

КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Н.В. ИСМАГИЛОВ, А.А. НИКОЛАЕВ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К
ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ ПО КУРСУ
«МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ»**

Казань – 2019

УДК 551.5
ББК 26.23
И85

Рекомендовано к изданию
Учебно-методической комиссией ИЭиП
(протокол № 8 от 20 ноября 2019 года)

Рецензенты:

кандидат географических наук, доцент **К.М. Шанталинский**;
кандидат географических наук, доцент **В.В. Гурьянов**

Исмагилов Н.В.

И85 Методические указания к практическим занятиям по курсу «Метеорология и климатология» / Исмагилов Н.В., Николаев А.А. – Казань: КФУ, 2019. – 71 с.

Издание содержит информацию, необходимую студентам для выполнения практических работ по курсу «Метеорология и климатология»

УДК 551.5
ББК 26.23

© **Исмагилов Н.В., Николаев А.А., 2019**
© **Казанский университет, 2019**

Оглавление

1. НАЧАЛЬНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОСНОВНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИНАХ.....	5
1.1. Температура воздуха.....	5
1.2. Атмосферное давление.....	6
1.3. Влажность воздуха.....	9
1.3.1. Гигрометрические характеристики.....	9
2. ОСНОВЫ СТАТИКИ АТМОСФЕРЫ.....	18
2.1. Уравнение состояния сухого воздуха.....	18
2.3. Вертикальный градиент давления и барическая ступень.....	22
2.4. Однородная атмосфера.....	24
2.5. Изотермическая атмосфера.....	25
2.6. Политропная атмосфера.....	26
2.7. Реальная атмосфера.....	27
3. ЛУЧИСТАЯ ЭНЕРГИЯ В АТМОСФЕРЕ И НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	30
3.1. Солнечная радиация на верхней границе атмосферы.....	30
3.2. Ослабление солнечной радиации при ее прохождении через атмосферу	33
3.3. Приход солнечной радиации на земную поверхность.....	37
3.4. Отражение и поглощение солнечной радиации деятельным слоем ...	44
3.5. Излучение деятельного слоя.....	45

3.6. Встречное излучение	48
3.7. Эффективное излучение и длинноволновый радиационный баланс .	51
3.8. Радиационный баланс деятельного слоя	53
3.9. Радиационный баланс атмосферы и системы.....	58
4. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПОЧВЫ И ВОДОЕМОВ	61
4.1. Изменения температуры почвы и водоемов во времени и в пространстве	61

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 России 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 $x^{\circ}\text{R}$, $y^{\circ}\text{F}$ и $z^{\circ}\text{Re}$ 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?

Температура плавления чистого льда при нормальном давлении	К	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{R}$	$^{\circ}\text{F}$	$^{\circ}\text{Re}$
	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 °С, если старинный уличный термометр показывает —32,0 °R. Выразить в К и в °С температуру 0,0; 14,0; 77,0 и 122,0 °F.

1.4. В рассказе Дж. Лондона «За тех, кто в пути» действие происходит на Аляске при температуре воздуха —74,0 °F. Выразить эту температуру в К и в °С.

1.5. Максимальная температура воздуха на стандартной высоте метеорологических наблюдений (2 м) составила 57,8°С. 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 Вадии-Хальфа (Судан) она достигала даже 61,0°С. Минимальная температура воздуха (-88,3°С) зафиксирована 24 августа 1960 г. на антарктической станции «Восток-1». Выразить эти температуры в К, R, Re.

1.2. Атмосферное давление

Атмосферное давление выражается в гектопаскалях (1 гПа = 10^2 Па = 10^2 Н/м²). 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:

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

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

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

Задачи

1.6. Вывести соотношение между мм рт. ст. и гПа. Определить давление, производимое ртутным столбом высотой 1 мм и с сечением 1 м^2 , находящимся при нормальных условиях, при которых плотность ртути составляет 13 595,1 кг/м^3 . Ускорение свободного падения вблизи земной поверхности принять равным $9,806 \text{ 65 м/с}^2$.

1.7. Выразить нормальное давление в гПа. Вычислить при этом давлении вес и массу столба воздуха с поперечным сечением 1 м^2 , простирающегося от уровня моря до верхней границы атмосферы.

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

Для измерения атмосферного давления в стационарных условиях применяется стационарный чашечный барометр. В его показание (h) вводятся постоянная ($\Delta h_{\text{п}}$) и температурная ($\Delta h_{\text{Т}}$) поправки. Первая является алгебраической суммой инструментальной ($\Delta h_{\text{и}}$) поправки, указываемой в

паспорте прибора, и поправок на приведение к ускорению свободного падения на широте 45° ($\Delta h_{g(\varphi)}$) и на уровне моря ($\Delta h_{g(z)}$):

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

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

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

$$h_c = h + \Delta h_{\text{г}} + \Delta h_T.$$

Задачи

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 $14,8^\circ\text{C}$, его поправка $-0,1^\circ\text{C}$. Вычислить поправки, ввести их в показание барометра и найти давление на станции.

