6,7	14,9	14,8	15,5	15,0
		1*	1,9	3,1	7,7	7,8	13,8	14,0
2	5.06	1	1,5	1,9	10,3	10,4	13,8	14,0
		7	1,4	1,7	9,6	9,5	14,8	14,3
		10	1,8	2,3	14,3	13,7	15,6	15,2
		13	2,6	3,3	15,2	14,8	16,1	15,6
		16	3,0	4,3	13,5	13,6	14,0	13,5
		19	2,3	3,3	11,0	11,2	15,3	14,8
		1*	2,6	3,5	10,2	10,4	14,9	15,3

№ п/п	Дата	Срок наблюдений, ч	$u_{0,5}$ м/с	$u_{2,0}$ м/с	$t_{0,5}$ °C	$t_{2,0}$ °C	$e_{0,5}$ гПа	$e_{2,0}$ гПа
3	7.06	1	0,9	1,6	9,4	9,5	14,9	15,3
		7	3,5	4,7	10,7	10,5	17,3	16,9
		10	4,5	5,8	13,4	13,0	17,8	17,4
		13	4,1	5,5	16,1	14,8	17,5	17,2
		16	1,7	2,4	12,7	12,0	16,6	16,4
		19	3,4	4,4	11,9	11,9	17,0	16,8
		1 *	2,0	2,8	8,0	8,1	16,4	16,9
4	9.06	1	1,0	1,6	11,0	11,2	16,4	16,9
		7	1,2	1,6	13,4	13,3	18,4	17,9
		10	2,1	3,0	16,6	16,4	18,9	18,2
		13	1,2	1,8	19,9	19,1	17,6	17,2
		16	1,9	2,6	16,6	16,6	17,4	17,0
		19	1,2	1,7	17,1	17,2	18,5	18,2
		1 *	0,8	1,4	9,8	10,0	18,1	18,6
5	17.06	1	0,0	1,8	17,2	17,7	18,1	18,6
		7	1,7	3,2	20,1	20,1	17,1	16,9
		10	2,6	3,7	24,6	24,3	18,0	17,8
		13	2,6	3,7	27,6	27,2	15,2	14,5
		16	2,2	3,6	27,8	27,7	14,3	13,6
		19	0,4	1,4	24,6	24,8	13,5	13,3
		1 *	1,0	1,9	17,3	17,7	10,6	11,1
6	18.07	1	1,0	1,9	17,3	17,7	10,6	11,1
		7	1,5	2,1	20,5	20,4	12,3	12,0
		10	1,8	2,9	25,5	25,4	14,4	14,0
		13	2,4	4,5	26,1	26,0	13,5	13,1
		16	0,6	1,9	27,0	27,0	13,3	13,0
		19	1,8	3,3	22,1	22,5	14,0	14,1
		1 *	1,2	2,2	18,2	18,3	11,8	11,9
7	22.07	1	0,0	1,0	16,0	16,6	11,8	11,9
		7	1,7	2,8	21,5	21,4	15,3	14,7
		10	0,9	2,8	23,2	23,0	15,8	15,2
		13	2,3	4,8	28,3	27,3	15,4	15,0
		16	1,2	3,3	27,4	27,4	14,8	14,2
		19	0,0	1,6	19,2	19,3	14,6	14,3
		1 *	0,0	1,1	17,2	17,4	11,5	11,9
8	1.08	1	0,4	1,4	15,1	15,6	11,5	11,9
		7	1,5	2,2	16,8	16,9	16,1	15,6
		10	0,9	1,5	19,2	19,1	16,9	16,2
		13	1,5	3,1	23,5	23,4	16,7	16,0
		16	0,8	1,7	21,4	21,4	16,5	15,8
		19	1,2	1,9	18,1	18,3	15,4	15,0
		1 *	0,6	1,2	15,7	15,9	12,3	12,7

№ п/п	Дата	Срок наблюдения, ч	$u_{0,5}$ м/с	$u_{2,0}$ м/с	$t_{0,5}$ °C	$t_{2,0}$ °C	$e_{0,5}$ гПа	$e_{2,0}$ гПа
9	2.08	1	0,6	1,2	15,7	15,9	12,3	12,7
		7	0,8	1,2	16,1	15,9	14,9	14,2
		10	0,5	1,6	20,5	20,3	16,3	15,8
		13	1,2	2,2	17,0	16,0	16,0	15,3
		16	2,1	2,9	19,6	19,5	15,4	14,7
		19	0,0	0,5	18,1	18,0	15,0	14,6
		1*	0,3	1,1	14,5	14,8	13,0	13,3
10	6.08	1	1,4	2,3	13,5	13,6	11,8	12,4
		7	1,7	2,5	15,7	15,7	14,8	14,6
		10	1,9	2,6	19,0	18,8	15,3	14,8
		13	2,3	3,3	19,8	19,6	15,0	14,5
		16	1,9	2,7	17,0	16,8	14,5	13,7
		19	0,9	1,7	16,0	16,0	13,8	13,4
		1*	1,0	1,9	11,5	11,9	11,6	11,2
11	9.08	1	1,0	2,0	7,1	7,5	12,0	12,2
		7	1,0	1,6	11,0	10,8	12,6	12,3
		10	1,9	3,6	12,7	12,7	13,8	13,4
		13	1,5	2,0	15,8	15,0	11,7	11,4
		16	0,3	0,6	13,3	12,8	11,5	10,8
		19	0,1	0,6	12,6	12,3	12,9	12,6
		1*	0,1	1,2	6,5	7,2	11,6	11,8
12	9.05	1	0,3	1,2	-0,3	0,0	11,6	11,8
		7	0,6	1,0	3,9	3,6	12,2	11,9
		10	1,0	1,3	8,9	8,5	13,6	13,2
		13	1,9	2,8	10,9	9,9	12,8	12,4
		16	0,4	0,8	10,2	9,8	12,6	12,0
		19	1,5	2,2	7,3	7,1	13,0	12,7
		1*	1,5	2,2	3,8	3,7	12,7	12,9
13	10.07	1	0,1	0,7	12,0	12,2	13,6	13,9
		7	0,4	1,4	14,0	13,8	15,3	15,0
		10	1,2	2,3	16,0	15,7	16,1	15,4
		13	1,3	2,3	20,3	19,5	15,3	14,8
		16	1,1	2,2	17,7	17,4	15,5	14,7
		19	0,2	0,8	18,2	17,5	14,2	14,0
14	11.07	1	0,0	0,0	12,3	12,4	14,0	14,3
		7	0,6	1,2	14,2	13,8	15,6	15,4
		10	2,1	2,8	18,5	17,8	15,4	14,5
		13	1,5	2,2	22,4	21,3	17,4	17,1
		16	1,3	2,1	21,2	20,8	14,1	13,6
		19	0,3	1,0	18,9	18,1	13,0	12,4
15	12.07	1	0,0	0,0	10,2	10,5	12,3	12,7
		10	0,7	1,3	21,2	20,4	13,4	12,8
		13	1,0	1,4	21,8	21,0	13,7	13,4
		16	0,9	1,2	22,3	21,5	13,5	13,1
		19	0,2	0,8	18,6	18,0	17,8	17,4
		1*	0,1	0,5	14,2	14,3	16,2	16,4

* Следующие сутки.

19*

Таблица 20

№ п/п	Дата	Срок, ч	B кВт/м ²	P кВт/м ²	$t_{0,5}$ °C	$t_{2,0}$ °C	$t_{0,5}$ гПа	$t_{2,0}$ гПа	$u_{0,5}$ м/с	$u_{2,0}$ м/с
1	26.06	07	0,30	0,06	16,9	16,7	14,3	13,5	1,9	3,9
2		13	0,48	0,12	22,1	21,7	14,2	13,2	1,1	2,0
3		15	0,54	0,08	21,1	20,7	12,4	11,6	1,6	1,9
4	27.06	13	0,28	0,06	19,0	18,6	15,6	14,4	1,3	2,1
5		15	0,30	0,04	18,5	18,0	14,0	13,8	1,4	1,8
6		17	0,21	0,04	17,2	16,6	13,2	12,9	1,7	2,4
7	28.06	07	0,34	0,03	15,0	14,2	15,1	14,4	2,0	3,0
8		09	0,46	0,07	16,8	16,2	16,3	15,7	1,1	1,6
9		11	0,50	0,10	18,2	17,8	13,0	11,8	1,7	2,3
10		13	0,52	0,08	21,3	20,2	18,8	18,4	0,9	1,7
11	29.06	09	0,45	0,09	20,1	19,5	10,4	9,9	1,8	2,1
12	30.06	09	0,42	0,06	19,0	18,0	17,0	16,5	1,6	2,8
13		11	0,31	0,07	20,6	20,1	13,3	17,6	1,7	2,2
14		13	0,41	0,09	23,0	22,5	16,2	15,9	1,9	3,6
15	1.07	15	0,44	0,04	16,3	15,5	10,4	10,0	1,0	1,7
16		17	0,27	0,04	15,5	15,1	9,6	8,8	0,7	1,4
17	3.07	13	0,30	0,03	21,2	20,7	9,9	9,7	1,3	1,6
18		15	0,52	0,08	21,2	20,6	9,9	9,4	1,8	2,2
19	4.07	09	0,49	0,06	15,2	14,6	11,6	11,0	1,7	2,1
20		13	0,31	0,01	18,2	17,8	10,3	9,4	0,9	1,2
21	5.07	11	0,40	0,04	20,6	19,8	10,1	9,6	1,4	1,9
22		13	0,38	0,06	19,7	19,1	11,3	10,5	1,5	1,5
23	6.07	09	0,45	0,08	19,2	18,8	11,2	10,2	1,5	2,1
24		11	0,53	0,11	21,0	19,8	10,1	9,5	1,4	2,5
25	9.07	09	0,17	0,03	15,8	15,5	14,8	14,3	1,7	2,4
26		11	0,26	0,04	17,3	17,0	12,8	12,4	1,0	2,7
27		13	0,34	0,08	17,7	17,4	13,0	12,5	1,8	4,1
28	10.07	09	0,36	0,05	15,3	14,8	13,7	12,7	0,9	4,5
29		13	0,34	0,08	18,6	18,0	13,4	12,6	1,3	2,1
30	11.07	13	0,48	0,09	18,9	18,2	17,1	16,1	1,6	2,5

Таблица 21

№ п/п	$r_{\text{я}} \cdot 10^{-7}$ см	$r_{\text{к}} \cdot 10^{-6}$ см	№ п/п	$r_{\text{я}} \cdot 10^{-7}$ см	$r_{\text{к}} \cdot 10^{-6}$ см
1	4,2	0,871	16	8,4	1,820
2	4,4	0,912	17	8,6	1,905
3	4,6	0,955	18	9,2	1,995
4	4,8	1,00	19	9,6	2,089
5	5,1	1,047	20	10,0	2,188
6	5,3	1,096	21	10,5	2,291
7	5,5	1,148	22	11,0	2,399
8	5,8	1,202	23	11,5	2,512
9	6,1	1,259	24	12,0	2,630
10	6,3	1,318	25	12,6	2,754
11	6,6	1,380	26	13,2	2,884
12	6,9	1,445	27	13,8	3,020
13	7,3	1,585	28	14,5	3,150
14	7,6	1,660	29	15,0	3,280
15	8,0	1,738	30	16,0	3,400

Примечание. $r_{\text{я}}$ — радиус ядра конденсации, $r_{\text{к}}$ — радиус капли насыщенного раствора.

Таблица 22

№ п/п	$r_a \cdot 10^{-7}$ см	$r_k \cdot 10^{-6}$ см	№ п/п	$r_a \cdot 10^{-7}$ см	$r_k \cdot 10^{-6}$ см	№ п/п	$r_a \cdot 10^{-7}$ см	$r_k \cdot 10^{-6}$ см
1	4,2	0,675	11	6,6	1,21	21	10,5	2,23
2	4,4	0,725	12	6,9	1,28	22	11,0	2,35
3	4,6	0,771	13	7,3	1,38	23	11,5	2,48
4	4,8	0,793	14	7,6	1,45	24	12,0	2,63
5	5,1	0,868	15	8,0	1,55	25	12,6	2,81
6	5,3	0,910	16	8,4	1,65	26	13,2	2,98
7	5,5	0,955	17	8,6	1,70	27	13,8	3,16
8	5,8	1,02	18	9,2	1,86	28	14,5	3,38
9	6,1	1,09	19	9,6	1,97	29	15,0	3,53
10	6,3	1,14	20	10,0	2,07	30	16,0	3,86

Примечание. r_a — радиус ядра конденсации, r_k — радиус капли ненасыщенного раствора.

