С. В. Зверева

ЗАДАЧНИК
ПО ОБЩЕЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

Атмосферная оптика

Электричество

Акустика

Допущено Министерством высшего
и среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для студентов вузов,
обучающихся по специальности
«Метеорология»

Ленинград Гидрометеоиздат 1980

УДК 551.59(075.8)

Рецензенты
Ж. В. Волошина, В. С. Навроцкая (кафедра общей метеорологии Одесского гидрометеорологического института)
проф. К. С. Шифрин

Ответственный редактор
К. С. Шифрин

В «Задачнике по общей метеорологии» представлены задачи по трем разделам курса общей метеорологии: оптические, электрические и звуковые явления в атмосфере. По этим разделам курса метеорологии задачник составлен и издается впервые. В каждой главе имеется краткий вводный текст, в основном включающий формулы, необходимые для решения задач. В приложениях помещены справочные пособия, таблицы и номограммы.

Задачник является учебным пособием по курсу общей метеорологии для студентов гидрометеорологических институтов, физических и географических факультетов университетов, а также авиационных и морских вузов и училищ; часть задач может быть использована гидрометеорологическими техникумами.

The collection of problems in General meteorology compiled by S. V. Zvereva included exercises on the optics, electricity, and sound phenomena in the atmosphere. It is the first time that exercises for these three sections of the course in meteorology will have been collected and published. In each chapter there is a brief introductory text including mainly formulas indispensable for solving the problems. Appendices contain reference tables and nomographs.

The book is intended for students of hydrometeorological institutes, physical and geographycal departments of universities, for higher and secondary aviation and marine schools. Some sections of the book can be used in secondary hydrometeorological schools.

Ленинградский
Гидрометеорологический ин-т
БИБЛИОТЕКА
Л-д 195196 Малоохтинский пр., 98

З $\frac{20807-045}{069(02)-80}$ 4-80. 1903040000

© Гидрометеоиздат, 1980 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий Задачник по атмосферной оптике, электричеству, и акустике написан применительно к программе гидрометеорологических институтов. Такой Задачник составлен и издается впервые.

В Задачнике в основном обобщен многолетний опыт автора в проведении практических занятий по указанным разделам курса метеорологии в Ленинградском гидрометеорологическом институте (ЛГМИ).

При составлении задач частично использовались материалы из «Задачника по метеорологии» Г. Ф. Фролова (М., 1946), «Сборника задач по общему курсу физики» В. С. Волькенштейн (М., 1973), «Сборника задач по общему курсу физики. Оптика» под ред. Д. В. Сивухина (М., 1977).

Некоторые наиболее типичные задачи (они помечены звездочкой (*)) имеют индивидуальные исходные данные. Они предназначены для домашних задач, контрольных работ, а также могут быть полезны для рассылки студентам заочных отделений.

В составлении раздела «Атмосферное электричество» большое участие принял заведующий кафедрой метеорологии Иркутского государственного университета доц. А. Х. Филиппов. Им составлены задачи №: 8.4, 8.13, 8.17—8.27, 9.7, 9.15—9.22, 9.27—9.29, 9.32—9.34, 9.42—9.51, 10.1.

Разделы курса общей метеорологии «Атмосферная оптика», «Атмосферное электричество» и «Атмосферная акустика» при подготовке метеорологов в вузах носят в значительной степени общеобразовательный характер. Поэтому в Задачник включены лишь сравнительно простые задачи, в основном являющиеся иллюстрацией общих положений лекционного курса. Многие задачи имеют познавательное значение. В то же время задачи имеют и практическую направленность. Приведенные значения оптических, электрических, акустических и других параметров взяты большей частью из фактических наблюдений. Делается попытка установления связи оптических, электрических и звуковых явлений с метеорологическими элементами (облачностью, ветром, видимостью и др.).

Во многих задачах после решения следует ответить на предлагаемые вопросы. Эти вопросы должны помочь студентам лучше усвоить лекционный курс. Думается, что постановка таких вопросов особенно полезна в самостоятельной работе студентов при заочном обучении.

Раздел «Атмосферная оптика» является в Задачнике ведущим, так как он охватывает большое число разнообразных

вопросов и является наиболее разработанным. Вопросам атмосферной оптики и в лекционном курсе отводится больше часов, чем атмосферному электричеству и акустике.

Центральной проблемой современной атмосферной оптики является исследование распространения электромагнитных волн оптического диапазона в атмосфере и изучение взаимодействия их с атмосферой как со средой неоднородной, одновременно и поглощающей и рассеивающей.

В оптический диапазон включают не только световые лучи, но и близкие УФ, ИК и даже радиоволны, поэтому и в предлагаемых задачах фигурируют не только световые лучи.

Исследования по атмосферной оптике часто делят на прямые и обратные задачи. Прямые задачи (их большинство) представлены в виде задач на рассеяние электромагнитных волн газами, составляющими атмосферу, аэрозолями, на изменение траекторий электромагнитных волн под влиянием рефракции, прохождения сквозь облака, завесу дождя и т. п.

Обратные задачи — получение информации о характеристиках атмосферы как среды по зарегистрированному ее влиянию на параметры распространяющихся в ней волн оптического диапазона. Этот тип задач представлен в главе 7 «Косвенные методы оптического зондирования атмосферы».

Атмосферная оптика в настоящее время является в значительной мере оптикой атмосферного аэрозоля. Поэтому в Задачник включено сравнительно много задач на определение характеристик наиболее типичных видов атмосферного аэрозоля — облаков, туманов, дымок.

За помощь и постоянное внимание к работе над данным Задачником автор искренне благодарен заведующему кафедрой общей метеорологии ЛГМИ проф. В. Г. Морачевскому.

Автор сердечно благодарит проф. К. С. Шифрина, взявшего на себя нелегкий труд научного редактирования, доц. А. Г. Бройдо, первым прочитавшего всю рукопись Задачника и сделавшего большое число ценных замечаний, которые были учтены при оформлении Задачника. В подготовке Задачника к печати большую техническую помощь оказали Н. А. Герасимова, Г. Н. Солдатенкова и Т. В. Сорокина, в обсуждении вводных текстов к главам по «Атмосферному электричеству» весьма полезными были советы доц. С. А. Юдовиной. Всем им автор также выражает свою искреннюю признательность.

РАЗДЕЛ I. АТМОСФЕРНАЯ ОПТИКА

ГЛАВА 1. ОСЛАБЛЕНИЕ ЛУЧИСТЫХ ПОТОКОВ В АТМОСФЕРЕ

1.1. Основные световые величины и единицы их измерения

Силой света I источника называется лучистая энергия, излучаемая источником в единицу времени в единицу телесного угла и оцениваемая по зрительному восприятию. Единицей силы света является *кандела* (кд).

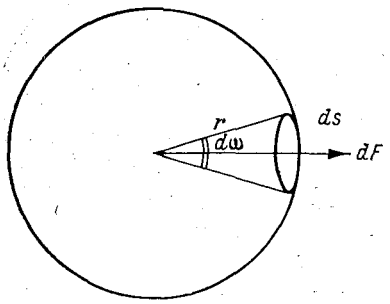


Рис. 1. К определению светового потока.

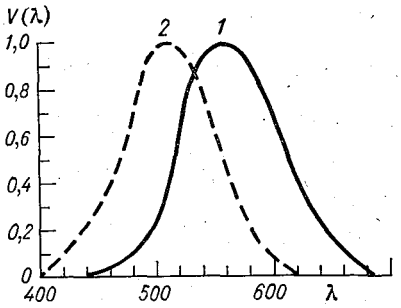


Рис. 2. Кривая видности (λ в 10^3 мкм).

1 — дневное зрение; *2* — сумеречное зрение.

Световым потоком F или dF 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. 1)

$$dF = I\,d\omega. \tag{1.1}$$

Единицей светового потока является *люмен* (лм).

Полный световой поток F, испускаемый изотропным источником силой света I во все направления, равен

$$F = 4\pi I, \tag{1.2}$$

поскольку полный телесный угол $\omega = 4\pi$ ср.

Световой поток можно выразить через лучистый поток $f(\lambda)$ с помощью функции видности $V(\lambda)$ (рис. 2)

$$F = K \int_{0,40}^{0,77} f(\lambda) V(\lambda) d(\lambda), \qquad (1.3)$$

где K — световой эквивалент потока излучения, равный 621 лм/Вт для $\lambda = 0{,}556$ мкм. На эту длину волны приходится наибольшая чувствительность нашего глаза (желто-зеленые лучи), коэффициент видности для нее принят равным единице.

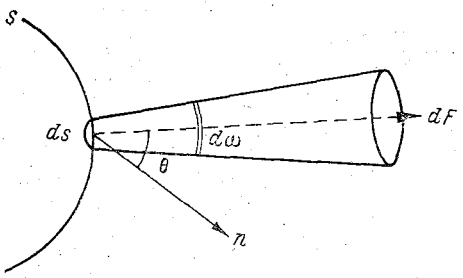


Рис. 3. К определению яркости.

Световой поток есть сумма монохроматических лучистых потоков, каждый из которых умножен на соответствующий коэффициент видности.

Яркостью B_θ светящегося элемента в некотором направлении θ (рис. 3) называется сила света, испускаемая в этом направлении с единицы видимой поверхности

$$B_\theta = \frac{dF}{ds \cos\theta \, d\omega}, \qquad (1.4)$$

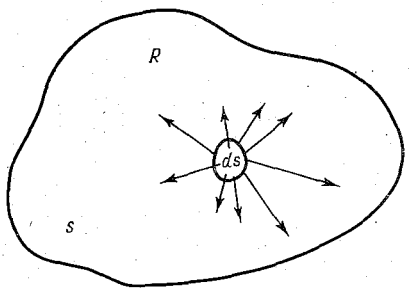


Рис. 4. К определению светимости.

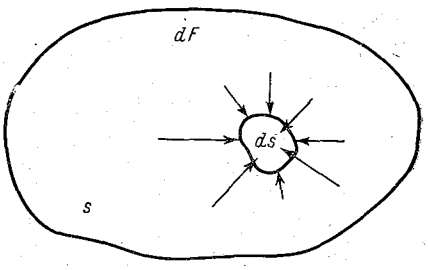


Рис. 5. К определению освещенности.

где $ds \cos\theta$ — видимая поверхность светящегося элемента. Заменяя $dF/d\omega$ через I, получим

$$B_\theta = \frac{I}{ds \cos\theta}. \qquad (1.5)$$

Единицей яркости служит *кандела на квадратный метр* (кд/м²).

Светимостью R называется полный световой поток dF,

испускаемый светящимся элементом ds во все направления с единицы его поверхности (рис. 4),

$$R=\frac{dF}{ds}. \qquad (1.6)$$

Единицей светимости является *люмен на квадратный метр* (лм/м^2).

Освещенностью E поверхности называется полный световой поток dF, падающий на единицу площади ds (рис. 5)

$$E=\frac{dF}{ds}. \qquad (1.7)$$

Единицей освещенности является *люкс* (лк). 1 люкс=1 лм/м^2.

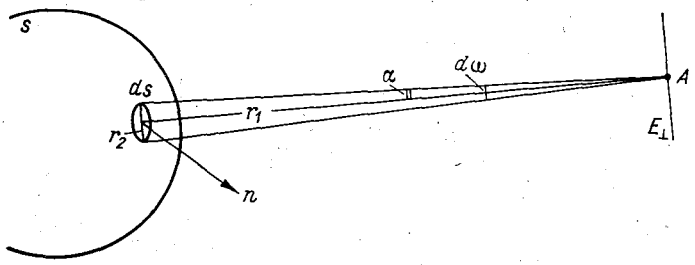


Рис. 6. Соотношение между яркостью и освещенностью.

Для источников, свет которых падает на поверхность под углом θ,

$$E=\frac{I\cos\theta}{r^2}. \qquad (1.8)$$

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

$$dE_\perp=B\,d\omega. \qquad (1.9)$$

Для малых телесных углов $d\omega$ можно на основании рис. 6 записать $ds\cos\theta=\pi r_2^2$ и тогда

$$d\omega=\frac{\pi r_2^2}{r_1^2}=\pi\,\mathrm{tg}^2\,\alpha\approx\pi\alpha^2, \qquad (1.10)$$

где α — малый плоский угол (в радианах), под которым из точки A, где измеряется освещенность, виден малый светящийся элемент.

Имеются поверхности, яркость которых одинакова во всех направлениях

$$B_\theta = B = \text{const}.$$

В первом приближении такими 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, также при снежном покрове, 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 имеет место соотношение

$$R = \pi B. \tag{1.11}$$

Задачи

1.1. Освещенность пшеничного поля в летний день составляет 40 000 лк, альбедо пшеницы равно 0,20. Вычислить светимость и яркость поля, если считать его яркость одинаковой во всех направлениях. Какой световой поток падает на площадь 1 га?

1.2. На плоский склон холма, покрытый свежевыпавшим рыхлым снегом, под углом 90° падают солнечные лучи, создающие на площади 10^4 м^2 световой поток $2 \cdot 10^7$ лм. Вычислить освещенность, светимость и яркость холма, если альбедо снега равно 0,90, а яркость рыхлого снега можно считать одинаковой во всех направлениях.

1.3. Доказать, что яркость лунного диска в данном направлении B_θ 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.

1.4. Считая Солнце протяженным источником света с одинаковой яркостью во всех направлениях, равной $2 \cdot 10^9$ кд/м^2, определить светимость солнечной поверхности и полный световой поток, испускаемый ею во все направления. Радиус Солнца приблизительно равен $7 \cdot 10^5$ км.

1.5. Вычислить световую солнечную постоянную, т. е. освещенность, создаваемую Солнцем на Земле на площадке, перпендикулярно солнечным лучам, при отсутствии атмосферы, если видимый диаметр солнечного диска 32′, а его яркость $2 \cdot 10^9$ кд/м^2. Где создается такая освещенность прямым солнечным светом?

1.6. Вычислить световые солнечные постоянные для всех планет Солнечной системы, используя световую солнечную постоянную для Земли, полученную в предыдущей задаче, и радиусы орбит планет, приведенные в приложении 1. Сравнить результаты со средней освещенностью горизонтальной поверхности Земли в Павловске (приложение 4). Какой приблизительно высоте Солнца или какому времени суток на Земле соответствуют полученные для каждой планеты максимальные освещенности?

1.7. Определить световые солнечные постоянные для Луны в момент 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 они отличаются?

1.8. Среднее расстояние от Земли до Солнца равно $1{,}5 \cdot 10^8$ км, световая солнечная постоянная 135 000 лк. Вычислить полный световой поток, испускаемый всей солнечной поверхностью.

1.9. Считая Солнце точечным источником света, определить его силу света и через нее полный световой поток, испускаемый Солнцем. Исходные данные взять из предыдущей задачи.

1.10. Считая Солнце абсолютно черным телом с температурой 6000 К и радиусом $7 \cdot 10^8$ м, вычислить полный лучистый поток, испускаемый всей солнечной поверхностью. Сколько процентов от полного лучистого потока приходит на Землю в виде светового солнечного потока? Сколько ватт это составляет?

1.11. Используя результаты предыдущей задачи, вычислить теряемую Солнцем ежесекундно за счет излучения массу всего лучистого потока и светового потока. Использовать формулу (8.20). Какие другие виды энергии, кроме лучистого потока, излучаются Солнцем?

1.12. Если Солнце будет продолжать излучать энергию и соответственно терять массу с неизменной интенсивностью $5 \cdot 10^6$ т/с, то за какое время его масса уменьшится вдвое? Масса Солнца равна $1{,}985 \cdot 10^{30}$ кг.

1.13. Вычислить получаемую Землей долю от общего лучистого потока, испускаемого Солнцем, если средний радиус Земли 6370 км, а среднее расстояние между центрами Земли и Солнца составляет $1{,}5 \cdot 10^8$ км. Сколько солнечной массы падает ежесекундно на дневную половину земного шара?

1.14. Вычислить лучистый поток, излучаемый Землей в окружающее пространство, если считать ее абсолютно черным телом с температурой 15 °С. Средний радиус Земли 6370 км.

1.15. Какую массу теряет Земля ежесекундно со всей ее поверхности за счет теплового излучения потока $2 \cdot 10^{17}$ Вт? Использовать формулу (8.20). Изменяется ли со временем масса Земли, если учитывать массу, получаемую ею от Солнца (задача 1.11) и теряемую за счет ее собственного излучения?

1.16. Вычислить световую лунную постоянную, т. е. максимальную освещенность на Земле, которую может создать Луна в момент полнолуния на площадке, перпендикулярной лунным лучам. Яркость лунного диска равна 5400 кд/м^2, радиус Луны 1740 км, среднее расстояние от Луны до Земли $3{,}84 \cdot 10^5$ км.

1.17. Используя исходные данные из предыдущей задачи, вычислить полный световой поток отраженного света, посылаемого Луной.

1.2. Общее ослабление лучистых потоков в атмосфере

Общее ослабление лучистых потоков, прошедших через всю атмосферу, описывается законом Бугера

$$J_\lambda = J_{0\lambda} e^{-\int_0^\infty \alpha_\lambda(s)\,ds},$$

или

$$J_\lambda = J_{0\lambda} \cdot 10^{-\int_0^\infty a_\lambda(s)\,ds}, \qquad (1.12)$$

где J_λ и $J_{0\lambda}$ — соответственно плотности дошедшего до земной поверхности и поступившего на внешнюю границу атмосферы монохроматических потоков с длиной волны λ (для солнечных монохроматических потоков приняты обозначения S_λ и $S_{0\lambda}$); $\alpha_\lambda(s)$ и $a_\lambda(s)$ — общие коэффициенты ослабления, выраженные в м$^{-1}$ или км$^{-1}$; причем $a_\lambda(s) = M\alpha_\lambda(s)$, где $M = \lg e = 0{,}4343\ldots$ Формула (1.12) может быть записана так:

$$J_\lambda = J_{0\lambda} e^{-\tau_\lambda m} = J_{0\lambda} p_\lambda^m, \qquad (1.13)$$

где τ_λ — оптическая толщина атмосферы, или коэффициент ослабления потока в вертикальном столбе воздуха единичного сечения (безразмерная величина):

$$\tau_\lambda = \int_0^\infty \alpha_\lambda(h)\,dh = \int_0^\infty k_\lambda \rho(h)\,dh; \qquad (1.14)$$

m — оптическая масса атмосферы; p_λ — спектральный коэффициент прозрачности для единичной массы атмосферы, т. е. при $m = 1$

$$p_\lambda = e^{-\tau_\lambda}; \qquad (1.15)$$

k_λ — массовый коэффициент ослабления, выраженный в м^2/кг;

$$\alpha_\lambda(h) = k_\lambda \rho(h), \qquad (1.16)$$

где $\rho(h)$ — плотность воздуха на высоте h.

Общий коэффициент ослабления является суммой компонент:

$$\alpha_\lambda = \sigma_{\lambda м} + \sigma_{\lambda а} + \alpha_{\lambda оз} + \alpha_{\lambda в.\ п}, \tag{1.17}$$

где $\sigma_{\lambda м}$ и $\sigma_{\lambda а}$ — соответственно объемные коэффициенты молекулярного и аэрозольного рассеяния; $\alpha_{\lambda оз}$ и $\alpha_{\lambda в.\ п}$ — объемные коэффициенты, обусловленные поглощением озоном и водяным паром.

Общая оптическая толщина атмосферы является суммой оптических толщин

$$\tau_\lambda = \tau_{\lambda м} + \tau_{\lambda а} + \tau_{\lambda оз} + \tau_{\lambda в.\ п}, \tag{1.18}$$

где

$$\tau_{\lambda м} = \int_0^\infty \sigma_{\lambda м}(h)\, dh \tag{1.19}$$

— оптическая толщина молекулярной атмосферы;

$$\tau_{\lambda а} = \int_0^\infty \sigma_{\lambda а}(h)\, dh \tag{1.20}$$

— оптическая толщина аэрозольной атмосферы;

$$\tau_{\lambda оз} = \int_0^\infty \alpha_{\lambda оз}(h)\, dh \tag{1.21}$$

— оптическая толщина озонной атмосферы;

$$\tau_{\lambda в.\ п} = \int_0^\infty \alpha_{\lambda в.\ п}(h)\, dh \tag{1.22}$$

— оптическая толщина атмосферы водяного пара.

Общий коэффициент прозрачности является произведением частных коэффициентов прозрачности

$$p_{\lambda общ} = p_{\lambda м} p_{\lambda а} p_{\lambda оз} p_{\lambda в.\ п}, \tag{1.23}$$

где $p_{\lambda м}$, $p_{\lambda а}$, $p_{\lambda оз}$ и $p_{\lambda в.\ п}$ — коэффициенты прозрачности соответственно молекулярной, аэрозольной, озонной атмосферы и атмосферы водяного пара:

$$p_{\lambda м} = e^{-\tau_{\lambda м}}; \quad p_{\lambda а} = e^{-\tau_{\lambda а}};$$
$$p_{\lambda оз} = e^{-\tau_{\lambda оз}}; \quad p_{\lambda в.\ п} = e^{-\tau_{\lambda в.\ п}}. \tag{1.24}$$

Спектральный коэффициент направленного пропускания q_λ равен

$$q_\lambda = \frac{J_\lambda}{J_{0\lambda}} = p_\lambda^m. \tag{1.25}$$

Энергетические потери направленного потока, прошедшего m масс атмосферы, составляют

$$(1-q_\lambda)\cdot 100\,\%; \qquad (1.26)$$

p_λ и q_λ — безразмерные величины, имеющие пределы изменения $0\leqslant p_\lambda\leqslant 1$; $0\leqslant q_\lambda\leqslant 1$.

Для горизонтального потока лучей плотность воздуха вдоль направления распространения потока остается постоянной $\rho(l)=\rho=\text{const}$. Поэтому формулы (1.12)—(1.15) для потока, прошедшего слой длиной l, запишутся:

$$J_\lambda=J_{0\lambda}e^{-\alpha_\lambda l}=J_{0\lambda}\cdot 10^{-a_\lambda l}; \qquad (1.27)$$

$$J_\lambda=J_{0\lambda}e^{-\tau_\lambda}=J_{0\lambda}p_\lambda^l; \qquad (1.27')$$

$$\tau_\lambda=\alpha_\lambda l; \qquad (1.28)$$

$$p_\lambda=e^{-\alpha_\lambda}=10^{-a_\lambda}. \qquad (1.29)$$

Коэффициенты прозрачности, обусловленные молекулярным и аэрозольным рассеянием в отдельности, равны:

$$p_{\lambda\text{м}}=e^{-\sigma_{\lambda\text{м}}}; \qquad (1.30)$$

$$p_{\lambda\text{а}}=e^{-\sigma_{\lambda\text{а}}}. \qquad (1.31)$$

Спектральный коэффициент направленного пропускания и энергетические потери для потока, прошедшего слой длиной l, составляют:

$$q_\lambda=\frac{J_\lambda}{J_{0\lambda}}=e^{-\tau_\lambda}=p_\lambda^l; \qquad (1.32)$$

$$(1-q_\lambda)\cdot 100\,\%. \qquad (1.33)$$

Формулы (1.16)—(1.19) полностью справедливы и для горизонтальных потоков радиации.

В формулах (1.30) и (1.31) коэффициенты прозрачности рассчитываются для единицы пути горизонтального луча в соответствии с единицами измерения $\sigma_{\lambda\text{м}}$ и $\sigma_{\lambda\text{а}}$ (обычно для 1 км).

Все вышеизложенное относилось к распространению монохроматического излучения.

Для интегрального потока прямой солнечной радиации S, дошедшего до поверхности Земли,

$$S=S_0p^m, \qquad (1.34)$$

где S_0 — солнечная постоянная, равная 1,38 кВт/м^2; p — интегральный коэффициент прозрачности.

Общее ослабление солнечной радиации $\Delta S_{\text{общ}}$ при прохождении ею m оптических масс атмосферы в основном вызывается

молекулярным рассеянием $\Delta S_м$, аэрозольным ослаблением (главным образом, рассеянием) $\Delta S_а$ и поглощением водяным паром $\Delta S_{в.\,п}$

$$\Delta S_{общ} = \Delta S_м + \Delta S_а + \Delta S_{в.\,п}; \qquad (1.35)$$

$$\Delta S_{общ} = S_0 - S_{набл}, \qquad (1.36)$$

где $S_{набл}$ — прямая радиация, наблюдаемая у поверхности Земли, $\Delta S_м$ — рассчитывается теоретически, в частности при $m=2$ она равна 0,25 кВт/м^2; $\Delta S_{в.\,п}$ обычно вычисляется по эмпирическим формулам. С. В. Зверевой получены следующие эмпирические формулы:

$$\Delta S_{в.\,п} = 0{,}238\,(m\omega_\infty)^{0{,}43} \text{ для } 0{,}005 \text{ см} < m\omega_\infty \leqslant 0{,}1 \text{ см};$$

$$\Delta S_{в.\,п} = 0{,}202\,(m\omega_\infty)^{0{,}36} \text{ для } 0{,}1 \text{ см} < m\omega_\infty \leqslant 0{,}4 \text{ см};$$

$$\Delta S_{в.\,п} = 0{,}184\,(m\omega_\infty)^{0{,}27} \text{ для } 0{,}4 \text{ см} < m\omega_\infty \leqslant 10 \text{ см}, \qquad (1.37)$$

где ω_∞ — содержание водяного пара в столбе атмосферы единичного сечения в см слоя осажденной воды.

Аэрозольное ослабление находится из (1.35) как остаточный член

$$\Delta S_а = \Delta S_{общ} - \Delta S_м - \Delta S_{в.\,п}. \qquad (1.38)$$

Освещенность прямым солнечным светом площадки, перпендикулярной солнечным лучам,

$$E_\perp = E_0 p^m, \text{ или } E_\perp = E_0 p_{ид}^{Tm}. \qquad (1.39)$$

Здесь E_0 — световая солнечная постоянная, равная 135 000 лк, p — интегральный световой коэффициент прозрачности, T — фактор мутности, $p_{ид}$ — коэффициент прозрачности идеальной атмосферы.

Освещенность прямым солнечным светом горизонтальной поверхности Земли

$$E_{гор} = E_0 p^m \sin h_\odot, \text{ или } E_{гор} = E_0 p_{ид}^{Tm} \sin h_\odot, \qquad (1.40)$$

где $h_\odot$ — высота Солнца.

Коэффициент направленного пропускания

$$q = \frac{E_\perp}{E_0} = \frac{E_{гор}}{E_0 \sin h_\odot} = p^m; \qquad (1.41)$$

$p = p_{ид}^T$, отсюда

$$T = \frac{\lg p}{\lg p_{ид}}; \qquad (1.42)$$

$$T = 1 + W + R, \qquad (1.43)$$

где W — влажная мутность, R — остаточная мутность

$$R=\frac{\sigma_а}{\sigma_м}. \qquad (1.44)$$

Если $R>1$, то $\sigma_а>\sigma_м$, т. е. преобладает аэрозольное ослабление.

Если $R<1$, то $\sigma_а<\sigma_м$, т. е. преобладает молекулярное ослабление.

Задачи

1.18. При высоте Солнца 30° освещенность горизонтальной поверхности Земли в двух пунктах, один из которых находился в воздушной массе арктического, а другой — тропического происхождения, соответственно равна 44 550 и 37 800 лк. Вычислить для светового солнечного потока в арктическом и тропическом воздухе коэффициенты прозрачности и направленного пропускания. Использовать приложение 9. Сколько процентов от светового потока, поступающего на внешнюю границу атмосферы, могло бы дойти до земной поверхности в каждой из воздушных масс, если бы Солнце было в зените? Сколько процентов фактически доходит при данной высоте Солнца? Сколько процентов светового потока задерживает первая масса атмосферы, две массы вместе взятые, только вторая масса атмосферы? Объяснить, почему вторая масса задерживает (ослабляет) поток меньше, чем первая?

1.19. Используя условия предыдущей задачи, вычислить для каждой воздушной массы фактор мутности и остаточную мутность. Какое преобладает ослабление (молекулярное или аэрозольное) в каждой из воздушных масс? Использовать приложение 2.

1.20. Определить освещенность горизонтальной поверхности Земли, фактор мутности и коэффициент пропускания атмосферы для светового потока, если высота Солнца 24°30′, а световой коэффициент прозрачности атмосферы равен 0,69. Использовать приложения 2 и 9.

1.21. Средний поток прямой солнечной радиации в Павловске в августе, приведенный к $m=2$, равен 0,82 кВт/м². Среднее месячное содержание водяного пара, по данным радиозондирования, составляет 3,67 см. Вычислить в кВт/м² и процентах от общего ослабления: общее ослабление солнечной радиации, молекулярное рассеяние, поглощение водяным паром, аэрозольное ослабление.

1.22. Вычислить общее ослабление солнечной радиации и его составляющие: молекулярное рассеяние, поглощение водяным паром и аэрозольное ослабление на станции Мирный в Антарктиде в январе 1957 г., если среднее значение потока прямой радиации при $m=2$ было 0,92 кВт/м², а содержание водяного

пара в атмосфере 1,12 см. Почему в Мирном меньше, чем в Павловске, как общее ослабление, так и все его компоненты?

1.23. На антарктической станции Оазис в феврале 1958 г. средний поток прямой солнечной радиации, приведенный к $m=2$, равнялся 1,01 кВт/м^2, а содержание водяного пара в атмосфере было 0,586 см. Вычислить общее ослабление солнечной радиации и его компоненты в кВт/м^2 и процентах от общего ослабления. Сравните полученные ответы с ответами задач 1.21 и 1.22. Почему на станции Оазис роль молекулярного рассеяния заметно больше, чем в Мирном, и тем более, чем в Павловске, хотя его абсолютная величина всюду одинакова и равна 0,25 кВт/м^2? Почему так мало аэрозольное ослабление?

1.24. После извержения вулкана Агунг (Индонезия) на о. Бали в марте 1963 г. на всех антарктических станциях в конце марта и 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 на ст. Восток 0,615, в Мирном 0,703 и на ст. Новолазаревская (в антарктическом оазисе) 0,700. Вычислить в кВт/м^2 и процентах от общего ослабления аэрозольное ослабление, обусловленное вулканическими пеплом и пылью, на этих станциях, если содержание водяного пара было 0,034 см на ст. Восток; 0,125 см в Мирном и 0,297 см в Новолазаревской. Сравнить полученные ответы с аэрозольным ослаблением на этих станциях до извержения вулкана (см. задачи 1.22, 1.23).

1.25. Средние месячные потоки прямой солнечной радиации (приведенные к $m=2$ и нормальному давлению) были: 1) в Павловске в августе 0,82 кВт/м^2, 2) в Мирном в январе 0,92 кВт/м^2, 3) в Оазисе в феврале 1,02 кВт/м^2, 4) в Пионерской в ноябре 0,91 кВт/м^2. Вычислить коэффициент прозрачности для интегрального солнечного потока (актинометрический) $p_а$ и коэффициент прозрачности для световых солнечных потоков (световой) $p_с$; на сколько процентов различаются $p_а$ и $p_с$, если за 100 % взять величину $p_а$. Почему во всех пунктах $p_с < p_а$?

1.3. Молекулярное ослабление

Плотность лучистого потока j_λ с длиной волны λ, рассеянного под углом θ малой сферической частицей, по теории Релея записывается:

$$j_\lambda = \frac{9\pi^2 v^2 J_\lambda}{\lambda^4 r^2} \left| \frac{m^2-1}{m^2+2} \right|^2 \left(\frac{1+\cos^2\theta}{2} \right), \qquad (1.45)$$

где v — объем рассеивающей частицы, m — комплексный показатель преломления вещества частицы, J_λ — плотность потока

падающей электромагнитной среды с длиной волны λ, r — расстояние от рассеивающего объема до места, где измеряется рассеянный поток.

Объемный коэффициент молекулярного рассеяния воздуха на любой высоте по теории Релея—Кабанна равен:

$$\sigma_{\text{м}}(\lambda, z) = \frac{32\pi^3 (n-1)^2}{3N(z)\lambda^4}\left(\frac{6+6\delta}{6-7\delta}\right), \tag{1.46}$$

где $(n-1)$ — оптический индекс рефракции, n — показатель преломления, $N(z)$ — число молекул в единице объема воздуха на данной высоте z, δ — средний коэффициент оптической анизотропии молекул воздуха, равный 0,035. Поэтому множитель $\frac{6+6\delta}{6-7\delta}$, введенный Кабанном для учета оптической анизотропии молекул воздуха, равен 1,061.

Оптическая толщина молекулярной однородной атмосферы высотой H при давлении воздуха у поверхности Земли p запишется:

$$\tau_{\text{м}} = \frac{32\pi^3 (n-1)^2 \cdot 1{,}061 H}{3N\lambda^4}\,\frac{p}{p_0} = \sigma_{\text{м}} H\,\frac{p}{p_0}, \tag{1.47}$$

p_0 — нормальное давление, равное 1013,2 мбар.

Нормированная индикатриса молекулярного рассеяния, полученная делением (1.45) и (1.46), определяется соотношением

$$\varkappa_{\text{м}}(\theta) = \frac{3}{16\pi}(1+\cos^2\theta). \tag{1.48}$$

Для направления вперед ($\theta=0°$) и назад ($\theta=180°$)

$$\varkappa_{\pi\text{м}} = \frac{3}{8\pi} \approx 0{,}119. \tag{1.49}$$

Объемный коэффициент молекулярного рассеяния $\sigma_{\text{м}}(\lambda, z)$ формально может быть представлен в виде

$$\sigma_{\text{м}}(\lambda, z) = \sigma^0_{\text{м}}(\lambda)\,N(z). \tag{1.50}$$

Для обратного молекулярного рассеяния

$$\sigma_{\pi\text{м}}(\lambda, z) = \varkappa_{\pi\text{м}}\sigma_{\text{м}}(\lambda, z) = \sigma^0_{\pi\text{м}}(\lambda)\,N(z). \tag{1.51}$$

Величины $\sigma^0_{\text{м}}(\lambda)$ и $\sigma^0_{\pi\text{м}}(\lambda)$ называются поперечными сечениями общего молекулярного рассеяния и рассеяния назад соответственно:

$$\sigma^0_{\text{м}}(\lambda) = \frac{32\pi^3 (n-1)^2 \cdot 1{,}061}{3\lambda^4 N_0^2}; \tag{1.52}$$

$$\sigma^0_{\pi\text{м}}(\lambda) = \frac{32\pi^3 (n-1)^2 \cdot 1{,}061 \cdot 0{,}119}{3\lambda^4 N_0^2}, \tag{1.53}$$

где N_0 — число молекул в единице объема воздуха у поверхности Земли при нормальных условиях ($N_0 = 2{,}55 \cdot 10^{25}$ м$^{-3}$).

Задачи

1.26. Длина волны фиолетовых лучей меньше красных примерно в 2 раза. Во сколько раз приблизительно различаются поперечные сечения молекулярного рассеяния; плотности потоков света, рассеянного единицами объема вперед, назад, объемные коэффициенты молекулярного рассеяния для фиолетовых и красных лучей?

1.27. Радиус рассеивающих комплексов, обусловленных флуктуациями плотности воздуха, увеличился в 2 раза; в 10 раз. Как изменится за счет этого плотность потока света, рассеянного единицей объема в любом направлении?