1.11. Показание стационарного чашечного барометра $975,4$ м.бар, постоянная поправка $1,5$ мбар, показание термометра при барометре $9,8^\circ\text{C}$, его поправка $0,1^\circ\text{C}$. 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.

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 [5]. Некоторые значения E приведены также в приложении 2 [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 $-4,2^{\circ}\text{C}$, парциальное давление водяного пара $1,54$ гПа. Найти дефицит насыщения.

1.18. Температура воздуха $12,4^{\circ}\text{C}$, 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 — $8,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 74% . Найти давление насыщенного водяного пара, парциальное давление водяного пара, находящегося в воздухе, и дефицит насыщения.

Точка росы

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

Задачи

1.23. До какой температуры должен изобарически охладиться воздух, чтобы содержащийся в нем пар стал насыщенным, если начальная температура воздуха $13,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ и дефицит насыщения $4,2\text{ гПа}$? 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 $14,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 63% соответственно, а к утру температура понизилась до $6,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, причем атмосферное

давление осталось неизменным? Какой процесс может начаться при таких условиях? 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 °С, точка росы 9,3 °С. 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

$$a = \frac{0.8 e}{1 + \alpha t}, \quad (1.6)$$

где e — парциальное давление водяного пара (гПа), a — объемный коэффициент теплового расширения газов ($\alpha = 1/273,15 = 3,66 \cdot 10^{-3} \text{ (C)}^{-1}$), t — температура воздуха (°С.). На практике a выражается в г/м³ с точностью до десятых.

Задачи

1.26. Температура воздуха 7,2 °С, 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)?

1.27. При температуре $0,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в 1 м^3 воздуха содержится $4,0\text{ г}$ водяного пара. Найти его парциальное давление.

1.28. Найти температуру воздуха, при которой абсолютная влажность ($\text{г}/\text{м}^3$) численно равна парциальному давлению водяного пара (гПа).

1.29. Вычислить массу воды, которая образуется, если сконденсировать весь водяной пар в изолированном помещении площадью 30 м^2 и высотой 3 м , в котором температура воздуха равна $15,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, а относительная влажность — 74% .

1.30. В тропических пустынях температура воздуха иногда поднимается до $45,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (и выше), а относительная влажность при этом уменьшается до 2% . В полярных же районах возможна температура $-40,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (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?

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

Массовая доля водяного пара

Массовая доля водяного пара (S) количество водяного пара в граммах в 1 г влажного воздуха, 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 гПа, атмосферное давление 1000,0 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 °С, давление 974,2 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°С и атмосферном давлении 981,4 гПа. Какое из них чаще встречается в природе? Возможность пересыщения пара в данном случае не учитывать.

1.36. Температура воздуха —7,1 °С, давление 993,9 гПа, массовая доля водяного пара 0,2 ‰. Найти парциальное давление водяного пара, дефицит насыщения, относительную влажность, точку росы и абсолютную влажность.

Массовое отношение водяного пара

Массовое отношение водяного пара (γ) вычисляется по формуле

$$\gamma = 0,622 e / (p - e), \quad (1.8)$$

где e — парциальное давление водяного пара, p — атмосферное давление. Величина γ выражается в долях единицы. В метеорологических задачах γ 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?

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 10,01‰- 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.

Психрометрические таблицы

1.41. Показание сухого термометра (t) стационарного психрометра $21,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, смоченного (t') $15,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, давление на станции $971,1\text{ гПа}$. 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.

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

1.43. Показание сухого термометра стационарного психрометра $-3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, смоченного $-3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$; на батисте вода. Давление $1000,0\text{ гПа}$. 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 $-13,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительная влажность 77% . Найти по Психрометрическим таблицам парциальное давление водяного пара, точку росы и дефицит насыщения.

2. ОСНОВЫ СТАТИКИ АТМОСФЕРЫ

2.1. Уравнение состояния сухого воздуха

Уравнение состояния сухого воздуха в метеорологии обычно записывается в виде

$$\rho_c = \frac{p}{R_c T}, \quad (2.1)$$

где ρ_c — плотность, p — давление (Па), T — температура (K), R_c — удельная газовая постоянная сухого воздуха (приложение 1 [1, 2]). Значения плотности принято выражать в $\text{кг}/\text{м}^3$ с точностью до тысячных.