Таблица 23

№ п/п	t_B °C	f_B %	t_Y °C	№ п/п	t_B °C	f_B %	t_Y °C	№ п/п	t_B °C	f_B %	t_Y °C
1	19,5	80	14,0	11	4,5	70	-2,0	21	-10,5	85	-13,6
2	18,0	70	11,0	12	3,0	80	-2,0	22	-12,0	80	-15,5
3	16,5	80	12,5	13	1,5	90	-2,8	23	-13,5	90	-15,5
4	15,0	90	12,7	14	0,0	80	-3,8	24	-15,0	93	-17,0
5	13,5	70	7,0	15	-1,5	90	-4,5	25	-16,5	90	-18,3
6	12,0	80	10,0	16	-3,0	70	-8,5	26	-18,0	95	-20,0
7	10,5	90	7,7	17	-4,5	80	-9,0	27	-19,5	80	-24,0
8	9,0	70	3,0	18	-6,0	70	-11,5	28	-21,0	85	-24,5
9	7,5	80	3,0	19	-7,5	80	-13,5	29	-22,5	75	-26,5
10	6,0	90	2,5	20	-9,0	90	-11,0	30	-24,0	90	-26,5

Примечание. t_B и t_Y — температура воздуха вечером и утром соответственно, f_B — относительная влажность вечером.

Таблица 24

№ п/п	Δf %	ω см/с	№ п/п	Δf %	ω см/с	№ п/п	Δf %	ω см/с
1	0,01	0,5	11	0,13	1,5	21	0,30	0,5
2	0,02	0,5	12	0,14	1,5	22	0,32	1,0
3	0,03	0,5	13	0,15	1,5	23	0,34	1,0
4	0,04	0,5	14	0,16	2,0	24	0,36	1,0
5	0,05	0,5	15	0,18	2,0	25	0,38	1,0
6	0,06	0,5	16	0,20	0,5	26	0,40	1,5
7	0,07	1,0	17	0,22	0,5	27	0,42	1,5
8	0,08	1,0	18	0,24	0,5	28	0,44	2,0
9	0,09	1,0	19	0,26	0,5	29	0,46	2,0
10	0,10	1,0	20	0,28	0,5	30	0,48	2,5

Таблица 25

№ п/п	Размер капель, мкм	f %	№ п/п	Размер капель, мкм	f %	№ п/п	Размер капель, мкм	f %
1	50	94	11	400	78	21	200	59
2	100	94	12	500	78	22	300	59
3	200	94	13	50	64	23	400	59
4	300	94	14	100	64	24	500	59
5	400	94	15	200	64	25	50	52
6	500	94	16	300	64	26	100	52
7	50	78	17	400	64	27	200	52
8	100	78	18	500	64	28	300	52
9	200	78	19	50	59	29	400	52
10	300	78	20	100	59	30	500	52

Примечание. Средняя температура в подоблачном слое 6,0 °С, давление 1000 гПа.

Таблица 26

№ п/п	t °С	f %	№ п/п	t °С	f %	№ п/п	t °С	f %
1	12,0	92	11	12,0	57	21	0,0	92
2	12,0	90	12	12,0	53	22	0,0	90
3	12,0	86	13	6,0	88	23	0,0	86
4	12,0	82	14	6,0	84	24	0,0	82
5	12,0	78	15	6,0	80	25	0,0	78
6	12,0	74	16	6,0	76	26	0,0	74
7	12,0	70	17	6,0	72	27	0,0	70
8	12,0	66	18	6,0	68	28	0,0	63
9	12,0	63	19	6,0	61	29	0,0	59
10	12,0	59	20	6,0	55	30	0,0	53

Примечание. p=900 гПа.

Таблица 27

№ п/п	λ мкм	(n-1)·10 ⁻⁶	№ п/п	λ мкм	(n-1)·10 ⁻⁶	№ п/п	λ мкм	(n-1)·10 ⁻⁶
1	0,20	324,08	11	0,44	280,91	21	0,64	276,43
2	0,265	297,78	12	0,46	280,17	22	0,66	276,20
3	0,28	294,75	13	0,48	279,53	23	0,68	275,98
4	0,30	291,56	14	0,50	278,96	24	0,70	275,79
5	0,32	289,03	15	0,52	278,47	25	0,74	275,45
6	0,34	286,99	16	0,54	278,03	26	0,78	275,16
7	0,36	285,32	17	0,56	277,64	27	0,80	275,03
8	0,38	283,93	18	0,58	277,29	28	1,00	274,15
9	0,40	282,76	19	0,60	276,97	29	2,00	272,98
10	0,42	281,76	20	0,62	276,69	30	4,00	272,70

Примечание. p=1013 гПа, t=15 °С.

Таблица 28

№ п/п	Цвет дуги радуги	Номер радуги	n	№ п/п	Цвет дуги радуги	Номер радуги	n
1	Красный	Первая	1,330	16	Красный	четвертая	1,330
2	Оранжевый	"	1,333	17	Оранжевый	"	1,333
3	Зеленый	"	1,335	18	Зеленый	"	1,335
4	Синий	"	1,340	19	Синий	"	1,340
5	Фиолетовый	"	1,343	20	Фиолетовый	"	1,343
6	Красный	вторая	1,330	21	Красный	пятая	1,330
7	Оранжевый	"	1,333	22	Оранжевый	"	1,333
8	Зеленый	"	1,335	23	Зеленый	"	1,335
9	Синий	"	1,340	24	Синий	"	1,340
10	Фиолетовый	"	1,343	25	Фиолетовый	"	1,343
11	Красный	третья	1,330	26	Красный	шестая	1,330
12	Оранжевый	"	1,333	27	Оранжевый	"	1,333
13	Зеленый	"	1,335	28	Синий	"	1,335
14	Синий	"	1,340	29	Фиолетовый	"	1,340
15	Фиолетовый	"	1,343	30	Фиолетовый	"	1,343

Таблица 29

№ п/п	λ°	Цвет лучей	n	λ°	№ п/п	λ°	Цвет лучей	n	λ°
1	0	Красные	1,307	60	16	0	Красные	1,307	90
2	0	Желтые	1,310	60	17	0	Желтые	1,310	90
3	0	Фиолетовые	1,317	60	18	0	Фиолетовые	1,317	90
4	10	Красные	1,307	60	19	10	Красные	1,307	90
5	10	Желтые	1,310	60	20	10	Желтые	1,310	90
6	10	Фиолетовые	1,317	60	21	10	Фиолетовые	1,317	90
7	20	Красные	1,307	60	22	20	Красные	1,307	90
8	20	Желтые	1,310	60	23	20	Желтые	1,310	90
9	20	Фиолетовые	1,317	60	24	20	Фиолетовые	1,317	90
10	30	Красные	1,307	60	25	30	Красные	1,307	90
11	30	Желтые	1,310	60	26	30	Желтые	1,310	90
12	30	Фиолетовые	1,317	60	27	30	Фиолетовые	1,317	90
13	40	Красные	1,307	60	28	40	Красные	1,307	90
14	40	Желтые	1,310	60	29	40	Желтые	1,310	90
15	40	Фиолетовые	1,317	60	30	40	Фиолетовые	1,317	90

Таблица 30

№ п/п	/ Гц	Время суток	Δt с	№ п/п	/ Гц	Время суток	Δt с
1	$1,02 \cdot 10^8$	День	$4,00 \cdot 10^{-4}$	7	$6,29 \cdot 10^8$	День	$5,20 \cdot 10^{-4}$
2	$1,93 \cdot 10^8$	"	$5,60 \cdot 10^{-4}$	8	$6,36 \cdot 10^8$	Ночь	$6,00 \cdot 10^{-4}$
3	$2,46 \cdot 10^8$	"	$4,40 \cdot 10^{-4}$	9	$7,07 \cdot 10^8$	"	$8,60 \cdot 10^{-4}$
4	$2,68 \cdot 10^8$	"	$5,40 \cdot 10^{-4}$	10	$7,78 \cdot 10^8$	"	$6,80 \cdot 10^{-4}$
5	$3,81 \cdot 10^8$	"	$4,60 \cdot 10^{-4}$	11	$8,39 \cdot 10^8$	"	$8,00 \cdot 10^{-4}$
6	$5,14 \cdot 10^8$	"	$4,80 \cdot 10^{-4}$	12	$8,94 \cdot 10^8$	"	$7,40 \cdot 10^{-4}$

№ п/п	f Гц	Время суток	Δt с	№ п/п	f Гц	Время суток	Δt с
13	$2,98 \cdot 10^6$	День	$6,20 \cdot 10^{-4}$	22	$4,30 \cdot 10^6$	Ночь	$1,64 \cdot 10^{-3}$
14	$4,31 \cdot 10^6$	"	$9,80 \cdot 10^{-4}$	23	$4,82 \cdot 10^6$	"	$1,80 \cdot 10^{-3}$
15	$5,01 \cdot 10^6$	"	$6,40 \cdot 10^{-4}$	24	$6,48 \cdot 10^6$	День	$1,68 \cdot 10^{-3}$
16	$5,68 \cdot 10^6$	"	$8,20 \cdot 10^{-4}$	25	$7,13 \cdot 10^6$	"	$1,94 \cdot 10^{-3}$
17	$5,96 \cdot 10^6$	"	$7,60 \cdot 10^{-4}$	26	$8,48 \cdot 10^6$	"	$2,80 \cdot 10^{-3}$
18	$4,02 \cdot 10^6$	"	$1,14 \cdot 10^{-3}$	27	$1,06 \cdot 10^7$	"	$2,56 \cdot 10^{-3}$
19	$5,54 \cdot 10^6$	"	$1,20 \cdot 10^{-3}$	28	$1,45 \cdot 10^7$	"	$2,10 \cdot 10^{-3}$
20	$6,80 \cdot 10^6$	"	$1,26 \cdot 10^{-3}$	29	$1,77 \cdot 10^7$	"	$2,34 \cdot 10^{-3}$
21	$2,98 \cdot 10^6$	Ночь	$1,46 \cdot 10^{-3}$	30	$2,03 \cdot 10^7$	"	$2,16 \cdot 10^{-3}$

ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ

Глава 1

- 1.1. 1.1. $t^{\circ}\text{C} = (t + 273,15) \text{ K}$; $m^{\circ}\text{R} = \left(\frac{5}{4} m\right)^{\circ}\text{C} = \left(\frac{5}{4} m + 273,15\right) \text{ K}$; $n^{\circ}\text{F} = \left[\frac{5}{9} (n - 32)\right]^{\circ}\text{C} = \left(\frac{5}{9} n + 255,37\right) \text{ K}$; $p^{\circ}\text{Re} = \left[\frac{5}{9} (p - 491,67)\right]^{\circ}\text{C} = \left(\frac{5}{9} p\right) \text{ K}$. 1.2. 233,2 K; $-40,0^{\circ}\text{C}$. 1.3. 255,4; 263,2; 298,2; 323,2 K; $-17,8$; $-10,0$; 25,0; $50,0^{\circ}\text{C}$. 1.4. 214,2 K; $-58,9^{\circ}\text{C}$. 1.5. 331,0; 334,2; 184,8 K.
- 1.2. 1.6. 1 мм рт. ст. = 1,333 224 гПа. 1.7. 1013,3 (точно 1013,25) гПа; 1013,3 кН; 10 333 кг. 1.8. 750,1 мм рт. ст.; 10^5 H ; 10 197 кг. 1.9. 1083,8; 854,7 гПа; 7, 16 %. 1.10. 966,1 гПа. 1.11. 975,3 гПа; 731,5 мм рт. ст. 1.12. 730,3 мм рт.ст.; 973,7 гПа. 1.13. 747,4 мм рт. ст.; 996,5 гПа.
- 1.3. 1.14. 0,00 и 2,86; 0,00 и 6,11; 0,00 и 12,3 гПа. 1.15. 0,05; 0,46; 2,5 гПа. 1.16. 6,9 гПа. 1.17. 2,94 гПа. 1.18. 9,7; 14,4 гПа. 1.19. 0, 25, 50, 75, 100 %. 1.20. а) 0; б) 100 %. 1.21. 35 %. 1.22. 3,19; 2,36; 0,83 гПа. 1.23. $8,6^{\circ}\text{C}$. 1.24. Да. 1.25. 11,7; 34,4; 22,7 гПа; 34 %. 1.26. $3,7 \text{ г/м}^3$. 1.27. 5,0 гПа. 1.28. $-54,6^{\circ}\text{C}$. 1.29. 892 г. 1.30. В первом, в 7 раз. 1.31. 17,4; $1,8 \text{ г/м}^3$; в 9,7 раза. 1.32. 19,2; 29,3; 10,1 гПа; 66 %; $16,9^{\circ}\text{C}$. 1.33. $6,2^{\circ}/_{\infty}$; 1.34. $3,9^{\circ}/_{\infty}$. 1.35. 0,0; $8,6^{\circ}/_{\infty}$. 1.36. 0,32; 3,59; 3,27 гПа; 9 %; $-34,2^{\circ}\text{C}$; $0,26 \text{ г/м}^3$. 1.37. $8,7^{\circ}/_{\infty}$. 1.38. 99 %. 1.39. 16,1; 17,0; 0,9 гПа; 94 %; $12,2 \text{ г/м}^3$; $9,9^{\circ}/_{\infty}$. 1.40. 26,1; 9,7; 16,4 гПа; $6,5^{\circ}\text{C}$; $7,2 \text{ г/м}^3$; 5,9; $6,0^{\circ}/_{\infty}$. 1.41. 12,8 гПа; $10,6^{\circ}\text{C}$; 49 %; 13,3 гПа; $9,5 \text{ г/м}^3$; 8,2; $8,3^{\circ}/_{\infty}$. 1.42. 3,45 гПа; $-7,6^{\circ}\text{C}$; 72 %; 1,34 гПа; $2,8 \text{ г/м}^3$; 2,2; $2,2^{\circ}/_{\infty}$. 1.43. $-3,8 \text{ л}$. 1.44. 1,66 гПа; $-16,7^{\circ}\text{C}$; $0,55 \text{ гПа}$.