1.28. Вычислить нормированные индикатрисы молекулярного рассеяния для направлений: а) вперед, б) назад, в) под углами 90 и 270° к падающему потоку и г) под углом рассеяния 60°.

1.29. Для исследования аэрозольных слоев, имеющихся в атмосфере, были применены два ОКГ: а) на неодимовом стекле ($\lambda = 1{,}06$ мкм), б) на углекислом газе ($\lambda = 10{,}6$ мкм).

Во сколько раз приблизительно будут различаться вклады за счет молекулярного рассеяния в принятых назад общих рассеянных сигналах (эхо-сигналах), поступивших с разных высот: а) у поверхности Земли; б) на высоте расположения максимума концентрации аэрозолей (около 19 км)?

1.30. Вычислить объемные коэффициенты молекулярного рассеяния для излучений ОКГ на второй гармонике иттрий-алюминиевого граната и на неодимовом стекле на высоте 20 км. Использовать приложения 3 и 13. Почему поперечные сечения и объемные коэффициенты молекулярного рассеяния для этих двух ОКГ различаются не в 16 раз, хотя их длины волн различаются ровно в 2 раза? Что можно сказать о соотношении оптических индексов рефракции и показателей преломления этих двух ОКГ? У какого они больше?

1.31. 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 $9{,}05 \cdot 10^{-4}$ 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?

1.32*. 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: $p = 1013{,}2$ мбар и $t = 15$ °С. Число молекул в единице объема $2{,}687 \cdot 10^{25}$ м$^{-3}$, высота однородной атмосферы $H = 7996$ м. Оптические индексы рефракции для

Ленинградский Гидрометеорологический ин-т БИБЛИОТЕКА

указанных лучей приведены в приложении 8. Длины волн фиолетовых и красных лучей различаются в 2 раза, почему оптические толщины различаются в 17 раз?

1.33*. 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 для задач 1.32 и 1.33 приведены в приложении 8.

1.34. Решить задачу 1.32 для крайних лучей солнечного спектра: ультрафиолетовых ($\lambda=0{,}3$ мкм) и инфракрасных ($\lambda=4{,}0$ мкм). Использовать приложение 8.

1.35. Используя результаты предыдущей задачи, вычислить коэффициенты прозрачности, обусловленные молекулярным рассеянием для УФ лучей 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 на протяжении солнечного спектра, как определить интегральный коэффициент прозрачности для всего солнечного потока?

1.4. Аэрозольное ослабление

Объемный коэффициент аэрозольного рассеяния σ_a выражается формулой

$$\sigma_a=\pi a^2 K(\rho,\ m)N, \tag{1.54}$$

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:

$$f(a)=Aa^{\mu}e^{-ba^{c}}, \tag{1.55}$$

где A — нормирующий множитель, μ, b и c — параметры, постоянные для данного распределения.

При экспериментальной проверке оказалось, что $c \approx 1$.

Малые значения параметра $\mu = 1$, 2 характерны для широких, а большие $\mu = 8$, 10 для узких спектров распределения частиц по размерам, что видно из формулы (1.57).

Полуширина гамма-распределения Δ равна

$$\Delta = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{a_m} \tag{1.56}$$

и связана с параметром μ соотношением К. С. Шифрина

$$\Delta = \frac{2{,}48}{\sqrt{\mu}}, \tag{1.57}$$

где a_m — модальный радиус, $a_{\max}$ и $a_{\min}$ — максимальный и минимальный радиусы, для которых $f(a_{\max,\min}) = \frac{1}{2} f(a_m)$.

Частицы атмосферной дымки вместе с ядрами конденсации обычно делят на три группы: 1) ядра Айткена (0,001 мкм$<$ $<a<$0,1 мкм), 2) большие частицы (0,1 мкм$<a<$1,0 мкм) и 3) гигантские частицы ($a>$1,0 мкм).

Распределение крупных частиц дымки ($a>$0,1 мкм) по размерам удовлетворительно аппроксимируется формулой Юнге

$$f(a) = Aa^{-\beta}, \tag{1.58}$$

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 $\alpha_a(\lambda)$ для наиболее типичных параметров микроструктуры водяных облаков и туманов (приложение 5) и атмосферной дымки (приложение 6) выполнены в Сибирском отделении АН СССР под руководством В. Е. Зуева. Коэффициенты $\alpha_a(\lambda)$ при других значениях метеорологической дальности видимости $S_м$ можно получить простым пересчетом данных, приведенных в приложениях 5 и 6, поскольку $\alpha_a(\lambda)$ обратно пропорциональны $S_м$.

Значения $\alpha_a(\lambda)$ 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

$$\alpha_a(\lambda) = \frac{3{,}91}{S_м}\,\omega(\lambda), \tag{1.59}$$

где $\omega(\lambda) = \frac{\alpha_a(\lambda)}{\alpha_a(0{,}5)}$; значения $\omega(\lambda)$ помещены в приложении 7.

Так как строгие расчеты $\alpha_a(\lambda)$ и $\sigma_a(\lambda)$ довольно сложны даже при известных параметрах микроструктуры атмосферного аэрозоля (обычно его характеристики и вертикальное распределение не известны), для оценок $\alpha_a(\lambda)$ и $\sigma_a(\lambda)$ используют эмпирические формулы. Например, для вычисления $\sigma_a(\lambda)$ формулы Кошмидера

$$\sigma_a(\lambda) = \frac{3{,}91}{S_м}\left(\frac{0{,}55}{\lambda}\right)^{0{,}585 S_м^{1/3}} \tag{1.60}$$

и К. С. Шифрина и И. Н. Минина

$$\sigma_a(\lambda) = \left[\frac{3{,}91}{S_м} - 0{,}0116\right]\left(\frac{0{,}55}{\lambda}\right). \tag{1.61}$$

Здесь σ_a в км$^{-1}$, $S_м$ в км.

Задачи

1.36. Вычислить оптическую толщину стандартной молекулярной атмосферы для $\lambda = 0{,}55$ мкм у поверхности Земли, на высоте 6 и 30 км. Расчет $\tau_м$ выполнить по формуле (1.19), произведя численное интегрирование по слоям: 1) от 0 до 6 км через 2 км; 2) от 6 до 30 км через 4 км и 3) от 30 до 50 км через 10 км. Коэффициенты молекулярного рассеяния на разных высотах взять из приложения 11.

1.37. Решить задачу 1.36 для стандартной аэрозольной атмосферы (см. приложение 11). Расчет выполнить (аналогично задаче 1.36) по формуле (1.20).

1.38. Решить задачу 1.36 для стандартной озонной атмосферы (приложение 11). Расчет выполнить по формуле (1.21).

1.39. Используя результаты задач 1.36, 1.37, 1.38 вычислить общую оптическую толщину стандартной атмосферы 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	$\tau_м$		τ_a		$\tau_{оз}$		$\tau_{общ}$	
	значение	%	значение	%	значение	%	значение	%
0								
6								
30								

Какая оптическая толщина является ведущей: у поверхности Земли, на высоте 6 км или на высоте 30 км?

1.40. Используя таблицу с результатами из предыдущей задачи, вычислить для стандартной атмосферы для длины волны 0,55 мкм (для $m=1$) 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.

1.41. Вычислить коэффициенты пропускания для слоя облаков толщиной 100 м и потери энергии на этом пути для длин волн, между которыми заключена видимая часть спектра: 0,38 и 0,78 мкм. Значительно ли изменяются коэффициенты аэрозольного ослабления, пропускания и 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 5.

1.42. Решить задачу 1.41 для крайних лучей в солнечном спектре: а) УФ лучей с $\lambda = 0{,}31$ мкм и б) ИК лучей с $\lambda = 5{,}0$ мкм. На сколько процентов различаются энергетические потери при переходе от УФ к ИК лучам? Имеется ли существенное преимущество в фотографировании или зондировании облаков с помощью ИК лучей в сравнении с видимыми?

1.43. 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 бы до 1 % от энергии волны, упавшей на туман. Коэффициенты аэрозольного ослабления в таком тумане (гамма-распределение, $S_м=0{,}2$ км) были в начальной стадии 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 микроструктуры (a и $S_м$) неизменными?

1.44. Какой станет длина пути инфракрасного луча ($\lambda = 10$ мкм) в тумане, описанном в предыдущей задаче, если в конечной стадии тумана капли укрупняются и наиболее вероятный размер их станет 10 мкм, а спектр распределения капель останется узким ($\mu=10$). Коэффициент аэрозольного ослабления для такого тумана в конечной стадии равен 24 км$^{-1}$. Как изменилась длина пути луча в тумане только за счет укрупнения капель (другие характеристики распределения не изменялись: $\mu=10$, $S_м=0{,}2$ км).

1.45. Какой путь в облаке или тумане с наиболее типичной микроструктурой (гамма-распределение, $a=6$ мкм, $\mu=2$, $S_м=0{,}2$ 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 5. Какие оптические толщины проходят лучи на таком пути в облаке?

1.46. Какой горизонтальный путь в приземном слое атмосферы могут пройти электромагнитные лучи с длинами волн 0,31 и 0,69 мкм (ОКГ на рубине) при наличии дымки с наиболее типичными параметрами микроструктуры (юнговское распределение, $\beta = 4$, $a_{min} = 0{,}05$ мкм, $a_{max} = 5{,}0$ мкм, $S_м = 10$ км), чтобы энергетические потери на этом пути составили бы 99 %. Использовать приложение 6. 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?

1.47. Какой путь в облаке или тумане с наиболее типичной микроструктурой (гамма-распределение, $a = 6$ мкм, $\mu = 2$, $S_м = 0{,}2$ км) должны пройти инфракрасные лучи с длинами волн 5,27 и 10,6 мкм, чтобы их энергетические потери достигли бы 99 %. Какие оптические толщины проходят данные лучи на таком пути в облаке? Использовать приложение 5.

1.48. 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, $S_м = 10$ км) должны пройти инфракрасные лучи с длинами волн 5,27 и 10,6 мкм, чтобы их энергетические потери составили бы 99 %. Какие оптические толщины при этом проходят данные лучи в атмосфере? Использовать приложение 6.

Сравните с ответами задач 1.45, 1.46, 1.47. Почему пути всех лучей в облаке практически одинаковы, а в атмосфере при дымке значительно различаются? Какой оптической толщины слой облака или тумана могут «пробить» любые электромагнитные волны (УФ, видимого или ИК областей спектра), в том числе и любые ОКГ из этих диапазонов? Чем определялась оптическая толщина в задачах 1.45—1.48 как в облаках, так и в атмосфере при дымке?

1.49. Какие оптические толщины должны пройти электромагнитные волны любой длины в любой ослабляющей их среде, чтобы их энергетические потери составили бы в процентах: а) 50; б) 75; в) 95; г) 99,5; д) 99,9?

Какую максимальную оптическую толщину может пройти любое электромагнитное излучение, когда его первоначальной энергии остается 0,1 %.

1.50. Пользуясь эмпирическими формулами Кошмидера и Шифрина и Минина, вычислить коэффициенты аэрозольного рассеяния излучения ОКГ на рубине ($\lambda = 0{,}69$ мкм) при следую-

щих 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?

1.51. Вычислить коэффициенты аэрозольного рассеяния лазера на рубине ($\lambda=0{,}69$ мкм) при метеорологической дальности видимости: 1, 2, 5, 10, 20, 50 км, используя приложение 6, составленное для $S_м=10$ км и считая, что σ_a обратно пропорциональна $S_м$. Результаты занести в таблицу, в первую и вторую строки которой записать результаты из предыдущей задачи. Вычислить в процентах разности величин σ_a, рассчитанных по формулам Кошмидера и Шифрина и Минина и по более точным данным, приведенным в приложении 6. Какая из формул дает результаты ближе к более точным данным? По какой формуле легче проводить расчеты?

ГЛАВА 2. ЯРКОСТЬ И ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА, РАССЕЯННОГО АТМОСФЕРОЙ. ФОРМА НЕБЕСНОГО СВОДА

2.1. Яркость небесного свода

Спектральная яркость небесного свода, обусловленная рассеянием только первого порядка B_1, при оптических толщинах атмосферы $\tau \leqslant 0{,}3$ может быть вычислена по формуле К. С. Шифрина

$$B_1=\frac{S_{0\lambda}}{4\pi}\tau(\lambda)\sec\theta\varkappa_1(\theta). \qquad (2.1)$$

Здесь $S_{0\lambda}$ — спектральная солнечная постоянная, θ — угловое расстояние точки небосвода от Солнца, $\varkappa_1(\theta)$ — функция рассеяния, или абсолютная индикатриса рассеяния, рассчитанная на всю высоту атмосферы. Ее физический смысл состоит в следующем: если выделить вертикальный слой атмосферы единичного сечения, то без учета вторичных эффектов абсолютная индикатриса такого объема будет равна $\varkappa_1(\theta)$. Таким образом, она представляет собой поток, рассеиваемый под углом θ всем вертикальным столбом единичного сечения.

При измерениях яркости неба можно определить только общую индикатрису рассеяния $\varkappa(\theta)$, в которую кроме $\varkappa_1(\theta)$ входят еще добавочные члены, обусловленные кратным рассея-

нием света $\varkappa_2(\theta)$ и светом, отраженным от земной поверхности и участвующим в кратном рассеянии $\varkappa_A(\theta)$:

$$\varkappa(\theta)=\varkappa_1(\theta)+\varkappa_2(\theta)+\varkappa_A(\theta). \qquad (2.2)$$

Индикатрису $\varkappa(\theta)$, так же как и $\varkappa_1(\theta)$, рассчитанную на всю атмосферу, называют иногда индикатрисой яркости, так как ее характер обусловливает распределение яркости по небосводу, поэтому общая яркость неба B равна

$$B=B_1+B_2+B_A, \qquad (2.3)$$

где B_2 — яркость неба, обусловленная кратным рассеянием света, и B_A — яркость неба, обусловленная светом, отраженным от земной поверхности. B_A можно вычислить по эмпирической формуле Г. Ш. Лившица, полагая B_A одинаковой во всех точках альмукантарата Солнца *:

$$B_A=\frac{17{,}75B(90)-13{,}14B(60)}{4{,}59}, \qquad (2.4)$$

где $B(90)$ и $B(60)$ — яркость неба на альмукантарате Солнца на угловом расстоянии от него 90 и 60°.

При высокой прозрачности атмосферы и малом альбедо подстилающей поверхности A основную роль в создании яркости неба играет рассеяние первого порядка. Учитывая крайнюю изменчивость характеристик атмосферного аэрозоля, его содержания и распределения, а следовательно, и функций $\varkappa_1(\theta)$, $\varkappa_2(\theta)$ и $\varkappa_A(\theta)$, расчеты по формулам (2.1), (2.2) и (2.3) выполняют обычно для заданных моделей атмосферного аэрозоля.

Для определения яркости неба чаще прибегают к непосредственным измерениям ее с помощью визуальных или фотометрических фотометров, в которых сравниваются яркость неба B и яркость экрана $B_{эк}$, освещенного лучами Солнца и имеющего альбедо $A_{эк}$,

$$B=\frac{n_н A_{эк}}{n_{эк}\pi} S_{0\lambda} p^m{}_{\odot} (r_0/r)^2. \qquad (2.5)$$

B и $B_{эк}$ могут быть выражены в абсолютных единицах, а чаще в единицах яркости неба в зените. Фотометры снабжены набором стеклянных фильтров (например, с эффективными длинами волн 0,476, 0,546 и 0,625 мкм). Здесь B в Вт/(см^2·ср·мкм), $n_н$ и $n_{эк}$ — соответственно отсчеты прибора при наблюдении неба и экрана, $(r_0/r)^2$ — поправка на приведение к среднему расстоянию между центрами Земли и Солнца.

---

* Альмукантарат Солнца — круг на небосводе, параллельный горизонту и проходящий через Солнце.

Измерив яркость неба B в нескольких точках и яркость экрана, можно определить индикатрису рассеяния $\varkappa(\theta)$, рассчитанную на всю высоту атмосферы:

$$\varkappa(\theta)=\frac{BA_{эк}}{B_{эк}\pi m_{\odot}}. \qquad (2.6)$$

Е. В. Пясковская-Фесенкова на основании многолетних наблюдений установила средние и наиболее вероятные значения отношения функции рассеяния $\varkappa(\theta)$ к оптической толщине атмосферы τ для визуальной области спектра.

Наиболее строго взаимосвязь $\varkappa(\theta)$ и τ выполняется для угла рассеяния 57°

$$\frac{\varkappa(\theta)}{\tau}=\frac{1}{4\pi}. \qquad (2.7)$$

Это соотношение между $\varkappa$ (57) и τ с точностью до нескольких процентов выполняется для всех реально наблюдаемых индикатрис, так как именно под этим углом 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 атмосферной массой в направлении на Солнце m_{max}

$$\tau=-\ln p=\frac{1}{m_{max}}. \qquad (2.8)$$

Учитывая, что $S=S_0e^{-\tau m}$ и что в момент наступления максимума яркости ореола $m=m_{max}$ и $\tau=1/m_{max}$, получаем

$$S=S_0e^{-1}, \text{ или } S=\frac{S_0}{e}, \qquad (2.9)$$

т. е. в момент наступления максимума яркости ореола солнечная радиация в месте наблюдения при любом коэффициенте прозрачности одинакова. В этот момент она в e раз меньше, чем солнечная радиация на внешней границе атмосферы.

Задачи

2.1. Во время измерений спектральной яркости безоблачного неба в Алма-Ате 7 сентября 1965 г. зенитное расстояние Солнца составляло 60°, измерения выполнялись визуальным фотометром с фильтром с эффективной длиной волны 0,593 мкм. Коэффициент прозрачности атмосферы для этой длины волны составлял 0,80. Альбедо серого экрана равнялось 0,30. Отношение отсчетов прибора при наблюдении неба и экрана ($n_н/n_{эк}$) 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. $S_{0\lambda} = 0{,}1689$ Вт/(см²·мкм). Поправочный множитель $(r_0/r)^2$ для 7 сентября равен 1,016. Использовать также приложение 9.

Как изменяется яркость неба при приближении к Солнцу? Какая функция в формуле (2.1) ответственна за возникновение этого максимума яркости неба? Объяснить, как возникает околосолнечный ореол?

2.2. Условия измерения яркости неба такие же, как в предыдущей задаче. Измерения проводились на двух угловых расстояниях от Солнца: а) 45°; б) 180° при изменении зенитного угла наблюдаемой точки неба от 0 до 75° с интервалом 15°. Отношения отсчетов прибора по небу к отсчетам по экрану равнялись:

при $\Psi = 45°$		при $\Psi = 180°$	
$z°$	$n_н/n_{эк}$	$z°$	$n_н/n_{эк}$
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 при приближении от зенита к горизонту? В каком из азимутов нарастание яркости при приближении к горизонту происходит более интенсивно? Почему? Какая функция в формуле (2.1) ответственна за возникновение пригоризонтного максимума яркости неба? В какой из рассмотренных точек небесного свода наблюдается минимум яркости? Почему?

2.3. 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 $\lambda = 0{,}577$ мкм.

Яркость неба измерена в точках, лежащих на альмукантарате Солнца на угловых расстояниях от Солнца 10, 15, 20, 40, 60, 80, 90, 100, 120 и 140°. Отношения отсчетов по шкале гальванометра при наблюдении яркости неба $n_н$ и яркости серого экрана $n_{эк}$ равнялись соответственно: 0,548; 0,398; 0,352; 0,219; 0,156; 0,125; 0,119; 0,120; 0,135 и 0,124. Альбедо экрана 0,50. Коэффициент прозрачности атмосферы во время измерений был 0,896, зенитное расстояние Солнца 71,9°.

Указания к построению. Построить индикатрису рассеяния в виде полярной диаграммы. Из центра полярной диаграммы провести лучи под углами θ, соответствующими угловым расстояниям от Солнца до точек

неба, в которых измерялась яркость. Горизонтальную ось, направленную слева направо, принять за $\theta=0$. Отсчет углов рассеяния вести в направлении против часовой стрелки. Из центра полярной диаграммы вдоль каждого луча отложить радиус-вектор, равный $\varkappa(\theta)$ в этом направлении. Концы радиусов-векторов соединить плавной линией. Так строится верхняя половина индикатрисы рассеяния. Нижняя ее половина является зеркальным отражением верхней и строится аналогично, только отсчет углов от $\theta=0$ ведется по часовой стрелке. Рекомендуемый масштаб при построении индикатрисы: 1 см — $0{,}25\cdot10^{-2}$ величины $\varkappa(\theta)$.

Решение задачи:

$$\varkappa(\theta)=\frac{0{,}5}{3{,}14\cdot3{,}19}\,\frac{n_{н}}{n_{эк}}=5\cdot10^{-2}n_{н}/n_{эк}.$$

Вычисляем радиусы-векторы индикатрисы рассеяния

θ°	10	15	20	40	60
$\varkappa(\theta)$ . . .	0,0274	0,0199	0,0176	0,0109	0,0078
θ°	80	90	100	120	140
$\varkappa(\theta)$ . . .	0,0062	0,0059	0,0060	0,0068	0,0062

Для построения в рекомендуемом масштабе умножим $\varkappa(\theta)$ на $4\cdot10^2$. Получаем следующие радиусы-векторы:

$\varkappa(\theta)$ . . .	10,97	8,70	7,04	4,18	3,12	2,50	2,38	2,40	2,70	2,48

Полученная индикатриса изображена на рис. 7.

2.4. Используя результаты предыдущей задачи, вычислить и построить индикатрисы молекулярного $\varkappa_{м}(\theta)$ и аэрозольного $\varkappa_{а}(\theta)$ рассеяния. Построение выполнить на рисунке предыдущей задачи.

Указания по вычислению и построению индикатрис $\varkappa_{м}(\theta)$ и $\varkappa_{а}(\theta)$.

Под углом рассеяния, близким к 60° *, практически все аэрозольные индикатрисы пересекаются со сферической при равных оптических толщинах. Поэтому на полярной диаграмме рис. 7 в принятом масштабе

$$\varkappa_{сфер}=\varkappa_{а}(60)=\varkappa_{м}(60)=\frac{\varkappa(60)}{2}=\frac{3{,}12}{2}=1{,}56\text{ см}.$$

Относительные индикатрисы молекулярного рассеяния $(1+\cos^2\theta)$ приведены в табл. 2.1. Под углом $\theta=60°$ мы имеем $\varkappa_{м}(60)=1{,}56$ см, модуль молекулярной индикатрисы $\varkappa_{м}(60)=1{,}25$. Из соотношения 1,56/1,25 находим множитель 1,247, на который следует помножить все модули молекулярной индикатрисы, чтобы получить радиусы-векторы молекулярной индикатрисы для разных углов θ в принятом масштабе построения. Полученные таким образом значения $\varkappa_{м}(\theta)$ приведены в 3-й графе табл. 2.1. В 4-й графе помещены величины $\varkappa(\theta)$, вычисленные в предыдущей задаче. Аэрозольную индикатрису для каждого угла рассеяния получаем как разность общей и молекулярной индикатрис:

$$\varkappa_{а}(\theta)=\varkappa(\theta)-\varkappa_{м}(\theta).$$

Результаты вычислений $\varkappa_{а}(\theta)$ помещены в 5-й графе табл. 2.1. Построенные указанным способом индикатрисы $\varkappa_{м}(\theta)$ и $\varkappa_{а}(\theta)$ также изображены на рис. 7.

---

* Молекулярная и сферическая индикатрисы, строго говоря, пересекаются под углами рассеяния около 55—57°.

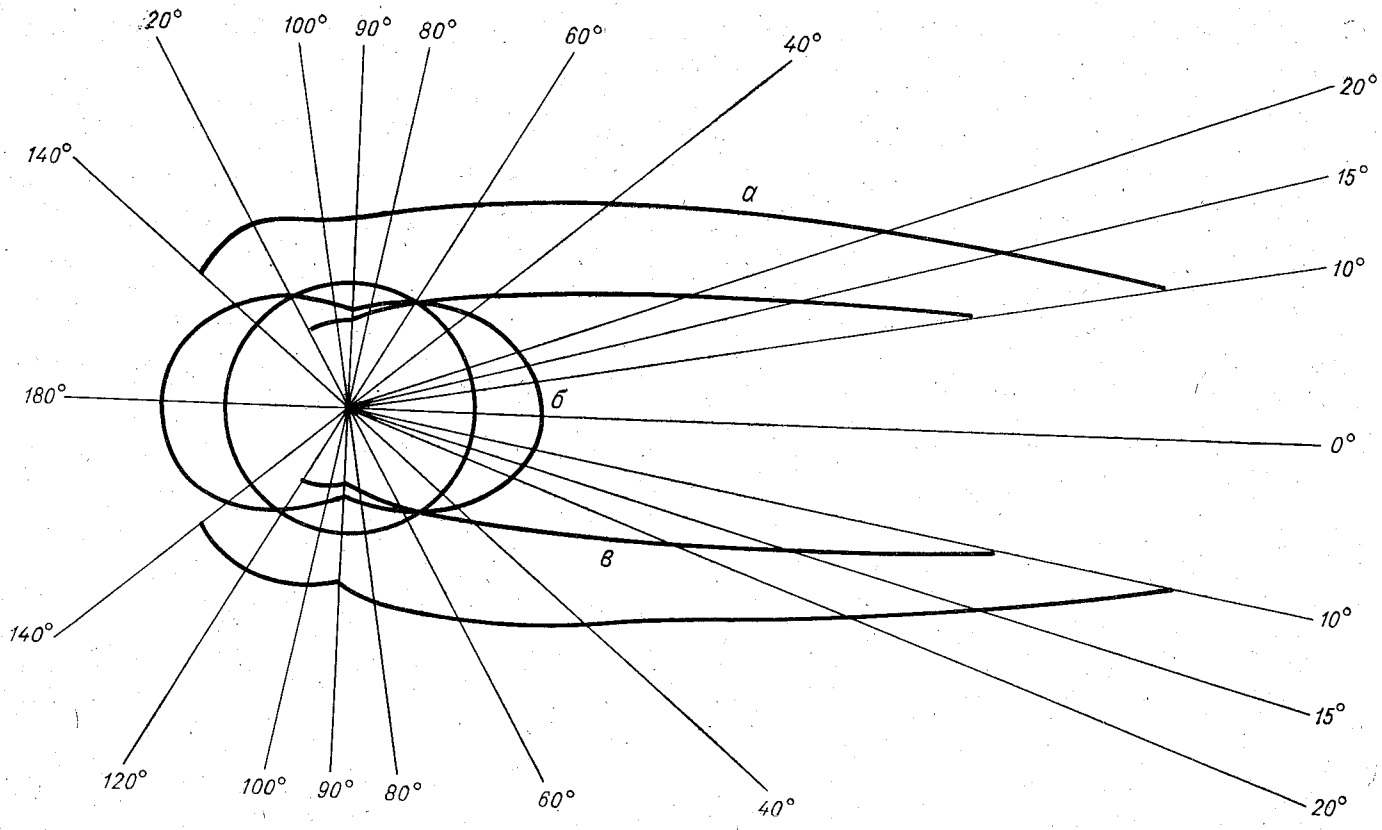


Рис. 7. Рассчитанные на всю атмосферу индикатрисы яркости: общая (*а*), молекулярного (*б*) и аэрозольного (*в*) рассеяния.

Таблица 2.1

Результаты вычислений молекулярной и аэрозольной индикатрис

$\theta°$	$1+\cos^2\theta$	$\varkappa_м(\theta)$ см	$\varkappa(\theta)$ см	$\varkappa_а(\theta)$ см
1	2	3	4	5
0	2,00	2,50		
10	1,97	2,46	10,97	8,51
15	1,93	2,40	8,70	6,30
20	1,88	2,34	7,04	4,70
40	1,59	1,98	4,18	2,20
60	1,25	1,56	3,12	1,56
80	1,03	1,28	2,50	1,22
90	1,00	1,25	2,38	1,13
100	1,03	1,28	2,40	1,12
120	1,25	1,56	2,70	1,14
130	1,41	1,76	—	—
140	1,59	1,98	2,48	0,50
150	1,75	2,18	—	
160	1,88	2,34		
180	2,00	2,50		

2.5. Вычислить и построить индикатрису яркости, т. е. индикатрису рассеяния, рассчитанную на всю атмосферу и не освобожденную от влияния вторичных эффектов, по результатам измерений яркости неба и серого экрана, выполненных 18 июля 1952 г. в Алма-Ате визуальным фотометром В. Г. Фесенкова с фильтром $\lambda = 0{,}577$ мкм. Яркость неба измерена при зенитном расстоянии Солнца 73,2° в точках, лежащих на альмукантарате Солнца на угловых расстояниях от него, равных: 10, 15, 20, 40, 60, 80, 90, 100, 120 и 140°. Отношения отсчетов по шкале гальванометра при наблюдении яркости неба ($n_н$) и яркости экрана ($n_{эк}$) равнялись соответственно: 1,288; 1,050; 0,795; 0,329; 0,224; 0,172; 0,157; 0,155; 0,168 и 0,183. Альбедо экрана равно 0,50. Коэффициент прозрачности атмосферы во время наблюдений составлял 0,865. Построить индикатрису рассеяния в виде полярной диаграммы. Указания для построения индикатрисы изложены в задаче 2.3. Рекомендуемый масштаб при построении индикатрисы 1 см — $0{,}25\cdot10^{-2}$ величины $\varkappa(\theta)$.

2.6. Используя результаты предыдущей задачи, вычислить индикатрисы молекулярного $\varkappa_м(\theta)$ и аэрозольного $\varkappa_а(\theta)$ рассеяния и построить их на полярной диаграмме предыдущей задачи.

Вычисление индикатрис $\varkappa_м(\theta)$ и $\varkappa_а(\theta)$ и их построение выполнить так, как указано в задаче 2.4. Сравните индикатрисы рассеяния, построенные в данной задаче и в задаче 2.4. 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.

2.7. Спектральная яркость неба для $\lambda = 0{,}577$ мкм по измерениям, выполненным в Алма-Ате 19 ноября 1952 г. при наличии снежного покрова, в точках неба, расположенных на альмукантарате Солнца на угловых расстояниях от него, равных 10, 15, 20, 40, 60, 80, 90, 100 и 120°, оказалась равной соответственно: 210,4; 182,8; 157,3; 106,9; 82,4; 70,0; 68,4; 68,4; 74,4 относительных единиц. Построить индикатрисы яркости, рассчитанные на всю высоту атмосферы: а) неосвобожденную от влияния кратного рассеяния и отражения от земной поверхности; б) освобожденную от влияния отражения от земной поверхности. Для вычисления яркости неба, обусловленной отражением от земной поверхности, использовать формулу Г. Ш. Лившица (2.4). Рекомендуемый масштаб для полярной диаграммы 1 см — $4 \cdot 10^{-2}\, B(\theta)$.

2.8. По результатам предыдущей задачи вычислить молекулярную и аэрозольную индикатрисы и построить их на общей полярной диаграмме задачи 2.7. При вычислении и построении индикатрис использовать указания из задачи 2.4. 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 от общей яркости неба (в процентах), обусловленные молекулярным, аэрозольным рассеянием и отражением от земной поверхности, покрытой снегом. Как изменяются эти доли при переходе от угла рассеяния 10° к углу 90°?

2.9. Максимум яркости околосолнечного ореола наблюдался при зенитном расстоянии Солнца 81,7°. Определить оптическую толщину; коэффициент прозрачности атмосферы и плотность потока прямой солнечной радиации в этот момент.

2.10. В один из дней наблюдений за околосолнечным ореолом его максимальная яркость имела место при зенитном расстоянии Солнца 59,3°. Определить оптическую толщину; коэффициент прозрачности атмосферы; плотность потока прямой солнечной радиации.

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? при большей или меньшей массе атмосферы в направлении на Солнце? в) при большей или меньшей оптической толщине атмосферы в направлении на Солнце?

2.2. Поляризация света, рассеянного атмосферой. Форма небесного свода

Степень поляризации света дневного неба с учетом только однократного молекулярного рассеяния по теории Релея будет

$$p=\frac{\sin^2\theta}{1+\cos^2\theta}\cdot 100\,\%; \qquad (2.10)$$

по теории Кабанна с учетом оптической анизотропии молекул воздуха:

$$p=\frac{\sin^2\theta}{1{,}061+\cos^2\theta}\cdot 100\,\%, \qquad (2.11)$$

где θ — угол рассеяния. Даже формула (2.11) выполняется 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

$$p=p_{\max}\frac{\sin^4\theta}{1-p_{\max}\cos^4\theta}, \qquad (2.12)$$

где $p_{\max}$ — максимальная наблюдаемая степень поляризации, которую можно вычислить по эмпирической формуле Г. В. Розенберга, связывающей $p_{\max}$ с коэффициентом прозрачности атмосферы p при $m = 1$:

$$p_{\max}=p-0{,}03. \qquad (2.13)$$

Мерой сплюснутости небесного свода является угол α, определяющий высоту точки M, которая делит дугу небосвода HZ пополам (рис. 8):

$$\operatorname{tg}\alpha=\frac{\cos x-\cos 2x}{\sin x}. \qquad (2.14)$$

Сплюснутость неба можно характеризовать также отношением горизонтальных размеров неба OH к вертикальным OZ

$$OH/OZ=\operatorname{ctg} x. \qquad (2.15)$$

Отношение OH/OZ при различных значениях угла α приведено в приложении 19.

Задачи

2.11. Насколько изменились и чему равны максимальная $p_{\max}$ и минимальная $p_{\min}$ степень поляризации света, однократно рассеянного молекулярной атмосферой, если учитывать влияние оптической анизотропии молекул воздуха, выполненной Кабанном? В каких точках небосвода они должны были бы наблюдаться по теории Релея — Кабанна?

освещена прямыми солнечными лучами и во сколько раз? Широта острова 80,5°. Использовать приложения 9 и 20.

3.3. Какова максимально возможная освещенность горизонтальной поверхности в полдень в день весеннего равноденствия на экваторе; в Ленинграде (60° с. ш.); на ст. Восток в Антарктиде (78,5° 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 20.

3.4. 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 9 и 20. Во сколько раз освещенность на экваторе больше, чем в Ленинграде и на ст. Восток? Почему изменилось соотношение освещенностей по сравнению с ответами предыдущей задачи, ведь в Антарктиде и Ленинграде прозрачность воздуха больше, чем на экваторе.

3.5. Доказать, что освещенность горизонтальной площадки на земной поверхности E_D, освещенной всем небосводом, яркость которого всюду одинакова и равна $B_н$, выражается:

$$E_D = \pi B_н.$$

3.6. При облачности 10/10 St освещенность земной поверхности рассеянным светом при наличии снежного покрова равна 13 000 лк. Найти среднюю яркость неба, покрытого такими облаками.

3.7. Средняя яркость неба, полностью покрытого равномерным по яркости слоем облаков Ns, 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.

3.8. Средняя освещенность горизонтальной поверхности рассеянным светом в Павловске по данным Н. Н. Калитина при наличии и отсутствии снежного покрова была:

E_D	$h^\circ_\odot$							
	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?

3.9. Какую освещенность создает прямой солнечный свет на поле, покрытом травой, если яркость поля равна $3{,}5 \cdot 10^3$ кд/м^2, а альбедо 0,22. Считать, что трава отражает по закону Ламберта.

3.10. 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.

3.11. 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.