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

Компонент ...	Азот	Кислород	Аргон	Углекислый	Сумма
Объемная доля, газ %	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 10^{-3}	31,999 10^{-3}	39,948 10^{-3}	44,010 10^{-3}	

Задачи

2.2. Вычислить плотность сухого воздуха при нормальных условиях (температура 0,0 °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?

2.3. Найти объем 1 г сухого воздуха при температуре 15,4 °С 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 м³ при температуре 21,7 °С 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 кг/м³, температура —23,1 °С, а вертикальный градиент температуры 0,65°С/100 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 (К), s — массовая доля водяного пара в долях единицы.

Величина $\Delta T = T_v - T$ — называется виртуальным добавком:

$$\Delta T_v = 0,608 s T \quad (2.4)$$

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 [2]. Соотношение (2.6) рекомендуется использовать только при $t > 0,0$ °С.

Задачи

2.6. Вычислить виртуальную температуру и виртуальный добавок для воздуха, имеющего температуру 7,0 °С, 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 °С. 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 °С), а также плотность влажного воздуха как идеального и как реального газа, если его температура равна 17,5 °С, давление 1000,0 гПа и относительная влажность 50 %. Найти относительное отклонение второго значения плотности от первого.

2.10. Воздух, температура которого составляла 17,5 °С, а относительная влажность 20 %, при давлении 1000,0 гПа прошел над теплой водной поверхностью. При этом его температура повысилась до 24,1 °С, а относительная влажность—до 80%. Давление осталось прежним. Вычислить массу водяного пара, поступившего в 1 м³ воздуха. Найти изменение веса 1 м³ 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

$$G = 3.42 p/T \quad (2.7)$$

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

$$h = \frac{7995}{p} (1 + at) \quad (2.9)$$

где a — объемный коэффициент теплового расширения газов (см. приложение 1 [2]).

Задачи

2.11. Вычислить вертикальный градиент давления на высоте, на которой атмосферное давление равно 1000,0 гПа и температура 0,0 °С. 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°С и давлении 1045,0 гПа (G_0) с его значением на высоте, где

температура равна $-38,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давление $468,7\text{ гПа (Gz)}$. 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 — $990,0\text{ гПа}$. Температура в первом пункте равна $27,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а во втором — $23,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Условно считая, что вертикальный градиент давления не изменяется с высотой, приближенно определить в этих пунктах давление 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 — $1000,0\text{ гПа}$. Средняя температура воздуха у подножия горы в эти месяцы составила соответственно $-13,0$ и $17,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Условно считай, что вертикальный градиент давления не меняется с высотой, вычислить среднее давление в указанные месяцы на вершине горы. Построить схему годового хода давления в высоко-горных районах.

2.15. Вычислить барическую ступень у поверхности Земли при давлении $1000,0\text{ гПа}$ и температурах $-40,0$; $0,0$ и $40,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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 $8,0\text{ гПа/100 м}$.

2.17. Сравнить барическую ступень на высоте, где температура равна $-30,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давление $500,0\text{ гПа (}h_z\text{)}$, с ее значением у поверхности Земли при

температуре $0,0^{\circ}\text{C}$ 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?

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 $0,0^{\circ}\text{C}$. Бывает ли в действительности на уровне моря такое давление? 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 $10,0^{\circ}\text{C}$.

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?

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

2.28. Найти давление на высотах 5 и 10 км в изотермической атмосфере для случаев, когда ее температура составляет $-15,0$ и $15,0$ °С, если давление у земной поверхности равно 1000,0 гПа.

2.29. На метеорологической станции, находящейся на высоте 400 м над уровнем моря, температура воздуха $0,0$ °С, 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.

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.

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 $3,42^{\circ}\text{C}/100$ м. Объяснить полученный результат, сравнив его с ответами к задачам 2.23 и 2.27.

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):

$$p_2 = p_1 e^{-0.0001251 \frac{(1-a \cos 2\varphi)(1-bz_{cp})}{(1-\alpha t_{cp}) \left[1 + \beta \left(\frac{e}{p} \right)_{cp} \right]} (z_2 - z_1)},$$

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:

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

Задачи

2.36. Принимая, что летом в низких широтах над сушей средняя по высоте температура тропосферы и нижней стратосферы несущественно отличается от 0,0 °С, 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.°С/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 °С, давление 1048,5 гПа, а средний вертикальный градиент температуры до уровня вершины горы составляет 0,5°С/100 м.

2.39. На станции, лежащей на широте 60° и высоте 552 м над уровнем моря, давление равно 952,4 гПа, температура $18,4^\circ\text{C}$, 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 $0,65^\circ\text{C}/100\text{ м}$.

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.