Глава 2

- 2.1. 2.1. 287,01 Дж/(кг · K); 0,014 %; $28,965 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$. 2.2. $1,292 \text{ кг/м}^3$; в 800 раз. 2.3. 820 см³; 11,6 см; 1,22 г. 2.4. 182,5; 137,8; 42,2; 2,4; 0,1 кг. 2.5. 10^{-4} г/м^3 ; $3,42^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}$.
- 2.2. 2.6. 8,1; $1,1^{\circ}\text{C}$. 2.7. 104. 2.8. $1,289 \text{ кг/м}^3$; 0,2 %. 2.9. 18,6; $18,5^{\circ}\text{C}$; 1,1941; 1,1946 кг/м³; 0,04 %. 2.10. 14,6 г; $-0,352 \text{ Н}$.
- 2.3. 2.11. 12,5 гПа/100 м. 2.12. $G_0/G_z = 2$. 2.13. 426,0; 313,2 гПа. 2.14. 605,6; 646,4 гПа. 2.15. 6,8; 8,0; 9,2 м/гПа. 2.16. 12,5 м/гПа. 2.17. $h_z/h_0 = 1,8$. 2.18. 800,2 гПа. 2.19. Увеличится на 58,5 м. 2.20. $h_{zn}/h_c = 1,02$. 2.21. 12,5 гПа/100 м; 8,0 м/гПа.
- 2.4. 2.22. $3,42^{\circ}\text{C}/100 \text{ м}$. 2.23. 506,9; 0,0 гПа; 7995 м. 2.24. 12,7 гПа/100 м; 7,9 м/гПа. 2.25. 7410, 7995, 8580 м.
- 2.5. 2.26. 614,7; 372,8 гПа. 2.27. ∞ . 2.28. 517,0; 266,2; 552,8; 305,6 гПа; 7,3; 6,9 гПа/100 м. 2.29. 1014,5; 1013,3 гПа.
- 2.6. 2.30. 599,2; 334,1 гПа. 2.31. Около 44,3 км. 2.32. 7987 м. 2.33. $p_0 = p_z \left(1 + \frac{0,0065z}{T_{sz}}\right)^x$, где $x = 0,536 [9,806 16 (1 - 2,6373 \cdot 10^{-3} \cos 2\varphi + 5,9 \cdot 10^{-6} \cos^2 2\varphi) - 3,086 \cdot 10^{-6} z + 1,118 \cdot 10^{-6} (z - z')]$. 2.34. 114,8 гПа.
- 2.7. 2.35. $(5788,6 \pm 5,8) \text{ м}$. 2.36. 5,5; [11,1; 16,6; 18,4 км; 36,8 км; 50; 75; 87,5; 90; 99 %]. 2.37. 245,0 гПа; 76 %. 2.38. $(688,2 \pm 6,9) \text{ гПа}$. 2.39. а) $20,2^{\circ}\text{C}$; 11,1 гПа/100 м; 9,0 м/гПа; $1,132 \text{ кг/м}^3$; б) 62,6 гПа; в) 1013,7; 1016,1; 1015,7 гПа; г) 609,1 гПа; 7,7 гПа/100 м; 13,0 м/гПа; $0,783 \text{ кг/м}^3$; д) 376,8 гПа; 5,1 гПа/100 м; 19,6 м/гПа; $0,520 \text{ кг/м}^3$.

Глава 3

- 3.1. 3.1. 0,24 м²/с. 3.2. 0,16 м²/с. 3.3. 0,10 м²/с. 3.5. 0,28; 0,17; 0,26 м²/с;
39; 7 %. 3.6. 1,6; 1,8 см. 3.7. 0,27 м²/с. 3.8. 2,00; 20,00 м²/с.
3.2. 3.9. 0,09; 0,03 м²/с; динамический. 3.10. 0,02; 0,43 м²/с; термический.
3.11. а) 0,10; 0,07; 0,17 м²/с; б) 0,10; 0,00; 0,10 м²/с; в) 0,10; -0,07;
0,03 м²/с. 3.12. $\Delta = 0,06; 0,07; 0,08; 0,13; 0,10; 0,14; 0,06$ м²/с; $T = -0,02;$
0,00; 0,04; 0,01; 0,00; -0,01; -0,05 м²/с.

Глава 4

- 4.1. 4.1. а) уменьшится на 33 %; б) увеличится на 22 %. 4.2. -63,0 °С. 4.3.
1,6 °С. 4.4. -10,0 °С. 4.5. 16,6 °С. 4.6. 7,2 °С. 4.7. 40,2 °С. 4.8. 747,2 гПа.
4.9. 6,8; 21,8; 35,0 °С. 4.10. 14,7; 5,3; -4,9 °С. 4.11. 14,3 °С; 2430 м.
4.12. 1270 м. 4.13. 22,4 °С. 4.14. 7,7 °С. 4.15. 70,0 °С. 4.16. 22,3 °С. 4.17.
Второй. На 15,0 °С. 4.18. На всех уровнях 21,0 °С. 4.19. 25,2 °С. 4.20.
Возрастает; возрастает; не изменяется; уменьшается. 4.21. 0,5 °С/100 м;
 $\gamma < \gamma_a$. 4.22. На высоте.
4.2. 4.23. 0,20 м/с². 4.24. 0,18 м/с². 4.25. -0,17 м/с². 4.26. 0,26 м/с²; 500,
750, 1500, ∞ , -1500 м. 4.27. -0,20 м/с²; 1000 м. 4.28. 633, 967 м. 4.29.
а) 682,0 гПа; 2980 м; б) 594,0 гПа; 4070 м; в) 890,0 гПа; 0,13 м/с²;
г) 0,13 м/с². 4.30. 49,0 Дж.
4.3. 4.31. 893,0 гПа; 15,0 °С; 800 м. 4.32. 750,0 гПа; -3,0 °С; 2300 м.
4.4. 4.33. а) уменьшится на 16,0 и на 8,0 °С; б) увеличится на 5,4 и на
2,6 °С. 4.34. 5,7; 2,9; -0,1 °С; 10,9; 13,0; 15,0 °С. 4.35. 13,4; 8,6 °С. 4.36.
17,8; 21,5; 25,4 °С; 14,0; 10,1; 8,0 °С. 4.37. 0,49 °С/100 м. 4.38. 3,9;
6,8 °С; 0,44; 0,89 °С/100 м. 4.39. 942,0 гПа; 3,2; -2,7; -9,6; -18,2 °С;
0,65; 0,67; 0,76 °С/100 м. 4.40. 15,2 °С; 0,70 °С/100 м; 2620 м.
4.5. 4.41. 12,0; 6,0 ‰; 6,6; 10,5 °С.
4.42.

p гПа . . .	1000,0	900,0	800,0	700,0	600,0
f ‰ . . .	41	68	50	33	51
t_d °С . . .	6,4	9,2	0,8	-7,8	-6,0
$t - t_d$ °С .	13,6	5,7	9,7	14,9	9,1

- 4.43. 5,5 ‰; 51 ‰; 10,0 °С. 4.44. 12,0 ‰; 55 %. 4.45. 9,0 ‰; 36 %. 4.46.
25,5; 20,7; 20,0; 19,0; 16,0 ‰.
4.47.

	Уровень				
	начальный	900,0 гПа	конденсации	800,0 гПа	700,0 гПа
t °С	30,2	22,6	16,5	14,6	9,4
S_n ‰	28,0	19,2	14,0	13,0	10,5
S_ϕ ‰	14,0	14,0	14,0	13,0	10,5
f ‰	50	73	100	100	100
t_d °С	19,1	17,6	16,5	14,6	9,4
$t - t_d$ °С	11,1	5,0	0,0	0,0	0,0

- 4.6. 4.48. 28,5 °С. 4.49. 31,8; 38,4 °С; второй на 6,6 °С. 4.50. 37,3 °С.

4.51.

	Уровень				
	начальный	конденсации	900,0 гПа	800,0 гПа	700,0 гПа
t_a °C	15,8	7,2	5,7	-3,6	-13,7
$t_{\text{вп}}$ °C	14,1	14,1	14,1	14,1	14,1
$t_{\text{ис}}$ °C	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3

4.52.

	Уровень, ГПа				
	1050,0	950,0	850,0	750,0	650,0
t_a °C	33,3	26,7	13,8	8,8	2,3
$t_{\text{вп}}$ °C	29,0	31,0	27,5	33,0	38,4
$t_{\text{ис}}$ °C	32,4	33,2	29,2	33,8	39,4

4.7. 4.53. Сухоустойчив. 4.54. Абсолютно неустойчив. 4.55. Абсолютно неустойчив; сухобезразличен и влажнеустойчив; сухоустойчив и влажнеустойчив; абсолютно устойчив; абсолютно устойчив. 4.56. Абсолютно неустойчива; сухобезразлична и влажнеустойчива; сухоустойчива; абсолютно устойчива; абсолютно устойчива. 4.57. Сухоустойчив. 4.58. Сухонеустойчив. 4.59. Абсолютно неустойчив; сухобезразличен и влажнеустойчив; сухоустойчив и влажнеустойчив; абсолютно устойчив; абсолютно неустойчив; абсолютно устойчив; 3110 м, 2,0 г; 4510 м, 2,4 г. 4.60. Для окружающей атмосферы:

p гПа	1030,0	940,0	870,0	720,0	610,0	490,0	400,0
$s_{\text{ф}}$ %	6,8	4,7	2,6	1,8	1,2	0,5	0,8
$s_{\text{в}}$ %	16,2	7,6	5,7	2,3	3,4	1,7	2,1
f %	42	62	45	78	35	29	38
θ °C	19,6	13,8	14,9	14,9	32,5	38,0	56,6
t_a °C	39,3	21,0	11,0	-6,4	-5,0	-18,2	-17,4
$t_{\text{ис}}$ °C	39,5	28,5	23,0	21,0	37,0	40,5	59,0

Абсолютно неустойчив; сухоустойчив и влажнеустойчив; сухобезразличен и влажнеустойчив; остальные слои абсолютно устойчивы.

Для поднимающегося объема: 840,0 гПа; 1670 м; 625,0 гПа; 3980 м;

	Уровень				
	начальный	900,0 гПа	конденсации	700,0 гПа	выравнивания
t_t °C	22,3	11,1	5,6	-2,8	-8,5
$s_{\text{ф}t}$ %	6,8	6,8	6,8	4,4	3,2
$s_{\text{в}t}$ %	16,2	9,2	6,8	4,4	3,2
f_t %	42	74	100	100	100
t_{dt} °C	8,5	6,7	5,6	-2,8	-8,5
θ_t °C	19,6	19,6	19,6	26,4	29,6
t_{dt} °C	39,3	28,1	22,6	8,2	0,1
$t_{\text{ис}t}$ °C	39,4	39,4	39,4	39,4	39,4
a_t м/с²	0,00	0,18	0,16	0,28	0,00

В 1 кг воздуха конденсируется 3,6 г пара.

Глава 5

5.1. 5.1. 0,47 мкм; 1,37 кВт/м²; 7, 44, 49 %. 5.2. 0,47 мкм. 5.3. 6,4 × 10⁻⁴ кВт/м²; 3,9 · 10³ кВт; 1,39 кВт/м². 5.4. 1,42; 1,33 кВт/м²; 2,9; -3,6 %. 5.5. 6,37 · 10¹⁴; 1,53 · 10¹⁶; 5,6 · 10¹⁸ МДж; 1,24; 29,81; 10880 МДж/м². 5.6. 0,36; 0,69; 0,98; 1,20; 1,33; 1,38 кВт/м². 5.7. 34,82; 42,96; 43,15; 47,45 МДж/м². 5.8. 34,89; 19,23; 2,06; 0,00 МДж/м². 5.9. 37,95; 32,86; 18,98; 0,00 МДж/м².

5.2. 5.10. 5,60; 2,90; 2,00; 1,55; 1,30; 1,15; 1,06; 1,015; 1,000. 5.11. 21 июня: 1,40; 1,19; 1,06; 22 декабря: —, 5,34; 2,40. 5.12. 0,722; 0,653. 5.13. 0,710; 1,37 кВт/м². 5.14. 0,619. 5.15. 0,51; 0,51; 0,702; 0,787; 0,707; 0,707. 5.16. 5,64. 5.17. 0,815; 0,801; 0,773; 0,748. 5.18. 20.

