

Б.В. Горячев, М.В. Кабанов, С.Б. Могильницкий

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЕ

Рассмотрены некоторые особенности распространения оптического излучения в облачности. Показано, что наибольший вклад в альбедо облачной атмосферы вносят облака с максимальной степенью симметрии. Эффект «аномального» пропускания излучения в разорванной облачности является следствием эффектов «просветления» слоя дисперсной среды при его дроблении и резкого уменьшения поглощения при увеличении числа облаков, сопровождаемом уменьшением оптических размеров отдельного облака. В слоистой облачности определяющее влияние на величину коэффициентов пропускания оказывает верхний слой облачности.

Облачные образования оказывают определяющее влияние на радиационный баланс атмосферы. Задачу расчета радиационного баланса для сплошной и разорванной облачности можно считать решенной [1–4], однако возникают определенные трудности физической интерпретации экспериментальных результатов при распространении излучения через систему облаков. В качестве примера можно отметить такие проблемы, как «аномальное поглощение» и неоднозначность результатов, получаемых при наземном и космическом зондировании облачности. Очевидно, что эти проблемы являются следствием некорректного учета структуры, геометрических и оптических параметров облачности. Так как эта задача является многопараметрической, то ее решение в общем виде часто приводит к появлению неоднозначных результатов, обусловленных сложностью учета одновременного влияния разных параметров на радиационный баланс; поэтому для глубокого анализа проблемы необходимо изучение всех аспектов задачи.

В данной статье установлены общие физические закономерности переноса излучения в разорванной облачности.

Известно, что развитие облачных образований сопровождается следующими процессами: увеличением геометрических и оптических размеров отдельных облаков и изменением их формы; объединением отдельных облаков и образованием облачных полей; изменением микрофизических характеристик облачности и оптических, таких как индикатриса рассеяния излучения и вероятность выживания кванта Λ ; изменением слоистой структуры облачности.

Рассмотрим влияние каждого из данных процессов на радиационный баланс в отдельности.

Рост геометрических размеров облаков обычно сопровождается ростом их оптических размеров; при этом микрофизические параметры могут оставаться постоянными. Увеличение оптического объема облака влияет на составляющие его радиационного баланса. Следует ожидать, что эти составляющие будут зависеть не только от оптического объема рассеивающей среды, но и от ее формы. Воспользуемся моделью облака в виде параллелепипеда с оптической длиной τ_x , шириной τ_y , высотой τ_z . Освещение осуществляется равномерно коллимированным потоком излучения, направленным по нормали к плоскости yz при использовании декартовой системы координат. Индикатриса рассеяния излучения характеризуется средним косинусом угла рассеяния g . В процессе исследований изучалось влияние величины и формы оптического объема на величины пропускания T и отражения R облака, с индикатрисой рассеяния $S1$. Изменение формы среды осуществлялось изменением соотношения между τ_x и $\tau_y = \tau_z$. В качестве общей характеристики облаков различных размеров и форм использовалось понятие оптического объема V , определяемого для параллелепипеда как произведение $\tau_x \times \tau_y \times \tau_z$. В основу динамической модели облака положены следующие представления: увеличение вертикальной оптической плотности облака обычно сопровождается увеличением горизонтальной, причем рост последней идет существенно быстрее роста вертикальной. Результаты исследований приведены на рис. 1. Полученные данные показывают, что величины T и R сильно зависят от формы рассеивающего объема, при этом, как известно, основное влияние на про-

пускание оказывает оптическая толщина облака τ_x , в то время как зависимость отражения от отношения τ_x/τ_y , характеризующего форму объема, имеет вид кривой с максимумом (рис. 1, б). Отметим, что максимальное отражение наблюдается для среды, форма которой имеет наибольшую степень симметрии (в данном случае куб).