3. ЛУЧИСТАЯ ЭНЕРГИЯ В АТМОСФЕРЕ И НА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

3.1. Солнечная радиация на верхней границе атмосферы

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

а) закон смещения (закон Вина)

$$\lambda_{\max} T = 2898, \quad (3.1)$$

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

б) закон Стефана—Больцмана

$$E = \sigma T^4 \quad (3.2)$$

где E — энергетическая светимость Солнца ($\text{Вт}/\text{м}^2$), σ — постоянная Стефана—Больцмана (приложение 1 [2]), T — радиационная температура Солнца (К).

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

$$S' = S_0 \sin h_{\odot} \quad (3.3)$$

где S_0 — солнечная постоянная (приложение 1 [2]), h_{\odot} — высота Солнца в момент, для которого вычисляется S' . Значения S_0 принято выражать в $\text{кВт}/\text{м}^2$ с точностью до сотых. Значение h_{\odot} на широте φ в момент, когда часовой угол Солнца равен τ_{\odot} , определяется по формуле

$$\sin h_{\odot} = \sin \varphi \sin \delta_{\odot} + \cos \varphi \cos \delta_{\odot} \cos \tau_{\odot}, \quad (3.4)$$

где δ_{\odot} — склонение Солнца в истинный полдень данных суток. При решении задач можно использовать значения δ для 1984 г., приведенные в приложении 5 [2]. Из (3.4) следует, что в истинный полдень, когда $\tau_{\odot} = 0,0^\circ$,

$$h = 90 - \varphi + \delta. \quad (3.5)$$

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

$$\sum_{\text{сут}} S_0^{\wedge} = \frac{S_0 t}{\pi} (\tau_{\odot,0} \sin \varphi \sin \delta_{\odot} + \cos \varphi \cos \delta_{\odot} \cos \tau_{\odot,0}), \quad (3.6)$$

где t — период суточного вращения Земли (приложение 1), $\tau_{\odot,0}$ — часовой угол Солнца в момент восхода ($-\tau_{\odot,0}$) или захода ($+\tau_{\odot,0}$), определяемый из соотношения причем в формуле (3.6) в первом слагаемом $\tau_{\odot,0}$ выражено в радианах, а во втором — в градусной мере. На широтах более $66,5^{\circ}$ в период полярного дня $\tau_{\odot,0} = 180^{\circ}$. Величину (3.6) иногда для краткости называют теоретической суточной суммой солнечной радиации. Значения (3.6) принято выражать в МДж/м^2 с точностью до сотых.

При решении ряда задач необходимо знать моменты восхода и захода Солнца в часах и минутах. Для их нахождения следует значение $\tau_{\odot,0}$, полученное по формуле (3.7), перевести из градусной меры в единицы времени ($1^{\circ} = 4$ мин, $1' = 4$ с).

$$\cos \tau_{\odot,0} = -\tan \varphi \tan \delta_{\odot}, \quad (3.7)$$

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

$$\tau_{\odot,0,\Gamma} = 12 \text{ ч } 00 \text{ мин } 00 \text{ с} \pm \tau_{\odot,0},$$

где знак минус соответствует моменту восхода, а знак плюс — моменту захода.

Задачи

3.1. При экстраполяции наземных, ракетных и спутниковых измерений на верхнюю границу атмосферы получено следующее распределение спектральной плотности энергетической освещенности солнечной радиацией, перпендикулярной к лучам поверхности ($S_{\lambda 0}$, кВт/(м² мкм)) по длинам волн (λ , мкм):

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

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.

3.2. За пределами атмосферы видимая часть солнечного спектра соответствует излучению черного тела с яркостной температурой $T = 6116$ К.

Вычислить длину волны λ_{\max} , имеющей наибольшую энергию. Согласуется ли результат с полученным в предыдущей задаче? Какая из величин, фигурирующих в задаче (T или λ_{\max}), в действительности находится из измерений и экстраполяцией за пределы атмосферы, а какая вычисляется?

3.3. 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

3.4. 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.

3.6. 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 $S_0(h)$.

3.7. Вычислить теоретические суточные суммы солнечной радиации 21 июня на экваторе и 30, 60 и 90° с. ш. Построить график зависимости от широты. Чем объясняется найденное широтное изменение этой величины в заданный день? Сохранится ли оно в другое время года?

3.2. 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

$$S = S_0 P^m \quad (3.8)$$

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 помещены в таблице Бемпорада (приложение 6 [2]). При $h > 30^\circ$ они могут быть найдены также по формуле

$$m = 1/\sin h \quad (3.9)$$

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

$$P = (S/S_0)^{1/m}. \quad (3.10)$$

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 от Земли до Солнца (приложение 7 [2]), после чего вычисляется

$$S_p = S + \Delta S; \quad (3.11)$$

б) по S_p и высоте Солнца S_p приводится к $h = 30^\circ$ ($m = 2$), т. е. определяется S_{p30} (приложение 8 [2]);

в) по S_{p30} находится приведенный к $m = 2$ коэффициент прозрачности P_2 (приложение 9 [2]).