5.3. 5.19. 0,96 кВт/м²; 70 %. 5.20. 0,20; 0,51; 0,71; 0,81; 0,88; 0,91 кВт/м². 5.21. При 30°: 0,35; 0,50; 0,68; 0,88 кВт/м²; при 60°: 0,62; 0,77; 0,92; 1,07 кВт/м². 5.22. 41,46 МДж/м². 5.23. 8,056S₃₀ + 10,8 (S₃₀ + S_{12 30} + S_{15 30}) + 6,256S_{18 30}. 5.24. 18,18; 0,42 МДж/м². 5.25. 21,30; 22,65 МДж/м². 5.26. 3460 МДж/м². 5.27. 0,44 кВт/м². 5.28. 0,47 кВт/м². 5.29. 0,56; 0,02 кВт/м²; в 5 н в 28 раз. 5.30. 1,63. 5.31. 1,66 МДж/м². 5.32.

		Широта						
		0°	15	30	45	60	75	90
21.06	$S_{\text{кВт/м}^2}$	0,94	0,96	0,96	0,94	0,88	0,78	0,57
	$S'_{\text{кВт/м}^2}$	0,86	0,95	0,95	0,87	0,71	0,48	0,23
22.12	$S_{\text{кВт/м}^2}$	0,94	0,88	0,75	0,52	0,07	—	—
	$S'_{\text{кВт/м}^2}$	0,86	0,69	0,45	0,19	0,01	—	—

5.33. 0,06; 0,31; 0,55; 0,71; 0,72; 0,59; 0,32; 0,06 кВт/м²; 39,76; 23,68 МДж/м². 5.34. 3440, 1640 МДж/м²; 23, 47, 57, 51, 29, 10 %. 5.35. 1340, 1500 МДж/м²; 12 %. 5.36. 48, 58 %. 5.37. 0,66 кВт/м²; склоны с α = 30°: 0,34; 0,80; 0,65; 0,49 кВт/м²; склоны с α = 60°: не облучается; 0,73; 0,47; 0,18 кВт/м²; вертикальные стены: не облучается; 0,46; 0,17 кВт/м²; не облучается. 5.38. 7,45 МДж/м². 5.40. 1780, 1820, 1870 МДж/м². 5.42. 0,35 кВт/м². 5.43. 0,23 кВт/м²; 74, 26 %; 0,60 кВт/м²; 83, 17 %; 0,81 кВт/м²; 86, 14 %; 0,84 кВт/м²; 83, 17 %; 0,65 кВт/м²; 80, 20 %; 0,37 кВт/м²; 73, 27 %; 0,09 кВт/м²; 33, 67 %. 5.44. 1,11; 21,57 МДж/м². 5.45.

	II	IV	VI	VIII	X	XII	Год
$\sum_{\text{мес}} Q \text{ МДж/м}^2$	164	498	729	549	176	59	4350
$\sum_{\text{мес}} S' / \sum_{\text{мес}} Q \%$	36	45	64	60	45	29	54
$\sum_{\text{мес}} D / \sum_{\text{мес}} Q \%$	64	55	36	40	55	71	46

5.4. 5.46. Чернозем, в 9 раз. 5.49. 0,11 кВт/м².

5.50.

	II	IV	VI	VIII	X	XII	Год
$\sum_{\text{мес}} Q_{\text{п}} \text{ МДж/м}^2$	46	408	620	472	141	20	3410
$\sum_{\text{мес}} Q_{\text{отр}} \text{ МДж/м}^2$	118	90	109	77	35	39	940

5.5. 5.51. 13,0; 10,1; 9,0 мкм. 5.52. В $19 \cdot 10^4$ раз. 5.53. 0,37 кВт/м²; $E_c/S' = 1,1$.
5.54. 0,52; 0,16 кВт/м². 5.55. 35 °С. 5.56. 0,80; 0,03 кВт/м². 5.57. 0,37; 0,39;
0,43; 0,46; 0,45; 0,40 кВт/м²; 35,26 МДж/м². 5.58. 0,26; 0,38; 0,58; 0,53;
0,36; 0,28 кВт/м². 5.59. 7—8 °С.

5.6. 5.60. 13,3 мкм. 5.61. 0,32 кВт/м². 5.62. 0,39; 0,46 кВт/м². 5.63. 0,29; 0,31;
0,33; 0,33; 0,33; 0,32 кВт/м²; 27,05 МДж/м². 5.64. 0,17; 0,26; 0,35; 0,35; 0,26;
0,20 кВт/м². 5.65. 0,33; 0,47; —0,14 кВт/м².

5.7. 5.66. 0,38; 0,30; 0,27; 0,11; —0,11 кВт/м². 5.67. 0,26; 0,06; 0,20 кВт/м². 5.68.
0,22; 0,19; 0,16 кВт/м². 5.69. 0,03 кВт/м². 5.70. Во втором, на 8 %. 5.71.
5,56 МДж/м². 5.72. 1330, 2080 МДж/м².

5.8. 5.73. 0,33 кВт/м². 5.74. —0,05 кВт/м². 5.75. 0,28 кВт/м². 5.76. 0,50 кВт/м².
5.77. —0,06 кВт/м². 5.78. 0,59; 0,27 кВт/м². 5.79. 13,54 МДж/м². 5.80.
0,92; 11,07 МДж/м². 5.81. 9,61; 14,96 МДж/м². 5.82. 1000, 1810 МДж/м².
5.83. 24,54; 4,88 МДж/м²;

	Срок, ч мин											Σ сут МДж/м ²
	0 30	4 30	6 30	8 30	10 30	12 30	14 30	16 30	18 30	20 30	0 30	
Q	0,00	0,00	0,25	0,64	0,88	0,96	0,80	0,46	0,10	0,00	0,00	29,42
$Q_{\text{п}}$	0,00	0,00	0,17	0,47	0,64	0,72	0,58	0,33	0,07	0,00	0,00	21,71
$B_{\text{д}}$	-0,06	-0,05	-0,09	-0,13	-0,20	-0,26	-0,20	-0,12	-0,11	-0,07	-0,06	-10,15
B	-0,06	-0,05	0,08	0,34	0,44	0,46	0,38	0,21	-0,04	-0,07	-0,06	11,56

5.84. 25,29; 5,30 МДж/м²;

	Срок, ч мин											Σ сут МДж/м ²
	0 30	4 30	6 30	8 30	10 30	12 30	14 30	16 30	18 30	20 30	0 30	
Q	0,00	0,00	0,24	0,63	0,92	0,99	0,86	0,51	0,14	0,00	0,00	30,59
$Q_{\text{п}}$	0,00	0,00	0,17	0,49	0,72	0,77	0,66	0,38	0,10	0,00	0,00	23,94
$B_{\text{д}}$	-0,05	-0,04	-0,05	-0,05	-0,09	-0,10	-0,07	-0,07	-0,07	-0,05	-0,05	-5,29
B	-0,05	-0,04	0,12	0,44	0,63	0,67	0,59	0,31	0,03	-0,05	-0,05	18,65

5.85.

Срок, ч мин	P	P ₂	S'	Q	S'/Q	D/Q	Q _п	B _д
0 30	—	—	0,00	0,00	—	—	0,00	—0,04
6 30	0,646	0,642	0,21	0,32	0,66	0,34	0,25	—0,08
9 30	0,636	0,675	0,54	0,75	0,72	0,28	0,62	—0,15
12 30	0,657	0,691	0,66	0,89	0,74	0,26	0,74	—0,17
15 30	0,641	0,675	0,43	0,62	0,69	0,31	0,52	—0,12
18 30	0,723	—	0,13	0,21	0,62	0,38	0,17	—0,07
0 30	—	—	0,00	0,00	—	—	0,00	—0,05

$\sum_{\text{сут}} B = 18,95 \text{ МДж/м}^2$. 5.86. 2300, 4670 МДж/м². 5.87. —5360 МДж/м².
5.88. —3060 МДж/м². 5.90. 3160, 7720 МДж/м². 5.91. 3000 МДж/м². 5.92.
0,00 МДж/м².

Глава 6

- 6.1. 6.1. Амплитуды 11; 31 °С. 6.2. Амплитуды 5; 24 °С. 6.3. 20,3; 34,5 °С.
6.4. Амплитуды 48; 16,8 °С. 6.5. Амплитуды 0,6; 25,7 °С. 6.6. Не изменя-
ется; амплитуды 12,0; 3,6; 2,9; 1,7; 1,6 °С. Запаздывания 2 ч 30 мин, 4 ч
12 мин, 5 ч 12 мин, 8 ч, среднее 4 ч. 6.7. Амплитуды 32; 36 °С. 6.8. Ампли-
туды 18,8; 19,0; 18,6 °С. 6.9. Амплитуды 15,2; 28; 36 °С. 6.10. Амплитуды
12,6; 3,6 °С. 6.11. Амплитуды 29; 10,2; 5,7 °С; запаздывания 42, 73 сут,
среднее 23 сут/м. 6.13. 29 сут. 6.14. Профили: промежуточный вечерний,
инсоляции, инсоляции, промежуточный вечерний; первый аномален, осталь-
ные нормальны; градиенты: 0,86; 0,36; 0,24; 0,06 °С/см; направления по-
токов: 0 ч ↑↑↑↑, 8 ч ↑↑↑↑, 12 ч ↑↑↑↑, 20 ч ↑↑↑↑. 6.15. Профили:
излучения, промежуточный весенний, инсоляции, промежуточный осен-
ний; все нормальны; градиенты: 14,0; 5,0; 6,0; 5,0; 4,0; 3,5; 2,6; 1,9; сред-
ний 3,9 °С/м; направления потоков: январь ↑↑↑↑↑↑↑↑, апрель ↑↑↑↑
↑↑↑↑, июль ↑↑↑↑↑↑↑↑, сентябрь ↑↑↑↑↑↑↑↑. 6.16. 0,15; 0,40; 0,35;
0,05 °С/м; средний 0,19 °С/м. 6.17. Оголенная: 0,15; 0,08; 0,07 °С/см; по-
крытая: 0,19; 0,11; 0,05 °С/см.
- 6.2. 6.18. Песок: 1,4; —1,1 °С; чернозем: 2,7; —2,3 °С. 6.19. 0,85 МДж/(м³·К);
89 %. 6.20. —34 %. 6.21. 72,0; 46,4; 23,0; 4,3; 612 см²/ч. 6.22. 11,7 см²/ч.
6.23. 7,6 см²/ч. 6.24. 28,9; 945,6 см²/ч. 6.25. 5,4 см²/ч. 6.26. 7,7; 51,2 см²/ч.
6.27. 2,5·10⁶ Дж/(м³·К); 26,2 см²/ч; 1,8 Вт/(м·К). 6.28. 2,8·10³ Вт/(м·К).
- 6.3. 6.30. Повысится на 2,0 °С. 6.31. 1,6 °С; 62,5 см. 6.32. 16,1; 9,6; 4,3 см;
23,1; 13,8; 6,2 см. 6.33. 10,2 см; 1,95 м. 6.34. 29; 5,7 °С; 14,0 см²/ч;
12,9 °С. 6.35. 12,0; 3,6; 2,9; 1,7; 1,6 °С; 0,30; 0,81; 0,59; 0,94. 6.36.
125,77 см. 6.37. 41,92 см. 6.38. 29 °С; 11 м. 6.39. 15,85 м. 6.40. 20 ч 19 мин;
3 ч 14 мин, 10 ч 09 мин (последние два ответа—для следующих суток).
6.41. 23 ч 10 мин. 6.42. 2 ч 30 мин, 4 ч 12 мин, 5 ч 12 мин, 8 ч 00 мин;
1,7; 2,1; 1,9.
- 6.4. 6.43. 0,08 кВт/м². 6.44. —0,01 кВт/м². 6.45. 2,24 МДж/м²; 0,02 %. 6.46.
0,0067 кВт/м²; 106,5 МДж. 6.47. По сокращенной формуле: —0,02; —0,01;
0,02; 0,03; 0,01; —0,02; —0,03; —0,02 кВт/м²; по полной формуле: —0,01;
—0,01; 0,02; 0,03; 0,01; —0,02; —0,03; —0,02 кВт/м²; в сроки: —0,01;
0,00; 0,02; 0,02; 0,00; —0,02; —0,02 кВт/м²; $\sum_{\text{сут}} P = -0,07 \text{ МДж/м}^2$.