3.12. Вычислить освещенность горизонтальной поверхности Земли лунным светом в момент полнолуния и в первую четверть, если высота Луны 60°, а коэффициент прозрачности атмосферы равен 0,77. Использовать данные задачи 3.11.

3.13. Средняя яркость ночного безлунного неба около 1 ч равнялась 10^{-4} кд/м^2. Определить освещенность земной поверхности, создаваемую за счет свечения, возникающего в земной атмосфере, если участие источников освещения около 1 ч при отсутствии Луны следующее: ночное свечение неба 60 %; свет звезд 22 %; зодиальный и галактический свет 18 %.

3.14. Что имеет бо́льшую яркость, т. е. должно казаться светлее, и во сколько раз вспаханное черноземное поле с альбедо 0,05, освещенное Солнцем ($E_S = 100\,000$ лк), или свежевыпавший снег с альбедо 0,90, освещенный полной Луной в зените ($E_Л = 0{,}25$ лк).

3.15. 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} кд/м^2 до 10^{-1} кд/м^2. Максимальная площадь, захваченная полярным сиянием, достигает $^1/_4$ небосвода.

Максимальная (минимальная) освещенность, создаваемая полярным сиянием, больше или меньше освещенности от Луны? Звезд? Ночного свечения неба?

3.16. 24 декабря 1971 г. на ст. Беллинсгаузен в Антарктиде при высоте Солнца 51° и облачности 3/3 Sc измерены потоки прямой и рассеянной солнечной радиации. Они равны соответственно 1,01 и 0,11 кВт/м^2. Вычислить прямую, рассеянную и суммарную освещенность. Использовать приложение 10.

3.17. Прямая и рассеянная солнечная радиация на о. Врангеля 4 июля 1964 г. составила соответственно 0,91 и 0,22 кВт/м^2. Высота Солнца во время измерений равнялась 37,3°, облачность ⊙^{2} 6/0 Ac, Ci. Вычислить суммарную освещенность в момент измерения радиации. Использовать приложение 10.

3.18. По измерениям 13 июля 1974 г. на площадке ЛГМИ в Даймище при облачности ⊙^{2} 3/3 Sc и высоте Солнца 48°

потоки прямой и рассеянной радиации оказались равными соответственно 0,74 и 0,18 кВт/м². Вычислить прямую, рассеянную и суммарную освещенность, используя световые эквиваленты радиации. Использовать приложение 10.

3.2. Сумерки. Явления, наблюдаемые во время сумерек

Нижняя граница 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. 9)

$$H=R(\sec\varphi-1); \tag{3.6}$$

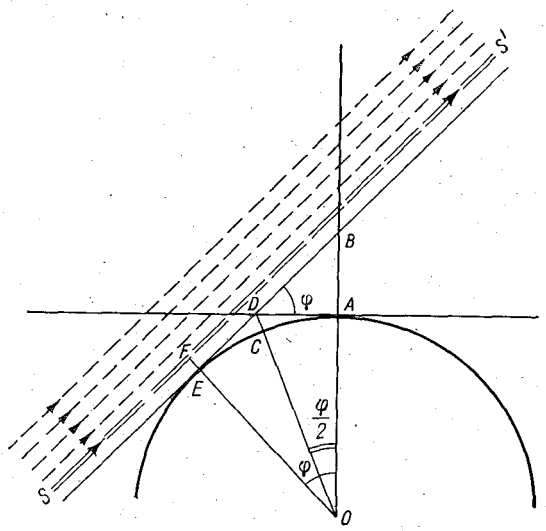


Рис. 9. Схема сумерек. Положение сумеречного луча.

в направлении на горизонт $DC=h$

$$h=R(\sec\varphi/2-1), \tag{3.7}$$

где R — радиус Земли, φ — центральный угол, равный углу погружения Солнца.

Высота эффективного рассеивающего слоя в направлении на зенит равна высоте слоя, на который падает в каждый момент сумерек сумеречный луч. Сумеречный луч SS' 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 (3.1).

Продолжительность сумерек можно определить по формуле (3.1) или (5.7) как разность часовых углов Солнца, соответствующих началу и концу каждого вида сумерек. Гражданские сумерки начинаются с исчезновения верхнего края диска Солнца под горизонтом, кончаются при $\varphi = -7°$; навигационные сумерки продолжаются от $\varphi = -7°$ до $\varphi = -12°$; астрономические сумерки — от $\varphi = -12°$ до $\varphi = -18°$.

Задачи

3.19. В. И. Черняев и М. Ф. 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 имело место при изменении зенитного расстояния Солнца от 97°09′ до 98°28′?

3.20. 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°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?

3.21. Вычислить высоты слоев в атмосфере, выключенных из участия в рассеянии света в направлении на горизонт в конце гражданских, навигационных и астрономических сумерек.

3.22. Определить высоты земной тени в зените в конце гражданских, навигационных и астрономических сумерек. На каких высотах лежат в эти моменты сумерек центры эффективных рассеивающих слоев?

3.23. 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°. До какой максимальной глубины погружения Солнца серебристые облака еще будут видны, если они располагаются в околозенитной части неба? Высота облаков над земной поверхностью изменяется от 75 до 90 км.

3.24. Условия, аналогичные предыдущей задаче, но серебристые облака располагаются в северной части небосвода у самого горизонта.

3.25. 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, опустилась 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 20 и 21.

3.26. 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?

3.27. В какие часы можно наблюдать серебристые облака в Ленинграде (60° с. ш.) 25 августа, если они видны при погружении Солнца под горизонт от 5 до 18°. Использовать приложения 20 и 21.

3.28. 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 20 и 21.

3.29. 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?

3.30. На основе фотографий края Земли и ее сумеречного ореола, полученных с космического корабля «Восток-6» 17 июня 1963 г. В. В. Николаевой-Терешковой, 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
$\sigma(z)\cdot 10^{-3}$ 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, концентрация порядка 1 частица в 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.

ГЛАВА 4. ДАЛЬНОСТЬ ВИДИМОСТИ ДАЛЕКИХ ПРЕДМЕТОВ И ОГНЕЙ

4.1. 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′×15′):

$\varepsilon=0{,}02$ 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, коротко, порог световой чувствительности глаза $E_{св}$ — минимальная освещенность зрачка глаза наблюдателя (блеск), при которой он еще видит этот источник. $E_{св}=5\cdot10^{-9}$ лк для единичного огня при полной темновой адаптации глаза в лабораторных условиях. В полевых условиях: $E_{св}=2{,}7\cdot10^{-7}$ 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} — минимальное количество световой энергии, которое производит световое раздражение сетчатки глаза человека в условиях полной темновой адаптации. По измерениям С. И. Вавилова, $\Phi_{min}=3{,}1\cdot10^{-18}$ Вт для $\lambda=0{,}507$ мкм (зеленый свет), к которой глаз наиболее чувствителен при полной темновой адаптации. Такое значение Φ_{min} соответствует световому потоку $F_{min}\approx10^{-13}$ 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

4.1. Сколько квантов с $\lambda=0{,}507$ мкм должен в 1 с испускать источник, энергии которого достаточно для светового раздражения сетчатки при полной темновой адаптации глаза.

4.2. Имеется источник, излучающий энергию, равную по величине абсолютному порогу световосприятия, и мы можем эту энергию накапливать. Сколько времени придется собирать эту энергию, чтобы набрать количество ее, достаточное для нагревания 1 г воды на 1 °С?

4.3. С какого самого большого расстояния можно увидеть темной ночью горящий фонарь «летучая мышь» силой света 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?

4.4. 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 равен 6 мм.

4.5. На каком расстоянии темной ночью можно увидеть свет от папиросы, силу света которой можно принять равной 1/400 кд, если порог световосприятия равен 10^{-13} лм, а площадь зрачка глаза 0,4 см^2.

4.6. Считая разрешающую способность глаза равной 1′, а телескопа 0,12″, вычислить расстояние между вершинами двух гор на Луне, чтобы их можно было видеть раздельно. Принять, что освещенность предметов и их контраст с фоном достаточны и не влияют на разрешающую способность глаза. Расстояние до Луны равно 384 000 км.

4.7. 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 понимании?

4.2. Геометрическая дальность видимости

Геометрическая дальность видимости предмета высотой $H_{пр}$ для наблюдателя, находящегося на высоте $H_н$ над земной поверхностью, с учетом рефракции света в атмосфере вычисляется по формуле

$$D = 3{,}82\left(\sqrt{H_н} + \sqrt{H_{пр}}\right), \qquad (4.1)$$

здесь $H_н$ и $H_{пр}$ в м, D в км.

Задачи

4.8. Где и во сколько раз больше геометрическая дальность видимости одного и того же предмета на Земле или на Луне? На Земле или на Юпитере? Чему равнялась бы геометриче-

ская дальность видимости любого предмета, если бы Земля стала плоской? Использовать приложение 1.

4.9. Вычислить радиус видимого горизонта для наблюдателя ростом 1,64 м.

4.10. На каком расстоянии наблюдатель ростом 1,64 м, находясь на берегу, увидит в море теплоход высотой 16 м?

4.11. На каком расстоянии от наблюдателя находится слой облаков Ac cast, видимых у горизонта, если их средняя высота равна 4 км? Сколько баллов составляет метеорологическая дальность видимости в условиях данной задачи?

4.12. Средняя высота нижней границы полярного сияния равна 100 км. С какого расстояния можно было бы его увидеть, если бы не было ослабления света в атмосфере?

4.13. Искусственное свечение натриевого облака в сумерки было создано с помощью специального устройства на ракете, выбросившей несколько килограммов натрия на высоте около 85 км. Желтый свет флуоресцирующего натриевого облака был хорошо виден не только в месте запуска ракеты, но и, как утверждали наблюдатели метеостанций, на расстояниях до 500 км. Доказать, могло ли это иметь место?

4.14. Высота полета космического корабля над земной поверхностью меняется в пределах от 175 км в перигее до 327 км в апогее. Вычислить геометрическую дальность видимости для космонавта при нахождении корабля в перигее и апогее.

4.15. Используя условия и результаты предыдущей задачи, определить минимальные размеры предметов на Земле, которые может увидеть космонавт в перигее и 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?

4.16. Спутники советской метеорологической космической системы «Метеор» обращаются вокруг Земли по круговым орбитам на высоте около 600 км. Ответить на все вопросы задач 4.14, 4.15.

4.3. Метеорологическая дальность видимости

Метеорологическая дальность видимости $S_м$ днем вычисляется по формулам

$$S_м = \frac{1{,}7}{\alpha}; \qquad (4.2)$$

$$S_м = \frac{3{,}9}{\alpha}; \qquad (4.3)$$

$$S_м = \frac{\lg \varepsilon}{\lg p}, \qquad (4.4)$$

где a и α — коэффициенты ослабления (рассчитываются на единицу длины пути, $м^{-1}$ или $км^{-1}$), p — коэффициент прозрачности в горизонтальном направлении, 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:

$$p_{ид}=e^{\sigma_м H}; \tag{4.5}$$

в горизонтальном направлении (на единицу длины пути, обычно 1 км)

$$p_{ид}=e^{-\sigma_м}. \tag{4.6}$$

Здесь $\sigma_м$ — объемный коэффициент молекулярного рассеяния, H — высота однородной атмосферы.

В формулах (4.2)—(4.6), а также и во всех следующих формулах данной главы все характеристики ослабления радиации в атмосфере: a, α, p, $S_м$, $p_{ид}$, $\sigma_м$ — относятся к интегральному потоку.

Метеорологическая дальность видимости в облаках и туманах оценивается по эмпирическим формулам, связывающим $S_м$ (м) с водностью q (г/м^3) облака или тумана. При средних условиях
для Sc

$$S_м=34{,}1/q^{0{,}63}; \tag{4.7}$$

для St

$$S_м=42{,}7/q^{0{,}72}. \tag{4.8}$$

Формулы (4.7) и (4.8) получены Г. М. Забродским. Для тумана имеются формулы
Е. А. Поляковой

$$S_м=59{,}2/q^{0{,}54}, \tag{4.9}$$

Траберта

$$S_м=2{,}6\frac{r^*}{q}, \tag{4.10}$$

где $r^*=\tilde{r}_3^3/\tilde{r}_2^2$ — поверхностно-эквивалентный радиус капель (мкм) ($\tilde{r}_3$ и $\tilde{r}_2$ — средний кубический и квадратический радиусы капель соответственно), r^* связана с водностью соотношением

$$r^* \approx 32\sqrt{q}. \tag{4.11}$$

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

определяется через интенсивность выпадающих осадков I (мм/ч)

$$\alpha = 0{,}21 I^{0{,}74} \tag{4.12}$$

для дождей, а метеорологическая дальность видимости, согласно (4.3), равна

$$S_м = 18{,}6 I^{-0{,}74}; \tag{4.13}$$

для снегопадов

$$\alpha = 3{,}21 I^{0{,}91}; \tag{4.14}$$

$$S_м = 1{,}21 I^{-0{,}91}. \tag{4.15}$$

Задачи

4.17. Вычислить коэффициент прозрачности и коэффициенты ослабления a и α, рассчитанные на 1 км и 1 м, если $S_м = 10$ км. Сколько процентов светового потока, например, отраженного света, идущего от предмета в сторону наблюдателя, задерживается слоем воздуха длиной 1 км и 1 м?

4.18. Метеорологическая дальность видимости в тумане равна 200 м. Вычислить коэффициент ослабления a, рассчитанный на 1 м, и через него потери световой энергии при прохождении светом слоя длиной 100 м. При какой длине пути потери световой энергии в данном тумане составят 98 %.

4.19. При определении $S_м$ прибором опытный наблюдатель получил $S_м = 2$ км, а начинающий наблюдатель этим же прибором получил $S_м = 1{,}2$ км. Определить порог контрастной чувствительности зрения начинающего наблюдателя.

4.20. Вычислить коэффициент ослабления a, коэффициент прозрачности, рассчитанный на 1 м и 1 км, метеорологическую дальность видимости в километрах и баллах и выразить ее соответствующей цифрой кода, если коэффициент ослабления α, измеренный нефелометром, равен 0,253 км$^{-1}$.

4.21. Вычислить коэффициент прозрачности идеальной атмосферы (сухой и беспыльной) в горизонтальном направлении, рассчитанный на 1 км, и максимально возможную метеорологическую дальность видимости в такой атмосфере. Коэффициент прозрачности всей толщи атмосферы с учетом только молекулярного рассеяния света при $m = 1$ равен 0,907, температуру воздуха у поверхности Земли принять равной 0 °С, давление нормальным. Атмосферу считать однородной. Можно ли увидеть достаточно высокий предмет любой яркости и цвета, находящийся в горизонтальном направлении на расстоянии, большем чем 321 км? Почему?

4.22. Решить задачу 4.21 при температуре воздуха у поверхности Земли —20 °С. Почему $p_{ид}$ и $S_{м\,max}$ получились меньше, чем в задаче 4.21?

4.23. Решить задачу 4.21 при температуре воздуха у поверхности Земли 20 °С. Сравнить с ответами задач 4.21, 4.22. В каком диапазоне варьирует $S_{\text{м max}}$ при изменении температуры воздуха у земной поверхности от —20 до 20 °С?

4.24. Вычислить метеорологическую дальность видимости, коэффициент ослабления α, рассчитанный на 1 м и 1 км, и энергетические потери лучей видимого диапазона в облаке St на трассе длиной 100 м, если в этом облаке водность $q=0{,}1$ г/м^3.

4.25. Решить задачу 4.24 для облака Sc. Объяснить, почему при одинаковой водности в обоих облаках, в Sc метеорологическая дальность видимости меньше, а показатель ослабления и энергетические потери на той же трассе больше?

4.26. Решить задачу 4.24 для тумана. Сравнить с ответами задач 4.24 и 4.25. К оптическим характеристикам каких облаков, St или Sc, ближе оптические характеристики тумана?

4.27. Вычислить объемный коэффициент аэрозольного рассеяния в радиационном тумане, считая, что этим рассеянием и обусловлено основное ослабление видимого диапазона в тумане. Определить метеорологическую дальность видимости, если $q=0{,}031$ г/м^3, распределение капель по размерам является гамма-распределением, параметр $\mu=6$, средний радиус капель равен 2 мкм. При решении использовать формулу (7.3).

4.28. Туман, описанный в предыдущей задаче, усилился, и изменились его характеристики. Решить задачу 4.27 для $q = 0{,}32$ г/м^3, $\bar{r} = 6$ мкм и $\mu = 3$.

4.29. Вычислить число капель в единице объема и поверхностно-эквивалентные радиусы r^* для тумана, описанного в задачах 4.27 и 4.28. Какие изменения микрофизических и оптических характеристик тумана произошли при переходе от условий задачи 4.27 к условиям задачи 4.28? Использовать формулу (7.4).

4.30. Вычислить объемный коэффициент аэрозольного рассеяния и соответствующую метеорологическую дальность видимости в км и баллах во время дождя, если его минимальная интенсивность равна 0,3 мм/ч.

4.31. Решить задачу 4.30 для максимальной интенсивности дождя 57 мм/ч. Каков диапазон изменения метеорологической дальности видимости при выпадении дождей разной интенсивности?

4.32. Сравнить энергетические потери горизонтальных потоков (например, излучений ОКГ) на трассе длиной 1 км в случае слабого и самого интенсивного дождей (задачи 4.30 и 4.31).

4.33. Вычислить объемный коэффициент аэрозольного ослабления и метеорологическую дальность видимости в км и баллах при слабом снегопаде интенсивностью 0,1 мм/ч.

4.34. Решить задачу 4.33 для сильного снегопада с интенсивностью 3 мм/ч. Сравнить диапазоны изменения $S_{\text{м}}$ при сильных и слабых дождях и снегопадах (задачи 4.30, 4.31, 4.33 и данная).

4.35. В Ленинградской области 19 июня 1951 г. при грозовом дожде интенсивность осадков в отдельные моменты достигала 22,6 мм/ч. Какова была минимальная метеорологическая дальность видимости в км и баллах при таких усилениях дождя?

4.4. Дальность видимости огней

Освещенность, создаваемая ночью огнем с силой света I, находящимся на расстоянии l, вычисляется по формуле Аллара:

$$E=\frac{I}{l^2}e^{-\alpha l}, \tag{4.16}$$

где α — коэффициент ослабления. В момент потери видимости огня $l=S_{ог}$ и $E=E_{св}$

$$E_{св}=\frac{I}{S_{ог}^2}e^{-\alpha S_{ог}}. \tag{4.17}$$

Подставляя в (4.17) α из формулы (4.3) и логарифмируя, получим:

$$\ln S_{ог}+\frac{3{,}9}{2S_м}S_{ог}=\frac{1}{2}(\ln I-\ln E_{св}). \tag{4.18}$$

Уравнение (4.18) относительно $S_{ог}$ не решается алгебраически. Для его решения построены номограммы с разными значениями порога световой чувствительности глаза $E_{св}$ (для белых огней). Номограмма В. А. Березкина для одиночного огня в темное время (приложение 24)

$$E_{св}=2{,}7\cdot 10^{-7}\ \text{лк};$$

номограмма В. А. Гаврилова с расширенным пределом для силы света огня (приложение 25)

$$E_{св}=2\cdot 10^{-7}\ \text{лк};$$

для групповых огней в темное время (приложение 26)

$$E_{св}=10^{-6}\ \text{лк}$$

и в светлое время (приложение 27)

$$E_{св}=10^{-3}\ \text{лк}.$$

Все номограммы можно использовать не только при том значении $E_{св}$, для которого они построены, но и при любом другом. Для этого необходимо увеличить (или уменьшить) заданную силу света I соответственно новой задаваемой пороговой освещенности $E_{св}$, т. е. увеличить (или уменьшить) I во столько раз, во сколько раз новый порог $E_{св}$ меньше (или больше) того порога, для которого составлена данная номограмма.

Приведенные номограммы можно применять и для цветных огней (сигналов), используя пороги световой чувствительности для точечных цветных огней из приложения 14.

Пример. Определим дальность видимости красного огня, имеющего силу света $4 \cdot 10^4$ кд при $S_м = 50$ км и яркости фона $5 \cdot 10^{-2}$ кд/м². Для такой яркости фона пороговая освещенность для красного света, в соответствии с данными приложения 14, равна $0{,}45 \cdot 10^{-6}$ лк. Эта пороговая освещенность 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 $S_м = 50$ км) соответствует дальность видимости огня 50 км.

Задачи

4.36. Какой минимальной силы света должен быть огонь морского маяка, чтобы штурман корабля мог его заметить ночью с расстояния не менее 5 км, при следующих условиях: не учитывая ослабление света в атмосфере; в идеальной атмосфере, при максимально возможной метеорологической дальности видимости 321 км (при температуре воздуха у земли 15 °С); в реальной атмосфере, при отличной метеорологической дальности видимости ($S_м = 50$ км). Существенно ли изменяется минимальная сила света при переходе от случая отсутствия атмосферы к идеальной и реальной атмосфере при $S_м = 50$ км?

4.37. Решить задачу 4.36 при следующих значениях метеорологической дальности видимости: 10, 5, 2 и 1 км. Сравните с ответами предыдущей задачи. В каких пределах изменяется необходимая минимальная сила света при изменении метеорологической дальности видимости от 50 км до 1 км? Чем объясняется резкое увеличение необходимой минимальной силы света при $S_м = 2$ и 1 км? Каким метеорологическим условиям соответствуют значения $S_м = 2$ км? $S_м = 1$ км?

4.38. Вычислить световой поток, падающий на площадь зрачка глаза наблюдателя от огня силой света 60 кд, находящегося от наблюдателя на расстоянии 2 км. Диаметр зрачка глаза равен 4 мм. Если выполнены условия темновой адаптации глаза и наблюдатель находится в полевых условиях, то увидит ли он этот огонь? С какого самого большого расстояния можно увидеть этот огонь? Ослабление света в атмосфере не учитывать.

4.39. Решить задачу 4.38 с учетом ослабления света в атмосфере, если метеорологическая дальность видимости равна 10 км.

4.40. Определить метеорологическую дальность видимости в километрах и баллах, если одиночный огонь силой света в 50 кд становится невидимым ночью на расстоянии 2 км.

4.41. Сигнальный огонь семафора на ж.-д. транспорте должен быть виден с расстояний не менее 800—1200 м. В каком диапазоне значений должна лежать минимальная сила света белого огня семафоров, чтобы машинист мог его увидеть в тумане при $S_м = 500$ м.

4.42. Решить задачу 4.41 для тумана с видимостью 200 м. Сравнить ответы данной и предыдущей задачи. Во сколько раз увеличивается необходимая минимальная сила света огней при уменьшении метеорологической дальности в тумане в 2,5 раза?

4.43. 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?

4.44. Расстояние до берега было около 60 км, когда наблюдателю на теплоходе ночью показалось, что он видит свет маяка. Мог ли он действительно увидеть свет маяка с такого расстояния, если метеорологическая дальность видимости равнялась 20 км, а сила света прожектора маяка $1{,}8 \cdot 10^9$ кд.

4.45. Решить задачу 4.44 при условиях $S_м = 10$ км, теплоход находился на расстоянии 40 км от берега.

Определение дальности видимости огней по номограммам

4.46. Решить задачу 4.37 по номограмме В. А. Березкина (приложение 24).

4.47. Решить задачу 4.40 по одной из номограмм.

4.48. Видимость в тумане была 800 м. С какого расстояния машинист тепловоза заметит белый огонь семафора, сила света которого равна 500 кд? Использовать номограмму В. А. Гаврилова (приложение 25).

4.49. Туман, упомянутый в предыдущей задаче, уплотнился. Видимость снизилась до 500, 200 и 100 м. С каких расстояний теперь сможет машинист увидеть белый огонь силой света 500 кд?

4.50. Решить задачу 4.48 для красного и зеленого огней. Использовать приложения 14 и 25.

4.51. Решить задачу 4.49 для красного и зеленого огней. (Использовать приложения 14 и 25.)

4.52. 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 $S_м = 400$ м. Использовать приложение 25.

4.5. Посадочная дальность видимости

Посадочную дальность видимости днем можно вычислять по формуле

$$S_{пос}=0{,}62S_м \lg \frac{V_0+\frac{Б}{B_{ВПП}}-1}{\frac{Б}{B_{ВПП}}}, \qquad (4.19)$$

где $S_м$ — метеорологическая дальность видимости, $V_0=K_0/\varepsilon$, т. е. отношение истинного контраста ВПП с окружающим фоном K_0 к порогу контрастной чувствительности глаза ε. Средние сезон-

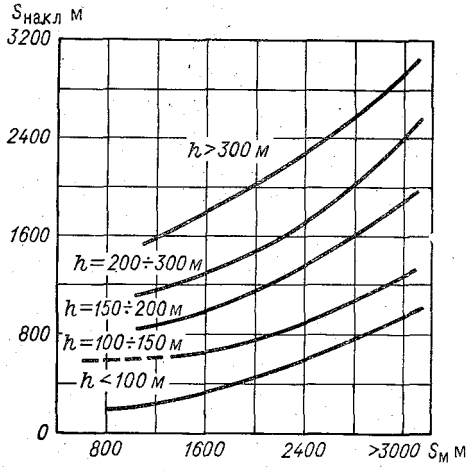


Рис. 10. Номограмма для определения $S_{накл}$ в зависимости от $S_м$ и высоты нижней границы облаков.

ные значения V_0 приведены в приложении 17. $Б/B_{ВПП}$ — отношение яркости неба у горизонта к яркости ВПП, $Б/B_{ВПП}=1{,}5$ для сухой ВПП, $Б/B_{ВПП}=2{,}0$ для мокрой ВПП.

Посадочную дальность видимости ночью можно вычислить по формуле (4.18). Практически она определяется с помощью номограмм, построенных на основании формулы (4.18) и приведенных в приложениях 24—27. Все сказанное в п. 4.4 об использовании этих номограмм применимо и к определению $S_{пос}$ ночью или других параметров, ее определяющих.

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 $S_{накл}$, так как в момент пролета ближней приводной радиостанции он должен увидеть ВПП. Угол наклона глиссады снижения β с горизонтом составляет 2—3°.

Для определения $S_{накл}$ в зависимости от метеорологической дальности видимости и высоты нижней границы облаков в практике работы аэропортов часто используется номограмма, приведенная на рис. 10.

Высота обнаружения ВПП

$$H = \sin\beta \; S_{накл} = 0{,}05 S_{накл}. \qquad (4.20)$$

Задачи

4.53. Самолет шел на посадку при густой дымке и слабом дожде, ВПП была мокрая и окружена пожелтевшей травой. $S_м$, измеренная регистратором прозрачности, равнялась 1500 м. Определить $S_{пос}$ днем.

4.54. Решить задачу 4.53 при отсутствии осадков (ВПП сухая) и при той же $S_м$. Почему $S_{пос}$ стала больше, какие параметры изменились по сравнению с задачей 4.53?

4.55. Приземление самолета происходило днем при дожде умеренной интенсивности $I = 5{,}2$ мм/ч. ВПП окружена молодой зеленой травой. Вычислить $S_{пос}$.

4.56. Решить задачу 4.55 при отсутствии дождя, но при прежней $S_м$. Почему увеличилась $S_{пос}$?

4.57. Вычислить $S_{пос}$ для самолета, приземляющегося днем зимой на ВПП, частично покрытую пятнами снега, если фоном ВПП является полностью заснеженное поле. По данным регистратора прозрачности $S_м = 2000$ м. В момент приземления самолета шел умеренный снег. Почему $S_{пос}$ получилась меньше, чем в задаче 4.53, несмотря на то, что $S_м$ была больше? Какие параметры, влияющие на $S_{пос}$, изменились и как это сказалось на величине $S_{пос}$?

4.58. Решить задачу 4.57 при отсутствии выпадения снега. За счет чего $S_{пос}$ увеличилась при том же $S_м$?

4.59. Как изменится $S_{пос}$ в задаче 4.57, если интенсивность выпадающего снега уменьшится до 0,2 мм/ч? Почему $S_{пос}$ остается такой маленькой, хотя $S_м$ стала 5,23 км?

4.60. Самолет приземлялся днем на мокрую ВПП, окруженную ярко-зеленой травой. В момент приземления осадки не выпадали. Какова была $S_{пос}$, если $S_м = 3$ км?

4.61. Решить задачу 4.60 для сухой ВПП. Почему $S_{пос}$ получилась больше, чем в предыдущей задаче? Почему $Б/В_{ВПП}$ для мокрой ВПП больше, чем для сухой?

4.62. Снижение самолета происходило при облаках Sc op 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 рис. 10.

4.63. Определить диапазон значений наклонной дальности видимости и высоты обнаружения ВПП для летчика, снижающегося по глиссаде в облаках St op с высотой нижней

границы 100—150 м, если $S_м = 1400$ м. Использовать номограмму рис. 10.

4.64. Решить задачу 4.63, если высота облаков 280 м, а $S_м = 2{,}5$ км.

4.65. Решить задачу 4.63, если высота нижней границы облаков уменьшилась до 120 м, а $S_м$ до 1400 м.

4.66. Оранжевые огни светового горизонта имеют силу света $1{,}3 \cdot 10^5$ кд каждый. С какого расстояния увидит их пилот приземляющегося самолета ночью при $S_м = 10$, 5 и 1 км? Порог световой чувствительности для оранжевого огня считать средним арифметическим для красного и желтого огней (приложение 14).

4.67. 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.

4.68. 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.

4.69. Решить задачу 4.68 для тумана с метеорологической дальностью видимости 500 м. Использовать приложение 25. Учитывая максимальную силу света огней приближения и огней на ВПП, оценить значения $S_{пос}$, которые невозможно обеспечить при таких значениях $S_м$.

4.70. 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 $S_м \approx 1$ 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 24—27). Сравнить с ответами задачи (4.68). 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 $S_м$?

4.71. Решить задачу 4.70 для тумана, в котором $S_м = 500$ м. Использовать приложение 25.

4.72. Метеорологическая дальность видимости была 10 км Определить дальность видимости огня силой света 200 кд, если его считать: одиночным огнем ночью; групповым огнем ночью; групповым огнем днем. В зависимости от какого параметра так сильно изменяется дальность видимости огня одной и той же силы света и при одинаковой $S_м$? При решении использовать приложения 24, 26 и 27.

ГЛАВА 5. РЕФРАКЦИЯ СВЕТА В АТМОСФЕРЕ

5.1. Астрономическая рефракция

Углом астрономической рефракции называется угол между направлением на действительное (S) и видимое (S') положение светила (рис. 11). Угол астрономической ре-

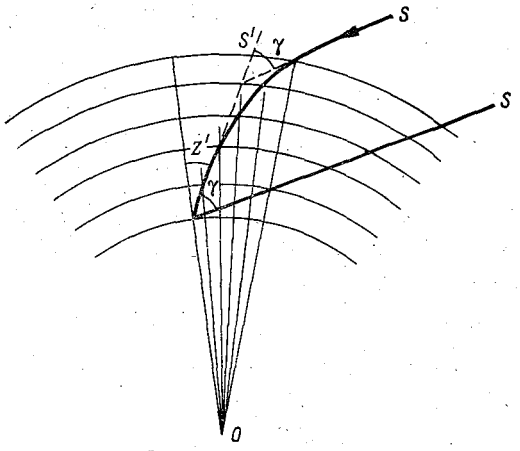


Рис. 11. Астрономическая рефракция.

фракции γ для зенитных расстояний светил не более 60° может быть вычислен по следующим формулам:

$$\gamma = 16{,}09 \frac{p}{T} \operatorname{tg} z_{\text{в}}, \tag{5.1}$$

где γ в секундах дуги, p — давление в мбар; T — температура воздуха в К, $z_{\text{в}}$ — видимое зенитное расстояние светила. При нормальном давлении (1013,2 мбар) и температуре воздуха 10 °С

$$\gamma = 57'' \operatorname{tg} z_{\text{в}}. \tag{5.2}$$

В мореходной практике при любой высоте светил γ вычисляется по формуле

$$\gamma = \gamma_0 + \Delta\gamma_t + \Delta\gamma_p, \tag{5.3}$$

где γ_0 — угол астрономической рефракции при нормальном давлении и температуре воздуха 10 °С (приложение 22), $\Delta\gamma_t$ и $\Delta\gamma_p$ — поправки к углу рефракции на температуру и давление в пункте измерения, отличающиеся от тех, для которых вычислено γ_0 (приложение 23).

Истинная высота светила h равна

$$h = h_в - \gamma, \tag{5.4}$$

если измерения выполнены с поверхности Земли, или

$$h = h_в - \gamma - n, \tag{5.5}$$

если измерения выполняются на некоторой высоте над Землей, например на палубе корабля. Здесь $h_в$ — видимая (кажущаяся) высота светила; n — наклонение видимого горизонта в угловых минутах

$$n = 1{,}766\sqrt{H}, \tag{5.6}$$

H — высота наблюдателя в метрах.

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 $\tau_\odot$ (приложение 21), соответствующих этим моментам восхода и захода Солнца, причем

$$\cos\tau_\odot = \frac{\sin h_\odot - \sin\varphi \sin\delta_\odot}{\cos\varphi \cos\delta_\odot}, \tag{5.7}$$

где φ — широта места, $\delta_\odot$ — склонение Солнца (приложение 20). Высота центра Солнца $h_\odot$ в моменты видимого восхода и захода равна $-16'$ без учета рефракции и $-51'$ с учетом среднего значения угла рефракции.

Пример. На сколько удлинится день за счет рефракции на широте 80° 8 марта?

По приложению 20, $\delta_\odot = -5°$. Без учета рефракции:

$$\cos\tau_\odot = \frac{\sin(-16') - \sin 80° \sin(-5°)}{\cos 80° \cos(-5°)} =$$

$$= \frac{-0{,}00\,465 + 0{,}086}{0{,}173} = \frac{0{,}0844}{0{,}173} = 0{,}0471.$$

По приложению 21, Солнце восходит в 5 ч 49 мин и заходит в 18 ч 10 мин; продолжительность дня $\Delta_1 = 12$ ч 21 мин без учета рефракции.

С учетом рефракции

$$\cos\tau_\odot = \frac{-0{,}0148 + 0{,}086}{0{,}173} = \frac{0{,}0712}{0{,}173} = 0{,}0412.$$

Солнце восходит в 4 ч 23 мин и заходит в 19 ч 37 мин; продолжительность дня $\Delta_2 = 15$ ч 14 мин. Увеличение дня за счет рефракции

$$\Delta_2 - \Delta_1 = 2 \text{ ч } 46 \text{ мин}.$$

Задачи

5.1. Высота звезды над горизонтом по измерениям наблюдателя, находящегося на высоте 16 м над поверхностью Земли, оказалась равной 35°16′. Давление в пункте измерения 980,5 мбар, температура воздуха 30,0 °С. Определить истинную высоту звезды и поправку на рефракцию.

5.2. Решить задачу 5.1 при давлении 1030,5 мбар и температуре воздуха —30 °С.

5.3. На какое угловое расстояние смещается звезда при мерцании, если между глазом наблюдателя и звездой проходят струи воздуха с температурой от —10 до +10 °С, давление равно 1010,0 мбар, а высота звезды составляет 49,5°.

5.4. Определить географическую широту места и поправку на рефракцию, если при прохождении звезды через меридиан места отсчет по вертикальному кругу теодолита оказался равным 65°38′. Склонение звезды 31°42′24″, температура воздуха 15,5 °С, давление 1000 мбар.