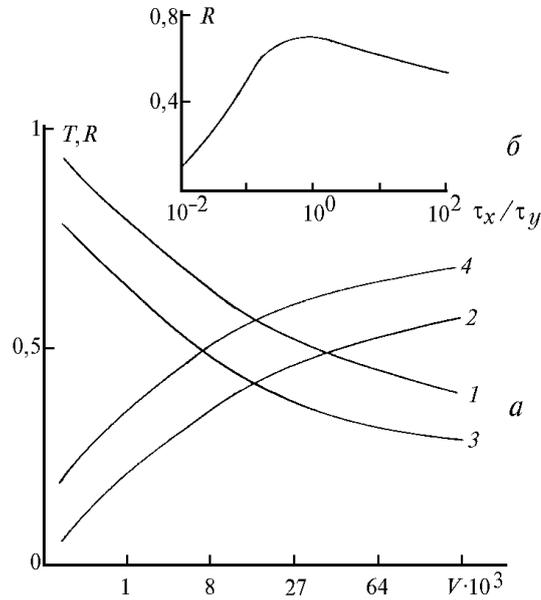


Рис. 1. Зависимость величины пропускания T и отражения R облака с оптическими размерами $\tau_x \times \tau_y \times \tau_z$ от оптического объема при $\Lambda = 1$, индикатриса $C1$. 1 – пропускание и 2 – отражение при $\tau_x:\tau_y = 1:3,5$; 3 – пропускание и 4 – отражение при $\tau_x:\tau_y = 1:1$ (а). Зависимость величины отражения R от τ_x/τ_y (б)

Рассмотрим далее эффект «просветления» слоя дисперсной среды при его дроблении [5]. Под эффектом «просветления» будем понимать следующее: увеличение T при дроблении среды постоянной оптической длины на N частей той же длины с соответствующим сохранением условий освещения и наблюдения. Так как целью данной статьи является изучение физических закономерностей в «чистом» виде, то взаимодействие между отдельными частями рассеивающей среды учитывать не будем. Рассмотрим, как влияет степень разбиения слоя рассеивающей среды на радиационные характеристики с учетом формы индикатрисы рассеяния, вероятности выживания кванта и оптической длины среды. Степень разбиения среды m характеризуем отношением величины оптического сечения $\tau_{y1} \times \tau_{z1}$ одной части среды к величине оптического сечения $\tau_{y0} \times \tau_{z0}$ всей среды. Рассматривая простейшую ситуацию – деление одного облака на две части той же оптической длиной, что и первоначальное, – можно предположить, что пропускание целого облака будет равно сумме пропусканий его частей в силу принципа аддитивности, например, как в модели облачности в виде «экранов».

Известно, что принцип аддитивности может нарушаться в упомянутой модели в случае, если существует обмен энергией между «экранами». Однако анализ экспериментальных данных показывает, что не существует однозначной зависимости между пропусканием и баллом облачности даже при отсутствии взаимодействия между отдельными облаками. Полученные результаты показывают, что изменение поперечных оптических размеров среды фиксированной длины приводит к изменению баланса излучения, распространяющегося в ограниченном объеме дисперсной среды, и, следовательно, величины пропускания. Так как при расчете радиационного баланса вычисляются потоки излучения в верхнюю и нижнюю полусферы, то при дроблении среды на отдельные невзаимодействующие части должно наблюдаться увеличение пропускания излучения, обусловленное увеличением доли многократно рассеянного света в нижнюю полусферу.

Данный эффект иллюстрирует рис. 2, а. Результаты расчетов, приведенные на этом рисунке, показывают действие эффекта «просветления» для конкретных ситуаций. При этом на малых оптических длинах ($\tau_x \sim 1$) влияние дробления на пропускание излучения мало; при увеличении τ_x и поглощения эффект усиливается.