Глава 7

- 7.1. 7.1. Амплитуды 5,7; 16,2 °C. 7.2. Амплитуды 2,0; 8,0 °C. 7.3. Амплитуды 8,3; 14,8 °C. 7.4. Амплитуды 0,9; 2,0 °C. 7.5. Амплитуды 16,8; 15,0 °C. 7.6. Амплитуды 11,5; 6,6 °C. 7.7. 0,6; 0,6; 1,4; 5,0; 4,0; 1,5; 0,7 °C. 7.8. 4,2; 2,6; 1,6; 0,6; 0,2 °C. 7.9. Амплитуды 5,1; 10,2 °C. 7.10. 0,7 °C. 7.11. —73; 873 °C/100 м. 7.12. 3 ч: —700, —133, —40, —30 °C/100 м, $\uparrow \uparrow \uparrow$; 5 ч: 1400, —100, —40, —10 °C/м, $\uparrow \uparrow \uparrow$; 13 ч: 4100, 100, 60, 20 °C/100 м, $\uparrow \uparrow \uparrow$; 17 ч: —1000, 33, 20, 10 °C/100 м, $\uparrow \uparrow \uparrow$. 7.13. 9,6; 6,4; 5,4; 4,8; 5,6 °C; 6,5; 1,2; 0,6; 1,3 °C/100 м; 97 м; сухобезразличная влажнонеустойчивая. 7.14. 0,86; 1,26; 0,92. 7.15. 21,6; 20,2 °C. 7.16. Амплитуды 6,5; 18,8; 30,7; 38,8; 38,9 °C. 7.17. Амплитуды 7,4; 35,0 °C. 7.18. Амплитуды 22,1; 61,9 °C. 7.19. 0,53; 1,01; 0,37; 0,75 °C/100 м; средний 0,70 °C/100 м; 22,2; 17,4; 14,7; —2,5; —13,9 °C. 7.20. Январь: 0,35; 0,49; 0,56; 0,80 °C/100 км; июль 0,31; 0,35; 0,53; 0,46 °C/100 км. 7.21. —10, 145 °C/100 м; $\uparrow$.
- 7.2. 7.22. $0,7 \cdot 10^{-5}$ кВт/м². 7.23. Увеличится на 0,003 °C за час. 7.24. 0,08 °C за час. 7.25. Увеличится на 24,9 °C. 7.26. 0,16 кВт/м². 7.27. Переменит направление и уменьшится в 10 раз. 7.28. 0,23 кВт/м². 33 %. 7.29. —0,01; 0,00; 0,04; 0,32; 0,14, 0,02; —0,01 кВт/м²; 5,51 МДж/м². 7.30. 0,23; 0,14; 0,26 кВт/м²; 39; 13 %. 7.31. —0,97 МДж/м². 7.32. 730 МДж/м². 7.33. 1,26 МДж/м².

Глава 8

- 8.2. 8.7. 17,6 гПа. 8.8. 14,6 гПа. 8.9. 11,5 гПа. 8.10. 8,4 гПа. 8.14. 18,3; 21,5; 22,1 кг/м². 8.15. 13,8; 17,4; 19,0 кг/м². 8.16. 14,9 кг/м².

Глава 9

- 9.1. 9.2. —6,16; —3,25 гПа. 9.3. 12,3; 43,5; 96,0; 2,87; 0,53 гПа; 0,12 гПа. 9.5. а) испарение; б) конденсация. 9.6. > 66 %. 9.7. Ниже 6,7 °C. 9.8. Нет. 9.9. Нет. 9.11. 91; 82 %. 9.13. Нет. 9.14. Ниже —13,2 °C. 9.15. Нет. 9.17. До < 52 %. 9.20. 15,3 гПа; 124 %; 7,6 гПа; 124 %. 9.21. 12,9 гПа; 105 %; 6,4 гПа; 105 %. 9.22. 0,12; 0,012; 0,001 гПа. 9.23. Да, нет, да. 9.24. 2,21; 2,49 гПа. 9.25. 0,70 гПа, 81 %; 0,9 гПа, 102 %. 9.26. 97 %. 9.27. 2,6 %. 9.28. На 13 %, на 10 %. 9.29. 12,7; 6,2 гПа; > 86 %. 9.30. 6,23; 12,73; 88 % ((NH₄)₂SO₄); 6,20; 12,70; 85 % (NH₄Cl); 5,75; 12,25; 40 % (CaCl₂); 6,18; 12,68; 83 % (NaCl). 9.31. а) при $t = 10$ °C: 12,77 гПа, 92 %; 12,86 гПа; 101 %; б) при $t = 0$ °C: 6,27 гПа; 92 %; 6,36 гПа; 101 %. 9.33. 160, 106, 158, 106 %. 9.34. 1; 2; 4; 11 зарядов.
- 9.2. 9.35. 0,37 мм/ч; $1,55 \cdot 10^4$ Дж/(м² · ч). 9.36. На 7 %. 9.37. На 6 %. 9.38. 2,3 кг/(м² · сут); $580,3 \cdot 10^4$ Дж/(м² · сут). 9.39. 0,033 мм/ч. 9.40. 0,07 мм/ч. 9.41. 5 мм/сут. 9.42. 99,8 см/год. 9.44. 1,9 мм/сут. 9.45. 393 см/год. 9.46. 0,09 мм/ч; 2,1 мм/сут; 60,7 Дж/(м² · ч); $14,57 \cdot 10^2$ Дж/(м² · сут). 9.47. 0,43 кВт/м²; 0,62 мм/ч. 9.48. 0,18 мм/ч, 0,13 кВт/м². 9.51. $1,5 \cdot 10^{-4}$ кг/(м² · с), 0,38 кВт/м²; $0,53 \cdot 10^{-4}$ кг/(м² · с); 0,13 кВт/м². 9.52. $1,39 \cdot 10^{-4}$ кг/(м² · с); 0,35 кВт/м²; $1,1 \cdot 10^{-4}$ кг/(м² · с); 0,28 кВт/м². 9.53. $1,58 \cdot 10^{-4}$ кг/(м² · с). 9.54. $0,83 \cdot 10^{-4}$ кг/(м² · с). 9.55. — $0,3 \cdot 10^{-8}$ кг/(м² · с). 9.56. 10^{-8} мм/ч; $0,24 \cdot 10^{-1}$ мм/сут. 9.57. 0,29 мм/сут. 9.58. 9,9 см/мес. 9.59. 7,7 см/мес. 9.60. 66,6 см/год. 9.61. 330 мм/год. 9.62. 14 см/мес.
- 9.3. 9.63. 3,1; 4,9; 5,8. 9.64. 5,7; 6,5; 7,4. 9.65. $1,47 \cdot 10^{-7}$; $7,32 \cdot 10^{-8}$; $4,89 \cdot 10^{-8}$ см. 9.66. 0 °C: $1,74 \cdot 10^{-7}$; $8,62 \cdot 10^{-8}$; $5,76 \cdot 10^{-8}$; —10 °C: $1,83 \cdot 10^{-7}$; $9,1 \cdot 10^{-8}$; $6,1 \cdot 10^{-8}$ см. 9.67. —10 °C: $2,10 \cdot 10^{-7}$; $1,05 \cdot 10^{-7}$; $0,70 \cdot 10^{-7}$ см; —32 °C: $2,37 \cdot 10^{-7}$; $1,18 \cdot 10^{-7}$; $0,78 \cdot 10^{-7}$ см. 9.68. $1,66 \cdot 10^{-7}$; $0,47 \cdot 10^{-7}$ см. 9.69. 30 °C: $6,43 \cdot 10^{-10}$; $1,61 \cdot 10^{-10}$; $0,71 \cdot 10^{-10}$ Дж; 0 °C: $9,59 \cdot 10^{-10}$; $2,35 \cdot 10^{-10}$; $1,05 \cdot 10^{-10}$ Дж; —10 °C: $10,7 \cdot 10^{-10}$; $2,68 \cdot 10^{-10}$; $1,19 \cdot 10^{-10}$ Дж. 9.70.

2,98 · 10⁻¹⁸; 2,98 · 10⁻¹⁷ Дж. 9.71. -5 °C: 2,52 · 10⁻¹⁸; 3,59 · 10⁻¹⁹ Дж;
 -20 °C: 3,08 · 10⁻¹⁹; 4,10 · 10⁻¹⁹ Дж; -32 °C: 3,61 · 10⁻¹⁹; 4,88 · 10⁻¹⁹ Дж.
 9.72. 1,07 · 10⁻¹⁸; 6,31 · 10⁻²¹ Дж. 9.73. 3,7 · 10⁻²⁰; 3,7 · 10⁻¹⁶; 3,7 · 10⁻¹⁴.
 3,7 · 10⁻¹⁸ Дж. 9.74. на 1,04 · 10⁻¹⁸ Дж. 9.75. Не образуются; 10¹⁶ зароды-
 шей в 1 см³ за 1 с. 9.76. 8,5 · 10¹⁸ зародышей в 1 см³ за 1 с. 9.78.
 5,22 · 10⁻¹⁷ г; 3,4 · 10⁻⁶ см; 82; 90 %; 8,2 · 10⁻⁶; 1,4 · 10⁻⁵ см; 100,6 %.

Глава 10

- 10.1 10.1. 5,0; 5,5; 6,2; 3,4 мкм. 10.3. 6,8; 10,0; 11,4; 13,0 мкм; 6 г/м³; $n(r) = \frac{1}{1,3\sqrt{r}} \exp\left[-\frac{(\ln r - 2,17)^2}{0,526}\right]$. 10.5. 6,0; 9,0; 10,5; 11,8 мкм; 0,57 г/м³;
 $n(r) = 6 \cdot 10^9 r^2 \exp(-0,33 \cdot 10^4 r)$. 10.6. 6,9; 10,4; 11,7; 13,0 мкм; 1,7 г/м³;
 $n(r) = 5,25 \cdot 10^9 r^2 \exp(-0,287 \cdot 10^4 r)$. 10.7. 5,1; 10,1 мкм; 0,42 г/м³. 10.8.
 2,2; 2,8 мкм; 0,03 г/м³. 10.9. 0,16 г/м³. 10.10. 0,19 г/м³. 10.11. 0,03 г/м³.
 10.12. 0,05; 0,33; 0,25; 0,18 ‰. 10.13. 0,12; 0,24; 0,05 ‰. 10.14. 0,11; 0,11;
 0,08; 0,07 ‰. 10.15. 0,29; 0,28; 0,26; 0,25; 0,24; 0,24 ‰. 10.16. 0,16;
 0,15 ‰. 10.17. 0,72; 9,5 г/м³. 10.18. 0,04 мм/м². 10.19. 0,29 мм/м². 10.20.
 4,6.
 10.2. 10.21. 258, 250, 330 м. 10.22. 0; 50; 154 м. 10.23. 569, 560 м. 10.24.
 1400 м. 10.25. 1200 м.
 10.3. 10.26. 5,2°. 10.27. Да. 10.28. 1,6 г/м³. 10.29. Нет. 10.30. 0,28 г/м³. 10.31.
 6 г/м³. 10.32. 1,8 г/м³; 4,5 · 10³ Дж/м³. 10.33. 0,4 г/м³; 1 · 10³ Дж/м³. 10.34.
 14 мкм. 10.35. 75 м. 10.36. 10⁻³ см², 20 м, 4 · 10⁻⁴ см², 50 м. 10.37. в 3 раза.
 10.38. 0,5 г/м³, 36 м. 10.39. 2,4 час, 5,5 м, 3,3 час. 10.40. 3,2 час; 17 м.

Глава 11

- 11.1 11.1. ≈ 0,1; 1,6; 6,4 м/с; ≈ 2,12 и 1870 %. 11.2. 304 мкм; 2,4 м/с. 11.3.
 10⁻³; 8 · 10⁻³ м/с. 11.4. 0,8 см/с. 11.5. ≈ 2 м/с. 11.6. ≈ 53 мин. 11.7. 0,3;
 0,9 м/с.
 11.2. 11.8. 8 · 10⁶ капель. 11.9. 1; 4; 16 мин; 1 ч 40 мин; 6 ч 40 мин; 7; 28 сут.
 11.10. 13,2 · 10⁻⁷; 3,2 · 10⁻⁸; 1,6 · 10⁻⁸; 0,64 · 10⁻⁸; 3,2 · 10⁻⁸; 1,6 · 10⁻⁸.
 6,4 · 10⁻¹⁰ м/с. 11.11. а) 22; 877 м; ≈ 15,7 км; б) 3; 746 м; 14,6 км. 11.12.
 92; 1662 м; ≈ 962 км. 11.13. а) 44; 54; 69 мкм; б) 76, 90, 110 мкм; в) 107,
 124, 147 мкм. 11.14. 0,21 · 10⁻⁸; 1,8 · 10⁻⁸; 4,6 · 10⁻⁸; 9,8 · 10⁻⁸; 2,6 · 10⁻⁷ м/с.
 11.15. 2,8; 5,6; 3,7; 8,9 км. $\Sigma = 21$ км. 11.16. 0,9; 2,4; 2,0; 4,8 км;
 $\Sigma = 10,1$ км. 11.17. 3; 12; 48 с; 5, 20 мин, 8, 30 ч, 11.18. 0,5 · 10⁻⁵; 0,5 · 10⁻⁶;
 0,26 · 10⁻⁶; 0,1 · 10⁻⁶; 0,5 · 10⁻⁷; 0,26 · 10⁻⁷; 0,1 · 10⁻⁷ м/с. 11.19. а) 16 мин;
 1,3 сут; б) 2,4 ч; 12 сут. 11.20. 640 м; 10,2; 64 км, 11.21. а) 754; 730 м;
 б) 615; 596 м. 11.22. 40; 98 мкм.
 11.3. 11.23. а) 10,7°; 12,9 гПа; б) 10,8°; 12,9 гПа. 11.24. 2,7°; 7,41 гПа. 11.26.
 1,3 см/с; 3,2 см. 11.27. Поднимается на расстояние 7,6 см. 11.28. Нет; нет.
 11.29. 147; 318; 1910 м. 11.30. 12; 46 мин. 11.31. 1,39; 9,3 км. 11.32. 100 мкм.
 11.33. 510 мкм. 11.34. 196 мкм. 11.35. 0; 91,6 мкм. 11.36. 300 мкм.