5.5. На сколько увеличивается продолжительность дня за счет рефракции в Ленинграде 10 декабря. Расчет сделать для двух случаев: при среднем угле рефракции 35′; при температуре воздуха в месте наблюдения —20 °С и давлении 1040,0 мбар. На сколько удлиняется день только за счет изменения температуры и давления воздуха по сравнению с нормальными? Использовать приложения 20—23.

5.6. Решить задачу 5.5 для 27 августа и широты 79°. Сравнить с ответами задачи 5.5. Почему удлинение дня оказалось таким большим?

5.7. Решить задачу 5.5 для 21 марта и широты 88°.

5.8. Когда сплющивание диска Солнца в моменты его восхода или захода в Ленинграде будет больше и на сколько: в один из осенних дней с температурой воздуха 10 °С или в один из зимних дней с температурой воздуха —20 °С. Давление в обоих случаях 1013,2 мбар.

5.9. Какова обычная продолжительность явления земного луча и где его можно наблюдать дольше: на экваторе, в средних широтах или в околополюсных областях? Почему? Во время экспедиции к Южному полюсу Бэрд видел зеленый луч в течение 35 минут! В какое время года и почему это могло иметь место?

5.2. Земная рефракция

На рис. 12 CC — математический горизонт, AB — геометрический (геодезический) горизонт, H — высота предмета, R — радиус Земли.

Геодезическая депрессия горизонта d в градусах

$$d = 57{,}3\sqrt{\frac{2H}{R}}. \qquad (5.8)$$

Депрессия горизонта вследствие рефракции Δ вычисляется по формулам:

$$d^2 - \Delta^2 = 2(n_B - n_A); \qquad (5.9)$$

$$d^2 - \Delta^2 = 0{,}454(\rho_0 - \rho_H), \qquad (5.10)$$

где n_B и n_A — показатели преломления воздуха, а ρ_0 и ρ_H — соответственно плотность воздуха у поверхности Земли и на высоте H.

Дальность видимого горизонта $D_0 = AB$ (рис. 12) в км, если высота глаза наблюдателя $H_н$ в м,

а) без учета рефракции

$$D_0 = 3{,}57\sqrt{H_н}; \qquad (5.11)$$

б) с учетом средней рефракции

$$D = AB' = 3{,}82\sqrt{H_н}. \qquad (5.12)$$

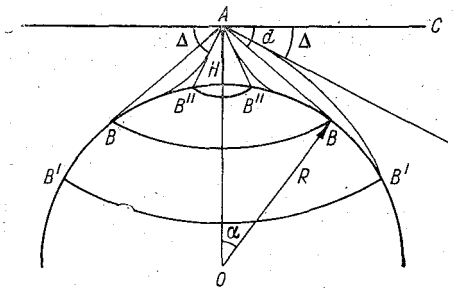


Рис. 12. Земная рефракция.

Дальность обнаружения горизонта лучом радиолокационной системы $D_{РЛС}$ с учетом средней рефракции радиоволн

$$D_{РЛС} = 4{,}08\sqrt{H_{РЛС}}, \qquad (5.13)$$

$D_{РЛС}$ в км, $H_{РЛС}$ в м.

Геометрическая дальность видимости предметов $D_{пр}$ и дальность обнаружения предметов лучом РЛС $D_{РЛС\,пр}$ запишутся соответственно:

$$D_{пр} = 3{,}82(\sqrt{H_н} + \sqrt{H_{пр}}); \qquad (5.14)$$

$$D_{РЛС\,пр} = 4{,}08(\sqrt{H_н} + \sqrt{H_{пр}}), \qquad (5.15)$$

где $D_{пр}$ и $D_{РЛС\,пр}$ в км, $H_н$ и $H_{пр}$ в м.

Задачи

5.10. Самолет летит на высоте 10 км. Определить геометрическую (геодезическую) дальность видимости и геодезическую депрессию горизонта без учета рефракции.

5.11. На сколько расширяется и повышается горизонт за счет рефракции для наблюдателя, летящего в самолете на вы-

соте 3 км, если метеорологические условия следующие: у земли $t=20\,°C$, $p=1000$ мбар; на высоте 3 км $t=2\,°C$, $p=700$ мбар.

5.12. Вычислить геометрическую дальность видимости корабля высотой 10 м, если наблюдение за кораблем ведется визуально из лодки. Высота глаза наблюдателя над поверхностью воды равна 1 м.

5.13. Решить задачу 5.12 для случая, когда обнаружение корабля осуществляется с помощью радиолокационной системы. Чем можно объяснить разницу в ответах?

5.14. Определить дальность обнаружения маяка с помощью радиолокационной системы и визуально, если высота маяка 30 м, а высота антенны РЛС 16 м.

5.15. 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 порядка 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?

5.16. 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—18 °С, температура воздуха около 25—30 °С. Какие это были миражи: верхние или нижние? При каком распределении плотности воздуха с высотой эти миражи возникают? Была ли в этот момент дальность видимого горизонта больше или меньше геодезической?

5.17. На внутриконтинентальной антарктической станции Восток средние месячные температуры воздуха и поверхности снега в декабре 1958 г. равнялись соответственно —33,2 и —31,6 °С. В течение этого месяца очень часто наблюдались миражи. Какого типа это были миражи? При каком распределении плотности воздуха с высотой они могут возникнуть? Наблюдалось ли в это время поднятие или опускание видимого горизонта?

5.18. В один из июльских дней 1952 г. участники Пахта-Аральской экспедиции ГГО наблюдали мираж. Температура поверхности почвы на площадке в полупустыне в районе Ташкента была 45,2 °С, температура воздуха 34,9 °С. Какой это был мираж? Какой своей стороной — выпуклой или вогнутой — были обращены к земной поверхности световые лучи, создававшие этот мираж? Имелось ли при этом расширение или сужение видимого горизонта?

5.19. Яков Санников, русский промышленник-зверобой, участвовал в исследовании группы Новосибирских островов и весной 1911 г. с северного берега о. Котельный 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 больше не удалось. По мнению ряда ученых, «Островом Санникова» был мираж, который неоднократно появлялся в одном и том же месте. Если это действительно так, то какого типа мираж это был? Существовал ли действительно остров, изображение которого видели Санников и Толь?

5.20. В ранние утренние часы воздух над южной частью Женевского 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 ее изображение. По мере приближения лодки к берегу ее изображение с такой же скоростью удаляется от берега. К какому типу миражей относится этот мираж? Как расположены при этом слои с одинаковой плотностью воздуха, в которых произошло такое внутреннее отражение лучей, создавших подобный мираж?

5.21. Одно из первых описаний миража было сделано Бушем в Германии. Направляясь к городу Бремену в Северной Германии летом 1783 г. и находясь на расстоянии 3—4 км от города, Буш увидел следующую картину. Сам город со всеми высокими строениями был совершенно четко виден на горизонте, а перед ним вместо плоского зеленого луга была видна обширная, слегка волнующаяся водная поверхность, в которой город отражался как в зеркале. Казалось, что город поднимается из воды. Какого типа был этот мираж? Как возникло изображение водной поверхности, хотя в окрестностях города Бремена нет сколько-нибудь значительных водоемов?

При каком распределении показателей преломления световых лучей с высотой мог возникнуть этот мираж? Мог ли он наблюдаться при значительном ветре или при отсутствии ветра? Почему?

ГЛАВА 6. ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ОБЛАКАХ

6.1. Венцы

Зависимость между угловым радиусом темных колец в венцах θ_n и размером элементов облака выражается следующими формулами:

$$\sin\theta_n = (n + 0{,}22)\frac{\lambda}{2r} \qquad (6.1)$$

для капельно-жидких облаков

$$\sin\theta_n = \frac{n\lambda}{d} \qquad (6.2)$$

для кристаллических облаков. Здесь n — номер темного кольца, $n=1$, 2, 3 и т. д., r — радиус капель облака (в мкм), d — толщина кристаллов облака (в мкм), λ — длина волны условного «белого» света [среднее арифметическое красного света ($\lambda=0{,}70$ мкм) и синего света ($\lambda=0{,}45$ мкм)], равная 0,57 мкм. Измерения размеров венцов делаются по четко очерченному красному краю любого кольца при условии, что сразу за ним и лежит минимум этого условного белого света.

Задачи

6.1. Вычислить диаметр капель облака Sc, образовавших венец, если радиус второго красного кольца вокруг Луны был равен 3°20′.

6.2. Между наблюдателем и Луной находится облако Ac. Вокруг Луны появился ореол, радиус красного края которого равнялся 3°40′. Через некоторое время, кроме ореола, появились еще два добавочных кольца. Радиус красного края наружного кольца оказался равным 5°20′. Как изменился диаметр капелек данного облака?

6.3. Небо затягивалось тонкой пеленой As. Вокруг ярких звезд и планеты Юпитер появились венцы в виде ореолов с угловым радиусом около 0,5°. Каков размер капель данного облака?

6.4. Средний размер кристаллов льда в облаках Cs равен 130 мкм. Если бы за счет дифракции света, проходящего через такое облако, возник венец, то каков был бы размер ореола? Может ли такой венец одновременно наблюдаться вокруг Луны и вокруг ярких звезд? Вокруг какого из этих светил такой венец мог быть видимым?

6.5. После интенсивных извержений вулканов вокруг Солнца наблюдались красновато-коричневые венцы необычайно большого размера, названные кольцами Бишопа. Средний радиус ореола достигал 22,5°. Вычислить размеры частиц вулканической пыли, образовавших такой венец, если считать их за кристаллики одинакового размера; за диски одинакового размера. Почему кольцо Бишопа имело размер необычно большой для венца? Как можно было убедиться, что это был венец, а не круг гало, хотя радиус кольца Бишопа очень близок к радиусу круга гало 22°?

6.6. 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?

6.7. Вечером во время тумана вокруг уличных фонарей наблюдались ореолы со средним радиусом около 1°50′. Определить диаметр капелек тумана.

6.8. Самолет летит над облаками. Вокруг его тени, упавшей на облако, наблюдается яркая глория, состоящая из нескольких концентрических дифракционных колец. Размер четвертого красного кольца равен 4°50′. Каков радиус капель облака, образовавших глорию?

6.2. Радуги

Угол отклонения солнечного луча SS от первоначального направления, испытавшего два преломления (при входе и вы-

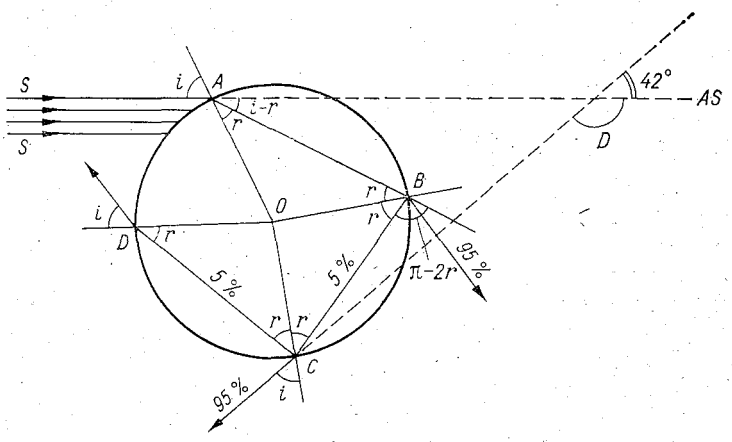


Рис. 13. Ход луча в капле дождя при образовании первой и второй радуги.

ходе из капли) и k внутренних отражений (рис. 13), равен:

$$D_k = k\pi + 2\,[i - (k+1)\,r], \qquad (6.3)$$

где i — угол падения луча на каплю, r — угол преломления.

Достаточную интенсивность для образования радуг имеют только лучи, испытавшие минимальное отклонение при про-

хождении капли. Угол падения и соответствующий ему угол преломления для таких лучей вычисляются по формулам:

$$\sin^2 i = \frac{(k+1)^2 - n^2}{(k+1)^2 - 1}; \qquad (6.4)$$

$$\sin i = n \sin r, \qquad (6.5)$$

где n — показатель преломления, $k = 1, 2, 3, 4, \ldots$ — число отражений луча внутри капли и одновременно номер (порядок) радуги.

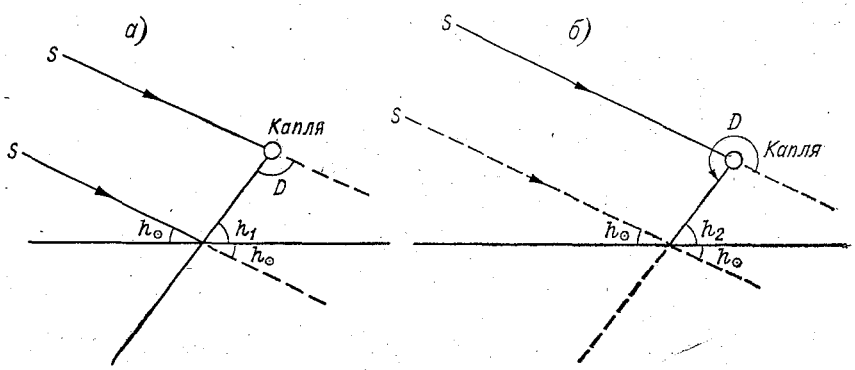


Рис. 14. Высота дуги первой (*а*) и второй (*б*) радуги над горизонтом.

Свет радуги характеризуется необычайно высокой степенью поляризации, которую можно вычислить по формуле К. С. Шифрина:

$$p = \frac{A-1}{A+1} \cdot 100\ \%, \qquad (6.6)$$

где

$$A = \left[\frac{k+1+n^2}{(k+2)\cdot n}\right]^4 \left[\frac{k(k+1+n^2)}{(k+2)(k+1-n^2)}\right]^{2k}.$$

Высота дуги первой h_1 и второй h_2 радуг над горизонтом, как видно из рис. 14, могут быть определены по формулам:

$$h_1 = 180 - D - h_\odot; \qquad (6.7)$$

$$h_2 = D - 180 - h_\odot. \qquad (6.8)$$

Задачи

6.9. Вычислить угловой радиус красной ($n = 1,330$) и фиолетовой ($n = 1,343$) дуг первой радуги, а также расположение цветов и высоту над горизонтом в момент захода Солнца. Какая точка на небосводе является центром этой радуги?

6.10. Солнце поднялось на высоту 30°. Как изменится при этом высота над горизонтом дуги радуги, описанной в задаче 6.9? В любое ли время дня можно видеть эту радугу? Когда она перестанет быть видимой?

6.11. Решить задачу 6.9 для радуги, образованной лучами, испытавшими двукратное внутреннее отражение внутри капель дождя.

6.12. Определить высоту над горизонтом дуги радуги, описанной в задаче 6.11 при высоте Солнца 20°. До какой максимальной высоты Солнца она может быть еще видна?

6.13. Используя ответы задач 6.9 и 6.11, вычислить угловую ширину первой и второй радуг, если бы Солнце было точечным источником, действительную ширину радуги, учитывая, что угловой диаметр Солнца 32′.

Какова угловая ширина темного промежутка на небосводе, разделяющего первую и вторую радуги? Какого цвета дуги окаймляют эту темную полосу, если капли дождя крупные (мелкие)?

6.14*. Где должна располагаться радуга, образованная лучами, испытавшими в каплях дождя четыре внутренних отражения? Вокруг какой точки небосвода эта радуга описана? Видна ли эта радуга обычно? Если нет, то почему не видна? Вычислить угловой радиус дуги красного цвета. Показатель преломления воды для красных лучей равен 1,330.

6.15. Решить задачу 6.14 для дуги фиолетового цвета. Показатель преломления $n_ф = 1{,}343$. Определить угловую ширину этой радуги и расположение цветов в ней. В какой радуге имеет место такое же расположение цветов? Одинаковы ли угловые размеры и ширина этих радуг?

6.16. Находясь в непосредственной близости от водопада, наблюдатель увидел редкую радугу — радугу вокруг Солнца. Как могла возникнуть такая радуга? Нарисуйте путь солнечного луча в капле воды при образовании такой радуги. При каком числе отражений внутри капли радуги возникают вокруг источника света? При каком числе отражений — вокруг точки, диаметрально противоположной источнику света?

6.17. Вычислить угловой размер, расположение цветов и ширину редкого вида радуги вокруг Солнца, описанной в предыдущей задаче. Расчет сделать при $k=3$ для крайних цветов и дуг радуги: красной ($n_к = 1{,}330$) и фиолетовой ($n_ф = 1{,}345$). На какую часто наблюдаемую радугу похожа эта необычная радуга по своему угловому радиусу, расположению цветов. Чем она отличается от нее?

6.18. Вычислить степень поляризации света в первой и второй радугах. Расчет сделать для красных дуг ($n = 1{,}33$). Наблюдается ли в реальной атмосфере в каких-нибудь точках небосвода столь высокая степень поляризации?

Варианты исходных данных к задаче 6.14

№ п/п	Цвет дуги радуги	Номер радуги	n	№ п/п	Цвет дуги радуги	Номер радуги	n
1	Красный	Первый	1,330	16	Оранжевый	Третий	1,333
2	Оранжевый	„	1,333	17	Желто-зеленый	„	1,334
3	Желто-зеленый	„	1,334	18	Зеленый	„	1,335
4	Зеленый	„	1,335	19	Голубой	„	1,337
5	Голубой	„	1,337	20	Синий	„	1,340
6	Синий	„	1,340	21	Фиолетовый	„	1,343
7	Фиолетовый	„	1,343	22	Красный	Четвертый	1,330
8	Красный	Второй	1,330	23	Оранжевый	„	1,333
9	Оранжевый	„	1,333	24	Желто-зеленый	„	1,334
10	Желто-зеленый	„	1,334	25	Зеленый	„	1,335
11	Зеленый	„	1,335	26	Голубой	„	1,337
12	Голубой	„	1,337	27	Синий	„	1,340
13	Синий	„	1,340	28	Фиолетовый	„	1,343
14	Фиолетовый	„	1,343	29	Красный	Пятый	1,330
15	Красный	Третий	1,330	30	Оранжевый	„	1,333

6.19. Когда самолет начал набирать высоту, пассажиры увидели необычную картину: радуги в виде двух концентрических полных кругов с центром в антисолярной точке. Внутренняя радуга яркая, узкая, с наружным красным краем, а вокруг нее более широкая и блеклая радуга с обратным расположением цветов. Начиная с какой высоты можно было увидеть такие радуги, если они появились в момент захода Солнца (для наблюдателя, находящегося на Земле), а облако Cb, образовавшее завесу дождя, находилось на расстоянии около 1 км от самолета.

6.3. Гало

Для лучей, прошедших через кристалл (ледяную призму) и испытавших минимальное отклонение $D_{\min}$ от своего первоначального направления распространения, имеет место соотношение (рис. 15)

$$\sin\left(\frac{D_{\min}+A}{2}\right)=n\sin\frac{A}{2}, \qquad (6.9)$$

где n — показатель преломления льда, A — преломляющий угол призмы.

Для лучей, испытавших максимальное отклонение $D_{\max}$ после прохождения призмы, выполняется соотношение

$$\left.\begin{aligned}\sin(D_{\max}+A-90)&=n\sin(A-R);\\ n\sin R&=1,\end{aligned}\right\} \qquad (6.10)$$

где R — угол преломления, соответствующий тому углу падения, при котором лучи испытывают максимальное отклонение.

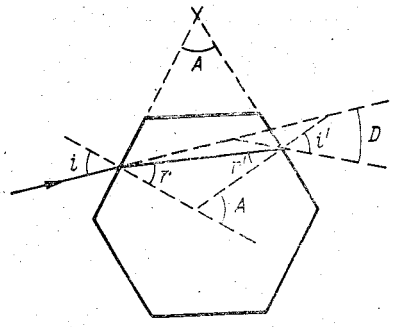


Рис. 15. Ход луча в ледяной призме.

Если лучи падают наклонно на кристалл, образуя с его главной осью угол падения h, а соответствующий ему угол преломления k, то формулы (6.9) и (6.10) записываются в виде:

$$\sin\left(\frac{D_{\min}+A}{2}\right)=n\frac{\cos k}{\cos h}\sin\frac{A}{2}; \tag{6.11}$$

$$\left.\begin{aligned}&\sin(D_{\max}+A-90)=\\&=n\frac{\cos k}{\cos h}\sin(A-R);\\&n\sin R=1.\end{aligned}\right\} \tag{6.12}$$

Задачи

6.20. Между глазом наблюдателя и Солнцем находится слой тонких Cs, кристаллы которых плавают так, что их главные оси расположены вертикально. Солнце находится на горизонте. Лучи его проходят через боковые грани кристаллов, образующие двугранный угол 60°. Какое гало при этих условиях может возникнуть? Где и на каком угловом расстоянии от Солнца оно будет наблюдаться? Вычислить минимальные отклонения красных и фиолетовых лучей, если показатели преломления льда для них равны соответственно 1,307 и 1,317.

6.21. Условия прохождения лучей сквозь кристаллы такие же, как в задаче 6.20, но кристаллы расположены так, что их главные оси горизонтальны; хаотично. Какие гало могут возникнуть в этих двух случаях? Какое из гало, описанных в настоящей и предыдущей задаче, наблюдается чаще всего и почему? Вычислить для этого гало средний угловой радиус, угловую ширину, расположение цветов.

6.22. По условиям задачи 6.20 вычислить длину «хвостов» ложных солнц при среднем показателе преломления льда для световых лучей $n=1{,}31$. Какой цвет имеют «хвосты» ложных солнц?

6.23. Решить задачу 6.20 при высоте Солнца 30°.

6.24. Решить задачу 6.21 для высоты Солнца 30°. Как изменяются радиус круга гало и его угловая ширина при увеличении высоты Солнца до 30°?

6.25. Решить задачу 6.22 при высоте Солнца 30°. Как изменяется длина «хвостов» ложных солнц при увеличении высоты Солнца?

6.26. Солнечные лучи входили в боковые грани ледяных кристаллов и выходили через их основания. Кристаллы Cs плавали так, что их главные оси были вертикальны. Высота Солнца составляла 10°. На каком среднем угловом расстоянии от Солнца появятся паргелии? Выполнить задание задачи 6.20. Какова угловая ширина ложных солнц и расположение цветов в них?

ГЛАВА 7. КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

7.1. Лазерное зондирование

Регистрируемая приемником лидара * с расстояния z от локатора мощность эхо-сигнала, обусловленная рассеянием в атмосфере, пропорциональна объемному коэффициенту рассеяния назад $\sigma_{\text{л}}(z)$. Последний в свою очередь (в отсутствие резонансного рассеяния и рассеяния на электронах) пропорционален объемным коэффициентам молекулярного $\sigma_{\text{м}}(z)$ и аэрозольного $\sigma_{\text{а}}(z)$ рассеяния и модулям индикатрис рассеяния назад, соответствующих этим рассеяниям:

$$\varkappa_{\pi\text{м}}(z) \text{ и } \varkappa_{\pi\text{а}}(z).$$

$$\sigma_{\pi}(z) = \varkappa_{\pi}(z)\,\sigma(z) = \varkappa_{\pi\text{м}}(z)\,\sigma_{\text{м}}(z) + \varkappa_{\pi\text{а}}(z)\,\sigma_{\text{а}}(z). \qquad (7.1)$$

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 и стратификации аэрозольных слоев, а также об их динамике. Однако из нее нельзя получить однозначную информацию о профиле объемного коэффициента аэрозольного рассеяния. Это можно сделать только, если имеется достоверная информация о некоторых параметрах атмосферного аэрозоля (спектр размеров, форма, химический состав и т. п.).

Исследования, проведенные в ИОА СО АН СССР, в ЦАО и рядом иностранных ученых, показали, что для разных типов

* Слово лидар составлено из первых букв английского названия установки light detection and ranging.

облаков и туманов с наиболее вероятными параметрами микроструктуры имеет место линейная зависимость между $\sigma_{\pi a}(z)$ и $\sigma_a(z)$

$$\sigma_{\pi a}(z) = K\sigma_a(z). \tag{7.2}$$

При этом коэффициент K варьирует в сравнительно небольших пределах. Коэффициент K — это нормированная индикатриса рассеяния для направления 180°, которую называют иногда лидарным отношением. Средние значения K для разных форм облаков по вычислению Кэрриера * приведены в приложении 12.

По восстановленному профилю $\sigma(z)$ можно вычислить распределение водности облака $q(z)$ и концентрацию средних капель $N_к(z)$, если задана или известна функция распределения облачных капель по размерам. Для наиболее типичного для облаков и туманов гамма-распределения (и отношения оптического поперечника сечения к геометрическому, равному 2) $q(z)$ и $N_к(z)$ вычисляются по формулам

$$q(z) = \frac{2\sigma(z)(\mu+3)\bar{a}\rho}{3(\mu+1)}; \tag{7.3}$$

$$N_к(z) = \frac{\sigma(z)(\mu+1)}{2\pi\bar{a}^2(\mu+2)}, \tag{7.4}$$

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.

$$D = \frac{\sigma_{\pi\,общ}}{\sigma_{\pi м}} = \frac{\sigma_{\pi м} + \sigma_{\pi a}}{\sigma_{\pi м}}, \tag{7.5}$$

отсюда

$$\frac{\sigma_{\pi a}}{\sigma_{\pi м}} = D - 1. \tag{7.6}$$

Задачи

7.1. Эхо-сигналы лазерного импульса, принятые от двух различных форм облаков, оказались одинаковыми. Лидарное отношение для первого облака равно 0,050, для второго — 0,033. У какого из этих двух облаков объемный коэффициент аэрозольного рассеяния больше и во сколько раз? В каком из

* Applied Optics, 1967, vol. 6, N 7.

этих двух облаков лазерный луч сможет «пробить» большую оптическую толщу?

7.2. Вычислить объемные коэффициенты общего и обратного молекулярного рассеяния излучения лазера на рубине ($\lambda=0{,}69$ мкм) на всех высотах от 0 до 44 км с интервалом по высоте 4 км. Необходимые данные взять из приложений 3 и 13.

Решение. Объемный коэффициент молекулярного рассеяния $\sigma_м(\lambda, z) = \sigma_м^0(\lambda) N(z)$, объемный коэффициент обратного молекулярного рассеяния: $\sigma_{\pi м}(\lambda, z) = \varkappa_{\pi м}\sigma(\lambda, z) = \varkappa_{\pi м}\sigma_м^0(\lambda) N(z)$. Нормированная индикатриса молекулярного рассеяния $\varkappa_м = \frac{3}{16\pi}(1+\cos^2\theta)$, для обратного рассеяния $\varkappa_{\pi м} = \frac{3}{8\pi} \approx 0{,}119$, поэтому $\sigma_{\pi м} = 0{,}119\sigma_м^0(\lambda)N(z)$. Для вычисления $\sigma_м(\lambda, z)$ и $\sigma_{\pi м}(\lambda, z)$ значения $\sigma_м^0(\lambda)$ и $N(z)$ берутся из приложений 3 и 13. Ответы к задаче представлены в приложении 3.

7.3. Катерле выполнил зондирование атмосферы в сентябре 1968 г. в Баварских Альпах с помощью ОКГ на рубине ($\lambda=0{,}69$ мкм). По эхо-сигналам, пришедшим с разных высот, получены следующие значения суммарного коэффициента обратного рассеяния:

z км	8	12	16	20	24
$\sigma_{\pi общ}$ м$^{-1}\cdot$ср$^{-1}$ . . .	8,72 —7*	3,60 —7	3,39 —7	7,29 —8	2,57 —8
z км	28	32	36	40	44
$\sigma_{\pi общ}$ м$^{-1}\cdot$ср$^{-1}$ . . .	1,25 —8*	8,01 —9	3,34 —9	2,23 —9	1,16 —9

Используя приложение 3, вычислить объемные коэффициенты обратного аэрозольного рассеяния и значения D на всех указанных высотах. Построить график вертикального профиля D. По оси ординат отложить высоту от 0 до 4 км, по оси абсцисс — D от 1 до 4,5. Что показывает D и каково его максимальное значение в день зондирования? На каких высотах в этот день находились аэрозольные слои? Во сколько раз аэрозольное рассеяние больше молекулярного на высоте 16 км? На каких высотах можно считать, что все наблюдавшееся обратное рассеяние практически было чисто молекулярным?

7.4. По данным лазерного зондирования атмосферы в Карадаге в 1971 г. В. М. Захаровым и др. получены следующие значения суммарных объемных коэффициентов обратного рассеяния излучения ОКГ на рубине ($\lambda=0{,}69$ мкм) на высотах:

z км	16	18	20	22
$\sigma_{\pi общ}$ м$^{-1}\cdot$ср$^{-1}$ . . .	9,65 —8*	7,70 —8	6,80 —8	7,03 —8
z км	24	26	28	
$\sigma_{\pi общ}$ м$^{-1}\cdot$ср$^{-1}$ . . .	4,45 —8*	2,26 —8	1,25 —8	

* Отрицательное число в этой строке означает показатель степени у десяти. Например, 8,72 —7 означает $8{,}72\cdot10^{-7}$.

Используя приложение 3, вычислить величины D на всех высотах. Построить график вертикального профиля D, по оси ординат отложить высоту (от 16 до 28 км), по оси абсцисс D (от 1 до 2,5). На каких высотах наблюдается максимум концентрации аэрозолей? Во сколько раз аэрозольное рассеяние назад больше молекулярного рассеяния назад на высоте расположения максимума концентрации аэрозолей? На каких высотах $\sigma_{\pi a} > \sigma_{\pi м}$, на каких наоборот? Если объемные коэффициенты аэрозольного и молекулярного рассеяния назад одинаковы, то будут ли одинаковы их объемные коэффициенты? У какого из этих рассеяний объемный коэффициент будет больше и почему?

7.5. 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 $2{,}54 \cdot 10^{-6}$ км$^{-1}$. 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? При решении использовать данные приложений 3 и 13.

7.6. Зондирование верхних слоев атмосферы рубиновым лазером ($\lambda = 0{,}69$ мкм) выполнялось группой Фиокко начиная с 1964 г. на Аляске и в Швеции. На высотах 110—125 км обнаружено заметное усиление обратного рассеяния, которое было приписано частицам, возникающим при распаде метеоров. Отраженный сигнал с высоты 110—120 км соответствовал коэффициенту обратного рассеяния $1{,}5 \cdot 10^{-10}$ м$^{-1}$, а с высоты 125 км — $2{,}5 \cdot 10^{-10}$ м$^{-1}$. Вычислить объемные коэффициенты обратного молекулярного рассеяния на этих высотах. Использовать приложения 3 и 13. Во сколько раз обратное рассеяние метеорной пылью превышает молекулярное на этих высотах?

7.7. Лазерное зондирование атмосферы, выполненное Гоером на пике Сакраменто (около 3000 м) в Нью-Мексико, позволило оценить значения D на различных высотах:

z км	15	16	17	18	19	20	22	24	26
D	1,40	1,55	1,58	1,73	1,75	1,70	1,63	1,55	1,34

Вычислить отношения коэффициентов аэрозольного и молекулярного рассеяния назад. На каких высотах $\sigma_{\pi a} > \sigma_{\pi м}$, на каких наоборот? Сравните с ответами задач 7.3, 7.4. Почему на пике Сакраменто на всех высотах $\sigma_{\pi м} > \sigma_{\pi a}$?

7.8. Импульсным ОКГ на рубине ($\lambda=0{,}69$ мкм) зондировалось облако Cu hum с высотой нижней границы 1850 м. По значениям сигнала, отраженного от облака, оценены коэффициенты рассеяния назад от нижней части облака, находящегося на расстоянии 3710 м ($1{,}1\cdot10^{-5}$ м$^{-1}$), от центральной части облака на расстоянии 3760 м ($2{,}0\cdot10^{-4}$ м$^{-1}$), от верхней части облака на расстоянии 3800 м ($2{,}5\cdot10^{-5}$ м$^{-1}$).

Вычислить: 1. Общие объемные коэффициенты рассеяния для этих трех точек облака и для трех видов индикатрисы рассеяния, которым соответствуют следующие нормированные индикатрисы для угла 180°:

а) $\varkappa_{\pi_1}=0{,}0085$ (теоретическая индикатриса для монодисперсного облака с радиусом капель $a=5$ мкм);

б) $\varkappa_{\pi_2}=0{,}025$ (теоретическая индикатриса для полидисперсного облака с гамма-распределением капель по размерам, параметр $\mu=2$, $\bar{a}=5$ мкм);

в) $\varkappa_{\pi_3}=0{,}075$ (экспериментальная индикатриса, полученная в камере туманов при исследовании рассеяния излучения ОКГ на рубине, $\lambda=0{,}69$ мкм). 2. Средние арифметические оптические толщины облака для трех видов индикатрисы рассеяния. 3. Энергетические потери ОКГ на рубине при прохождении через облако в вертикальном направлении для трех индикатрис.

Почему объемные коэффициенты рассеяния для первого вида индикатрисы оказались самыми большими? Сравните коэффициенты рассеяния для первой и второй индикатрис. Для первой все капли имеют $a=5$ мкм, для второй спектр капель с наиболее вероятным радиусом $\bar{a}=5$ мкм. Почему коэффициент рассеяния во втором случае меньше, чем в первом? Влияние каких капель с $a>5$ мкм или с $a<5$ мкм оказалось сильнее? Проследите, как влияет вид индикатрисы рассеяния на оптические толщины облака и соответственно на энергические потери излучения ОКГ Объясните причины такого влияния. Во сколько раз уменьшаются потери энергии излучения ОКГ при переходе от первого вида индикатрисы к третьему?

7.9. Принимая во внимание, что в видимой части спектра коэффициент аэрозольного рассеяния для всех облаков и туманов имеет нейтральный характер, и используя результаты предыдущей задачи, определить метеорологическую дальность видимости в средней части облака для трех рассмотренных видов индикатрис рассеяния. Существенно ли влияет форма индикатрисы аэрозольного рассеяния на метеорологическую дальность видимости в облаке? Почему индикатриса первого вида соответствует самая маленькая $S_м$?

7.10. Определить водность облака Cu hum и число капель среднего размера в единице объема: а) в нижней, б) в средней, в) в верхней частях облака, если объемные коэффициенты

рассеяния в этих частях облака, восстановленные по результатам зондирования ОКГ на рубине, были следующие: в нижней части — $4{,}4 \cdot 10^{-4}$ м$^{-1}$; в средней — $8{,}0 \cdot 10^{-3}$ м$^{-1}$; в верхней — 10^{-3} м$^{-1}$. Распределение капель по размерам представляет собой гамма-распределение с параметром $\mu = 2$ и средним радиусом капель 5 мкм.

7.11. Как изменятся водность облака и число средних капель в единице объема в предыдущей задаче, если при сохранении размера преобладающих капель ($a = 5$ мкм) спектр распределения капель по размерам станет более узким, характеризующимся параметром $\mu = 8$.