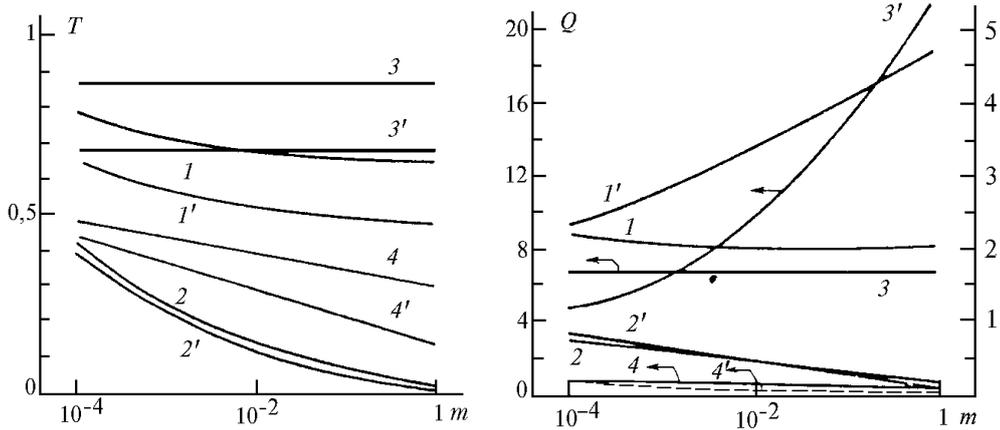


Рис. 2. Зависимость величины пропускания T (а) и отношения Q (б) от степени дробления дисперсной среды m ; 1 - $\tau_{x_0} = 1$, $\Lambda = 1$, $g = 0$; 1' - $\tau_{x_0} = 1$, $\Lambda = 0,7$, $g = 0$; 2 - $\tau_{x_0} = 20$, $\Lambda = 1$, $g = 0$; 2' - $\tau_{x_0} = 20$, $\Lambda = 0,7$, $g = 0$; 3 - $\tau_{x_0} = 1$, $\Lambda = 1$, $g = 0,77$ (облачная индикатриса С1 [7]); 3' - $\tau_{x_0} = 1$, $\Lambda = 0,7$, $g = 0,77$; 4 - $\tau_{x_0} = 20$, $\Lambda = 1$, $g = 0,77$; 4' - $\tau_{x_0} = 20$, $\Lambda = 0,7$, $g = 0,77$

Другой важной составляющей радиационного баланса является альbedo облачных систем, поэтому представляет интерес соотношение пропускания и отражения при дроблении среды. Отношение

$$Q = T/R,$$

приведенное на рис. 2, б, при $\Lambda = 1$ слабо возрастает, а при наличии поглощения ход данной зависимости может меняться при изменении величины поглощения в среде, что объясняется изменением соотношения составляющих баланса излучения (увеличение доли поглощенного излучения).

Дробление дисперсной среды с поглощением приводит к еще одному эффекту, имеющему исключительно важное значение для энергетики атмосферы. Речь идет о резком уменьшении доли поглощенного излучения при увеличении числа облаков, сопровождаемом уменьшением поперечных размеров отдельного облака (рис. 3).

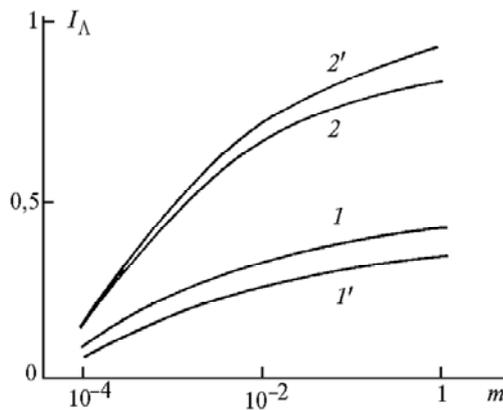


Рис. 3. Зависимость поглощенной энергии от степени дробления дисперсной среды m ; $\Lambda = 0,7$; $\tau_{x_0} = 1$ (1, 1'), 20 (2, 2'), $g = 0$ (1, 2), 0,77 (1', 2')

Из приведенных данных следует, что изменение формы индикатрисы рассеяния не влияет на качественный ход кривых во всех рассмотренных случаях. Поскольку в общем случае величина «просветления» зависит от объема среды, то, как было показано ранее, необходимо учитывать изменение всех размеров среды.

С целью выяснения особенностей переноса излучения в слоисто-неоднородных средах исследовался перенос излучения в пространственно-ограниченной среде в форме параллеле-

пипеда с различными оптическими размерами τ_x, τ_y, τ_z при числе слоев, равном 3, и вероятности выживания кванта $\Lambda = 1$ [6].