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

$$c = \frac{S_0 - S}{S_m} \quad (3.12)$$

и фактор мутности

$$T = \lg P / \lg P_i, \quad (3.13)$$

где P , — 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	0,945

Значения T определяются с точностью до сотых.

Ослабление радиации, вызванное только молекулярным рассеянием, характеризуется коэффициентом молекулярного рассеяния, представляющим собою долю поступившей радиации, рассеянную единичным объемом воздуха. Для любой длины волны

$$\sigma_m \sim 1/\lambda^4 \quad (3.14)$$

Задачи

3.10. Найти оптические массы атмосферы, проходимые солнечными лучами при всех высотах Солнца, кратных 10° . Построить график функции m

(h). Объяснить причины найденного характера данной зависимости. Использовать приложение 6 [2].

3.11. 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?

3.12. При высоте Солнца 30° прямая радиация на перпендикулярную поверхность составила 0,72 кВт/м², а при высоте Солнца 55° — 0,82 кВт/м². 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 ?

3.13. В некотором пункте в один и тот же день дважды измерена прямая радиация на перпендикулярную поверхность: при высоте Солнца 90° она составила 0,98 кВт/м², а при высоте Солнца 30° — 0,70 кВт/м². 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)?

3.14. 18 сентября при высоте Солнца 42° прямая радиация на перпендикулярную поверхность составила 0,63 кВт/м². Найти коэффициент прозрачности при оптической массе, равной 2.

3.15. 1 сентября при высоте Солнца 30° прямая радиация на перпендикулярную поверхность составляла 0,68 кВт/м², а при 10° — 0,36 кВт/м². 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?

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

3.17. 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?

3.3. Приход солнечной радиации на земную поверхность

Прямая радиация на перпендикулярную поверхность (S) измеряется непосредственно или вычисляется по формуле (3.8).

Энергетическая освещенность прямой солнечной радиацией горизонтальной поверхности (S') также измеряется непосредственно или вычисляется по формуле

$$S' = S \sin h. \quad (3.15)$$

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

Энергетическая освещенность прямой солнечной радиацией поверхности, наклоненной под углом к горизонту и ориентированной в любую сторону (S_n)(прямая радиация на наклонную поверхность), составляет

$$S_n = S [\sin h_{\odot} \cos \alpha + \cos h_{\odot} \sin \alpha \cos (\psi_{\odot} - \psi_n)] \quad (3.16)$$

где ψ_{\odot} — азимут Солнца, ψ_n — азимут поверхности.

Значения ψ_{\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.

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

$$Q = S' + D. \quad (3.17)$$

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. Все эти суммы выражают в МДж/м², часовые и суточные с точностью до сотых.

Действительные суммы (Σ_d) суммарной радиации за те или иные интервалы можно приближенно определить по теоретически рассчитанным возможным ее суммам (Σ_v) с помощью, например, формулы С. И. Савинова

$$\Sigma_d(S + D) = [\Sigma_v (S' + D)] (1 - C n), \quad (3.18)$$

где C — облачный коэффициент, n — среднее количество облаков за интервал, для которого вычисляется $\Sigma_d (S' + D)$.

Задачи

3.19. 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?

3.20. Вычислить прямую радиацию на перпендикулярную поверхность на 56° с.ш. 15 июля при высотах Солнца $10, 20, 30^\circ$ 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.

3.21. 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.

3.23. 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).

3.24. Средние часовые действительные суммы прямой радиации на перпендикулярную поверхность (МДж/м^2) 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

3.25. 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?

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

Месяц	II	IV	VI	VIII	X	XII
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?

3.27. Прямая радиация на перпендикулярную поверхность при высоте Солнца 34° составила $0,78$ кВт/м². Вычислить прямую радиацию на горизонтальную поверхность. Всегда ли между этими величинами сохраняется такое соотношение?

3.28. 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?

3.29. 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?

3.30. 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?

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

3.32. 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 $0,700$. 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?

3.33. 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	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

3.37. 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?

3.40. 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 ?

3.42. 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?

5.44. 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.

3.4. Отражение и поглощение солнечной радиации деятельным слоем

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

$$A = Q_{\text{отр}}/Q, \quad (3.19)$$

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

$$Q_{\text{п}} = Q(1 - A). \quad (3.20)$$

Эту величину называют также остаточной солнечной радиацией или коротковолновым радиационным балансом. В этих случаях ее обозначают $B_{\text{к}}$.

Задачи

3.46. Альbedo свежеспаханного 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?

3.47. 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.

3.48. Средние значения альbedo поверхности Черного моря летом:

h	20	30	40	50	60
A%	10	7	6	6	5

Построить график функции $A(h)$ и указать причину уменьшения альbedo моря при увеличении высоты Солнца (волнением моря пренебречь).