7.12. Лазером на стекле с неодимом ($\lambda = 1{,}06$ мкм) зондировалась нижняя часть облака Ns, начиная от его нижней границы, находящейся от лазера на расстоянии 1850 м, до точки внутри облака на расстоянии 1950 м от лазера, где произошло затухание лазерного луча. Эхо-сигналы лазерных импульсов, пересчитанные на объемные коэффициенты рассеяния назад, оказались следующими: в нижней части облака $5{,}20 \cdot 10^{-3}$ м$^{-1} \cdot$ ср$^{-1}$ и в точке, дальше которой произошло затухание лазерного луча, $6{,}45 \cdot 10^{-3}$ м$^{-1} \cdot$ ср$^{-1}$. Вычислить в этих двух точках облака объемные коэффициенты рассеяния, водность облака и среднее число капель в единице объема. В облаке имеется гамма-распределение с параметром $\mu = 4$ и средним радиусом капель 5 мкм. Отношение оптического поперечника капель к геометрическому равно 2. Использовать приложение 12.

7.13. Зондирование нижней части облака Cu cong выполнялось лазером на стекле с неодимом ($\lambda = 1{,}06$ мкм). Коэффициенты рассеяния назад, вычисленные по принятым сигналам лазерных импульсов, в двух точках нижней части облака оказались следующими: $3{,}60 \cdot 10^{-3}$ и $4{,}20 \cdot 10^{-3}$ м$^{-1} \cdot$ ср$^{-1}$. Вычислить объемные коэффициенты рассеяния в двух точках облака, водность облака и число средних капель в единице объема. Считать, что имеется гамма-распределение, средний размер капель 8 мкм, параметр $\mu = 2$. Отношение оптического сечения капель к геометрическому равно 2. Использовать приложение 12.

Сравнить объемные коэффициенты рассеяния, водность и число капель в единице объема в облаках Ns и Cu cong (задачи 7.12 и данная).

Почему в Ns имеются самые большие объемные коэффициенты рассеяния? Чем это объясняется? Почему в облаке Cu cong водность больше, чем в Ns, а число капель в единице объема меньше?

7.14. Кэрриером и сотрудниками теоретически рассчитаны лидарные отношения для различных типов облаков и туманов при наиболее вероятных параметрах их микроструктуры (приложение 12).

Вычислить объемные коэффициенты рассеяния, метеорологическую дальность видимости в облаках, если 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: $6{,}03\cdot10^{-3}$; $4{,}52\cdot10^{-3}$; $4{,}76\cdot10^{-3}$ и $3{,}01\cdot10^{-3}$ м$^{-1}$ соответственно. Зондирование облаков St I, Cb, Sc и Cu hum ОКГ на стекле с неодимом ($\lambda=1{,}06$ мкм) привели к следующим объемным коэффициентам обратного рассеяния $3{,}08\cdot10^{-3}$; $2{,}19\cdot10^{-3}$; $2{,}08\cdot10^{-3}$ и $1{,}00\cdot10^{-3}$ м$^{-1}$, соответственно. Принять во внимание, что в облаках и туманах аэрозольное ослабление в видимой и близкой ИК областях практически имеет нейтральный характер. Почему в слоистообразных облаках Ns, As, St наблюдается самая маленькая дальность видимости, хотя водность в этих облаках меньше, чем в кучевообразных Cu hum, Cu cong, Cb.

7.15. 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 $5{,}7\cdot10^{-4}$ и $4{,}5\cdot10^{-4}$ м$^{-1}$, соответственно. Определить объемные коэффициенты рассеяния тумана в двух точках зондирования, если средняя нормированная индикатриса аэрозольного рассеяния для угла рассеяния 180° равна 0,030; водность тумана и число капель среднего размера в единице объема, если имеется гамма-распределение по размерам капель тумана с параметром $\mu=6$, средний радиус капель тумана у поверхности Земли равен 3 мкм, а на верхней границе тумана — 2 мкм.

7.2. Определение характеристик аэрозолей по спектральной прозрачности атмосферы

Спектральный коэффициент прозрачности атмосферы p_λ определяется из формулы Бугера (после ее логарифмирования):

$$\lg p_\lambda=\frac{p_0}{pm}(l_\lambda-l_{0\lambda}), \tag{7.7}$$

где p и p_0 — давление в пункте измерения и на уровне моря, соответственно; m — оптическая масса атмосферы.

Средние значения $l_{0\lambda}=\lg S_{0\lambda}$ за пределами атмосферы приведены в приложении 15. Измерив $l_\lambda=\lg S_\lambda$ прибором М-83 (с набором фильтров) конструкции Г. П. Гущина, можно определить p_λ, а также ряд характеристик аэрозолей.

1. Оптическую толщину аэрозольной атмосферы τ_a

$$\tau_a=\frac{l_{0\lambda}-l_\lambda}{m}-\tau_м-xk_\lambda^*. \tag{7.8}$$

где $\tau_м$ — оптическая толща молекулярной атмосферы (приложение 15); k^*_λ — спектральный коэффициент поглощения озона в см$^{-1}$ (приложение 15); x — содержание озона в атмосфере в см. Формула (7.8) справедлива в УФ и видимой областях спектра (вне полос поглощения пара) для высот Солнца более 15°.

2. Параметры n и c в эмпирической формуле Юнге, характеризующие распределение частиц аэрозоля по размерам

$$\frac{dN}{dt}=cr^{-n}, \tag{7.9}$$

где N — общее число частиц аэрозоля с радиусом менее r в вертикальном столбе атмосферы единичного сечения (формула (3.10) применима для $r \geqslant 0{,}08$ мкм);

$$n=3+\frac{1}{\lg\lambda_2-\lg\lambda_1}\lg\frac{\tau_{a\lambda_1}}{\tau_{a\lambda_2}}; \tag{7.10}$$

$$c=\frac{\tau_{a\lambda}}{B_\lambda}. \tag{7.11}$$

В приложении 16 приведены значения B_λ для разных значений n.

3. Параметры b и c_1 в эмпирической формуле Ангстрема, характеризующие зависимость оптической плотности аэрозоля от длины волны:

$$\tau_{a\lambda}=c_1\lambda^{-b}; \tag{7.12}$$

$$b=n-3, \tag{7.13}$$

$$c_1=\tau_{a\lambda}\lambda^b, \tag{7.14}$$

где λ в нм.

4. Содержание больших частиц аэрозоля $N_б$, гигантских $N_г$ и их отношение $N_б/N_г$ в столбе атмосферы единичного сечения (1 см^2) определяется по формулам:

$$N_б=\frac{c}{n-1}\cdot 10^{5(n-1)}; \tag{7.15}$$

$$N_г=\frac{c}{n-1}\cdot 10^{4(n-1)}; \tag{7.16}$$

$$N_б/N_г=10^{n-1}. \tag{7.17}$$

Деление атмосферного аэрозоля на группы приведено в п. 1.4.

Задачи

7.16. Вычислить спектральные коэффициенты прозрачности атмосферы для длин волн, соответствующих четвертому и пятому светофильтрам прибора М-83 (приложение 15), если от-

счеты по прибору М-83 с этими светофильтрами равны 362 и 233, а измерение выполнено при высоте Солнца 35,9° и атмосферном давлении 981,5 мбар. Почему коэффициент прозрачности для λ_4 значительно меньше, чем для λ_5?

7.17. Вычислить спектральные коэффициенты прозрачности идеальной атмосферы, в которой ослабление лучистых потоков происходит только за счет молекулярного рассеяния для всех длин волн, соответствующих семи светофильтрам прибора М-83 (приложение 15). Среднее давление принять равным 1000 мбар, оптическую массу атмосферы за 1. Перечислите не менее четырех причин, в силу которых спектральные коэффициенты прозрачности p_{λ_4} и p_{λ_5} существенно отличаются от их значений в задаче 7.16? Почему спектральные коэффициенты прозрачности заметно возрастают при увеличении номера светофильтра от второго до восьмого?

7.18. Измерения с прибором М-83 проводились в Воейково 10 июня 1971 г. при высоте Солнца 38,6°. Получены средние приведенные отсчеты S_λ 5,5; 3,6; 159; 135; 1426; 273; 231, соответствующие номерам светофильтров 2, 3, 4, 5, 6, 7 и 8. Вычислить спектральные оптические толщины аэрозолей для этих длин волн, если содержание озона в этот день было 0,328 см. Использовать приложение 15.

7.19. Над о. Диксон 17 апреля 1969 г. наблюдалась «вспышка озона», когда содержание озона достигло «рекордного» значения 0,673 см. Отсчеты по прибору М-83 с светофильтрами № 2 и 7 при высоте Солнца 27,0° составили 7,0 и 3696,3 соответственно. Вычислить оптические плотности аэрозолей для этих двух длин волн. Использовать приложение 15.

7.20. Для условий, описанных в предыдущей задаче, и на основании ее результатов вычислить спектральные оптические толщины озона, молекулярной атмосферы и общие оптические толщины для длин волн, соответствующих светофильтрам № 2 и 7. Сколько процентов от общей оптической толщины атмосферы составляют доли, обусловленные молекулярным рассеянием, аэрозольным ослаблением и поглощением озоном?

7.21. Вычислить оптические плотности аэрозоля; параметры Юнге n и c, характеризующие распределение частиц аэрозоля по размерам. Приведенные отсчеты по светофильтрам № 4 и 5 прибора М-83 равнялись 546 и 296. Измерения выполнены 5 июля 1970 г. в Воейково при высоте Солнца 51,0°. Содержание озона 0,330 см. Использовать приложения 15 и 16.

7.22. На основании результатов предыдущей задачи оценить число больших и гигантских частиц аэрозоля в единичном вертикальном столбе атмосферы сечением 1 см^2, а также их отношение. Использовать приложение 16.

7.23. Определить параметры формулы Ангстрема b и c_1, характеризующие зависимость оптической плотности аэрозоля от длины волны по данным задачи 7.21 для $\lambda=369$ нм.

РАЗДЕЛ II. АТМОСФЕРНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И ЭЛЕМЕНТЫ АТМОСФЕРНОЙ АКУСТИКИ

ГЛАВА 8. ИОНИЗАЦИЯ АТМОСФЕРЫ

8.1. Характеристики ионизации атмосферного воздуха

Скорость установившегося движения легких ионов u в электрическом поле напряженностью E составляет

$$u = wE, \tag{8.1}$$

где w — подвижность ионов.

Уравнение ионного баланса легких ионов в идеально чистом воздухе можно записать в виде

$$\frac{dn_{\pm}}{dt} = q - \alpha n_{+} n_{-}, \tag{8.2}$$

где n_{+} и n_{-} — число положительных и отрицательных ионов в единице объема; q — мощность действия ионизаторов; α — коэффициент рекомбинации. По лабораторным измерениям в чистом воздухе при нормальных атмосферных условиях $\alpha = 1{,}6 \cdot 10^{-6}$ см^3/с $= 1{,}6 \cdot 10^{-12}$ м^3/с.

Если $n_{+} = n_{-}$, то уравнение (8.2) принимает вид

$$\frac{dn}{dt} = q - \alpha n^2. \tag{8.3}$$

При стационарных условиях $\frac{dn}{dt} = 0$ и $q = \alpha n^2$

$$n = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}. \tag{8.4}$$

Продолжительность жизни легкого иона

$$\tau = \frac{n}{q} = \frac{1}{\alpha n}. \tag{8.5}$$

Концентрация легких ионов через промежуток времени t после прекращения действия ионизатора ($q = 0$)

$$n_t = \frac{n_0}{1 + \alpha n_0 t}, \tag{8.6}$$

где n_0 — начальная концентрация легких ионов.

В реальной запыленной атмосфере уравнение ионного баланса легких ионов имеет вид

$$\frac{dn}{dt}=q-\beta n, \tag{8.7}$$

где β — постоянная исчезновения легких ионов. Она зависит от концентрации легких и тяжелых ионов и нейтральных пылинок. Среднее значение β колеблется в пределах $(1—30)\cdot 10^{-9}$ м³/с.

В стационарных условиях

$$q=\beta n \text{ или } n=\frac{q}{\beta}. \tag{8.8}$$

Продолжительность жизни легкого иона в запыленной атмосфере

$$\tau=\frac{n}{q}=\frac{1}{\beta}. \tag{8.9}$$

Концентрация легких ионов через промежуток времени t после прекращения действия ионизаторов имеет вид

$$n_t=n_0e^{-\beta t}. \tag{8.10}$$

Проводимость атмосферного воздуха λ, обусловленная движением только легких ионов, равна

$$\lambda=\lambda_++\lambda_-=en_+w_++en_-w_-, \tag{8.11}$$

где e — заряд иона, равный $1{,}6\cdot 10^{-19}$ Кл, λ_+ и λ_- — полярные проводимости.

Проводимость и число ионов измеряют с помощью цилиндрических конденсаторов с принудительной аспирацией воздуха. Начальный потенциал V_0 внутреннего электрода, соединенного с электрометром, по истечении t секунд аспирации уменьшается до V_t. Проводимость рассчитывается по формуле

$$\lambda=\frac{(C+C_э)\,\varepsilon_0}{Ct}\ln\frac{V_0}{V_t}, \tag{8.12}$$

где C и $C_э$ — емкости конденсатора и электрометра, ε_0 — электрическая постоянная, равная $8.85\cdot 10^{-12}$ Ф/м. Коэффициент рассеивания заряда с изолированного проводника $a_\pm$ и число легких ионов n вычисляются по формулам

$$a_\pm=4\pi\lambda_\mp; \tag{8.13}$$

$$n=\frac{C+C_э}{e\Phi t}(V_0-V_t), \tag{8.14}$$

где Φ — объем, просасываемый через конденсатор в единицу времени.

Время релаксации — это время, в течение которого устанавливается стационарное состояние

$$T_{рел}=\frac{\varepsilon_0}{\lambda}. \tag{8.15}$$

Задачи

8.1. Вычислить скорость движения легких ионов при средней напряженности электрического поля у поверхности Земли 130 В/м. Сравнить со скоростью вертикальных движений при тепловой и динамической конвекции. Средние значения подвижностей ионов $w_+ = 1{,}35 \cdot 10^{-4}$ м^2/(В·с) и $w_- = 1{,}83 \times \times 10^{-4}$ м^2/(В·с).

8.2. При какой напряженности электрического поля скорость легких ионов достигает средней скорости ветра, т. е. скорости около 5 м/с? Наблюдаются ли в атмосфере такие поля? При каких условиях? Среднюю подвижность ионов принять равной $1{,}6 \cdot 10^{-4}$ м^2/(В·с).

8.3. Какова скорость движения тяжелых ионов в нормальном электрическом поле у поверхности Земли ($E = 130$ В/м), если средняя их подвижность $w_\pm = 10^{-8}$ м^2/(В·с)?

8.4. По теории Ланжевена подвижность иона обратно пропорциональна его массе. Во сколько раз будут различаться скорости движения иона радиусом 10^{-8} м и облачной капли радиусом 4 мкм в электрическом поле?

8.5. В 1 м^3 воздуха над океаном содержится $8 \cdot 10^8$ пар легких ионов. Сколько пар ионов в секунду должны создавать ионизаторы в 1 м^3, чтобы при наличии только рекомбинации легких ионов друг с другом поддерживалось бы стационарное состояние? Коэффициент рекомбинации в чистом воздухе составляет $1{,}6 \cdot 10^{-12}$ м^3/с. Сколько пар ионов рекомбинирует каждую секунду в 1 м^3? Если число ионов будет больше $8 \cdot 10^8$ (меньше $8 \cdot 10^8$) пар ионов/м^3, то должны ли ионизаторы для поддержания стационарного состояния создавать большее или меньшее число пар ионов? Как изменяется скорость рекомбинации легких ионов при возрастании числа ионов, при уменьшении числа ионов?

8.6. По данным предыдущей задачи вычислить среднюю продолжительность жизни легкого иона в идеально чистом воздухе. Как и за счет каких процессов изменится продолжительность жизни легкого иона, если число легких ионов в 1м^3 будет увеличиваться (уменьшаться)? кроме легких ионов будут присутствовать и тяжелые ионы? кроме легких и тяжелых ионов будут присутствовать нейтральные ядра (пылинки?)

8.7. Вычислить продолжительность жизни τ легкого иона в запыленном воздухе городских зданий, где постоянная исчезновения легких ионов β принимает предельное значение $30 \cdot 10^{-9}$ м^3/с. Каков диапазон изменений τ легкого иона в зависимости от степени загрязнения воздуха, если β лежит в пределах $(1—30) \cdot 10^{-6}$ м^3/с?

8.8. На какое расстояние от места возникновения успеют переместиться за время своей жизни легкие ионы и в каком направлении будут перемещаться ионы каждого знака в нор-

мальном электрическом поле у поверхности Земли? Какой путь смогли бы проделать за это время тяжелые ионы, если бы их средняя продолжительность жизни была такой же? Использовать ответы к задачам 8.1 и 8.3.

8.9. На сколько уменьшится число пар легких ионов в 1 $м^3$ воздуха по истечении 5 мин после выключения ионизаторов в идеально чистом воздухе, если в начальный момент имелось по $5 \cdot 10^8$ ионов каждого знака.

8.10. Решить задачу 8.9 для сильно запыленного воздуха, когда постоянная исчезновения легких ионов $\beta = 3 \cdot 10^{-9}$ $м^3/с$. Сравнить с ответом задачи 8.9.

8.11. Над океаном в 1 $м^3$ воздуха содержится $8{,}5 \cdot 10^8$ $м^{-3}$ положительных и $7 \cdot 10^8$ $м^{-3}$ отрицательных легких ионов. Их средние подвижности равны соответственно $1{,}4 \cdot 10^{-4}$ и $1{,}6 \cdot 10^{-4}$ $м^2/(В \cdot с)$. Определить: полярные проводимости, общую проводимость воздуха, удельное сопротивление воздуха над океаном. Во сколько раз воздух как изолятор хуже янтаря, если удельное сопротивление янтаря $5 \cdot 10^{14}$ см. м. Почему над поверхностью океана больше положительных ионов, чем отрицательных?

8.12. В воздухе над сушей в среднем содержится $5 \cdot 10^8$ $м^{-3}$ положительных и $4{,}5 \cdot 10^8$ $м^{-3}$ отрицательных легких ионов с подвижностями соответственно $1{,}35 \cdot 10^{-4}$ $м^2/(В \cdot с)$ и $1{,}83 \times \times 10^{-4}$ $м^2/(В \cdot с)$. Тяжелых ионов содержится $8 \cdot 10^9$ $м^{-3}$, их подвижность $2 \cdot 10^{-8}$ $м^2/(В \cdot с)$. Вычислить: проводимости, обусловленные движением легких и тяжелых ионов в отдельности; общую проводимость атмосферного воздуха; долю общей проводимости, обусловленную легкими ионами, и долю, связанную с тяжелыми ионами.

8.13. 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 мбар антициклоном с давлением 1070 мбар.

8.14. Проводимость воздуха определялась аспирационным методом. Внутренний электрод цилиндрического конденсатора был заряжен отрицательно до потенциала 140 В. Вентилятор просасывал воздух в течение 10 мин и потенциал уменьшился до 57 В. Вычислить полярную проводимость и коэффициент рассеяния отрицательного заряда, если емкости цилиндрического конденсатора и электрометра равны соответственно $1{,}4 \cdot 10^{-11}$ и $0{,}6 \cdot 10^{-11}$ Ф.

8.15. Внутренний электрод счетчика ионов зарядили отрицательно до 250 В. Через 10 мин аспирации потенциал уменьшился до 240 В. Затем прибор перезарядили положительным электричеством до 260 В и через 10 мин аспирации потенциал стал 251 В. Скорость аспирации прибора 0,45 $м^3$ воздуха в минуту. Емкости конденсатора и электрометра равны соответст-

венно $2{,}30 \cdot 10^{-11}$ и $2{,}70 \cdot 10^{-11}$ Ф. Вычислить: число ионов каждого знака в единице объема, заряды единицы объема.

8.16. Найти отношение числа положительных ионов к числу отрицательных, если при заряжении внутреннего электрода конденсатора счетчика ионов положительным электричеством потенциал за 8 мин аспирации уменьшился с 245 до 224 В, а при заряжении отрицательным электричеством за 6 мин уменьшился с 255 до 236 В. Чем объяснить, что положительных ионов у поверхности Земли больше, чем отрицательных?

8.17. Тяжелый атмосферный ион массой $5 \cdot 10^{-19}$ 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?

8.18. По теории Ланжевена подвижность ионов пропорциональна отношению заряда к массе. Какова подвижность электрона, если при тех же условиях подвижность легкого иона, состоящего из 10 молекул воды, равна 1,35 $см^2/(В \cdot с)$?

8.19. Какой должна быть интенсивность ионизации, чтобы обеспечить постоянную концентрацию легких ионов обеих знаков, равную 500 $см^{-3}$? Прилипанием ионов к нейтральным частицам пренебречь.

8.20. Какой должна быть концентрация нейтральных ядер, чтобы обеспечить постоянную концентрацию легких ионов, равную 300 $см^{-3}$ при интенсивности ионизации 10 $см^{-3} \cdot с^{-1}$?

8.21. Концентрация легких ионов и нейтральных ядер в момент прекращения действия ионизатора равна соответственно 400 и 2000 $см^{-3}$. За какое время число легких ионов уменьшится в 100 раз только за счет прилипания?

8.22. За какое время число легких ионов уменьшится в 100 раз только за счет рекомбинации при условиях предыдущей задачи? Сравните эффективность рекомбинации и прилипания.

8.23. Самолетные измерения Краакевика над Гренландией позволили представить электропроводность воздуха как функцию высоты в виде:

$$\lambda(z) = 2{,}72 \cdot 10^{-14} \exp\left(\frac{z-6}{3{,}5}\right)$$

(z — высота в км). Какова электропроводность на высоте 40 км. Сравнить полученную величину с электропроводностью морской воды, равной 3,3 $Ом^{-1} \cdot м^{-1}$.

8.24. Вертикальный профиль проводимости воздуха приближенно можно представить экспонентой $\lambda(z) = \lambda_0 \exp(\alpha z)$, где $\lambda_0 = 2 \cdot 10^{-14}$ $Ом^{-1}$ $м^{-1}$, z — высота в км, $\alpha = 0{,}4$ $км^{-1}$. Каково удельное сопротивление всей тропосферы (средняя высота тропосферы 11 км).

8.25. По условиям предыдущей задачи рассчитать общее для всей Земли сопротивление между тропосферой и земной поверхностью. Площадь поверхности земного шара $510 \cdot 10^6$ $км^2$.

8.26. Каково время релаксации электрического состояния атмосферы, если концентрация ионов обоих знаков равна 300 $см^{-3}$ и их подвижность 2 $см^2/(В \cdot с)$?

8.27. Сравнить время релаксации атмосферы у земли и на высоте 50 км, если электропроводность воздуха на этих уровнях равна $2 \cdot 10^{-14}$ и $34 \cdot 10^{-10}$ $Ом^{-1} \cdot м^{-1}$.

8.2. Ионизаторы атмосферного воздуха

Основными ионизаторами приземного слоя атмосферы являются радиоактивные излучения и космические лучи. В верхней тропосфере и стратосфере космические лучи становятся единственным источником ионизации, а в ионосфере ведущая роль в ионизации переходит к ультрафиолетовому, рентгеновскому и корпускулярному излучениям Солнца.

Частицы космических лучей и β-частицы радиоактивного распада, обладая очень высокими энергиями, движутся со скоростями, приближающимися к скорости света. Поэтому правильно определить 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

$$m = m_0 + \frac{T}{c^2}, \tag{8.16}$$

где c — скорость света в пустоте.

Зависимость массы движущегося тела m от скорости движения v

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \tag{8.17}$$

Длина l тела, движущегося со скоростью v относительно некоторой системы отсчета, связана с длиной l_0 тела, неподвижного в этой системе, соотношением

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \tag{8.18}$$

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

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \tag{8.19}$$

Полная энергия тела или системы равна

$$E = mc^2, \text{ откуда } m = \frac{E}{c^2}. \tag{8.20}$$

Формула (8.20) является общим законом, связывающим массу тела (системы) с энергией. Из нее следует, что всякое изменение энергии ведет к изменению массы тела, и наоборот. Величина $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, входящая в формулы (8.17—8.19), называется релятивистской поправкой.

Работа ионизации

$$U = eV, \tag{8.21}$$

где V — потенциал ионизации в вольтах (приложение 18).

При фотоионизации

$$h\nu \geqslant U, \text{ т. е. } h\nu \geqslant eV. \tag{8.22}$$

Здесь h — постоянная Планка, равная $6{,}6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с; e — заряд электрона, равный $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

При ударной ионизации

$$\frac{mv^2}{2} \geqslant eV, \tag{8.23}$$

где m и v — масса и скорость частицы, совершающей работу ионизации. Ионизирующая способность частицы или кванта энергии — число пар ионов, создаваемых на 1 см пробега. Ионизационные потери — средняя энергия, расходуемая на образование одной пары ионов.

Постоянная радиоактивного распада λ^* связана с периодом полураспада $T_{1/2}$ соотношением

$$T_{1/2} = \frac{0{,}693}{\lambda^*}. \tag{8.24}$$

Длина пробега α-частицы в воздухе R_α при нормальных метеорологических условиях

$$R_\alpha = 9{,}8 \cdot 10^{-28} v_\alpha^2, \tag{8.25}$$

где R_α в см, а v_α — начальная скорость α-частицы в см/с.

Задачи

8.28. Кинетическая энергия α-частицы, вылетающей при распаде ядра атома радия, равна 4,79 МэВ. Средняя длина ее пробега в воздухе (при нормальных условиях) 3,26 см. Вычислить: скорость α-частицы; общее число пар ионов, создаваемых ею на всем пути пробега; ионизирующую способность α-частицы, если средняя энергия, затрачиваемая α-частицей на образование одной пары ионов (ионизационные потери), равна 36,6 эВ.

8.29. Максимальной кинетической энергией обладают α-частицы, образующиеся при радиоактивном распаде ядер атомов тория С. Их энергия достигает 8,95 МэВ, а длина пробега в воздухе (при 15 °С и 1013,2 мбар) — 8,7 см. Определить скорость таких α-частиц, общее число пар ионов на всем пути пробега и на 1 см пробега, если ионизационные потери такой α-частицы равны 34,6 эВ.

8.30. β-частицы, вылетающие при радиоактивном распаде ядра атома тория С, обладают кинетической энергией, равной

2,25 МэВ. Длина их пробега в воздухе составляет около 20 м. Вычислить относительное увеличение $\left(\frac{m-m_0}{m_0}\right)$ массы β-частиц в процентах; скорость β-частицы в долях скорости света; общее число пар ионов, создаваемых такой β-частицей на всем пути пробега и ионизирующую ее способность. Ионизационные потери в среднем составляют 36,0 эВ/на 1 пару ионов. У какой из частиц (α или β) больше ионизирующая способность? У какой из них больше проникающая способность?

8.31. Решить задачу 8.30 для электрона, вылетающего при β-распаде, если его кинетическая энергия равна 15 кэВ, а длина пробега в воздухе составляет 2 м.

8.32. Кинетическая энергия α-частицы, вылетающей при распаде ядра атома тория С, равна 6,20 МэВ. Определить длину ее пробега в воздухе (при нормальных условиях), отношение массы движения к массе покоя, отношение ее скорости к скорости света, скорость частицы. Имеет ли смысл применять к движению такой частицы формулы теории относительности и почему?

8.33. Постоянные распада радиоактивных эманаций радона $2{,}097 \cdot 10^{-6}$ $с^{-1}$, тория $1{,}27 \cdot 10^{-2}$ $с^{-1}$, актинона 0,177 $с^{-1}$. Определить периоды их полураспада. Какая из перечисленных эманаций играет главную роль в ионизации атмосферы и почему?

8.34. Космические лучи создают у поверхности Земли в среднем около $1{,}8 \cdot 10^6$ пар ионов/(с·м^3), а радиоактивные ионизаторы, действующие практически только над сушей, создают около $9 \cdot 10^6$ пар ионов (с·м^3). Какой могла бы быть концентрация легких ионов над океаном и над сушей, если бы воздух был идеально чистым? Почему в действительности число легких ионов над океаном имеет такой же порядок, как над сушей, хотя интенсивность ионообразования над сушей почти в 5 раз больше, чем над океаном.

8.35. Определить реальные коэффициенты исчезновения легких ионов над океаном и над сушей, если над океаном в среднем наблюдается около $6 \cdot 10^8$ пар ионов/м^3, а над сушей около $7 \cdot 10^8$ пар ионов/м^3. Данные об интенсивности ионообразования над океаном и сушей взять из предыдущей задачи. Во сколько раз и почему скорость исчезновения легких ионов над сушей больше, чем над океаном?

8.36. Используя ответы задач 8.34 и 8.35, определить возможную продолжительность жизни легкого иона над сушей и океаном в идеально чистом воздухе и действительную его продолжительность в реальном (запыленном) воздухе.

8.37. Средняя кинетическая энергия первичных протонов в космических лучах равна 10^9 эВ. Определить скорость этих протонов в долях от скорости света и в м/с. Во сколько раз увеличивается масса движения протонов по сравнению

с массой покоя при такой скорости? (Масса покоя протона равна $1{,}675 \cdot 10^{-27}$ кг.)

8.38. Решить задачу 8.37 для первичного протона космических лучей, обладающего максимальной зарегистрированной энергией 10^{20} эВ.

8.39. Мюоны (μ-мезоны), в основном составляющие жесткую компоненту космических лучей, расходуют свою энергию главным образом на ионизацию тропосферного воздуха. Их масса покоя равна 206,76 единиц *, 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 равна $1{,}5 \cdot 10^{9}$ эВ. Масса покоя электрона $9{,}11 \cdot 10^{-31}$ кг. Успеет ли мюон достичь земной поверхности?

8.40. Решить задачу 8.39 для мюона, кинетическая энергия которого достигла 10^{12} эВ. Во сколько раз увеличиваются время жизни такой частицы и ее путь в атмосфере?

8.41. 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 (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?

8.42. По условиям предыдущей задачи определить, во сколько раз уменьшается длина мезона при его движении с такой скоростью?

8.43. Как и во сколько раз изменяются: а) время жизни, б) путь в атмосфере, в) масса и г) длина любой элементарной частицы, если скорость ее движения составляет 0,995 от скорости света?

8.44. Вычислить максимальные длины волн, у которых энергия квантов достаточна для фотоионизации основных газов атмосферы: O_2, O, N_2 и He. В каких областях солнечного спектра лежат такие длины волн и как эти области спектра называются? В каких слоях атмосферы данные длины волн в основном совершают фотоионизацию воздуха? Если ионизация происходит ступенчатым путем, то требуются кванты с большей или меньшей длиной волны? Использовать приложение 18.

8.45. Какими должны быть минимальные скорости электронов, чтобы за счет своей кинетической энергии они могли про-

---

* За единицу принята масса покоя электрона $m_0 = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ кг.

изводить ударную ионизацию основных газов атмосферы: O_2, O, N_2 и He. Использовать приложение 18.

8.46. Решить задачу 8.45 для протонов. Масса протона равна $1{,}675 \cdot 10^{-27}$ кг. Какие частицы в атмосфере движутся с такими скоростями или даже с бо́льшими? Принять во внимание ответ данной задачи и предыдущей.

8.47. Квазинейтральный поток 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 с ответами задач 8.45 и 8.46).

8.48. На основании результатов предыдущей задачи оценить энергию протонов и электронов солнечного ветра в эВ. Сравнить со средней энергией космических частиц.

8.3. Ионосфера и полярные сияния

При установлении динамического равновесия между числом электронов q, создаваемых ионизаторами в ионосфере за единицу времени в единице объема, и числом электронов, рекомбинирующих с положительными ионами за это же время, можно записать аналогично (8.4)

$$N = \sqrt{\frac{q}{\alpha}}, \tag{8.26}$$

где N и α — наблюдаемые на данном уровне электронная концентрация и коэффициент рекомбинации электронов. После прекращения действия ионизаторов концентрация убывает во времени по закону, аналогичному (8.6),

$$N_t = \frac{N_0}{1 + \alpha N_0 t}, \tag{8.27}$$

где N_0 и N_t — электронные концентрации в начальный момент времени и по истечении времени t.

Электронная концентрация N на данном уровне связана с критической частотой радиоволны $f_{кр}$, направленной вертикально и испытывающей отражение на данном уровне, соотношением

$$N = \frac{4\pi^2 \varepsilon_0 m}{e} f_{кр}^2 = 1{,}24 \cdot 10^{-2} f_{кр}, \tag{8.28}$$

где $f_{кр}$ в Гц, e и m — заряд и масса электрона, N в м$^{-3}$, $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м. Из (8.28) следует, что

$$f_{кр} = \sqrt{80{,}7N}. \tag{8.29}$$

Высота слоя ионосферы h, от которого произошло отражение радиоволны, равна

$$h=\frac{c_0\,\Delta t}{2}, \qquad (8.30)$$

где c_0 — скорость радиоволны в пустоте, Δt — промежуток времени между моментами выпуска радиоволны и приема отраженного сигнала.

Удельная электропроводность ионосферы λ (См/м)

$$\lambda=7{,}12\cdot 10^{-7}\frac{N\alpha}{f^2}. \qquad (8.31)$$

Для радиоволны, падающей на ионосферу наклонно под углом падения i_0, соотношения между N (эл/м^3) и $f_{кр}$ (Гц) запишутся в виде:

$$N=\frac{4\pi^2\varepsilon_0 m\,(1-n^2)}{e^2}\,f_{кр}^2=1{,}24\cdot 10^{-2}\,(1-n^2)\,f_{кр}^2; \qquad (8.32)$$

$$f_{кр}=\sqrt{\frac{e^2N}{4\pi^2\varepsilon_0 m\,(1-n^2)}}=\sqrt{\frac{80{,}7}{1-n^2}N}\;; \qquad (8.33)$$

$$n=\sin i_0=\frac{c_0}{c}, \qquad (8.34)$$

где n — показатель преломления в месте отражения радиоволны; c_0 и c — скорость радиоволн в пустоте и в ионосфере (фазовая скорость) на уровне с электронной концентрацией N.

Задачи

8.49. Концентрация электронов в области D днем составляет 10^3 эл/см^3, средний коэффициент рекомбинации равен 10^{-5} см^3/с. Через какое время после захода Солнца концентрация электронов в этом слое уменьшится в 100 раз? Существует ли область D ночью? Почему? Как изменился бы ответ данной задачи, если бы в вычислениях было учтено, что в области D, кроме электронов указанной концентрации, имеются еще ионы, концентрация которых днем равна 10^6—10^8 см$^{-3}$ и нейтральные атомы и молекулы (10^{14}—10^{16} см$^{-3}$)?

8.50. Вычислить концентрацию электронов в области E через 6 ч после захода Солнца летом, если концентрация перед заходом была $4\cdot 10^5$ эл/см^3, а средний коэффициент рекомбинации в этой области ночью равен 10^{-8} см^3/с. Почему область E не исчезает ночью, как область D, несмотря на то, что концентрация ионов и электронов в ней выше, чем в области D? На сколько процентов уменьшилась концентрация за 6 ч?

8.51. На сколько процентов уменьшится содержание электронов в 1 см^3 в области F_2 через 8 ч после захода Солнца, если

перед заходом она составляла $3 \cdot 10^6$ эл/см^3? Средний коэффициент рекомбинации в этой области ночью равен $3 \cdot 10^{-11}$ см^3/с. Почему в области F_2 концентрация электронов ночью уменьшается медленнее, чем в областях E или D, хотя содержание ионов и электронов в ней значительно больше, чем в областях E и D?