Глава 12

- 12.1. 12.1. 2,8 гПа/111 км. 12.2. 12,7 гПа/100 м; 5,5 гПа/111 км; $G_z/G_x = 2540$.
 12.3. Менее 10'.
 12.2. 12.4. 2,1 · 10⁻³ м/с²; $\Gamma/g = 2,25 \cdot 10^{-4}$; 12.5. 2,8 · 10⁻³; 3,6 · 10⁻³ м/с²;
 $\Gamma_1/\Gamma_2 = 1,3$. 12.6. 45,8 м/с. 12.8. 6,3 · 10⁻⁴ м/с²; $A/\Gamma = 0,3$. 12.9. 8,7 м/с.
 12.10. 5 · 10⁻⁵ м/с²; $z/\Gamma = 0,02$. 12.11. $z/A = 0,24$. 12.12. В 4 раза.
 12.13. 3 · 10⁻⁴ м/с².

12.3. 12.16. 12,4; 14,3; 24,8 м/с. 12.17. $G_{x,60}/G_{x,20}=2,5$. 12.18. 2,6 гПа/111 км;
 $2,9 \cdot 10^{-3}$; $2,9 \cdot 10^{-3}$ м/с². 12.21. 4,7 м/с, $u_{\text{цц}}/u_{\text{г}}=0,9$. 12.24. 8,3 м/с;
 $u_{\text{ца}}/u_{\text{г}}=1,5$; $u_{\text{ца}}/u_{\text{цц}}=1,8$. 12.25. 25,2 м/с. 12.26. 0,4 гПа/111 км.
 12.4. 12.29. $50^{\circ}30'$. 12.30. $7,3 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹. 12.31. 5,7 м/с; $u/u_{\text{г}}=0,6$.

Глава 13

13.1 13.1. 16 500 лк; 0,37. 13.2. 4,1; 2,2; аэрозольное. 13.3. а) $73,0 \cdot 10^3$; $54,4 \cdot 10^3$;
 $43,7 \cdot 10^3$; $38,3 \cdot 10^3$ лк; б) $36,5 \cdot 10^3$; $18,0 \cdot 10^3$; $10,8 \cdot 10^3$; $7,5 \cdot 10^3$ лк;
 в) 0,735; 0,739; 0,754; 0,777; г) 0,54; 0,40; 0,32; 0,28; д) 26, 20, 14, 8, 4 %.
 13.4. Ташкент: 0,54; 0,25; 0,15 и 0,14 кВт/м²; 100, 46, 28 и 26 %. Павловск:
 0,51; 0,25; 0,14 и 0,12 кВт/м²; 100, 49, 27 и 24 %. Дрейфующие ст.: 0,58;
 0,25; 0,13 и 0,20 кВт/м²; 100, 43, 22 и 35 %. 13.5. Ст. Мирный 0,45; 0,25;
 0,10 и 0,10 кВт/м²; 100, 56, 22 и 22 %; ст. Оазис 0,37; 0,25; 0,08 и 0,04 кВт/м²;
 100, 67, 22 и 11 %; ст. Пионерская 0,47; 0,25; 0,00 и 0,22 кВт/м²; 100,
 53, 0 и 47 %. 13.6. Ст. Мирный 1,022; 0,25; 0,137 и 0,635 кВт/м²; 100,
 25, 13 и 62 %; ст. Новолазаревская 1,025; 0,25; 0,176 и 0,599 кВт/м²; 100,
 24, 17 и 59 %; ст. Восток 1,106; 0,25; 0,021 и 0,835 кВт/м²; 100, 23, 2 и
 75 %. 13.7. 0,769; 0,816; 0,856; 0,810; 0,728; 0,779; 0,823; 0,773 кВт/м²;
 5,8, 4,5, 3,9 4,6 %.
 13.2. 13.8. $2,2 \cdot 10^4$ кД/м²; $6,8 \cdot 10^4$ лм/м²; $8 \cdot 10^8$ лм. 13.9. $5 \cdot 10^3$ лк; 287 кД/м²;
 $9 \cdot 10^2$ лм/м². 13.12. $2 \cdot 10^9$ кД/м². 13.13. $6,28 \cdot 10^9$ лм/м²; $\approx 3,9 \cdot 10^{28}$ лм.
 13.14.

Планета	Е лк	
Меркурий	905 000	$6,8E_0$ Земли
Венера	260 000	$1,9E_0$ Земли
Марс	58 000	При $h_{\odot}=40^{\circ}$
Юпитер	5 000	При $h_{\odot}=5,5^{\circ}$
Сатурн	1 490	При $h_{\odot}=1,3^{\circ}$
Уран	368	Начало гражданских сумерек на Земле
Нептун	150	
Плутон	111	

13.15. $3,9 \cdot 10^{28}$ лм. 13.16. $3,1 \cdot 10^{27}$ кД. 13.17. $5 \cdot 10^6$ т/с. 13.18. $6,4 \cdot 10^{12}$ лет. 13.19. $4,9 \times$
 $\times 10^{-10}$; 2,2 кг/с. 13.20. 2,2 кг/с. 13.21. 5400 кД/м²; $1,7 \cdot 10^4$ лм/м²; $3,2 \cdot 10^{17}$ лм.

13.3. 13.22. 16 раз; фиолетовых. 13.23. Уменьшится в 64, 10^6 и 10^8 раз. 13.24.
 0,119; 0,119; 0,060; 0,075. 13.25. 17,6; 16,5. 13.26. $1,094 \cdot 10^4$ раз; больше
 в задаче 13.25. 13.27. 13 и 1 %; 44 и 3 %. 13.28. 0,344; 0,0926; 0,0195;
 17,6 раза. 13.29. 0,74; 0,91; 0,98. 13.30. 1,22; $3,31 \cdot 10^{-5}$. 13.31. 0,30; 0,9999.
 13.32. 330 км.

13.4. 13.33. 0,097; 0,046; 0,0013. 13.34. 0,170; 0,001 23; 0,000. 13.35. 0,032; 0,0305;
 0,0059. 13.37. $p_{\text{общ}}=0,744$; $p_{\text{м}}=0,909$; $p_{\text{а}}=0,845$; $p_{\text{оз}}=0,970$; потери
 энергии 26,9, 15 и 2 %; $p_{\text{общ}}=0,925$; $p_{\text{м}}=0,956$; $p_{\text{а}}=999$; $p_{\text{оз}}=0,970$;
 потери энергии 7,5, 4,4, 0,1 и 3,0 %; $p_{\text{общ}}=0,993$; $p_{\text{м}}=0,999$; $p_{\text{а}}=1,0$;
 $p_{\text{оз}}=0,994$; потери энергии 0,7; 0,1; 0,0 и 0,6 %. 13.38. 0,145; 86 %; 0,143;
 86 %. 13.39. 0,145; 85,5 %; 0,118; 88,2 %; менее 3 %. 13.40. 2,3 и 0,580 км;
 в 4 раза. 13.41. 2,3 и 0,096 км; в 24 раза. 13.42. 239 м; 4,65; 236 м; 4,65.
 13.43. 7,2 км; 4,65; 16,0 км; 4,65. 13.44. 210 м; 4,65; 237 м; 4,65. 13.45.
 155 км; 4,65; 465 км; 4,65. 13.46. 0,70; 1,40; 3,03; 5,35; 6,97. 13.47. По
 Кошмидеру: 3,39; 1,65; 0,62; 0,29; 0,14; 0,05 км⁻¹; по Шифрину и Миннину:
 3,12; 1,56; 0,62; 0,31; 0,16; 0,06 км⁻¹. а) на 8 % больше по Кошмидеру;
 б) на 10 % больше по Шифрину и Миннину. 13.48. Шифрина и Миннина; Шиф-
 рина и Миннина.

13.5. 13.49. 8,16 и 32 км; 3,4 раза (16 км); 36 км. 13.50. 22 км; 1,4 раза; нет у аэрозольного. 13.51. 4 раза; 5. 13.52. $\sigma_{a_2} = 1,5\sigma_{a_1}$; $\tau_{a_1} = 1,5\tau_{a_2}$. 13.53. а) $1,3 \cdot 10^{-2}$; $2,3 \cdot 10^{-1}$; $2,9 \cdot 10^{-2} \text{ м}^{-1}$; б) $4,4 \cdot 10^{-3}$; $8,0 \cdot 10^{-2}$; 10^{-2} м^{-1} ; в) $1,47 \cdot 10^{-3}$; $2,70 \cdot 10^{-2}$; $3,30 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$; 8,1; 2,83; 1,0; 99,97; 94, 62%. 13.54. 199; 124; 369 м. 13.55. 0,09; 0,21; 0,12 г/м³; $1,34 \cdot 10^3$; $3,11 \cdot 10^3$; $1,75 \cdot 10^3 \text{ м}^{-3}$. 13.56. Увеличивается в 1,41 раза, уменьшается в 1,22 раза. 13.57. 0,041; $0,051 \text{ м}^{-1}$; 0,33; $0,41 \text{ г/м}^3$; $81,6 \cdot 10^6$; $100,1 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$. 13.58. Ns: $0,13 \text{ м}^{-1}$; 30 м; As: $0,108 \text{ м}^{-1}$; 36 м; St II: $0,101 \text{ м}^{-1}$; 39 м; St I: $0,070 \text{ м}^{-1}$; 56 м; Sc: $0,047 \text{ м}^{-1}$; 83 м; Cu hum: $0,022 \text{ м}^{-1}$; 180 м; Cu cong: $0,070 \text{ м}^{-1}$; 56 м; Cb: $0,045 \text{ м}^{-1}$; 88 м. 13.59. 0,019; $0,015 \text{ м}^{-1}$; 0,16; $0,10 \text{ г/м}^3$; $31,2 \cdot 10^6$; $40,6 \cdot 10^6 \text{ м}^{-3}$.

Глава 14

14.1 14.1. $68,0 \cdot 10^{-4}$; $28,0 \cdot 10^{-4}$; $22,8 \cdot 10^{-4}$; $23,5 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/(см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм)}$. 14.2. а) $19,0 \cdot 10^{-4}$; $25,0 \cdot 10^{-4}$; $35,6 \cdot 10^{-4}$; $50,0 \cdot 10^{-4}$; $68,6 \cdot 10^{-4}$; $96,5 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/(см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм)}$; б) $19,0 \cdot 10^{-4}$; $14,6 \cdot 10^{-4}$; $14,0 \cdot 10^{-4}$; $16,0 \cdot 10^{-4}$; $23,5 \cdot 10^{-4}$; $44,0 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/(см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм)}$. 14.5. 0,060; 0,0488; 0,0370; 0,0153; 0,0104; 0,0080; 0,0073; 0,0072; 0,0078; 0,0085. 14.7. а) 8,40; 7,32; 6,27; 4,28; 3,28; 2,80; 2,72; 2,72; 2,96; б) 7,28; 6,18; 5,16; 3,14; 2,16; 1,67; 1,60; 1,60; 1,84. 14.9. 0,455; 0,63; $0,51 \text{ кВт/м}^2$. 14.10. 0,245; 0,78; $0,51 \text{ кВт/м}^2$. 14.2. 14.11. p_{max} уменьшилась на 6%; 94%; p_{min} не изменяется; 0%; p_{max} — в зените; p_{min} — в направлении на Солнце и анτισолярную точку; на зенитном расстоянии 84°; менее 85%. В точках Араго, Бабинне, Брюстера и четвертой точке, симметричной точке Араго, но под Солнцем; 0%. 14.12. 0,88; 0,52. 14.13. Уменьшается на 6 и 8%. 14.14. 22°. 14.15. 4,22 раза.

Глава 15

15.1. 15.1. 60 220 и 2620 лк. 15.2. Вертикальная, в 6 раз. 15.3. 135 000; 67 500; 27 000 и 0 лк; в 2 раза больше, чем в Ленинграде, и в 5 раз больше, чем на ст. Восток. 15.4. 94 500; 42 100; 9000 и 0 лк; в 2,2 раза больше, чем в Ленинграде и в 10,5 раза больше, чем на ст. Восток. 15.7. 190 и 260 кд/м^2 . 15.8. 3340 кд/м^2 . 15.9.