3.49. 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 $0,07 \text{ кВт/м}^2$.

3.5. Излучение деятельного слоя

Энергетическая светимость подстилающей поверхности измеряется непосредственно или вычисляется по формуле

$$E_C = \varepsilon \sigma T_0^4, \quad (3.21)$$

где ε - коэффициент теплового излучения (коэффициент серости); σ - постоянная Стефана - Больцмана ($\sigma = 5.67032 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4)$), T_0 - температура

подстилающей поверхности (К).

По В. Л. Гаевскому, значения ε для некоторых видов подстилающей поверхности составляют:

<i>Вид подстилающей поверхности</i>		<i>Вид подстилающей поверхности</i>	
<i>Песок сухой</i>	<i>0.949</i>	<i>Торф сырой</i>	<i>0.983</i>
<i>Песок влажный</i>	<i>0.962</i>	<i>Трава густая</i>	<i>0.986</i>
<i>Почва сухая</i>	<i>0.954</i>	<i>Трава редкая</i>	<i>0.975</i>
<i>Почва влажная</i>	<i>0.968</i>	<i>Снег чистый</i>	<i>0.986</i>
<i>Торф сухой</i>	<i>0.970</i>	<i>Вода</i>	<i>0.960</i>

Эти же значения ε характеризуют поглощательные свойства подстилающей поверхности по отношению к падающей на него длинноволновой радиации. Произведение σT^4 при разных температурах затабулировано (приложение 10 [2]).

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.

Задачи

3.51. Средняя за год для всей планеты в целом температура деятельного слоя Земли составляет около 15,0 °С, 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. Каким участкам длин волн соответствуют метеорологические термины «коротковолновая радиация» и «длинноволновая радиация»?

3.52. 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?

3.53. 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?

3.54. 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?

3.56. 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?

3.57. 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°С	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.

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

Месяц	II	IV	VI	VIII	X	XII
t°С	-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 — редкой травой. Построить график годового хода E_c и указать возможные причины годового изменения этой величины.

3.6. Встречное излучение

Встречное излучение атмосферы. Энергетическая освещенность подстилающей поверхности встречным излучением при ясном небе измеряется непосредственно или вычисляется, например, по формуле Брента

$$E_A = \sigma T_A^4 (D + G \sqrt{e}), \quad (3.22)$$

где T_A - температура воздуха (К) на высоте 2 м над земной поверхностью, e - парциальное давление водяного пара (гПа) на той же высоте, D и G - постоянные ($D = 0.61$; $G = 0.05$).

В настоящем задачнике будем для краткости величину E_A называть просто встречным излучением.

Поглощенная и отраженная деятельным слоем части встречного излучения определяются из соотношений

$$E_{A,n} = \varepsilon E_A, \quad E_{A,отр} = (1 - \varepsilon) E_A, \quad (3.23)$$

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

Задачи

3.60. 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 3.1, 3.2 и 3.51. Почему допущение, принятое в задаче, является условным? Следует ли, используя метеорологические термины, относить атмосферное излучение к коротковолновой или к длинноволновой радиации?

3.61. 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?

3.62. 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?

3.63. 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?

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

	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 .

3.65. 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?

3.7. Эффективное излучение и длинноволновый радиационный баланс

Эффективное излучение подстилающей поверхности определяется соотношением

$$E_{\text{Э}} = E_{\text{С}} - \varepsilon E_{\text{А.}} \quad (3.24)$$

При подстановке (3.21) и (3.22) в (3.24) получается полная формула эффективного излучения

$$E_{\text{Э}} = \varepsilon [\sigma T_0^4 - \sigma T_{\text{А}}^4 (D + G \sqrt{e})] \quad (3.25)$$

Эффективное излучение при наличии облачности может быть представлено в виде

$$E_{\text{Э,о}} = E_{\text{Э,я}} (1 - C_n), \quad (3.26)$$

где $E_{\text{Э,я}}$ - эффективное излучение при ясном небе, n - количество облаков в баллах, C - эмпирический облачный коэффициент ($C_{\text{ср}} = 0.076$). Коэффициент C различается для облаков разных ярусов, поэтому более точным является соотношение

$$E_{\text{Э,о}} = E_{\text{Э,я}} (1 - C_{\text{Н}}n_{\text{Н}} - C_{\text{С}}n_{\text{С}} - C_{\text{В}}n_{\text{В}}), \quad (3.27)$$

где $n_{\text{Н}}, n_{\text{С}}, n_{\text{В}}$ - количество облаков нижнего, среднего и верхнего ярусов в баллах, $C_{\text{Н}}, C_{\text{С}}, C_{\text{В}}$ - соответствующие облачные коэффициенты (0.076, 0.052, 0.022).