8.52.* Радиоимпульс с частотой $1{,}27 \cdot 10^6$ Гц, направленный вертикально вверх днем (или ночью) радиоустановкой ионосферной станции, был принят назад через $2 \cdot 10^{-3}$ с. Определить: высоту слоя ионосферы, от которого отразился радиосигнал; 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 в ионосфере выше области, от которой отразился радиосигнал, не имелось бы областей с более высокой концентрацией электронов.

Варианты исходных данных к задаче 8.52

Вариант	f Гц	Время суток	Δt с	Вариант	f Гц	Время суток	Δt с
1	$1{,}02 \cdot 10^5$	День	$4{,}00 \cdot 10^{-4}$	16	$5{,}68 \cdot 10^6$	День	$8{,}20 \cdot 10^{-4}$
2	$1{,}93 \cdot 10^5$	„	$5{,}60 \cdot 10^{-4}$	17	$5{,}96 \cdot 10^6$	„	$7{,}60 \cdot 10^{-4}$
3	$2{,}46 \cdot 10^5$	„	$4{,}40 \cdot 10^{-4}$	18	$4{,}02 \cdot 10^6$	„	$1{,}14 \cdot 10^{-3}$
4	$2{,}68 \cdot 10^5$	„	$5{,}40 \cdot 10^{-4}$	19	$5{,}54 \cdot 10^6$	„	$1{,}20 \cdot 10^{-3}$
5	$3{,}81 \cdot 10^5$	„	$4{,}60 \cdot 10^{-4}$	20	$6{,}80 \cdot 10^6$	„	$1{,}26 \cdot 10^{-3}$
6	$5{,}14 \cdot 10^5$	„	$4{,}80 \cdot 10^{-4}$	21	$2{,}98 \cdot 10^6$	Ночь	$1{,}46 \cdot 10^{-3}$
7	$6{,}29 \cdot 10^5$	„	$5{,}20 \cdot 10^{-4}$	22	$4{,}30 \cdot 10^6$	„	$1{,}64 \cdot 10^{-3}$
8	$6{,}36 \cdot 10^5$	Ночь	$6{,}00 \cdot 10^{-4}$	23	$4{,}82 \cdot 10^6$	„	$1{,}80 \cdot 10^{-3}$
9	$7{,}07 \cdot 10^5$	„	$8{,}60 \cdot 10^{-4}$	24	$6{,}48 \cdot 10^6$	День	$1{,}68 \cdot 10^{-3}$
10	$7{,}78 \cdot 10^5$	„	$6{,}80 \cdot 10^{-4}$	25	$7{,}13 \cdot 10^6$	„	$1{,}94 \cdot 10^{-3}$
11	$8{,}39 \cdot 10^5$	„	$8{,}00 \cdot 10^{-4}$	26	$8{,}48 \cdot 10^6$	„	$2{,}80 \cdot 10^{-3}$
12	$8{,}94 \cdot 10^5$	„	$7{,}40 \cdot 10^{-4}$	27	$1{,}06 \cdot 10^7$	„	$2{,}56 \cdot 10^{-3}$
13	$2{,}98 \cdot 10^6$	День	$6{,}20 \cdot 10^{-4}$	28	$1{,}45 \cdot 10^7$	„	$2{,}10 \cdot 10^{-3}$
14	$4{,}31 \cdot 10^6$	„	$9{,}80 \cdot 10^{-4}$	29	$1{,}77 \cdot 10^7$	„	$2{,}34 \cdot 10^{-3}$
15	$5{,}01 \cdot 10^6$	„	$6{,}40 \cdot 10^{-4}$	30	$2{,}03 \cdot 10^7$	„	$2{,}16 \cdot 10^{-3}$

8.53. Критические частоты радиоволн, отражающихся от области E, меняются от $4{,}82 \cdot 10^6$ Гц днем до $4{,}48 \cdot 10^5$ Гц ночью. Как изменяется концентрация электронов в области E при переходе от дня к ночи?

8.54. Решить задачу 8.53 применительно к длинам радиоволн, которые могут отражаться от области E в течение суток.

8.55. 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 $5 \cdot 10^2$ до $5 \cdot 10^3$ эл/см^3?

8.56. 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?

8.57. Определить максимальную удельную электропроводность области E ионосферы днем, если критическая частота для этой области $4{,}82 \cdot 10^6$ Гц, а число столкновений электронов составляет 10^5 с$^{-1}$. Во сколько раз удельная электропроводность в области E больше, чем у поверхности Земли, где она равна в среднем $2{,}2 \cdot 10^{-14}$ См/м?

8.58. Определить критическую частоту, соответствующую ей длину радиоволны и удельную электропроводность области F_2 днем, когда электронная концентрация в ней достигает максимального значения $6 \cdot 10^6$ эл/см^3, а число столкновений электронов равно $1{,}5 \cdot 10^3$ с$^{-1}$. На каких длинах волн может осуществляться наземная радиосвязь с помощью этой области ионосферы, на каких — связь с космическими кораблями?

8.59. Дальняя радиосвязь между двумя пунктами осуществляется на частоте $2{,}3 \cdot 10^7$ Гц. Угол падения радиосигнала на ионосферу 30°. Какой должна быть концентрация электронов в месте отражения радиосигнала? Что произойдет с радиосигналом, если концентрация электронов в данном месте окажется меньше или больше найденной?

8.60. По условиям предыдущей задачи определить отношение скорости данной радиоволны в момент ее отражения от ионосферы к скорости света в пустоте. Какая скорость — фазовая или групповая — определена в данной задаче? Если направление радиосигналов останется таким же, то на каких длинах волн может быть осуществлена связь с космическими кораблями?

8.61. Используя формулы вводной части данного параграфа, получить аналитическую зависимость концентрации электронов $N_{верт}$, необходимой для отражения вертикального радиоимпульса, от показателя преломления n и от концентрации электронов $N_{накл}$, необходимой для отражения наклонного луча, если частоты обоих импульсов одинаковы. Для какого из радиоимпульсов с одинаковой частотой — вертикального или наклонного — условия отражения более благоприятны, т. е. для отражения достаточна меньшая концентрация? Для луча с бо́льшим или меньшим углом падения на ионосферу условия отражения более благоприятны? Какой из лучей одинаковой

частоты — вертикальный или наклонный — должен подняться выше, чтобы произошло его полное внутреннее отражение?

8.62. От разных видов полярных сияний наблюдалось отражение радиоволн широкого диапазона частот от СВЧ и УВЧ вплоть до 144 МГц. Какова 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 $2 \cdot 10^{-3}$ с, а от нижнего — через $5{,}3 \cdot 10^{-4}$ с после момента посылки исходного сигнала?

8.63. Какая концентрация электронов должна быть в ионосфере, чтобы от нее могли бы отражаться световые волны? Если бы такая концентрация действительно была в ионосфере, то могли бы мы видеть Солнце, звезды и другие небесные светила?

8.64. На сколько процентов ионизирован воздух у земной поверхности и на уровне максимума ионизации в ионосфере в области F_2, если у Земли в 1 м^3 воздуха содержится $3 \cdot 10^8$ пар легких и $8 \cdot 10^9$ тяжелых ионов, а число молекул воздуха в единице объема равно $2{,}55 \cdot 10^{25}$ м$^{-3}$. В области F_2 средняя концентрация электронов днем составляет $3 \cdot 10^{12}$ м$^{-3}$, а число молекул в единице объема — $3 \cdot 10^{15}$ м$^{-3}$. На сколько нейтральных молекул приходится одна ионизированная у Земли и в области F_2?

8.65. В области E ионосферы ионная и электронная концентрации приблизительно одинаковы. Во сколько раз электронная проводимость больше ионной, если основными ионами в этой области являются O_2^+, N_2^+ и O^+?

8.66. Максимальная энергия ядер атомов водорода, выбрасываемых при солнечных хромосферных вспышках средней интенсивности, обычно не превышает 40 кэВ. Через сколько времени после начала такой вспышки следует ожидать магнитной бури, нарушения радиосвязи и появления полярных сияний?

8.67. Внезапное ионосферное возмущение (SID), проявившееся в прекращении радиосвязи в коротковолновом диапазоне одновременно на всем освещенном полушарии Земли, началось в 14 ч 49 мин и продолжалось около получаса. Когда началась солнечная вспышка, его вызвавшая? Возрастание какого излучения Солнца во время вспышек является причиной таких SID?

8.68. Средняя скорость корпускул спокойного солнечного ветра обычно колеблется в пределах 300—800 км/с. Вычислить, на сколько времени корпускулярное затмение Солнца начнется позднее, чем видимое (световое)? В каких пределах при указанных скоростях корпускул лежат минимальное и максимальное расстояния между точками земного шара, в одной из которых начнется видимое, а в другой корпускулярное затмение Солнца? Использовать приложение 1.

ГЛАВА 9. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ И ТОКИ В АТМОСФЕРЕ

9.1. Характеристики электрического поля тропосферы

Электрическое поле в тропосфере и нижней стратосфере ввиду малой проводимости атмосферного воздуха можно характеризовать с помощью основных уравнений электростатики. В частности, напряженность электрического поля E связана с потенциалом поля V, поверхностной плотностью зарядов на Земле σ и с плотностью объемных зарядов ρ следующими соотношениями:

$$E = -\frac{dV}{dz}; \tag{9.1}$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}; \tag{9.2}$$

$$\frac{dE}{dz} = -\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \frac{1}{\varepsilon_0}\rho(z); \tag{9.3}$$

$$\rho(z) = e\,\Delta n = e\,(n_+ - n_-). \tag{9.4}$$

Здесь ε_0 — электрическая постоянная, равная $8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; n_+ и n_- — число положительных и отрицательных ионов в единице объема; e — элементарный заряд, равный $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Напряженность поля, создаваемая монополярным облаком Cb на земной поверхности на расстоянии l от облака, заряд которого равен Q кулонов, а центр тяжести заряда расположен на высоте h над земной поверхностью, выражается формулой

$$E = \frac{2Qh}{4\pi\varepsilon_0 (h^2 + l^2)^{3/2}}. \tag{9.5}$$

Энергия электростатического поля W

$$W = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} v, \tag{9.6}$$

где v — объем поля, ε — диэлектрическая постоянная среды (для воздуха равна 1).

Задачи

9.1. Определить поверхностную плотность электрических зарядов на Земле, если средний градиент потенциала у поверхности Земли равен 130 В/м.

9.2. Используя результаты предыдущей задачи, вычислить общий заряд Земли. Радиус земного шара 6300 км.

9.3. Если бы электрическое поле в атмосфере создавалось только отрицательным зарядом Земли, то какова была бы напряженность такого поля у поверхности Земли и на высотах 3 и 9 км? Существенно ли изменялась бы с высотой напряженность такого поля в тропосфере и даже в стратосфере?

9.4. Средние градиенты потенциала электрического поля атмосферы на разных высотах над поверхностью Земли:

z км	0	3	6	9
$\frac{dV}{dz}$ В/м . . .	130	20	10	5

Вычислить среднюю объемную плотность заряда в слоях: 0—3; 3—6 и 6—9 км, а также разность между числом положительных и отрицательных ионов в 1 м^3 каждого слоя. Почему напряженность электрического поля так быстро убывает с высотой? Как изменяется с высотой объемная плотность положительного заряда?

9.5. По результатам предыдущей задачи вычислить: общее избыточное число положительных ионов в столбе атмосферы сечением 1 м^2 и высотой 9 км; общий свободный объемный положительный заряд q в указанном столбе атмосферы; соотношение найденного объемного заряда q с поверхностной плотностью σ отрицательного заряда на земной поверхности (см. задачу 9.1); общий положительный заряд всей тропосферы $Q_а$, если радиус земного шара 6370 км; соотношение полученного заряда тропосферы с общим зарядом земной поверхности $Q_з$. Является ли Земля для Мирового пространства телом заряженным или нейтральным?

9.6. Установлено, что градиент потенциала электрического поля атмосферы убывает с высотой по экспоненциальному закону. Показатель экспоненты изменяется во времени и от пункта к пункту. Вычислить этот показатель для средних значений градиента потенциала на высотах, приведенных в задаче 9.4.

9.7. Результаты радиозондовых измерений напряженности электрического поля (В/м) атмосферы 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.

9.8. Суточные изменения градиента потенциала электрического поля атмосферы над всеми океанами происходят одновременно (унитарная вариация). Максимум наблюдается около 17—18 ч, а минимум — около 3—4 ч по Гринвичу. Средний годовой максимум и минимум составляют соответственно 165 и 115 В/м. Вычислить поверхностные плотности заряда в момент наступления максимума и минимума напряженности электрического поля.

9.9. Используя результаты предыдущей задачи, вычислить плотность тока, который обеспечивает такое изменение поверхностного заряда океана, и силу тока, текущего ко всей поверхности Мирового океана, если его площадь равна $3{,}61 \cdot 10^8$ км^2.

9.10. Какую напряженность электрического поля создает у поверхности Земли грозовое облако Cb под облаком и на расстоянии 20 км, если центр тяжести отрицательного заряда облака находится на высоте 3 км, а заряд равен 20 Кл. На каком расстоянии поле, создаваемое облаком, становится сравнимым с нормальным электрическим полем атмосферы?

9.11. Вычислить напряженность поля, создаваемого биполярным грозовым облаком Cb у поверхности Земли, под облаком и на расстоянии 10 км. Центр тяжести нижнего отрицательного заряда (—20 Кл) находится на высоте 3 км, центр тяжести верхнего положительного заряда (+20 Кл) — на высоте 7 км. Вычислить напряженности, создаваемые отдельно положительным (а) и отрицательным (б) зарядами, а также суммарную напряженность (в). Сравнить с ответами задачи 9.10. Существенный ли вклад в общую напряженность вносит учет влияния верхнего положительного заряда?

9.12. На каком максимальном расстоянии обнаружит приближающееся грозовое облако прибор для измерения напряженности электрического поля, если его чувствительность равна 1 В/м? Заряд нижней части Cb равен 30 Кл, центр тяжести заряда расположен на высоте 2 км.

9.13. По самолетным измерениям Е. В. Чубариной, напряженность электрического поля атмосферы в отсутствие облаков чаще всего убывает по экспоненциальному закону $E_z = E_0 e^{-\alpha z}$, коэффициент α равен в Ленинграде 1 км$^{-1}$, в Киеве и Ташкенте 0,6 км$^{-1}$. Вычислить напряженность электрического поля на высоте 3 км, если средняя напряженность у поверхности Земли равна в Ленинграде 170 В/м, в Киеве 160 В/м и в Ташкенте 120 В/м.

9.14. Используя условия предыдущей задачи, вычислить потенциал электрического поля атмосферы на высоте 3 км над Ленинградом, Киевом и Ташкентом.

9.15. Облачная капля радиусом 10 мкм имеет заряд 500 e и находится в вертикальном электрическом поле напряженно-

стью 150 В/м. Определить соотношение между силой тяжести и силой Кулона, действующей на каплю.

9.16. Вычислить энергию электрического поля нижнего 100-метрового слоя атмосферы, приняв среднюю напряженность равной 100 В/м. Сравнить эту энергию с кинетической энергией атмосферы, составляющей, по расчетам Е. П. Борисенкова, $4 \cdot 10^{20}$ Дж.

9.17. По измерениям 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?

9.18. Какую напряженность электрического поля нужно создать, чтобы уравновесить силу тяжести, действующую на облачную каплю радиусом 5 мкм и несущую заряд $300e$ (e — элементарный заряд)? Наблюдается ли в облаках поля с такими значениями напряженности?

9.19. Принципиально возможно фиксировать неоднородности рельефа земной поверхности с летательного аппарата, измеряющего горизонтальную разность потенциалов (рис. 16). Какой минимальный угол наклона этой поверхности α можно зафиксировать, если на концах крыльев самолета (летящего строго горизонтально) расположить измерители потенциала атмосферы? Напряженность поля E принять постоянной, расстояние между измерителями l, а чувствительность измерителей φ.

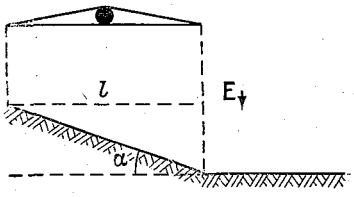


Рис. 16. К задаче 9.19.

9.20. 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 магнитном поле Земли. Какова напряженность возникающего электрического поля при скорости ветра 10 м/с и магнитном поле 15 А/м?

9.21. Какой заряд индуцируется на автомобиле «Жигули» в электрическом поле напряженностью 200 В/м? Поверхность автомобиля 17 м^2.

9.22. Какой потенциал будет иметь автомобиль при условиях предыдущей задачи, если его электроемкость 300 пФ?

9.23. Вычислить максимально возможную напряженность электрического поля, создаваемого солнечным излучением у земной поверхности, если плотность потока прямой солнечной радиации в идеальной атмосфере (при $m=1$) на уровне моря

равна 1,22 кВт/м². Сравнить ответ с напряженностью нормального электрического поля атмосферы. Решать с помощью вектора Пойнтинга.

9.24. Пользуясь данными предыдущей задачи, вычислить напряженность магнитного поля, создаваемого солнечной радиацией на Земле. Сравнить с напряженностью нормального магнитного поля, в среднем равной около 40 А/м.

9.2. Электрические токи в атмосфере. Электричество грозы

Плотности токов, текущих в атмосфере, вычисляются по следующим формулам. Плотность тока проводимости

$$j_\lambda = \lambda E; \tag{9.7}$$

плотность тока конвекции

$$j_\rho = \rho v_в, \tag{9.8}$$

где $v_в$ — скорость вертикального переноса. Вертикальная составляющая плотности тока конвекции, обусловленной турбулентным переносом объемного заряда ρ,

$$j_{\rho_т} = -k_z \frac{\partial \rho}{\partial z}, \tag{9.9}$$

где k_z — вертикальный коэффициент турбулентности.

Плотность горизонтального тока адвекции

$$j_{адв} = \rho v_{гор}, \tag{9.10}$$

где $v_{гор}$ — скорость ветра.

Плотность тока смещения

$$j_{смещ} = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}, \tag{9.11}$$

где $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Напряженность электрического поля, создаваемого молниевым разрядом,

$$E_м = \frac{hQ}{2\pi\varepsilon_0 r^3} + \frac{h}{2\pi\varepsilon_0 c r^2}\frac{dQ}{dt} + \frac{h}{2\pi\varepsilon_0 c^2 r}\frac{d^2Q}{dt^2}, \tag{9.12}$$

где Q — заряд, нейтрализуемый в канале молнии длиной h. Первое слагаемое — электростатическая составляющая поля, второе — радиационная его составляющая, третье — поле электромагнитного излучения. При этом $\frac{dQ}{dt} = i$ — ток в канале молнии.

Приведем некоторые вспомогательные формулы электростатики, необходимые для решения ряда задач:

$$c = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R \tag{9.13}$$

для емкости шара радиуса R;

$$c = \frac{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 Rr}{R - r} \qquad (9.14)$$

для емкости сферического конденсатора. Здесь R и r — радиусы внешнего и внутреннего шаров.

Задачи

9.25. Какова плотность тока проводимости в Ленинграде зимой, если среднее значение напряженности поля у поверхности Земли равно 250 В/м, а проводимость атмосферного воздуха $1{,}1 \cdot 10^{-14}$ Ом$^{-1} \cdot$ м$^{-1}$. Электричество какого знака доставляет земной поверхности ток проводимости?

9.26. Сколько электричества приносит ток проводимости за 1 секунду, за 1 час и за 1 сутки на поверхность всего земного шара, если средняя напряженность электрического поля равна 130 В/м, а проводимость атмосферы $2{,}2 \cdot 10^{-14}$ Ом$^{-1} \cdot$ м$^{-1}$. Радиус земного шара 6 300 км. Каков суммарный ток проводимости, текущий на Землю? За какое время ток проводимости полностью уничтожил бы заряд Земли, если бы плотность этого тока оставалась постоянной по мере убывания заряда Земли?

9.27. По расчетам А. Х. Филиппова, суммарный ток проводимости на земную поверхность равен 1600 А. Каково сопротивление между электросферой и землей, если разность потенциалов составляет 300 кВ?

9.28. 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.

9.29. 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?

9.30. Найти плотность тока конвекции, если число легких положительных ионов 650 см$^{-3}$, а отрицательных 645 см$^{-3}$. Средняя скорость конвективных движений составляет около 2 см/с. Сравнить полученную плотность тока с плотностью тока проводимости (задача 9.25).

9.31. Какой плотности и силы может достичь конвективный ток в центре грозового облака, где скорость восходящих движений воздуха возрастает до 25 м/с и более, а плотность объемных зарядов, по исследованиям И. М. Имянитова, составляет в среднем $1{,}5 \cdot 10^{-9}$ Кл/м^3, но может в неоднородностях облака достигать 10^{-7} Кл/м^3. Область с такими вертикальными

скоростями имеет диаметр порядка 10 км. Сравнить ответы с плотностью нормального тока проводимости (задача 9.25).

9.32. По измерениям Х. Израэля на горе Юнгфрау в Альпах (высота 3578 м) плотность вертикального тока проводимости равна $13{,}3 \cdot 10^{-12}$ А/м^2. Напряженность электрического поля при этом составляла 149 В/м. Определить проводимость воздуха и проанализировать причины изменения проводимости и тока с высотой.

9.33. Вычислить плотность тока смещения в атмосфере, если за 10 мин электрическое поле изменилось от 76 до 198 В/м. Сравнить с типичным значением плотности тока проводимости.

9.34. 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?

9.35. Вычислить плотности горизонтальных токов: проводимости и тока адвекции. Среднее значение проводимости атмосферного воздуха равно $2 \cdot 10^{-14}$ Ом$^{-1} \cdot$ м$^{-1}$, вертикальная составляющая напряженности поля 130 В/м, горизонтальная составляющая на 2 порядка меньше вертикальной; скорость ветра 10 м/с и средний объемный заряд у земной поверхности равен 10^{-11} Кл/м^3.

9.36. Какая плотность тока адвекции создается при метели, когда скорость ветра увеличивается до 25 м/с, а объемный заряд за счет трения снежинок о земную поверхность достигает 10^{-8} Кл/м^3. Какова сила тока, текущего на металлическую крышу площадью 50 м^2, имеющую угол наклона с вертикалью 60°.

9.37. Какова сила тока, создаваемого выпадающими обложными осадками, и сколько положительного электричества они приносят на Землю за сутки, если зона обложных осадков имеет ширину 200 км и длину 1200 км. Среднее количество осадков за сутки составило 10 мм, средний радиус капель 1 мм, а заряд отдельной капли 10^{-12} Кл. Могут ли выпавшие обложные осадки даже на одной такой площади (а на земной поверхности их может быть несколько) полностью компенсировать весь заряд Земли? Сравнить полученную силу тока с силой тока в грозовых облаках.

9.38. По исследованиям В. П. Колоколова, на земном шаре происходит каждую секунду 118 разрядов молний. Из них 31 % составляют разряды на Землю и 69 % — междуоблачные разряды. Вычислить силу суммарного тока молний на Землю. Сколько электричества доставляют молнии на земную поверхность за 1 с, за 1 ч и за 1 сут, если каждая молния переносит в среднем 20 Кл, причем примерно 85 % молний несут Земле отрицательный заряд, а 15 % — положительный. Сравнить ответы с аналогичными данными для тока проводимости (задача 9.26).

9.39. Используя результаты предыдущей задачи, вычислить среднюю для всего земного шара плотность тока, создаваемого молниями. Сравнить ее с плотностью тока проводимости (задача 9.25). Полностью ли молнии компенсируют утечку отрицательного заряда Земли, вызываемую током проводимости? Какой другой ток (кроме молний) доставляет Земле большой отрицательный заряд?

9.40. Пользуясь данными задачи 9.38, определить суммарную мощность молниевых разрядов (т. е. мощность «грозовой машины» земного шара) для всех разрядов, происходящих в атмосфере Земли и для ударяющих в землю. Среднюю силу тока в канале молнии принять равной 20 000 А, разность потенциалов на концах молниевого разряда, т. е. между облаком и Землей, 10^7 В, среднюю длительность основного разряда молнии 10^{-3} с. Сравнить ответы с мощностью крупнейших в мире гидроэлектростанций — Куйбышевской и Волжской (около 4×10^6 кВт).

9.41. На сколько времени хватило бы энергии одной молнии для освещения и питания телевизоров 300-квартирного дома, если каждая квартира потребляет 300 Вт? Молния выносит из облака в среднем около 20 Кл при разности потенциалов между облаком и землей порядка 10^7 В. Рационально ли создавать установки для перехвата энергии молний, если в средних широтах на площадь 1 км^2 молния ударяет 1 раз в 2 года?

9.42. Плотность объемного заряда у земной поверхности равна $2 \cdot 10^{-11}$ Кл/м^3, а на высоте 100 м уменьшается вдвое. Найти плотность конвективного тока, если коэффициент турбулентности 1 м^2/с.

9.43. Плотность объемного заряда в кучевом облаке изменяется от $5{,}4 \cdot 10^{-11}$ Кл/м^3 на нижней границе облака до $4{,}2 \cdot 10^{-11}$ Кл/м^3 на высоте 1,5 км над нижней границей облака. В облаке измерена плотность конвективного тока $3{,}8 \cdot 10^{-12}$ А/м^2. Вычислить коэффициент турбулентности в облаке.

9.44. В атмосфере течет ток проводимости плотностью $4 \cdot 10^{-12}$ А/м^2. До какого потенциала зарядится этим током за 1 час изолированный от земли автомобиль «Жигули», имеющий поверхность 17 м^2 и электроемкость 300 пФ? Утечкой заряда и искажением поля пренебречь.

9.45. Зональный перенос воздуха осуществляется поперек горизонтальной компоненты магнитного поля Земли. 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. Напряженность магнитного поля равна 15 А/м.

9.46. 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.

9.47. Какой потенциал наведется на увлажненном зонте, который человек держит над головой, при скачке электрического поля от молнии, равном 15 000 В/м. Площадь зонта 1,2 м^2, электроемкость 500 пФ.

9.48. 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 развития канала молнии. Через какое время после начала разряда ток достигает максимума?

9.49. По условиям предыдущей задачи определить заряд, нейтрализуемый в канале молнии за время от 0 до 100 мкс.

9.50. Сравнить электростатическую и электромагнитную составляющие поля, создаваемого молнией на расстоянии 50 км. Заряд в облаке, равный 20 Кл, был расположен на высоте 3 км. Крутизна тока в канале молнии равна 10 кА/мкс.

9.51. 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 10. ЭЛЕМЕНТЫ АТМОСФЕРНОЙ АКУСТИКИ

10.1. Характеристики звуковых колебаний в атмосфере

Акустические колебания, как и всякий волновой процесс, характеризуются частотой ν, длиной волны λ и скоростью распространения v, которые связаны между собой соотношением

$$v = \nu\lambda. \tag{10.1}$$

Акустические частоты лежат в пределах:

$\nu > 20\,000$ Гц	20 000—2300	2300—44	44—16 Гц	$\nu < 16$ Гц
Ультразвуки	Свисты	Звуки человеческого голоса	Шумы	Инфразвуки

Скорость распространения акустических колебаний в некоторой среде

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \tag{10.2}$$

где E — модуль Юнга среды (модуль объемной упругости), определяемый соотношением

$$E=\frac{1}{\beta}, \qquad (10.3)$$

где β — коэффициент объемного сжатия среды, ρ — плотность среды.

Скорость звуковых волн в газе

$$v=\sqrt{\varkappa\frac{p}{\rho}}=\sqrt{\frac{\varkappa R^*T}{\mu}}, \qquad (10.4)$$

где $\varkappa=\frac{c_p}{c_v}$ (c_p и c_v — соответственно удельные теплоемкости газа при постоянном давлении и объеме), для воздуха $\varkappa=1{,}404$; p и ρ — давление и плотность газа; T — абсолютная температура; μ — молекулярный вес газа, для воздуха $\mu=28{,}966$, R^* — универсальная газовая постоянная, равная 8,315 Дж/(моль·°С).

Интенсивность, или сила, звука I есть поток энергии, приходящийся на единичную площадку в единицу времени. Выражается в *ваттах на квадратный метр* (Вт/м^2).

Уровень интенсивности, или уровень громкости, звука L_2 связан с интенсивностью звука I соотношением

$$L_2=10\lg\frac{I}{I_0}, \qquad (10.5)$$

где I_0 — нулевой уровень интенсивности, или стандартный порог слышимости. Это есть 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/м^2 при $\nu\approx1000$ 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 в децибелах (дБ) связан с амплитудой звукового давления Δp соотношением

$$L_1=20\lg\frac{\Delta p}{\Delta p_0}, \qquad (10.6)$$

где Δp_0 — амплитуда звукового давления при нулевом уровне громкости, равная $2\cdot10^{-5}$ Н/м^2; Δp должно быть выражено также в Н/м^2.

Влияние ветра на скорость распространения звуковых колебаний пояснено на рис. 17. 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 $S_м$ и наблюдателю в точке M будет казаться, что звуковая волна пришла к нему из точки $S_м$. Скорость распространения звуковых колебаний с учетом скорости ветра w

$$v_w = v + w \cos \varphi, \tag{10.11}$$

где φ — угол между направлением ветра и направлением на кажущееся положение источника звука (точка $S_м$).

Угловой поправкой на аберрацию звука, т. е. на снос звуковой волны ветром, называется угол a_w между направлениями на истинное и на кажущееся положение источника звука.

Ввиду того что $v \gg w$, угол $\gamma \approx \varphi$ и

$$\sin a_w = \frac{w}{v} \sin \varphi. \tag{10.12}$$

Число Маха (число Ма) есть отношение скорости движения летательного аппарата $v_{л.а}$ или другого летящего тела к скорости звука в окружающей среде

$$\text{Ма} = \frac{v_{ла}}{v}. \tag{10.13}$$

Соотношение энергии падающего звукового луча I^2 и преломленного луча D^2 при падении звуковой волны на границу вода—воздух выражается формулой

$$F = \frac{D^2}{I^2} = 0{,}001\,189 \sqrt{1 - 17{,}9 \operatorname{tg}^2 i}, \tag{10.14}$$

где i — угол падения звукового луча на поверхность воды.

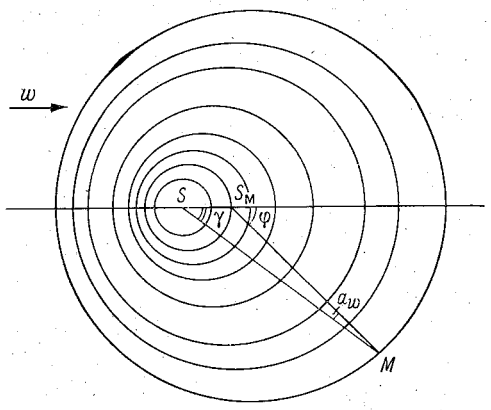


Рис. 17. Влияние ветра на скорость звука и положение источника звука.

Радиус зоны слышимости R, или расстояние от источника звука до начала звуковой тени (рис. 18), при положительном

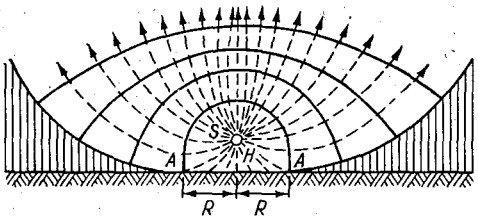


Рис. 18. Траектория звуковых лучей при падении температуры воздуха с высотой.

вертикальном температурном градиенте γ(°C/100 м) определяется по формуле

$$R=2\sqrt{\frac{T_0H}{\gamma}}, \qquad (10.15)$$

где T_0 — температура воздуха у поверхности Земли в К; H — высота источника звука в м.

Задачи

10.19. Когда скорость звука в воздухе будет больше и на сколько: в жаркий летний день с температурой 30 °С или в зимний день с температурой — 30 °С? Влиянием влажности пренебречь.

10.20. На борту теплохода, плывущего в тумане на некотором расстоянии от скалистого берега, произвели выстрел и через 2 с услышали эхо. На каком расстоянии от берега находился теплоход, если температура воздуха была 15 °С?

10.21. Для определения температуры верхних слоев атмосферы запускают ракету с гранатами, взрывающимися при достижении определенной высоты. Определить температуру на высоте 20 км над поверхностью Земли, если звук от взрыва, произведенного на высоте 22 км, пришел на 13,5 с позже звука от взрыва, произведенного на высоте 18 км. Почему для измерения температуры верхних слоев атмосферы нельзя использовать обычные термометры, применяемые у поверхности Земли?

10.22. Вычислить разность между виртуальной акустической и кинетической температурой воздуха, находящегося при давлении 1000 мбар и содержащего насыщенный водяной пар при температурах —30,0 и 30,0 °С. При высокой или низкой температуре и влажности воздуха различие между виртуальной акустической и кинетической температурой может быть значительным? В какое время года этим различием можно пренебречь и когда с ним следует считаться?

10.23. Ежедневно в 12 ч 00 мин в Ленинграде в Петропавловской крепости 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 и расположены так, как показано на рис. 19. Ветер скоростью 10 м/с дует от о. Декабристов к Смольному, температура воздуха 15 °С.

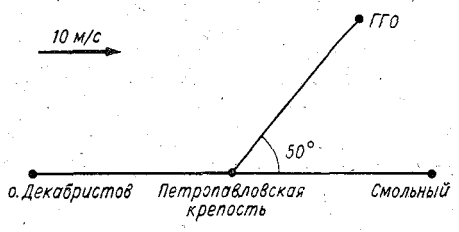


Рис. 19.

10.24. Наблюдателю в точке M (см. рис. 17) казалось, что звук выстрела из орудия пришел к нему из направления $S_{м}M$. Температура воздуха была 20 °С, ветер западный, скорость 20 м/с. Определить угол между направлениями на истинное и кажущееся положение источника звука, если угол между направлением ветра и кажущимся положением источника звука равен 60°.

10.25. Через 10 с после выстрела из орудия артиллеристы услышали эхо. На каком расстоянии от орудия отразился звук выстрела, если температура воздуха была — 20 °С.

10.26. Решить задачу 10.25 для случая, когда температура воздуха 20 °С.

10.27. Ударная волна, возникшая в результате извержения вулкана Кракатау в Зондском проливе 27 августа 1883 г., обошла несколько раз вокруг земного шара, что было записано барографами всех станций мира. По этим записям установили, что ударная волна, возникшая над Кракатау в 10 ч, пришла на противоположную сторону Земли, в Южную Америку, в 12 ч. С какой скоростью в среднем распространялась ударная волна? Как изменяется скорость ударных волн по мере удаления от места зарождения?

10.28. Самолет, летевший на высоте 1 км, где температура воздуха была 20 °С, поднялся на высоту 15 км, где температура — 53 °С. Как и на сколько должна измениться максимальная допустимая скорость полета, если максимальное число Ма для данного типа самолета равно 0,8.

10.29. Самолет совершает перелет из Ленинграда в Дели летом на высоте около 18 км. Каковы максимально возможные

скорости полета над Ленинградом и над Дели, если температура воздуха над ними на этой высоте равна соответственно —50 и —75 °С, а максимальное число Ма для данного типа самолета 0,7.

10.30. Вычислить радиус зоны слышимости звука от самолета, летящего на высоте 5 км, если температура воздуха у поверхности Земли равна 25 °С, а вертикальный температурный градиент составляет 0,60 °С/100 м.