$h_{\odot}$	0	5	10	15	25	35	45	55
% освещенности	220	48	26	18	15	12	10	10

15.10. 50 000 лк. 15.11. $3,2 \cdot 10^4 \text{ кд/м}^2$; $10,2 \cdot 10^4 \text{ лм/м}^2$. 15.12. 0,32 лк. 15.13. 0,22 и 0,11 лк. 15.14. $1,9 \cdot 10^{-4} \text{ лк}$. 15.15. Черноземное поле ярче в 22 000 раз. 15.16. От $1,57 \cdot 10^{-7}$ до 0,16 лк. 15.17. 77 000 лк. 15.18. $81,5 \cdot 10^3$; $24,6 \cdot 10^3$; $80,2 \cdot 10^3 \text{ лк}$. 15.19.

	Зима		Весна		Лето		Осень		Год	
	10^4 лк	%	10^4 лк	%	10^4 лк	%	10^4 лк	%	10^4 лк	%
Ташкент $\sum E_Q$	100		280		408		191		979	
$\sum E_D$	55	55	115	41	108	26	72	38	350	36
Жаргополь $\sum E_Q$	17		186		243		45		491	
$\sum E_D$	15	88	105	37	125	52	34	76	279	57

15.2. 15.20. 70—90 км. 15.21. 162 и 267 км; области ионосферы F_1 и F_2 . 15.22. 12,7; 38; 76 км; 51; 140; 325 км. 15.23. $9^{\circ}30'$. 15.24. От 19 ч 56 мин до 21 ч 32 мин; от 2 ч 28 мин до 4 ч 04 мин. 15.25. До $59,8^{\circ}$. 15.26. От 20 ч 03 мин до 22 ч 58 мин; от 1 ч 02 мин до 3 ч 57 мин. 15.27. 1100 км. 15.28. $17^{\circ}15'$. 15.29. 11,5 и 19,5 км; ≈ 3 и 10 км; $2,25 \cdot 10^{-2}$; $22,5 \cdot 10^{-2}$; 0,025; перламутровые облака; с вулканическими извержениями. 15.30. а) 2,4 %; б) 4,8 %; в) 70 раз.

Глава 16

16.1. 16.1. 8 квантов в секунду. 16.2. 1,9; 14 км; почти в 7 раз. 16.3. $1,4 \times 10^{-18}$ лм. 16.4. 111 км. 16.5. 47 км.
16.2. 16.6. 0,68; 0,9996; $0,17 \text{ км}^{-1}$; $0,00017 \text{ м}^{-1}$; $0,39 \text{ км}^{-1}$; $0,00039 \text{ м}^{-1}$; 32 и 0,04 %. 16.7. $0,0085 \text{ м}^{-1}$; 57 %; $\approx 200 \text{ м}$. 16.8. $\approx 0,10$. 16.9. 0,9879; 321 км. 16.10. 0,9869; 297 км. 16.11. 0,9887; 344 км; от 297 до 344 км. 16.12. 167 м; $0,023 \text{ м}^{-1}$; 23 км $^{-1}$; 90 %. 16.13. 113 м; $0,035 \text{ м}^{-1}$; 35 км $^{-1}$; 97 %. 16.14. 165 м; $0,024 \text{ м}^{-1}$; 24 км $^{-1}$; 91 %. 16.15. 130 м; 30 км^{-1} . 16.16. 103 м; 38 км^{-1} . 16.17. $0,086 \text{ км}^{-1}$; 45,5 км; 8 баллов. 16.18. $4,19 \text{ км}^{-1}$; 930 м; 3 балла. 16.19. 8 и 85 %. 16.20. $0,395 \text{ км}^{-1}$; 9,9 км; 6 баллов. 16.21. $8,72 \text{ км}^{-1}$; 450 м; 2 балла.
16.3. 16.22. 7; 7,4; ≈ 10 кд. 16.23. 49; 340; $1,2 \cdot 10^5$ и $2 \cdot 10^5$ кд. 16.24. 4 км. 16.25. Да. 16.26. 7; ≈ 7 ; 8,5 кд. 16.27. $\approx 1500 \text{ м}$. 16.28. ≈ 950 , ≈ 400 и $\approx 270 \text{ м}$. 16.29. 1300, $\approx 1200 \text{ м}$. 16.30. Для красного: 900, 420, 250 м; для зеленого: 850, 410, 240 м. 16.31. 2 км.
16.4. 16.32. 506 м. 16.33. 785 м. 16.34. 1370. 16.35. 2130 м. 16.36. 280 м. 16.37. 580 м. 16.38. Увеличится до 720 м. 16.39. 1640 м. 16.40. 1850 м. 16.41. 650—950 и 32—48 м. 16.42. 700—1000 и 35—50 м. 16.43. 250—600 и 12,5—30 м. 16.44. > 10 ; 7,7, 2,2 км. 16.45. 2,9 км. 16.46. 1; 50; 1100; $1,7 \cdot 10^4$; $> 10^5$ кд. 16.47. 20; $4 \cdot 10^3$; $2,5 \cdot 10^5$; $2 \cdot 10^7$; $5 \cdot 10^{11}$ кд; $S_{\text{пос}} = 2$ и 3 км. 16.48. ≈ 2100 , $\approx 5 \cdot 10^4$, $\approx 7 \cdot 10^5$, $> 10^7$, $> 10^7$ кд; $S_{\text{пос}} = 2$ и 3 км. 16.49. $\approx 2,5 \cdot 10^4$, $4 \cdot 10^8$, $2,5 \cdot 10^8$, $\approx 10^{11}$, $6 \cdot 10^{15}$ кд; $S_{\text{пос}} > 1,5 \text{ км}$. 16.50. 3500 раз; 3500 раз.

Глава 17

17.1. 17.1. $31^{\circ}12'25''$; $-1^{\circ}31'$. 17.2. $-1^{\circ}57'$. 17.3. $70^{\circ}16'44''$. 17.4. 32 мин. 17.5. 22 мин. 17.6. 2 ч 56 мин. 17.7. $7^{\circ}31'$. 17.8. 4', 7 и $7,4$. 17.9. Низкая температура, высокое давление, конец полярной ночи.
17.2. 17.10. На Земле в 1,92 раза; на Юпитере в 3,36 раза; бесконечно большая. 17.11. 4,9 км. 17.12. 246 км; 9 баллов. 17.13. 1320 км. 17.14. 1080 км. 17.15. 1730 и 1800 км. 17.16. 60 и 65 м. 17.17. 13,7 км; 14'. 17.18. 36,2 и 38,7 км.

Глава 18

18.1. 18.1. 57 мкм. 18.2. 23,5 и 17,0 мкм; испаряются. 18.3. 1,5 и 1,8 мкм. 18.4. От 0,645 до 0,740 мкм. 18.5. $0^{\circ}10'$. 18.6. 7 мкм.
18.2. 18.7. $50^{\circ}18'$; $53^{\circ}30'$; $53^{\circ}30'$. 18.8. $42^{\circ}38'$; $40^{\circ}40'$; $42^{\circ}38'$. 18.9. $30^{\circ}18'$ и $22^{\circ}39'$; нет; вторую при $h_{\odot} < 53^{\circ}30'$, первую при $h_{\odot} < 42^{\circ}38'$. 18.10. $1^{\circ}58'$; $2^{\circ}30'$; $3^{\circ}12'$; $3^{\circ}44'$; $7^{\circ}40'$. 18.12. а) 3, 4, 7, 8, 11, 12 и т. д. б) 1, 2, 5, 6, 9, 10 и т. д. 18.13. $42^{\circ}54'$; $38^{\circ}00'$; $5^{\circ}26'$.
18.3. 18.14. $21^{\circ}34'$. 18.15. $21^{\circ}34'$; $22^{\circ}22'$; $1^{\circ}20'$; красный внутренний. 18.16. $45^{\circ}06'$. 18.17. $45^{\circ}06'$; $47^{\circ}16'$; $2^{\circ}42'$; красный внутренний. 18.18. $22^{\circ}16'$ ($46^{\circ}56'$). 18.19. $43^{\circ}24'$; $21^{\circ}36'$.

Глава 19

- 19.1. $2,6 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$; $2,6 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$. 19.2. $\approx 26 \text{ мин}$. 19.3. $33 \text{ с} - 16 \text{ мин}$. 19.4. $5,2 \text{ ч}$. 19.5. $92\,600 \text{ ч}$. 19.6. $1,4 \cdot 10^{-14}$; $1,2 \cdot 10^{-14}$; $2,6 \cdot 10^{-14} \text{ См}$; $3,8 \cdot 10^{13} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; 13,2 раза. 19.7. $1,543\,84 \cdot 10^{-14}$; $1,54 \cdot 10^{-14}$; $3,84 \cdot 10^{-17} \text{ См}$; 99,8 и 0,2 %. 19.8. Уменьшится на 11,2 %. 19.9. $7,5 \cdot 10^{-16} \text{ См}$; $9,4 \cdot 10^{-14} \text{ См}$. 19.10. $2,9 \cdot 10^7$ и $1,5 \cdot 10^7 \text{ м}^{-2}$; $4,6 \cdot 10^{-12}$ и $2,4 \cdot 10^{-12} \text{ Кл/м}^2$. 19.11. 1:4000. 19.12. $3,0 \cdot 10^5 \text{ см}^2/(\text{с} \cdot \text{В})$. 19.13. $0,35 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. 19.14. $2,74 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$. 19.15. 31,2 мин. 19.16. 2,05 сут. 19.17. $4,48 \cdot 10^{-10} \text{ См}$; меньше, чем у воды, в $74 \cdot 10^9$ раз. 19.18. $3 \cdot 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. 19.19. 240 Ом. 19.20. 460 с. 19.21. 400; $2,4 \cdot 10^{-5} \text{ с}$. 19.22. 3,4 и $4,6 \text{ см/с}$. 19.23. $5 \cdot 10^4 \text{ В/м}$. 19.24. $5 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$. 19.25. В $1,6 \cdot 10^4$ раз. 19.26. 53 и 72 м; 0,8 см.
- 19.2. 19.27. $4,9 \cdot 10^7 \text{ м/с}$; $1,37 \cdot 10^5$ пар ионов; $4,2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$. 19.28. $2,09 \cdot 10^7 \text{ м/с}$; $2,6 \cdot 10^5$ пар ионов; $4,4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$. 19.29. 0,9987; 1976 %; $2,78 \cdot 10^5$ пар ионов; 93 см $^{-1}$. 19.30. 0,23; 2,9 %; 420 пар ионов; $2,1 \text{ см}^{-1}$. 19.31. 10,4 см; 1,0027; 0,0735 с; $2,2 \cdot 10^7 \text{ м/с}$. 19.32. 3,8 сут, 1 мин, 4 с; радон. 19.33. 10^9 и $2,7 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$. 19.34. $4,5 \cdot 10^{-3}$ и $20 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. 19.35. 9,3 и 3,8 мин; 3,7 мин и 4,2 с. 19.36. 0,874 с; $2,6 \cdot 10^8 \text{ м/с}$; увеличивается в 2,06 раза. 19.37. 0,999 99 с; $3,0 \cdot 10^8 \text{ м/с}$; увеличивается в 10 раз. 19.38. 660 м; $3,4 \cdot 10^{-8} \text{ с}$; 10,2 км; возможно, что успеет. 19.39. 660 м; $2,04 \cdot 10^{-2} \text{ с}$; 6120 км; в 9200 раз. 19.40. На 0,5 %; в 10 раз; 36 м. 19.41. В 30 раз. 19.42. а), б), в) увеличиваются в 10 раз; г) уменьшается в 10 раз. 19.43. 0,100; 0,088; 0,079; 0,085; 0,080; 0,090; 0,133 мкм. 19.44. $2,07 \cdot 10^3$; $2,18 \cdot 10^3$; $2,33 \cdot 10^3$; $2,25 \cdot 10^3$; $2,32 \cdot 10^3$; $2,18 \cdot 10^3$; $1,80 \cdot 10^3 \text{ км/с}$. 19.45. Уменьшается в 42,8 раза. 19.46. От $1,4 \cdot 10^6$ до $2,8 \cdot 10^6 \text{ м/с}$. 19.47. Протоны $(1-4) \cdot 10^4 \text{ эВ}$, электроны $(5,6-22) \cdot 10^2 \text{ эВ}$.
- 19.3. 19.48. 3,6 ч. 19.49. 22,9 ч. 19.50. 94 и 56 %. 19.51. $\sqrt{171} \text{ км}$; $2,0 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$; область F; 75 м; $> 75 \text{ м}$; $< 75 \text{ м}$. 19.52. $4,5 \cdot 10^5$ и $5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$; 50 и 472 м. 19.53. $9,98 \cdot 10^4$ и $6,96 \cdot 10^5 \text{ Гц}$; 3340 и 430 м. 19.54. В 10^6 раз. 19.55. В $2,5 \cdot 10^9$ раз. 19.56. $4,7 \cdot 10^6$ раз. 19.57. а) $9,0 \cdot 10^6 \text{ Гц}$; $> 33 \text{ м}$; б) $1,03 \times 10^7 \text{ Гц}$; $> 29 \text{ м}$; в) $1,27 \cdot 10^7 \text{ Гц}$; $> 24 \text{ м}$. 19.58. $1,98 \cdot 10^9$; $1,45 \cdot 10^9$ и $0,99 \cdot 10^9 \text{ м}^{-2}$. 19.59. а) $c \gg c_0$; б) $c = 2c_0$; в) $c = 1,4c_0$; фазовые. 19.60. $2,5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$; от 1200 до 800 км. 19.61. $4,5 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$. 19.62. $2,2 \cdot 10^{-12}$; 1,2 %; 1 ионизированная молекула на 10^{18} нейтральных; 1 ионизированная молекула на 100 нейтральных. 19.63. 27 500 раз. 19.64. 13,4 ч. 19.65. 12 ч 06 мин 40 с.