Задачи

3.66. 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?

3.67. 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?

3.68. 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?

3.69. 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 гПа и наблюдается 4 балла облаков среднего и 5 баллов облаков нижнего яруса.

3.70. М.Е. Берлянд и Т.Г. Берлянд установили, что в холодный период коэффициент C_E севернее 60° с.ш. составляет 0,090, а в поясе $50-40^{\circ}$ 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.

3.8. Радиационный баланс деятельного слоя

Радиационный баланс подстилающей поверхности, называемый также «остаточной радиацией», характеризуется соотношением

$$R = B_K + B_D = (S' + D)(1 - A) - E_{\text{Э}}. \quad (3.31)$$

Здесь величина $B_K = (S' + D)(1 - A)$ представляет собой коротковолновый радиационный баланс, D - рассеянная радиация, A - альbedo подстилающей поверхности.

Задачи

3.73. 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?

3.74. 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?

3.75. 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?

3.76. 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.

3.77. 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?

3.78. 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?

3.79. 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.

3.80. 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	0,0	-0,01	-0,01	-0,02
Июль	-0,4	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 .

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

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.

3.82. 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
Кишинев	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.

3.83. 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):

	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	—	—
Ee	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.

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

Срок, ч мин	h	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 *P2*. 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, поглощенную.

3.9. Радиационный баланс атмосферы и системы

Радиационный баланс атмосферы выражается соотношением

$$B_a = E_3 + Q_{\Pi} - U_{\infty} \quad (3.32)$$

где E_3 — эффективное излучение деятельного слоя; Q_{Π} — 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

$$B_C = (S' + D)(1 - A) + Q_{\Pi} - U_{\infty}, \quad (3.33)$$

где все обозначения имеют прежний смысл.

Задачи

3.86. Среднее во времени и в пространстве альbedo системы деятельный слой—атмосфера, по расчетам, 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 10880 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?

3.87. Средняя во времени и в пространстве годовая сумма эффективного излучения деятельного слоя, по расчетам, 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.

3.88. Используя ответы к задачам 3.86 и 3.87, вычислить годовую сумму радиационного баланса атмосферы. Результат, проверить по уравнению (3.32). 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?

3.90. 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 10880 МДж/м^2 , вычислить годовую сумму солнечной радиации, отраженной Землей как планетой в окружающее пространство. Рассчитать баланс солнечной радиации на верхней границе атмосферы.

3.91. Средняя многолетняя годовая сумма солнечной радиации, поглощаемой деятельным слоем, по расчетам, 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 3.88 и объяснить, почему один из них больше другого.

3.92. Средняя многолетняя годовая сумма уходящего излучения, по расчетам, составляет 7030 МДж/м^2 . Используя ответы к задаче 3.86, 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?

4. 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.

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

Задачи

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

	Срок, ч												
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
9.07	11	11	12	12	13	15	20	21	21	20	17	10	10
13.07	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.

4.2. Средняя за 1953—1956 гг. температура (°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.

4.3. По наблюдениям в Финляндии за несколько летних дней получены экстремальные температуры поверхности соседних участков с гранитной почвой: 34,8 и 14,5°C, и с сухой песчаной почвой: 42,3 и 7,8 °C. Вычислить амплитуду на каждом участке и указать причину их различия. •

4.4. 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.

4.5. 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.:

	Ст. Чарджоу						
Срок, ч	1	7	10	13	16	19	1
t°, C	25,6	25,5	38,1	48,0	44,6	28,9	22,3

	Судно погоды E								
Срок, ч	0	3	6	9	12	15	18	21	24

t°, C	25,6	25,2	25,2	25,1	25,1	25,1	25,1	25,0	25,2
----------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

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

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

Дата	Срок, ч	Глубина				
		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 термоизоплет.

4.7. 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.

4.8. 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.

4.9. 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	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.

4.10. 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.

4.11. 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.

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

Месяц	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.

4.13. 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.

4.14. По данным задачи 4.6 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 ($^{\circ}\text{C}/\text{см}$) 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.

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

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

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.

4.16. Средняя месячная температура воды в Каспийском море:

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

Построить вертикальные профили температуры и сравнить с профилями из задачи 4.15. Вычислить вертикальный градиент температуры в июле для каждого слоя отдельно и средний от поверхности до глубины 100 м. Результат сравнить с полученным в задаче 4.15. Указать причины различия.

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

	Глубина			
	0	20	40	80
Поверхность	0	20	40	80
Оголенная	24,6	21,6	20	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.