10.31. Решить задачу 10.30 для зимних условий, когда температура у поверхности Земли равна —25 °С, а вертикальный температурный градиент 0,12 °С/100 м. Почему радиус зоны слышимости зимой и летом различен?

10.32. Сколько процентов звуковой энергии входит в воду из воздуха в самом благоприятном случае, когда угол падения звуковых лучей на воду равен 0°. Сколько процентов звуковой энергии при этом отражается от поверхности воды назад в воздух? Почему?

10.33. При каких углах падения звуковых лучей на поверхность воды звуковая энергия совершенно не проходит в воду, а полностью отражается от нее? Почему звуковые лучи так плохо проходят из воздуха в воду, и наоборот?

10.34. На каком расстоянии от наблюдателя происходят грозовые разряды и каков радиус слышимости грома, если наблюдатель услышал гром через 6 с после вспышки молнии. Температура воздуха 30,0 °С, давление 999,5 мбар. Относительная влажность 90 %, упругость насыщения при $t=30{,}0$ °С равна 42,4 мбар, вертикальный температурный градиент 0,9 °С/100 м. Ветер отсутствует. Грозовые разряды в средних широтах чаще всего происходят на высоте около 1500 м.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Средние радиусы орбит планет Солнечной системы

Планета	Среднее расстояние от Солнца, 10^6 км	Планета	Среднее расстояние от Солнца, 10^6 км
Меркурий	57,87	Сатурн	1426,1
Венера	108,14	Уран	2867,7
Земля	149,50	Нептун	4494
Марс	227,79	Плутон	9508
Юпитер	777,8		

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Интегральные коэффициенты прозрачности идеальной атмосферы $p_{ид}$ при различных оптических массах m

m	1	2	3	4	5	6	8	10
$p_{ид}$	0,907	0,921	0,928	0,934	0,939	0,943	0,949	0,954

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Число молекул в 1 м³ воздуха N по модели CIRA 1961 г. и объемные коэффициенты молекулярного рассеяния общего $\sigma_м$ и рассеяния назад $\sigma_{\pi м}$ на различных высотах над поверхностью Земли

z км	0	4	8	12	16	20
N м$^{-3}$	2,55 25	1,70 25	1,11 25	6,56 24	3,53 24	1,85 24
$\sigma_м$ м$^{-1}$	4,69 —6	2,15 —6	2,04 —6	1,21 —6	6,49 —7	3,40 —7
$\sigma_{\pi м}$ м$^{-1}$/ср	5,58 —7	2,56 —7	2,42 —7	1,44 —7	7,72 —8	4,05 —8
z км	24	28	32	36	40	44
N м$^{-3}$	9,76 23	5,22 23	2,82 23	1,53 23	8,46 22	4,76 22
$\sigma_м$ м$^{-1}$	1,80 —7	9,60 —8	5,18 —8	2,81 —8	1,56 —8	8,75 —9
$\sigma_{\pi м}$ м$^{-1}$/ср	2,14 —8	1,14 —8	8,16 —9	3,34 —9	1,86 —9	1,05 —9
z км	56	68	80	100	110	120
N м$^{-3}$	1,01 22	2,39 21	4,03 20	9,98 18	1,99 18	5,15 17
z км	130	150	200	250	300	350
N 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 — это показатель степени у десяти.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Суммарная освещенность горизонтальной поверхности Земли в Павловске, по данным Н. Н. Калитина

Безоблачные дни

$h^\circ_\odot$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
$E \cdot 10^3$ 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

$-h^\circ_\odot$	0	1,0	2,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	8,5
E лк	674	520	120	27	7,3	2,6	1,05	0,36	0,15

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Коэффициенты $\alpha_a(\lambda)$ для наиболее вероятных значений параметров микроструктуры облаков и туманов (наивероятнейший радиус $a=6$ мкм, параметр полуширины распределения $\mu=2$) при $S_м=0{,}2$ км (по В. Е. Зуеву)

λ мкм	α_a (λ) км$^{-1}$	λ мкм	α_a (λ) км$^{-1}$	λ мкм	α_a (λ) км$^{-1}$
0,31	19,5	0,81	19,7	4,55	21,6
0,51	19,6	1,06	19,9	5,27	22,2
0,69	19,7	2,00	20,3	10,6	19,6

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Коэффициенты $\alpha_a(\lambda)$ атмосферной дымки для наиболее вероятных параметров микроструктуры дымки $\beta=4$, $a_{min}=0{,}05$ мкм и $a_{max}=5{,}0$ мкм при $S_м=10$ км в приземном слое атмосферы (по В. Е. Зуеву)

λ мкм	α_a (λ) км$^{-1}$	λ мкм	α_a (λ) км$^{-1}$	λ мкм	α_a (λ) км$^{-1}$
0,31	0,65	0,81	0,25	4,55	0,04
0,63	0,32	1,06	0,18	5,27	0,03
0,69	0,29	2,00	0,09	10,6	0,01

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Значения $\omega(\lambda)$ при наиболее часто встречающихся параметрах атмосферной дымки $a_{min}=0{,}1$ мкм и $a_{max}=1{,}0$ мкм, $\beta=3$ и 5 (по В. Е. Зуеву)

λ мкм	β		λ мкм	β	
	3	5		3	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 8

Оптические индексы рефракции для разных длин волн при $p=1013{,}2$ мбар и $t=15\,°C$

(Варианты исходных данных приведены для задач 1.40 и 1.41)

№ варианта	λ мкм	$(n-1)\cdot10^{-6}$	№ варианта	λ мкм	$(n-1)\cdot10^{-6}$
1	0,20	324,08	16	0,54	278,03
2	0,265	297,78	17	0,56	277,64
3	0,28	294,75	18	0,58	277,29
4	0,30	291,56	19	0,60	276,97
5	0,32	289,03	20	0,62	276,69
6	0,34	286,99	21	0,64	276,43
7	0,36	285,32	22	0,66	276,20
8	0,38	283,93	23	0,68	275,98
9	0,40	282,76	24	0,70	275,79
10	0,42	281,76	25	0,74	275,45
11	0,44	280,91	26	0,78	275,16
12	0,46	280,17	27	0,80	275,03
13	0,48	279,53	28	1,00	274,15
14	0,50	278,96	29	2,00	272,98
15	0,52	278,47	30	4,00	272,70

ПРИЛОЖЕНИЕ 9

Таблица Бемпорада для определения числа масс, пройденных лучами при разной высоте Солнца

Десятки градусов	Градусы									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	35,0	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

Световой эквивалент (10^3 лк/(кВт·м$^{-2}$) прямой, суммарной и рассеянной радиации в зависимости от высоты Солнца $h_\odot^\circ$ и облачности

Радиация	Облачность, баллы	$h_\odot^\circ$							
		10	20	30	40	50	60	70	75
Прямая	0—3 (⊙²)	70±10	80±6	89±4	94±4	98±4	100±4	101±3	101±3
Суммарная	0—6 (⊙²); 1—10 (⊙)	89±7	94±7	97±6	100±4	101±4	102±4	103±4	103±4
Рассеянная	0—6 (⊙²)	117±17							
	1—10 (⊙)	114±10							
Рассеянная (суммарная)	3—10 (⊙⁰); 7—10 (П)	103±10							

ПРИЛОЖЕНИЕ 11

Модель чистой стандартной атмосферы (США) * для $\lambda = 0{,}55$ мкм **

Высота, км	$\sigma_м$ км$^{-1}$	$\sigma_а$ км$^{-1}$	$\alpha_{оз}$ км$^{-1}$	Высота, км	$\sigma_м$ км$^{-1}$	$\sigma_а$ км$^{-1}$	$\alpha_{оз}$ км$^{-1}$
0	1,162 —2	1,58 —1	3,28 —4	22	6,121 —4	6,32 —5	1,81 —3
1	1,055 —2	6,95 —2	3,00 —4	24	4,453 —4	4,11 —5	1,78 —3
2	9,552 —3	3,00 —2	2,70 —4	26	3,250 —4	2,05 —5	1,50 —3
3	8,628 —3	1,26 —2	2,30 —4	28	2,379 —4	1,74 —5	1,13 —3
4	7,775 —3	5,69 —3	2,08 —4	30	1,747 —4	1,50 —5	8,31 —4
5	6,988 —3	2,53 —3	2,03 —4	32	1,286 —4	0,00	6,27 —4
6	6,264 —3	8,69 —4	1,99 —4	34	9,381 —5	0,00	4,44 —4
8	4,989 —3	1,11 —4	2,10 —4	36	6,886 —5	0,00	3,32 —4
10	3,924 —3	2,05 —5	3,22 —4	38	5,092 —5	0,00	2,33 —4
12	2,960 —3	1,74 —5	5,71 —4	40	3,791 —5	0,00	1,71 —4
14	2,162 —3	2,05 —5	8,80 —4	42	2,841 —5	0,00	1,09 —4
16	1,580 —3	5,37 —5	9,48 —4	44	2,143 —5	0,00	6,84 —5
18	1,154 —3	6,32 —5	1,12 —3	46	1,626 —5	0,00	4,10 —5
19	9,868 —4	7,11 —5	1,31 —3	48	1,249 —5	0,00	2,57 —5
20	8,436 —4	6,79 —5	1,51 —3	50	9,743 —6	0,00	1,71 —5

* Handbook of Geophysics and Space Environment, U. S. Air Force, 1967.

** При использовании данных таблицы смотри примечание к приложению 3.

ПРИЛОЖЕНИЕ 12

Средние значения K в различных формах облаков для излучений ОКГ (по расчетам Кэрриера)

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 13

Поперечные сечения молекулярного рассеяния общего $\sigma_{м}^{0}$ и рассеяния назад $\sigma_{\pi м}^{0}$ для излучений ОКГ, наиболее часто применяемых при исследовании атмосферы

λ мкм	0,265	0,3371	0,3472	0,5320	0,6328	0,6943	1,06	2,36	10,6
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	ОКГ на рубине	ОКГ на стекле с неодимом	ОКГ на флюорите с диспрозием	Газовый ОКГ на смеси углекислого газа и азота
$\sigma_{м}$ см^2	9,71 —26	3,45 —26	3,18 —26	5,53 —27	2,68 —27	1,84 —27	3,35 —28	1,35 —29	3,32 —32
$\sigma_{\pi м}^{0}$ см^2/ср	1,15 —26	4,11 —27	3,82 —27	6,64 —28	3,22 —28	2,20 —28	4,01 —29	1,62 —30	3,99 —33

Примечание. При использовании данных таблицы смотри примечание к приложению 3.

ПРИЛОЖЕНИЕ 14

Пороги световой чувствительности глаза (лк) для точечных цветных огней (сигналов)

Цвет огня (сигнала)	Яркость фона	
	$5 \cdot 10^{-2}$ кд/м² (снежный покров при свете луны)	10^4 кд/м² (снежный покров в полдень при тумане)
Белый	$2 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-3}$
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	$5 \cdot 10^{-7}$	

ПРИЛОЖЕНИЕ 15

Средние коэффициенты поглощения озона $\overline{k}^*_\lambda$, оптические плотности молекулярной атмосферы $\tau_м$ и средние внеатмосферные значения $\overline{I}_{0,\lambda}$ (для светофильтров прибора М-83, № 94, по градуировке в мае—июне 1971 г.) Воейково

	Номер светофильтра						
	2	3	4	5	6	7	8
λ мкм	0,326	0,344	0,369	0,463	0,530	0,572	0,627
$\tau_м$	0,369	0,296	0,220	0,086	0,050	0,036	0,025
$\overline{k}^*_\lambda$ см⁻¹	0,115	0,000	0,000	0,004	0,030	0,055	0,040
$\overline{I}_{0,\lambda}$	1,98	1,61	3,13	3,78	2,62	2,89	2,80

ПРИЛОЖЕНИЕ 16

Значения *B* для определения параметра *c* формулы Юнге (*n* — показатель степени формулы Юнге)

n	*B*	*n*	*B*
3,0	$1,4 \cdot 10^{1}$	4,3	$6,8 \cdot 10^{6}$
3,5	$1,7 \cdot 10^{3}$	5,0	$1,5 \cdot 10^{10}$
4,0	$2,8 \cdot 10^{5}$	6,0	$1,7 \cdot 10^{15}$

ПРИЛОЖЕНИЕ 17

Сезонные средние значения *V* бетонных ВПП для светлого времени суток при любых условиях освещения (по В. А. Гаврилову)

Фон	Состояние ВПП	При посадке самолета	
		без осадков	при осадках
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 18

Потенциалы ионизации основных газов атмосферы

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 19

Отношение OH/OZ **при разных значениях угла** α

$\alpha°$	OH/OZ	$\alpha°$	OH/OZ	$\alpha°$	OH/OZ
18	4,49	23	3,36	28	2,60
19	4,22	24	3,19	29	2,48
20	3,98	25	3,03	30	2,36
21	3,75	26	2,88	31	2,25
22	3,55	27	2,74	32	2,14

Склонение Солнца в истинный полдень в 1978 г.

Число	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	—23,0	—17,3	—7,8	4,3	14,9	22,0	23,1	18,2	8,5	—3,0	—14,2	—21,7
2	—23,0	—17,0	—7,4	4,7	15,2	22,1	23,1	17,9	8,1	—3,3	—14,6	—21,9
3	—22,9	—16,7	—7,0	5,1	15,5	22,2	23,0	17,6	7,8	—3,7	—14,9	—22,0
4	—22,9	—16,4	—6,7	5,5	15,8	22,4	22,9	17,4	7,4	—4,1	—15,2	—22,1
5	—22,7	—16,1	—6,3	5,8	16,1	22,5	22,8	17,1	7,0	—4,5	—15,5	—22,3
6	—22,6	—15,8	—5,9	6,2	16,4	22,6	22,8	16,9	6,6	—4,9	—15,8	—22,4
7	—22,4	—15,5	—5,5	6,6	16,6	22,7	22,6	16,6	6,3	—5,3	—16,1	—22,5
8	—22,3	—15,2	—5,1	7,0	16,9	22,8	22,5	16,3	5,9	—5,7	—16,4	—22,6
9	—22,2	—14,8	—4,7	7,4	17,2	22,9	22,4	16,0	5,5	—6,0	—16,7	—22,8
10	—22,0	—14,5	—4,3	7,7	17,5	23,0	22,3	15,7	5,1	—6,4	—17,0	—22,8
11	—21,9	—14,2	—3,9	8,1	17,7	23,0	22,2	15,4	4,8	—6,8	—17,3	—22,9
12	—21,7	—13,9	—3,5	8,5	18,0	23,1	22,0	15,1	4,4	—7,2	—17,5	—23,0
13	—21,6	—13,5	—3,1	8,8	18,2	23,2	21,9	14,9	4,0	—7,5	—17,8	—23,1
14	—21,4	—13,2	—2,7	9,2	18,5	23,2	21,8	14,5	3,6	—7,9	—18,1	—23,2
15	—21,2	—12,9	—2,4	9,5	18,7	23,3	21,6	14,2	3,2	—8,3	—18,3	—23,2
16	—21,0	—12,5	—2,0	9,9	19,0	23,3	21,5	13,9	2,9	—8,7	—18,6	—23,3
17	—20,8	—12,2	—1,6	10,3	19,2	23,4	21,3	13,6	2,5	—9,0	—18,8	—23,3
18	—20,6	—11,8	—1,2	10,6	19,4	23,4	21,1	13,3	2,1	—9,4	—19,1	—23,4
19	—20,4	—11,5	—0,8	11,0	19,6	23,4	20,9	13,0	1,7	—9,8	—19,3	—23,4
20	—20,2	—11,1	—0,4	11,3	19,8	23,4	20,8	12,6	1,3	—10,1	—19,5	—23,4
21	—20,0	—10,8	0,0	11,7	20,1	23,4	20,6	12,3	0,9	—10,5	—19,8	—23,4
22	—19,8	—10,4	0,4	12,0	20,3	23,4	20,4	12,0	0,5	—10,8	—20,0	—23,4
23	—19,6	—10,0	0,8	12,3	20,5	23,4	20,2	11,6	0,1	—11,2	—20,2	—23,4
24	—19,3	—9,7	1,2	12,7	20,6	23,4	20,0	11,3	—0,2	—11,5	—20,4	—23,4
25	—19,1	—9,3	1,6	13,0	20,8	23,4	19,8	11,0	—0,6	—11,9	—20,6	—23,4
26	—18,8	—8,9	2,0	13,3	21,0	23,4	19,6	10,6	—1,0	—12,2	—20,8	—23,4
27	—18,6	—8,6	2,4	13,6	21,2	23,3	19,3	10,3	—1,4	—12,6	—21,0	—23,3
28	—18,3	—8,2	2,8	14,0	21,4	23,3	19,1	9,9	—1,8	—12,9	—21,2	—23,3
29	—18,1		3,1	14,3	21,5	23,3	18,9	9,6	—2,2	—13,3	—21,4	—23,3
30	—17,8		3,5	14,6	21,7	23,2	18,6	9,2	—2,6	—13,6	—21,5	—23,2
31	—17,5		4,0		21,8		18,4	8,8		—13,9		—23,1

Косинусы часового угла Солнца $\tau_{\odot}$

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	23
1	—0,966	—0,961	—0,956	—0,951	—0,946	—0,940	—0,934	—0,927	22
2	—0,866	—0,857	—0,848	—0,839	—0,829	—0,819	—0,809	—0,799	21
3	—0,707	—0,695	—0,682	—0,669	—0,656	—0,643	—0,629	—0,616	20
4	—0,500	—0,485	—0,469	—0,454	—0,438	—0,423	—0,407	—0,391	19
5	—0,259	—0,242	—0,225	—0,208	—0,191	—0,174	—0,156	—0,139	18
6	—0,000	0,017	0,035	0,052	0,070	0,087	0,105	0,122	17
7	0,259	0,276	0,292	0,309	0,326	0,342	0,358	0,375	16
8	0,500	0,515	0,530	0,545	0,559	0,574	0,588	0,602	15
9	0,707	0,719	0,731	0,743	0,755	0,766	0,777	0,788	14
10	0,866	0,875	0,883	0,891	0,899	0,906	0,914	0,921	13
11	0,966	0,970	0,974	0,978	0,982	0,985	0,988	0,990	12
	60	56	52	48	44	40	36	32	Часы
	Минуты								

Часы	Минуты								
	32	36	40	44	48	52	56	60	
0	—0,990	—0,988	—0,985	—0,982	—0,978	—0,974	—0,970	—0,966	23
1	—0,921	—0,914	—0,906	—0,899	—0,891	—0,883	—0,875	—0,866	22
2	—0,788	—0,777	—0,766	—0,755	—0,743	—0,731	—0,719	—0,707	21
3	—0,602	—0,588	—0,574	—0,559	—0,545	—0,530	—0,515	—0,500	20
4	—0,375	—0,358	—0,342	—0,326	—0,309	—0,292	—0,276	—0,259	19
5	—0,122	—0,105	—0,087	—0,070	—0,052	—0,035	—0,017	—0,000	18
6	0,139	0,156	0,174	0,191	0,208	0,225	0,242	0,259	17
7	0,391	0,407	0,423	0,438	0,454	0,469	0,485	0,500	16
8	0,616	0,629	0,643	0,656	0,669	0,682	0,695	0,707	15
9	0,799	0,809	0,819	0,829	0,339	0,848	0,857	0,866	14
10	0,927	0,934	0,940	0,946	0,951	0,956	0,961	0,966	13
11	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 22

Угол астрономической рефракции γ_0 (в минутах дуги) при $t=10\,°C$ и $p=1013{,}2$ мбар

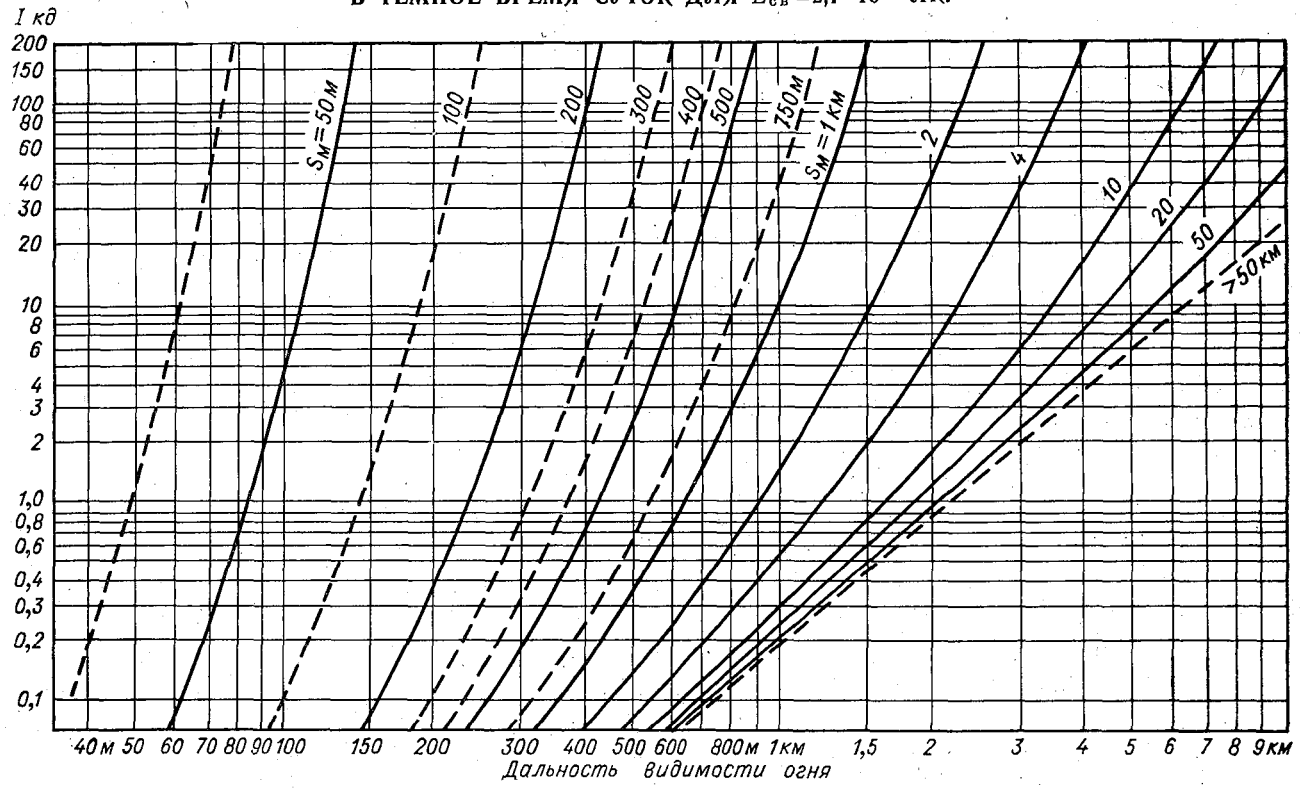
$h^\circ_в$	γ_0	$h^\circ_в$	γ_0	$h^\circ_в$	γ_0
—0,10	36,8	0,30	28,7	10	5,3
0,0	34,4	1	24,3	30	1,7
0,10	32,3	3	14,3	90	0,0

ПРИЛОЖЕНИЕ 23

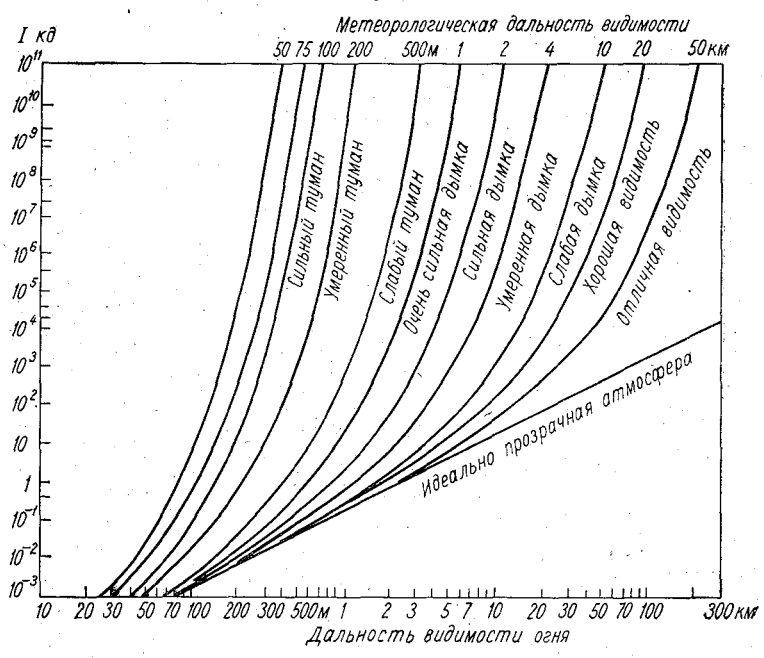
Поправки (в минутах дуги) к углу астрономической рефракции γ_0 на изменение температуры воздуха $\Delta\gamma_t$ и на изменение давления воздуха $\Delta\gamma_p$

$h^\circ_в$	Температура °C			Давление, мбар			
	—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

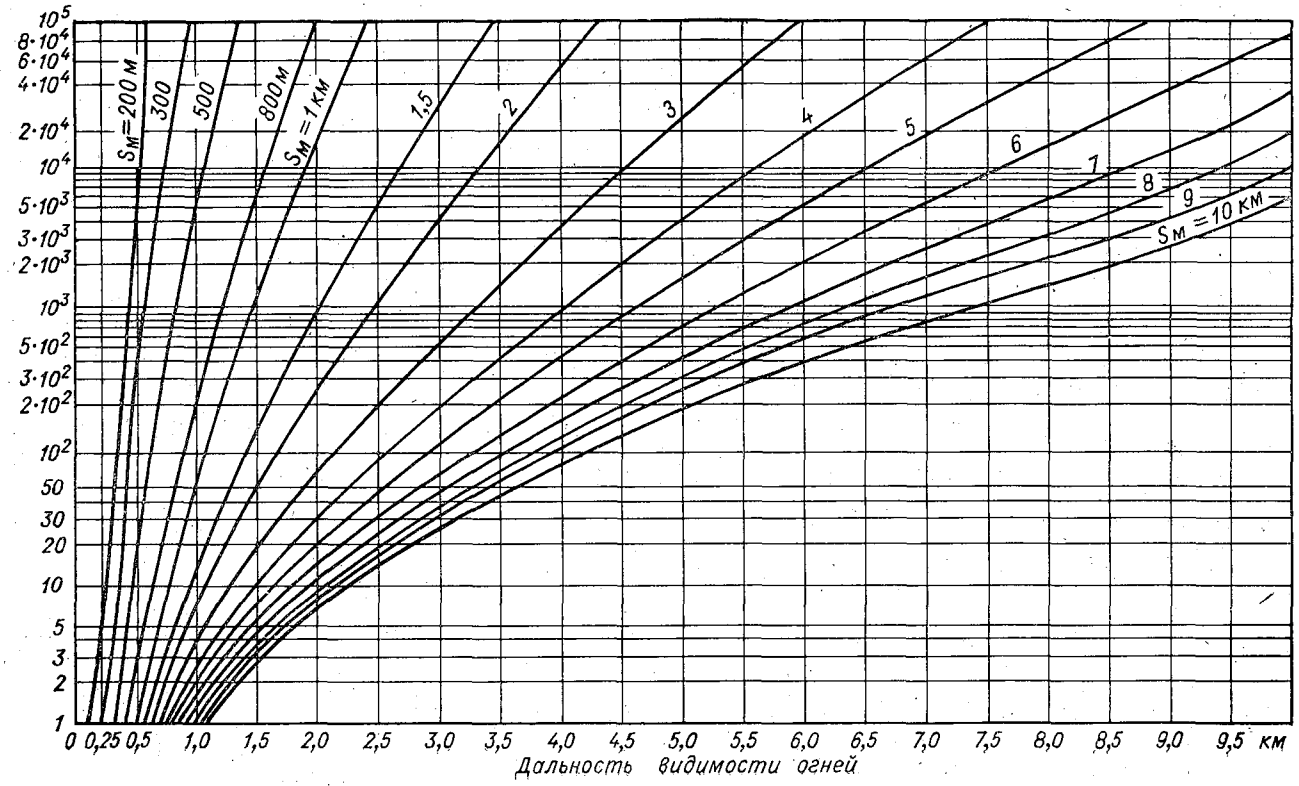
НОМОГРАММА В. А. БЕРЕЗКИНА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ ОДИНОЧНОГО ОГНЯ В ТЕМНОЕ ВРЕМЯ СУТОК ДЛЯ $E_{св}=2{,}7\cdot10^{-7}$ ЛК.



НОМОГРАММА В. А. ГАВРИЛОВА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ ОДИНОЧНОГО БЕЛОГО ОГНЯ В ТЕМНОЕ ВРЕМЯ СУТОК ДЛЯ $E_{св}=2\cdot10^{-7}$ ЛК (ЯРКОСТЬ ФОНА $5\cdot10^{-2}$ КД/М²).

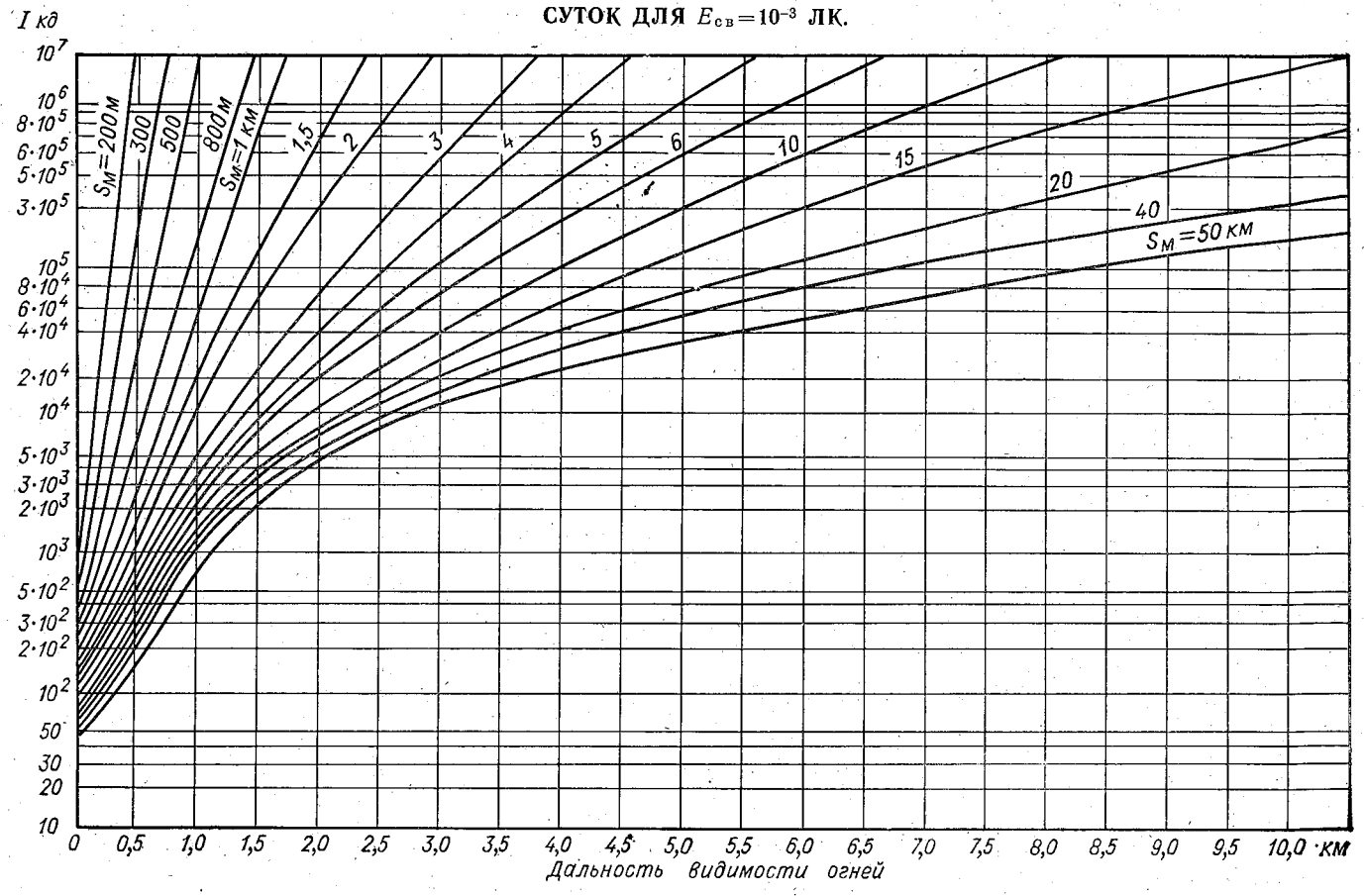


НОМОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ ГРУППОВЫХ ОГНЕЙ В ТЕМНОЕ ВРЕМЯ СУТОК ДЛЯ $E_{св}=10^{-6}$ ЛК.



ПРИЛОЖЕНИЕ 27

НОМОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ ГРУППОВЫХ ОГНЕЙ В СВЕТЛОЕ ВРЕМЯ СУТОК ДЛЯ $E_{св}=10^{-3}$ ЛК.



ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ

Глава 1

1.1. **1.1.** $8\cdot10^3$ лм/м²; $2{,}5\cdot10^3$ кд/м²; $4\cdot10^8$ лм. **1.2.** $2\cdot10^3$ лк; $1{,}8\cdot10^3$ лм/м²; $5{,}7\cdot10^2$ кд/м². **1.4.** $6{,}3\cdot10^9$ лм/м²; $3{,}9\cdot10^{28}$ лм. **1.5.** 135 000 лк.
1.6. Планета

	E лк	
Меркурий	905 000	6,8 E_0 Земли
Венера	260 000	1,9 E_0 Земли
Марс	58 000	При $h_\odot = 40°$
Юпитер	5 000	При $h_\odot = 5{,}5°$
Сатурн	1 490	При $h_\odot = 1{,}3°$
Уран	368	Начало гражданских сумерек на Земле
Нептун	150	
Плутон	111	

1.7. 135 000 и 136 000 лк; на 0,7 %. **1.8.** $3{,}9\cdot10^{28}$ лм. **1.9.** $3\cdot10^{27}$ кд; $3{,}9\cdot10^{28}$ лм. **1.10.** $4{,}5\cdot10^{26}$ Вт; 47 %; $2{,}1\cdot10^{26}$ Вт. **1.11.** $5\cdot10^6$ и $2{,}4\cdot10^6$ т/с. **1.12.** $6{,}4\cdot10^{12}$ лет. **1.13.** $4{,}9\cdot10^{-10}$; 2,2 кг. **1.14.** $2\cdot10^{17}$ Вт. **1.15.** 2,2 кг/с; не изменяется. **1.16.** 0,35 лк. **1.17.** $3{,}2\cdot10^{17}$ лм.