Глава 20

- 20.1. 20.1. $-1,15 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2$; $-570\,000 \text{ Кл}$. 20.2. 126, 126 и 123 В/м. 20.3. $3,24 \cdot 10^{-13}$; $0,295 \cdot 10^{-13}$; $0,148 \cdot 10^{-13} \text{ Кл/м}^2$; 2; 0,18; 0,09 положительных ионов в 1 см^2 . 20.4. $1,1 \cdot 10^{-9} \text{ Кл над } 1 \text{ м}^2$; $6,81 \cdot 10^9$ положительных ионов в столбе 6-9 км; $Q_a = -Q_3$; 20.6. 0,60 и $0,81 \text{ км}^{-1}$. 20.7. $1,46 \cdot 10^{-9}$ и $1,02 \cdot 10^{-9} \text{ Кл/м}^2$. 20.8. От $0,87 \cdot 10^{-14}$ до $1,2 \cdot 10^{-14} \text{ А/м}^2$; от 3,1 до 4,3 А. 20.9. 86 500 и 1230 В/м. 20.10. 65 км. 20.11. 12 800 и 2070 В/м. 20.12. 2; 8; 10,6 В/м. 20.13. Сила тяжести в 3400 раз больше. 20.14. $2,3 \cdot 10^9 \text{ Дж}$. 20.15. Уменьшается в 12,25 раза. 20.16. $3,2 \cdot 10^5 \text{ В/м}$. 20.17. $\approx 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ В/м}$. 20.18. $>$ в 5,2 раза. 20.19. $<$ в 22 раза.
- 20.2. 20.20. $>$ в 5,2 раза. 20.21. $<$ в 2,2 раза; $5,04 \cdot 10^6 \text{ Кл/ч}$; $1,21 \cdot 10^8 \text{ Кл/сут}$; 6,8 мин. 20.22. 187,5 Ом. 20.23. 226 и 113 мкФ. 20.24. 56,5 и 28,2 Кл. 20.25. $1,6 \cdot 10^{-13} \text{ А/м}^2$; 17,2 раза. 20.26. $4,5 \cdot 10^{-6}$; $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ А/м}^2$; больше в $1,6 \cdot 10^4$ и $1,6 \cdot 10^8$ раз; 3,5 и 350 А. 20.27. $8,9 \cdot 10^{-14} \text{ См}$. 20.28. $1,78 \times 10^{-12} \text{ А/м}^2$. 20.29. $2,76 \cdot 10^{-6} \text{ А}$. 20.30. Больше в 4200 раз. 20.31. $2,8 \times 10^{-6} \text{ А/м}^2$; $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ А}$. 20.32. $1,3 \cdot 10^6 \text{ Кл}$; 20 А; $4 \cdot 10^{-10} \text{ А/м}^2$; больше в 150 раз; могут. 20.33. 518 А; $1,02 \cdot 10^{-12} \text{ А/м}^2$; 518 Кл/с; $1,86 \cdot 10^6 \text{ Кл/ч}$; $4,48 \cdot 10^7 \text{ Кл/сут}$. 20.34. $1,2 \cdot 10^{11}$; $3,7 \cdot 10^{10} \text{ кВт}$; мощность молниевых раз-

рядов: в $3 \cdot 10^4$ раз больше, в $2 \cdot 10^3$ раз больше. 20.35. 1 ч 23 мин. 20.36. 10^{-9} А/м². 20.37. 475 м²/с. 20.38. 816 В. 20.41. 5,6 мкс. 20.42. $\approx 0,64$ Кл. 20.43. Отношение составляющих 0,18. 20.44. 1:30 000.

Глава 21

21.1 21.1. От 17 мм до 20 м. 21.2. От 14,4 см до 7,5 м. 21.3. 1030 кг/м³. 21.4. В гелии в 5,7 раза больше; в гелии в 2,69 раза больше, а в ксеноне в 2,13 раза меньше, чем в воздухе. 21.5. 3700 м/с. 21.6. 5300 м/с. 21.7 3,7; 5,2 и 1,5 м; больше, чем в воздухе: в медном в 11,2 раза, в стальном в 16,0 раз, в воде в 4,5 раза. 21.8. 3160:1. 21.9. 50 дБ. 21.10. 1:10.000. 21.11. 1 фон; $2,24 \cdot 10^{-6}$ Н/м². 21.12. 130 дБ. 21.13. $1,26 \cdot 10^{-12}$ Вт/м²; 1дБ. 21.14. 10 фон. 21.15. 20 дБ. 21.16. 10 фон, 10 дБ; 20 фон, 20 дБ; 40 фон, 40 дБ; 60 фон, 60 дБ. 21.17. 3,16; 10; 100; 1000 раз. 21.18. 20 фон, 10 раз. 21.2. 21.19. На 64 м/с; 22 %. 21.20. От 2,6 до 0,2 К. 21.21. 227 К. 21.22. 12 ч 00 мин 16 с, 12 ч 00 мин 15,9 с, 12 ч 00 мин 15,2 с. 21.23. 8°41'. 21.24. 1377 м. 21.25. 1261 м. 21.26. 2778 и 855 м/с. 21.27. Летом больше на 86 км/ч. 21.28. 177 км/ч. 21.29. 127 км. 21.30. 28 км. 21.31. $\approx 0,12$ %. 21.32. 13°18'. 21.33. 1724 м; 15,6 км.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Начальные сведения об основных метеорологических величинах	5
1.1. Температура воздуха	—
1.2. Атмосферное давление	6
1.3. Влажность воздуха	7
Глава 2. Основы статики атмосферы	13
2.1. Уравнение состояния сухого воздуха	—
2.2. Виртуальная температура. Уравнение состояния влажного воздуха	14
2.3. Вертикальный градиент давления и барическая ступень	16
2.4. Однородная атмосфера	18
2.5. Изотермическая атмосфера	—
2.6. Политропная атмосфера	19
2.7. Реальная атмосфера	20
Глава 3. Турбулентное перемешивание в приземном слое атмосферы	22
3.1. Некоторые методы определения коэффициента турбулентности	—
3.2. Факторы турбулентности	26
Глава 4. Основы термодинамики атмосферы	27
4.1. Адиабатические изменения состояния воздуха с ненасыщенным паром (сухоадиабатические процессы). Потенциальная температура	—
4.2. Ускорение адиабатически перемещающегося воздуха с ненасыщенным паром. Уровень выравнивания температур	30
4.3. Уровень конденсации	32
4.4. Адиабатические изменения состояния воздуха с насыщенным паром (влажноадиабатические процессы)	33
4.5. Определение гигрометрических характеристик по диаграмме и их изменение при вертикальных перемещениях воздуха	35
4.6. Некоторые термодинамические температуры	37
4.7. Стратификация слоев атмосферы	38
Глава 5. Лучистая энергия в атмосфере и на земной поверхности	40
5.1. Солнечная радиация на верхней границе атмосферы	—
5.2. Ослабление солнечной радиации при ее прохождении через атмосферу	44
5.3. Приход солнечной радиации на земную поверхность	46
5.4. Отражение и поглощение солнечной радиации деятельным слоем	53
5.5. Излучение деятельного слоя	55
5.6. Встречное излучение	57
5.7. Эффективное излучение и длинноволновый радиационный баланс	59
5.8. Радиационный баланс деятельного слоя	61
5.9. Радиационный баланс атмосферы и системы деятельный слой—атмосфера	65
Глава 6. Тепловой режим почвы и водоемов	67
6.1. Изменения температуры почвы и водоемов во времени и в пространстве	—
6.2. Теплофизические характеристики почвы и водоемов	73

6.3. Теоретические законы распространения колебаний температуры в почве	77
6.4. Тепловой поток в почве	80
Глава 7. Тепловой режим нижнего слоя атмосферы	82
7.1. Изменения температуры воздуха во времени и в пространстве	—
7.2. Факторы, определяющие тепловой режим нижнего слоя атмосферы	90
Глава 8. Водяной пар в атмосфере	94
8.1. Суточный и годовой ход характеристик влажности воздуха	—
8.2. Распределение влажности воздуха с высотой в тропосфере	97
Глава 9. Фазовые переходы воды в атмосфере	101
9.1. Факторы, влияющие на фазовые переходы воды, связанные со свойствами испаряющей среды	—
9.2. Методы расчета испарения с поверхности суши и водоемов	108
9.3. Образование и рост зародышей жидкой и твердой фаз воды	118
Глава 10. Облака и туманы	123
10.1. Микрофизические характеристики облаков и туманов	—
10.2. Нижняя граница облаков	130
10.3. Процессы образования тумана. Видимость в тумане	132
Глава 11. Осадки	135
11.1. Скорость падения капель и ледяных частиц в атмосфере	—
11.2. Процессы укрупнения облачных элементов и образование осадков	136
11.3. Испарение облачных и дождевых капель	143
Глава 12. Основы динамики атмосферы	146
12.1. Барическое поле и барический градиент	—
12.2. Силы, действующие при горизонтальном движении воздуха	148
12.3. Градиентный ветер	150
12.4. Движение воздуха при наличии трения	151
Глава 13. Распространение оптического излучения в атмосфере	153
13.1. Оптические характеристики атмосферы	—
13.2. Основные фотометрические (световые) величины и единицы их измерения	158
13.3. Молекулярное рассеяние	163
13.4. Аэрозольное ослабление	166
13.5. Лазерное зондирование атмосферы	170
Глава 14. Яркость и поляризация света, рассеянного атмосферой	174
14.1. Яркость небесного свода	—
14.2. Поляризация света, рассеянного атмосферой. Форма небесного свода	180
Глава 15. Освещенность земной поверхности	182
15.1. Освещенность земной поверхности днем и ночью	—
15.2. Сумерки. Явления, наблюдаемые во время сумерек	185
Глава 16. Дальность видимости далеких предметов и огней	189
16.1. Пороги световой чувствительности глаза, влияющие на видимость предметов	—

16.2. Метеорологическая дальность видимости	190
16.3. Дальность видимости огней	193
16.4. Посадочная дальность видимости	195
Глава 17. Рефракция света в атмосфере	198
17.1. Астрономическая рефракция	—
17.2. Земная рефракция	200
Глава 18. Оптические явления в облаках	203
18.1. Венцы	—
18.2. Радуги	205
18.3. Гало	207
Глава 19. Электрические свойства атмосферы	208
19.1. Ионы в атмосфере. Ионная проводимость воздуха	—
19.2. Ионизаторы атмосферы	213
19.3. Ионосфера	217
Глава 20. Электрическое поле и токи в атмосфере	221
20.1. Основные соотношения для электрического поля тропосферы	—
20.2. Электрические токи в атмосфере. Грозовые разряды	224
Глава 21. Элементы атмосферной акустики	229
21.1. Характеристики звуковых колебаний	—
21.2. Распространение звуковых колебаний в атмосфере	232
Приложения 1—41	236
Ответы к задачам	297

Александр Григорьевич Бройдо
Софья Васильевна Зверева
Анна Васильевна Курбатова
Тамара Васильевна Ушакова

ЗАДАЧНИК ПО ОБЩЕЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

Редактор О. В. Лайина. Художник Е. Е. Городная. Художественный редактор Б. А. Денисовский. Технический редактор М. И. Брайнина. Корректор И. А. Динабург

ИБ № 1566. Сдано в набор 19.08.83. Подписано в печать 12.01.84. М-16307. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 1. Литературная гарнитура. Печать высокая. Печ. л. 19,5. Кр.-отт. 19,5. Уч.-изд. л. 22,04. Тираж 4600 экз. Индекс МОЛ-27. Заказ № 332. Цена 1 руб. 20 коп. Гидрометеонздат. 199053. Ленинград, 2-я линия, д. 23.

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли. 190000, г. Ленинград, Прачечный переулок, 6.