Литература

1. Бройдо А.Г. Задачник по общей метеорологии. Часть 1. - Л.: Гидрометеоиздат, 1970, 224 с.
2. Задачник по общей метеорологии./Под ред. В.Г.Морачевского. - Л.: Гидрометеоиздат, 1984, 312 с.
3. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. - Л.: Гидрометеоиздат, 1984, 752 с.
4. Хабутдинов Ю.Г. Учение об атмосфере. Учебное пособие/ Ю.Г.Хабутдинов, К.М.Шанталинский, А.А.Николаев. – Казань: Казан.гос.ун-т, 2010. –245 с.
5. Психрометрические таблицы. -Л.: Гидрометеоиздат, 1972, 234 с.

Константы используемые при решении задач

Константы в формуле Брента(5.22), по Т.Г.Берлянд и М.Е.Берлянд; $D = 0,61$; $G = 0,05$.

Нормальное ускорение свободного падения $g=9,8066 \text{ м/с}^2$.

Облачные коэффициенты в формуле (5.30), по Н.Г.Евфимову (для Павловска): $C_H = 0,076$; $C_c = 0,052$; $C_v = 0,022$.

Облачный коэффициент в формуле (5.29), по М.Е.Берлянд, $c = 0,50—0,82$; $c_{cp} = 0,76$.

Объемный коэффициент теплового расширения газов $\alpha = 1/273,15 = 3,66 \cdot 10^{-3} \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$

Период суточного вращения Земли $T \approx 24 \text{ ч} = 86400 \text{ с}$.

Постоянная Стефана—Больцма на $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \text{ К}^4)$.

Радиус Земли $R_3 = 6371 \text{ км}$.

Радиус Солнца $R = 695,6 \cdot 10^3 \text{ км}$.

Расстояние между центрами Солнца и Земли: средне $149 \cdot 10^6 \text{ км}$, 2 января (Земля в перигелии) $147 \cdot 10^6 \text{ км}$, 4 июля (Земля в афелии) $152 \cdot 10^6 \text{ км}$.

Солнечная постоянная $S_0 = 1,38 \text{ кВт/м}^2$.

Сухоадиабатический градиент $\gamma_a = 0,01 \text{ }^\circ\text{C/м}$.

Удельная газовая постоянная водяного пара $R_H = 461,51 \text{ Дж/(кг К)}$.

Удельная газовая постоянная сухого воздуха $R_c = 287,05 \text{ Дж/(кг К)}$.

Универсальная газовая постоянная $R = 8,31 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кмоль К)}$.

Удельная теплоемкость сухого воздуха при постоянном давлении $c_p = 1005 \text{ Дж/(кг К)}$.

Удельная теплоемкость сухого воздуха при постоянном объеме $c_v = 718 \text{ Дж/(кг К)}$.

Число Авогадро $N = 6,023 \cdot 10^{25} \text{ кмоль}^{-1}$.

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) $C = (2501 \cdot 10^3 - 2,72 \cdot 10^3 \text{ t})$ Дж/кг.

Удельная теплота сублимации $C_c = (2834,6 \cdot 10^3 - 1,51 \cdot 10^3 \text{ t})$ Дж/кг.

Теплота плавления льда $C_{пл} = C_c - C$

Молекулярная теплопроводность воздуха при температуре $t^\circ\text{C}$

$$\lambda = (24,16 + 0,670 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}/(\text{м с К})).$$

Плотность воздуха при нормальных условиях $\rho_0 = 1,292 \text{ кг}/\text{м}^3$

Угловая скорость вращения Земли $\omega = 7,27 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$.

Скорость света в вакууме $3 \cdot 10^8 \text{ м}/\text{с}$.

Приложение 2

Таблица Бемпорада (значения m при разных высотах Солнца)

h	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	39,6	27	19,8	15,4	12,4	10,4	8,9	7,8	6,9	6,18
10	5,6	5,12	4,72	4,37	4,08	3,82	3,59	3,39	3,21	3,05
20	2,9	2,77	2,65	2,55	2,45	2,45	2,27	2,2	2,12	2,06
30	2	1,94	1,88	1,83	1,78	1,78	1,7	1,66	1,62	1,59
40	1,55	1,52	1,49	1,46	1,44	1,44	1,39	1,37	1,34	1,32
50	1,3	1,28	1,27	1,25	1,24	1,22	1,2	1,19	1,18	1,17
60	1,15	1,14	1,13	1,12	1,11	1,1	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	1,01	1,007	1,005	1,004	1,002	1,002	1,001	1
90	1									

Учебное издание

ИСМАГИЛОВ Наиль Вагизович
НИКОЛАЕВ Александр Анатольевич

**ВЫПОЛНЕНИЕ И ЗАЩИТА КУРСОВЫХ
И ВЫПУСКНЫХ КВАЛИФИКАЦИОННЫХ РАБОТ**

Учебно-методическое пособие