1.2. **1.18.** Для арктич. воздуха: $p=0{,}81$; $q=0{,}66$; для тропич. воздуха: $p=0{,}75$, $q=0{,}56$; 81 и 75 %; 66 и 56 %; 19 и 25 %; 34 и 44 %; 15 и 19 %. **1.19.** Для арктич. воздуха: 2,5 и 0,8; молекулярное; для тропич. воздуха: 3,5 и 1,6; аэрозольное. **1.20.** 22 800 лк; 4,5; 0,41. **1.21.** 0,57 кВт/м², 100 %; 0,25 кВт/м², 44 %; 0,19 кВт/м², 33 %; 0,13 кВт/м², 23 %. **1.22.** 0,46 кВт/м², 100 %; 0,25 кВт/м², 56 %; 0,13 кВт/м², 29 %; 0,08 кВт/м², 17 %. **1.23.** 0,37 кВт/м², 100 %; 0,25 кВт/м², 68 %; 0,11 кВт/м², 30 %; 0,01 кВт/м², 2 %. **1.24.** На ст. Восток: 0,51 кВт/м², 60 %; на ст. Мирный: 0,31 кВт/м²; 44 %; на ст. Новолазаревская: 0,26 кВт/м², 38 %. **1.25.** 1) 0,769; 0,728; 5,8 %; 2) 0,816; 0,779; 4,5 %; 3) 0,856; 0,823; 3,9 %; 4) 0,810; 0,773; 4,6 %.

1.3. **1.26.** Приблизительно в 16 раз. **1.27.** Увеличивается в 64 раза; увеличится в 10^6 раз. **1.28.** а) 0,119; б) 0,119; в) 0,060; г) 0,075. **1.29.** а) в 10 000 раз; б) в 10 000 раз. **1.30.** $1{,}02\cdot10^{-3}$, $6{,}55\cdot10^{-5}$ м⁻¹; 15,6 раза. **1.31.** 13 и 1 %; 44 и 3 %. **1.32.** 0,364; 0,098; 0,021; 17 раз. **1.33.** 0,70; 0,91; 0,98. **1.34.** 1.22; $3{,}31\cdot10^{-5}$. **1.35.** 0,30; 0,9999.

1.4. **1.36.** 0,097; 0,046; 0,0013. **1.37.** 0,170; 0,00123; 0,000. **1.38.** 0,032; 0,0305; 0,0059. **1.40.** $p_{общ}=0{,}744$, $p_м=0{,}909$, $p_а=0{,}845$, $p_{оз}=0{,}970$, потери энергии соответственно 26,9, 15 и 2 %; $p_{общ}=0{,}925$, $p_м=0{,}956$, $p_а=0{,}999$, $p_{оз}=0{,}970$, потери энергии соответственно 7,5, 4,4, 0,1 и 3,0 %; $p_{общ}=0{,}993$; $p_м=0{,}999$, $p_а=1{,}0$, $p_{оз}=0{,}994$, потери энергии соответственно 0,7, 0,1, 0,0 и 0,6 %. **1.41.** 0,145, 85,5 %; 0,143, 85,7 %. **1.42.** а) 0,145, 85,5 %; б) 0,118, 88,2 %; менее 3 %. **1.43.** 2,3 и 0,580 км; уменьшился в 4 раза. **1.44.** 2,3 и 0,096 км; уменьшилась в 24 раза. **1.45.** 239 м и 4,65; 236 м и 4,65. **1.46.** 7,2 км и 4,65; 16,0 км и 4,65. **1.47.** 210 м и 4,65; 237 м и 4,65. **1.48.** 155 км и 4,65; 465 км и 4,65. **1.49.** а) 0,70; б) 1,40; в) 3,03; г) 5,35; д) 6,97. ≈7. **1.50.** По Кошмидеру: 3,39; 1,65; 0,62; 0,29; 0,14; 0,05 км⁻¹; по Шифрину и Минину: 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 Минину. **1.51.** Формула Шифрина и Минина; по формуле Шифрина и Минина.

Глава 2

2.1. **2.1.** 68,0, 28,0, 22,8 и $23{,}5\cdot10^{-4}$ Вт/(см²·ср·мкм). **2.2.** а) 19,0, 25,0, 35,6, 50,0, 68,6 и $96{,}5\cdot10^{-4}$ Вт/(см²·ср·мкм); б) 19,0, 14,6, 14,0, 16,0, 23,5 и $44{,}0\cdot10^{-4}$ Вт (см²·ср·мкм). **2.5.** 0,060; 0,0488; 0,0370; 0,0153; 0,0104; 0,0080;

0,0073; 0,0072; 0,0078; 0,0085. **2.7.** а) 8,40; 7,32; 6,27; 4,28; 3,28; 2,80; 2,72; 2,72; 2,96 см; б) 7,28; 6,18; 5,16; 3,14; 2,16; 1,67; 1,60; 1,60; 1,84. **2.9.** 0,152; 0,86; 0,51 кВт/м². **2.10.** 0,513; 0,60; 0,51 кВт/м².

2.2. **2.11.** p_{max} уменьшилась на 6 %, 94 %; p_{min} не изменилась, 0 %; p_{max} в зените, p_{min} в направлении на Солнце и антисолярную точку. **2.12.** На зенитном расстоянии около 84°, менее 85 %; в точках Араго, Бабине, Брюстера и четвертой точке, симметричной т. Араго, но под Солнцем, 0 %. **2.13.** 0,88; 0,52. **2.14.** Уменьшатся на 6 и 8 %. **2.15.** 22°. **2.16.** В 4,22 раза. **2.17.** 19° 54′. **2.18.** В 2 раза.

Глава 3

3.1. **3.1.** 60 220 и 2620 лк. **3.2.** Вертикальная, в 6 раз. **3.3.** 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. **3.4.** 94 500, 42 100, 9000 и 0 лк. В 2,2 раза больше, чем в Ленинграде, в 10,5 раз больше, чем на ст. Восток. **3.6.** 4140 кд/м². **3.7.** 190 и 260 кд/м². **3.8.**

$h_\odot^\circ$	0	5	10	15	25	35	45	55
% увеличения освещенности	220	48	26	18	15	12	10	10

3.9. 50 000 лк. **3.10.** $3{,}2 \cdot 10^4$ кд/м²; $10{,}2 \cdot 10^4$ лм/м². **3.11.** 0,32 лк. **3.12.** 0,22 и 0,11 лк. **3.13.** $1{,}9 \cdot 10^{-4}$ лк. **3.14.** Черноземное поле ярче в 22 000 раз. **3.15.** От $1{,}57 \cdot 10^{-7}$ до 0,16 лк. **3.16.** 74 700; 13 100; 88 600 лк. **3.17.** 77 000 лк. **3.18.** 55 000, 21 000 и 76 000 лк.

3.2. **3.19.** 70—90 км. **3.20.** 162 и 267 км; области ионосферы F_1 и F_2. **3.21.** 12,7, 38, 76 км. **3.22.** 51, 140, 325 км; на высоте 71, 160, 345 км. **3.23.** 9°30′. **3.24.** ≈19°. **3.25.** От 19 ч 56 мин до 21 ч 32 мин; от 2 ч 28 мин. до 4 ч 04 мин. **3.26.** До 59,8°. **3.27.** От 20 ч 03 мин до 22 ч 58 мин; от 1 ч 02 мин до 3 ч 57 мин. **3.28.** ≈1100 км. **3.29.** 17° 15′. **3.30.** 11,5 и 19,5 км; ≈3 и 10 км; $2{,}25 \cdot 10^{-3}$, $22{,}5 \cdot 10^{-3}$; 0,025; перламутровые облака; с вулканическими извержениями.

Глава 4

4.1. **4.1.** 8 квантов/с. **4.2.** $4{,}3 \cdot 10^{10}$ лет. **4.3.** 1,9, 14 км; почти в 7 раз. **4.4.** $1{,}4 \times 10^{-13}$ лм. **4.5.** 1 км. **4.6.** 111 км; 230 м. **4.7.** 47 км.

4.2. **4.8.** На Земле в 1,92 раза; на Юпитере в 3,36 раза; бесконечно большая. **4.9.** 4,9 км. **4.10.** 20,4 км. **4.11.** 246 км; 9 баллов. **4.12.** 1200 км. **4.14.** 1600 и 2200 км. **4.15.** ≈50 и 100 м. **4.16.** 2950 км; 175 м.

4.3. **4.17.** 0,68; 0,9996; 0,17 км⁻¹; 0,00017 м⁻¹; 0,39 км⁻¹, 0,00039 м⁻¹; 32 и 0,04 %. **4.18.** 0,0085 м⁻¹; 57 %; ≈200 м. **4.19.** ≈0,10. **4.20.** 0,11 км⁻¹; 0,9997; 0,78; 15,5 км; 7 баллов; 66. **4.21.** 0,9879; 321 км. **4.22.** 0,9869; 297 км. **4.23.** 0,9887; 344 км; от 297 до 344 км. **4.24.** 224 м; 0,017 м⁻¹; 17 км⁻¹; 82 %. **4.25.** 145 м; 0,027 м⁻¹; 26,8 км⁻¹; 93 %. **4.26** 205 м; 19,0 км⁻¹; 85 %. **4.27.** $9{,}05 \cdot 10^{-3}$ м⁻¹; 430 м. **4.28.** $3{,}56 \cdot 10^{-2}$ м⁻¹; 110 м. **4.29.** N уменьшилось от $3{,}14 \cdot 10^8$ до $1{,}26 \cdot 10^8$ м⁻³, r^* увеличился от 5,8 до 18,1 мкм. **4.30.** 0,086 км⁻¹; 45,5 км; 8 баллов. **4.31.** 4,19 км⁻¹; 930 м; 3 балла. **4.32.** 8 и 85 %. **4.33.** 0,395 км⁻¹; 9,9 км; 6 баллов. **4.34.** 8,72 км⁻¹; 450 м; 2 балла. **4.35.** 2 м; 0 баллов.

4.4. **4.36.** 7, 7,4, ≈10 кд. **4.37.** 49, 340, $1{,}2 \cdot 10^5$ и $2 \cdot 10^9$ кд. **4.38.** $1{,}88 \cdot 10^{-10}$ лм; увидит; 14,8 км. **4.39.** $8{,}7 \cdot 10^{-11}$ лм; увидит; 10 км. **4.40.** 2,0 км; 5 баллов. **4.41.** 90—450 кд. **4.42.** От 10^9 до $7{,}8 \cdot 10^{12}$ кд. **4.43.** 4 км. **4.44.** Да. **4.45.** Нет. **4.46.** 7; ≈7; 8,5 кд. **4.47.** 2 км; 5 баллов. **4.48.** ≈1500 м. **4.49.** ≈950, ≈400 и ≈270 м. **4.50.** 1300, ≈1200 м. **4.51.** Для красного: 900, 420, 250 м; для зеленого: 850, 410, 240 м. **4.52.** 2 км.

4.5. **4.53.** 506 м. **4.54.** 785 м. **4.55.** 1370 м. **4.56.** 2130 м. **4.57.** 280 м. **4.58.** 580 м. **4.59.** Увеличится до 720 м. **4.60.** 1640 м. **4.61.** 1850 м. **4.62** 650—950 и 32—48 м. **4.63.** 700—1000 и 35—50 м. **4.64.** 1800—2400 и 80—110 м. **4.65.** 400—700 и 20—32 м. **4.66.** >10; 7,7; 2,2 км. **4.67.** 2,9 км. **4.68.** 1, 50,

1100, $1{,}7\cdot10^4$, $>10^5$ кд. **4.69.** 20, $4\cdot10^3$, $2{,}5\cdot10^5$, $2\cdot10^7$, $5\cdot10^{11}$ кд. $S_{пос}=2$ и 3 км. **4.70.** ≈2100, $\approx5\cdot10^4$; $\approx7\cdot10^5$; $>10^7$; $>10^7$ кд; $S_{пос}=2$ и 3 км. **4.71.** $\approx2{,}5\cdot10^4$; $4\cdot10^6$; $2{,}5\cdot10^8$; $\approx10^{11}$; $6\cdot10^{15}$ кд; $S_{пос}=1{,}5$ км и больше. **4.72.** 7,5 км; 5,1 км; 400 м.

Глава 5

5.1. **5.1.** 35° 06′ 40,7″; —1′ 15,3″. **5.2.** 35° 06′ 17,5″; —1′ 38,5″. **5.3.** 3,5″. **5.4.** 56° 30′; —25′ 36″. **5.5.** а) 14 мин; б) 16 мин; на 2 мин. **5.6.** а) 1 ч 28 мин; б) 2 ч 14 мин; на 46 мин. **5.7.** а) 2 ч 20 мин; б) 2 ч 56 мин; на 36 мин. **5.8.** Зимой больше на 1′ 48″.

5.2. **5.10.** 357 км; 3°09′. **5.11.** 13,7 км; 14′. **5.12.** 15,5 км. **5.13.** 16,8 км. **5.14.** 36,2 и 38,7 км.

Глава 6

6.1. **6.1.** 21,8 мкм. **6.2.** Увеличился от 10,8 до 19,5 мкм. **6.3.** 65 мкм. **6.4.** $\approx15'$. **6.5.** 1,5 и 1,8 мкм. **6.6.** 0,645—0,740 мкм. **6.7.** 21,8 мкм. **6.8.** 14,2 мкм.

6.2. **6.9.** 42° 30′; 40° 40′; 42°; антисолярная. **6.10.** 12°; при $h_\odot>42°$. **6.11.** 50° 34′; 53° 56′; 53° 56′; антисолярная. **6.12.** 33° 56′; $<53°\,56'$. **6.13.** 1-я радуга: 1° 50′; 2° 22′; 2-я радуга: 3° 22′; 3° 54′; 8° 04′. **6.14.** Центр радуги — Солнце; 42° 12′. **6.15.** 48° 36′; 6° 56′. **6.16.** 3, 4, 7, 8 и т. д.; 1, 2, 5, 6 и т. д. **6.17.** 42° 54′; 38° 00′; 5° 26′. **6.18.** 92 и 80 %. **6.19.** >1376 м.

6.3. **6.20.** 21° 36′; 22° 22′. **6.21.** 22°; 1° 18′; внутренний цвет — красный. **6.22.** 21° 07′; белый. **6.23.** 28° 00′; 29° 00′. **6.24.** Увеличивается до 28°; увеличивается до 1° 32′. **6.25.** 16° 23′; укорачивается. **6.26.** 46° 34′; 48° 46′; 2° 44′; внутренний цвет — красный.

Глава 7

7.1. **7.1.** $\sigma_{a_2}=1{,}5\sigma_{a_1}$; $\tau_{a_1}=1{,}5\tau_{a_2}$. **7.3.** 4,4; 8,16 и 32 км; в 3,4 раза; 36 км. **7.4.** На высоте 22 км; в 1,4 раза; 22—24 км; у аэрозольного больше, так как более вытянута индикатриса и назад рассеивается мало, основная масса рассеянного света направляется вперед. **7.5.** В 4 раза; 5. **7.6.** В $7\cdot10^3$ и $4\cdot10^4$ раз. **7.7.** Всюду $\sigma_{\pi м}>\sigma_{\pi a}$. **7.8.** 1. а) $\sigma_{н.\,ч}=1{,}3\cdot10^{-3}$ м$^{-1}$; $\sigma_{ц.\,ч}=2{,}3\cdot10^{-2}$ м$^{-1}$; $\sigma_{в.\,ч}=2{,}9\cdot10^{-3}$ м$^{-1}$; б) $\sigma_{н.\,ч}=4{,}4\cdot10^{-4}$ м$^{-1}$; $\sigma_{ц.\,ч}=8{,}0\cdot10^{-3}$ м$^{-1}$; $\sigma_{в.\,ч}=10^{-3}$ м$^{-1}$; в) $\sigma_{н.\,ч}=1{,}47\cdot10^{-4}$ м$^{-1}$; $\sigma_{ц.\,ч}=2{,}7\cdot10^{-3}$ м$^{-1}$; $\sigma_{в.\,ч}=3{,}3\cdot10^{-4}$ м$^{-1}$; 2. а) 0,81; б) 0,28; в) 0,09; 3. а) 55 %; б) 24 %; в) 9 %. **7.9.** а) 170 м; б) 490 м; в) 1450 м. **7.10.** а) $2{,}4\cdot10^{-3}$ г/м^3; $2{,}1\cdot10^6$ м$^{-3}$; б) $4{,}4\cdot10^{-2}$ г/м^3; $3{,}8\cdot10^7$ м$^{-3}$: в) $5{,}6\cdot10^{-3}$ г/м^3; $4{,}8\cdot10^6$ м$^{-3}$. **7.11.** Уменьшится в 1,36 раза; увеличится в 1,2 раза. **7.12.** 0,116 и 0,132 м$^{-1}$; 0,54 и 0,62 г/м^3; $6{,}1\cdot10^8$ и $7{,}0\cdot10^8$ м$^{-3}$. **7.13.** $7{,}2\cdot10^{-2}$ и $8{,}2\cdot10^{-2}$ м$^{-1}$; 0,64 и 0,73 г/м^3; $1{,}34\cdot10^8$ и $1{,}53\cdot10^8$ м$^{-3}$. **7.14.** Ns: 0,13 м$^{-1}$, 30 м; As: 0,108 м$^{-1}$, 36 м; St II: 0,101 м$^{-1}$, 39 м; St I: 0,070 м$^{-1}$, 56 м; Sc: 0,0473 м$^{-1}$, 83 м; Cu hum: 0,0217 м$^{-1}$, 180 м; Cu cong: 0,070 м$^{-1}$, 56 м; Cb: 0,0446 м$^{-1}$, 88 м. **7.15.** 0,019 и 0,015 м$^{-1}$; 0,05 и 0,025 г/м^3; $3{,}6\cdot10^8$ и $5{,}2\cdot10^8$ м$^{-3}$.

7.2. **7.16.** 0,46 и 0,70. **7.17.** 0,43; 0,51; 0,60; 0,89; 0,82; 0,92; 0,94. **7.18.** 0,367; 0,367; 0,361; 0,246; 0,307; 0,229; 0,234. **7.19.** 0,071; 0,590.

7.20.

№ фильтра	$\tau_м$		$\tau_а$		$\tau_{оз}$		$\tau_{общ}$	
	значение	%	значение	%	значение	%	значение	%
2	0,369	71	0,071	14	0,077	15	0,517	100
7	0,036	27	0,059	45	0,037	28	0,132	100

7.21. 0,085 и 0,055; 4,2 и $3{,}7\cdot10^{-8}$; **7.22.** $1{,}15\cdot10^8$ и $7{,}25\cdot10^4$ см$^{-2}$; $1{,}6\cdot10^3$; **7.23.** 1,2; 102.

Глава 8

8.1. **8.1.** $1{,}76\cdot10^{-2}$ и $2{,}38\cdot10^{-2}$ м/с. **8.2.** $3{,}3\cdot10^{4}$ В/м. **8.3.** $1{,}3\cdot10^{-6}$ м/с. **8.4.** В $1{,}6\cdot10^{4}$ раз. **8.5.** 10^{6} пар ионов/(с·м³); 10^{6} пар ионов/(с·м³). **8.6.** 13,3 мин. **8.7.** 33 с; от 33 с до 16 мин. **8.8.** ≈14 м; ≈19 м; ≈0,1 см. **8.9.** $97\cdot10^{6}$ пар ионов. **8.10.** $4{,}999\cdot10^{8}$ м$^{-3}$, т. е. практически прорекомбинируют все ионы. **8.11.** $1{,}9\cdot10^{-14}$, $1{,}8\cdot10^{-14}$ и $3{,}7\times10^{-14}$ Ом$^{-1}$·м$^{-1}$; $2{,}7\cdot10^{13}$ Ом·м; в 18,5 раз. **8.12.** $2{,}4\cdot10^{-14}$, $5{,}1\cdot10^{-17}$ и $2{,}4051\cdot10^{-14}$ Ом$^{-1}$·м$^{-1}$; 99,8 и 0,2 %. **8.13.** Уменьшатся на 11,2 %. **8.14.** $3{,}53\cdot10^{-15}$ и $4{,}47\cdot10^{-14}$ См. **8.15.** $6{,}94\cdot10^{8}$ и $6{,}25\cdot10^{8}$ м$^{-3}$; $1{,}16\cdot10^{-10}$ и $1{,}00\cdot10^{-10}$ Кл/м³. **8.16.** 1,20. **8.17.** 1 : 4000. **8.18.** $3{,}0\cdot10^{5}$ см²/(В·с). **8.19.** 0,35 см$^{-3}$·с$^{-1}$. **8.20.** $2{,}74\cdot10^{4}$ см$^{-3}$. **8.21.** 31,2 мин. **8.22.** 2,05 сут. **8.23.** $4{,}48\cdot10^{-10}$ Ом$^{-1}$·м$^{-1}$, меньше, чем у воды, в $7{,}4\cdot10^{9}$ раз. **8.24.** $3\cdot10^{12}$ Ом·м. **8.25.** 240 Ом. **8.26.** 460 с. **8.27.** 400, $2{,}4\cdot10^{-3}$ с.

8.2. **8.28.** $1{,}53\cdot10^{7}$ м/с; $\approx1{,}3\cdot10^{5}$ пар ионов; $4\cdot10^{4}$ пар ионов/см. **8.29.** $2{,}09\times10^{7}$ м/с; $2{,}6\cdot10^{5}$ пар ионов; $3\cdot10^{4}$ пар ионов/см. **8.30.** 440 %; 0,983; $6{,}2\cdot10^{4}$ пар ионов и 31 пара ионов/см. **8.31.** 2,9 %; 0,23; 420 пар ионов и ≈2,1 пары ионов/см. **8.32.** 5,2 см; 1,00166; 0,058; $1{,}74\cdot10^{9}$ см/с. **8.33.** 3,8 сут, 1 мин, 4 с. **8.34.** $1\cdot10^{9}$ и $2{,}5\cdot10^{9}$ пар ионов/м³. **8.35.** $3\cdot10^{-3}$ и $14\cdot10^{-3}$ с$^{-1}$. **8.36.** 42,5 и 92,5 мин; 1,3 и 5,5 мин. **8.37.** 0,874; $2{,}6\cdot10^{8}$ м/с; в 2,06 раз. **8.38.** 0,99999; $3{,}0\cdot10^{8}$ м/с; в 10^{9} раз. **8.39.** 660 м; $3{,}4\cdot10^{-5}$ с; 10,2 км; возможно, что успеет. **8.40.** 660 м; $2{,}04\cdot10^{-2}$ с; 6120 км; в 9200 раз. **8.41.** На 0,5%; в 10 раз; 36 м. **8.42.** В 30 раз. **8.43.** а), б) и в) увеличиваются в 10 раз; г) уменьшается в 10 раз. **8.44.** 0,10; 0,091; 0,078 и 0,052 мкм. **8.45.** $2{,}0\cdot10^{6}$, $2{,}2\cdot10^{6}$, $2{,}4\cdot10^{6}$, $2{,}9\cdot10^{6}$ м/с. **8.46.** $4{,}7\cdot10^{4}$; $5{,}0\cdot10^{4}$; $5{,}5\cdot10^{4}$ и $6{,}7\cdot10^{4}$ м/с. **8.47.** От $1{,}4\cdot10^{6}$ до $2{,}8\cdot10^{6}$ м/с. **8.48.** Протоны $(1—4)\cdot10^{4}$ эВ, электроны $(5{,}6—22)\cdot10^{2}$ эВ.

8.3. **8.49.** Через 2,7 ч. **8.50.** $4{,}6\cdot10^{3}$ эл/см³; на 98 %. **8.51.** 72 %. **8.52.** 300 км; $2\cdot10^{6}$ эл/см³; F_2; 23,6 м; >23,6 м; <23,6 м. **8.53.** От $3{,}0\cdot10^{5}$ до $2{,}5\cdot10^{3}$ эл/см³. **8.54.** От 62 до 670 м. **8.55.** от $2\cdot10^{5}$ до $6{,}4\cdot10^{5}$ Гц; от 1500 до 470 м. **8.56.** В 10^{6} раз; 10 км от области D, 10 м от области F_2 или $E_{спор}$. **8.57.** $1{,}22\cdot10^{-6}$ См/м; $\approx5{,}5\cdot10^{7}$ раз. **8.58.** $2{,}2\cdot10^{7}$ Гц; 13,6 м; $1{,}33\cdot10^{-8}$ См/м; ⩾13,6 м; <13,6 м. **8.59.** $5\cdot10^{6}$ эл/см³. 8.60. 2; <13 м. **8.61.** $N_{верт}=\frac{N_{накл}}{1-n^2}$. **8.62.** $2{,}5\cdot10^{8}$ эл/см³; 220 км. **8.63.** $2{,}5\cdot10^{21}$ эл/см³. **8.64.** $3\cdot10^{-14}$ %; 1 ионизированная на $3\cdot10^{15}$ нейтральных; 0,1 %; 1 ионизированная на 1000 нейтральных. **8.65.** ≈46 000 раз. **8.66.** Через 15 ч. **8.67.** 14 ч 40 мин. 40 с. **8.68.** От 8 до 21 мин; 222 и 583 км.

Глава 9

9.1 **9.1** $-1{,}15\cdot10^{-9}$ Кл/м². **9.2.** $-5{,}7\cdot10^{5}$ Кл. **9.3.** 126, 126, 126 В/м. **9.4** $3{,}2\times10^{-13}$, $0{,}294\cdot10^{-13}$, $0{,}147\cdot10^{-13}$ Кл/м³; $2\cdot10^{6}$, $0{,}184\cdot10^{6}$, $0{,}092\cdot10^{6}$ м$^{-3}$. **9.5.** $6{,}83\cdot10^{9}$; $1{,}1\cdot10^{-9}$ Кл над 1 м²; $q\approx-\sigma$; +570 000 Кл; $Q\approx-Q_3$. **9.6.** 0,36 км$^{-1}$. **9.8.** $-1{,}45\cdot10^{-9}$ и $-1{,}01\cdot10^{-9}$ Кл/м². **9.9.** От $0{,}87\cdot10^{-14}$ до $1{,}2\cdot10^{-14}$ А/м²; от 3,1 до 4,3 А. **9.10.** 40 000, 130 В/м; ≈20 км. **9.11.** а) 150 и 0,2 В/м; б) 40 000 и 130 В/м; в) 40 150 и 130,2 В/м. **9.12.** ≈100 км. **9.13.** 8,5, 26,4, 19,8 В/м. **9.14.** 162, 222, 167 кВ. **9.15.** Сила тяжести в 3400 раз больше. **9.16.** $2{,}3\cdot10^{9}$ Дж. **9.17.** Уменьшается в 12,25 раз. **9.18.** $3{,}2\cdot10^{5}$ В/м. **9.19.** $\operatorname{tg}\alpha_{min}=\frac{\Delta V_{min}}{El}$. **9.20.** $\approx1{,}9\cdot10^{-4}$ В/м. **9.21.** $3\cdot10^{-8}$ Кл. **9.22.** 100 В. **9.23.** 680 В/м. **9.24.** ≈1,8 А/м.

9.2. **9.25.** $2{,}7\cdot10^{-16}$ А/см². **9.26.** 1450 Кл/с; $5{,}2\cdot10^{6}$ Кл/ч; $1{,}25\cdot10^{8}$ Кл/сут; 1450 А; 6,5 мин. **9.27.** 187,5 Ом. **9.28.** 226 и 113 мкФ. **9.29.** 56,5 и 28,25 Кл. **9.30.** $1{,}6\cdot10^{-18}$ А/см². **9.31.** $3{,}8\cdot10^{-12}$, $2{,}5\cdot10^{-10}$ А/см²; 3 А; до 200 А. **9.32.** $8{,}9\cdot10^{-14}$ Ом$^{-1}$·м$^{-1}$. **9.33.** $1{,}78\cdot10^{-12}$ А/м². **9.34.** $2{,}76\cdot10^{-5}$ А. **9.35.** $2{,}6\times10^{-18}$, 10^{-13} А/м². **9.36.** $2{,}5\cdot10^{-11}$ А/см²; $3{,}8\cdot10^{-6}$ А. **9.37.** $\approx5{,}7\cdot10^{5}$ Кл; 6,6 А. **9.38.** 500 А; 500 Кл/с; $1{,}8\cdot10^{6}$ Кл/ч; $4{,}3\cdot10^{7}$ Кл/сут. **9.39.** 10^{-16} А/см²;

около $^1/_3$ тока проводимости. **9.40.** $2{,}4\cdot10^{13}$, $7{,}2\cdot10^{12}$ кВт. **9.41.** 36 мин. **9.42.** 10^{-9} А/м^2. **9.43.** 475 м^2/с. **9.44.** 816 В. **9.47.** 32 В. **9.48.** 5,6 мкс. **9.49.** $\approx$0,64 Кл. **9.50.** $E_{эл.\ ст}/E_{эл.\ м}=0{,}18$. **9.51.** 1 : 30 000.

Глава 10

10.1. **10.2.** От 17 мм до 20 м. **10.3.** 7,5 м—14 см. **10.4.** В водороде в 3,8 раза больше, чем в воздухе; в воздухе в 1,3 раза больше, чем в углекислом газе. **10.5.** 2320 м. **10.6.** 5200 м/с. **10.7.** 3600 м/с. **10.8.** 5,5, 3,6 и 1,5 м; в стальном стержне в 15,8 раза длиннее, а в медном в 11 раз длиннее, чем в воздухе, в воде — в 4,5 раза. **10.9.** 1 : 100 000. **10.10.** На 30 дБ, в 31,6 раза. **10.11.** $2{,}24\cdot10^{-5}$ Н/м^2; 1 фон. **10.12.** $1{,}23\cdot10^{-12}$ Вт/м^2; 1 дБ. **10.13.** На 3 фона. **10.14.** На 6 дБ. **10.15.** 140 фон; 200 Н/м^2. **10.16.** 10, 20, 30, 40 фон; 10, 20, 30, 40 дБ. **10.17.** В 3,16, 10, 31,6, 100 раз. **10.18.** На 10 дБ; в 3,16 раза.

10.2. **10.19.** Летом на 36 м/с больше. **10.20.** 341,2 м. **10.21.** —55 °С. **10.22.** 0,03 и 3,5 °С. **10.23.** В Смольном в 12 ч 00 мин 14,2 с.; в ГГО в 12 ч 00 мин 14,3 с; на о. Декабристов в 12 ч 00 мин 15 с. **10.24.** 2° 57′. **10.25.** 1600 м. **10.26.** 1690 м. **10.27.** 464 м/с. **10.28.** Уменьшится на 133 км/ч. **10.29.** 756 и 711 км/ч. **10.30.** 31,4 км. **10.31.** 68,4 км. **10.32.** 0,12 и 98,88 %. **10.33.** $\geqslant$13° 17′. **10.34.** 2,1 и 14,2 км.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Раздел I. Атмосферная оптика

Глава 1. Ослабление лучистых потоков в атмосфере 5

1.1. Основные световые величины и единицы их измерения . . . 5
1.2. Общее ослабление лучистых потоков в атмосфере 10
1.3. Молекулярное ослабление 15
1.4. Аэрозольное ослабление 18

Глава 2. Яркость и поляризация света, рассеянного атмосферой. Форма небесного свода 23

2.1. Яркость небесного свода 23
2.2. Поляризация света, рассеянного атмосферой. Форма небесного свода 31

Глава 3. Освещенность земной поверхности 32

3.1. Освещенность земной поверхности днем и ночью 32
3.2. Сумерки. Явления, наблюдаемые во время сумерек 36

Глава 4. Дальность видимости далеких предметов и огней 39

4.1. Пороги световой чувствительности глаза, влияющие на видимость предметов 39
4.2. Геометрическая дальность видимости 40
4.3. Метеорологическая дальность видимости 41
4.4. Дальность видимости огней 45
4.5. Посадочная дальность видимости 48

Глава 5. Рефракция света в атмосфере 51

5.1. Астрономическая рефракция 51
5.2. Земная рефракция 53

Глава 6. Оптические явления в облаках 56

6.1. Венцы 56
6.2. Радуги 58
6.3. Гало 61

Глава 7. Косвенные методы оптического зондирования атмосферы . . 63

7.1. Лазерное зондирование 63
7.2. Определение характеристик аэрозолей по спектральной прозрачности атмосферы 69

Раздел II. Атмосферное электричество и элементы атмосферной акустики

Глава 8. Ионизация атмосферы 72

8.1. Характеристики ионизации атмосферного воздуха 72
8.2. Ионизаторы атмосферного воздуха 77
8.3. Ионосфера и полярные сияния 81

Глава 9. Электрическое поле и токи в атмосфере 86

9.1. Характеристики электрического поля тропосферы 86
9.2. Электрические токи в атмосфере. Электричество грозы . . . 90

Глава 10. Элементы атмосферной акустики 94

10.1. Характеристики звуковых колебаний в атмосфере 94
10.2. Распространение звуковых колебаний в атмосфере 97

Приложения 1—27 102

Ответы к задачам 119

СОФЬЯ ВАСИЛЬЕВНА ЗВЕРЕВА

ЗАДАЧНИК

ПО ОБЩЕЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

Редактор О. Д. Рейнгеверц. Художник В. В. Бабанов

Худож. редактор В. В. Быков. Техн. редактор М. И. Брайнина. Корректор Т. В. Алексеева

ИБ № 495

Сдано в набор 22.10.79. Подписано в печать 25.02.80. М-23259. Формат 60×90 1/16. Бум. тип. № 2. Лит. гарн. Печать высокая. Печ. л. 8. Уч.-изд. л. 8,09. Тираж 3600 экз. Индекс МЛ-253. Заказ № 449. Цена 30 коп. Гидрометеоиздат. 199053, Ленинград, 2-я линия, д. 23.

Ленинградская типография № 8 ЛПО «Техническая книга» Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 190000, Ленинград, Прачечный пер., 6.

Готовятся к изданию в 1980 г.

УЧЕБНИКИ ДЛЯ ВУЗОВ

Догановский А. М., Самохин А. А., Соловьева Н. Н. **Практикум по гидрологии.** 20 л. 1 р. 10 к.

Задачник по динамической метеорологии. 3-е изд., доп. Под редакцией проф. Д. Л. Лайхтмана и проф. Л. С. Гандина. 15 л. 90 к.

Павлов Н. Ф. **Аэрология, радиометеорология и техника безопасности.** 30 л. 1 р. 40 к.

Предварительные заказы принимает наш специализированный магазин: 197101, Ленинград, Большой пр., 57, магазин № 15 Ленкниги.

ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ

ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ

предлагает Вашему вниманию имеющиеся в наличии учебники для вузов

Аполлов Б. А., Калинин Г. П., Комаров В. Д. **Курс гидрологических прогнозов.** 1974 г. 1 р. 25 к.

Бауман И. А., Кондратович К. В., Савичев А. И. **Практикум по долгосрочным прогнозам погоды.** 1979 г. 30 к.

Гирс А. А., Кондратович К. В. **Методы долгосрочных прогнозов погоды.** 1978 г. 1 р. 20 к.

Давыдов Л. К., Дмитриева А. А., Конкина Н. Г. **Общая гидрология.** Изд. 2-е. 1973 г. 1 р. 39 к.

Зверев А. С. **Синоптическая метеорология.** Изд. 2-е. 1977 г. 2 р.

Качурин Л. Г. **Физические основы воздействия на атмосферные процессы.** 1978 г. 1 р. 40 к.

Павлова М. Д. **Практикум по агрометеорологии.** Изд. 2-е. 1974 г. 64 к.

Чирков Ю. И. **Агрометеорология.** 1979 г. 1 р. 10 к.

Заказы принимает специализированный магазин Гидрометеоиздата: 197101, Ленинград, Большой пр., д. 57, магазин № 15 Ленкниги. Книги могут быть высланы наложенным платежом.

ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