В качестве модельных сред использовались монодисперсные взвеси полистиролового латекса в воде с размерами частиц 0,1; 0,95; 1,5 мкм. Изучались следующие сочетания слоев: 123; 132; 231; 213; 312; 321, а также каждый слой в отдельности. Проводились измерения интенсивности излучения, прошедшего через среду, отраженного от среды и вышедшего через боковые грани. Влияние пространственной ограниченности среды на баланс излучения исследовалось при следующих значениях оптических размеров среды: $\tau_{x1} = 5$; $\tau_{x2} = \tau_{x3} = 10$; $\tau_{y1} = 15$; $\tau_{y2} = \tau_{y3} = 30$; $\tau_{z1} = 10$; $\tau_{z2} = \tau_{z3} = 20$. Значения величины пропускания T , отражения R и выхода излучения через боковую поверхность B для каждого слоя были следующие:

$$\begin{aligned} T_1 &= 0,189, & T_2 &= 0,553, & T_3 &= 0,529; \\ R_1 &= 0,445, & R_2 &= 0,124, & R_3 &= 0,118; \\ B_1 &= 0,366, & B_2 &= 0,323, & B_3 &= 0,352. \end{aligned}$$

Результаты дальнейших исследований переноса излучения через слоисто-неоднородную среду представлены на рис. 4. Для сочетания слоев 132 наблюдается увеличенный выход излучения через боковую поверхность при оптической глубине $0 \div 3$ по сравнению с сочетанием слоев 231. Дальнейшее увеличение τ слабо влияет на величину интенсивности, вследствие чего интегральный поток излучения, выходящий через боковую поверхность слоистой среды, заметно меньше, чем при сочетании слоев 231. Заметим, что слои 2 и 3 характеризуются резко вытянутой индикатрисой рассеяния. Как следует из рис. 4, б, кривая 321 повторяет ход зависимости 231 при несколько меньших абсолютных значениях интенсивности. Перестановка 2 и 3 между собой слабо влияет на выход излучения через боковую поверхность. Следовательно, выход излучения через боковые поверхности характеризуется тремя типами распределений, при этом характер распределения излучения определяет слой, находящийся первым в слоистой среде. В то же время характер распределения излучения через боковую поверхность в каждом случае сохраняет индивидуальную особенность.

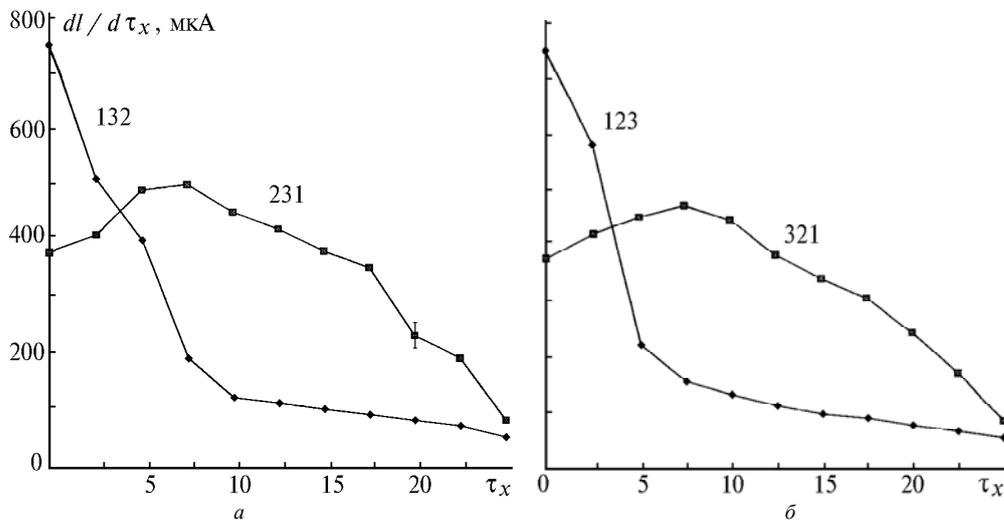


Рис. 4. Распределение интенсивности излучения, выходящего через боковую поверхность рассеивающей среды. Цифрами указан порядок чередования слоев. $\tau_{x1} = 5$; $\tau_{x2} = \tau_{x3} = 10$; $\tau_{y1} = \tau_{y2} = 15$; $\tau_{y3} = \tau_{z2} = \tau_{y3} = \tau_{z3} = 30$

Разработанная методика применена в качестве примера к расчету переноса излучения в слоистой области. При проведении расчетов энергетических характеристик излучения использовалась модель трехслойной облачности. Каждый слой характеризуется следующими параметрами. Верхний крупнокапельный слой облачности имеет индикатрису, приведенную в [7], для $\rho = 100$, $n = 1,33$, $\tau_{x1} = 7$, где ρ – параметр Ми; n – коэффициент преломления. Средний слой имеет индикатрису, соответствующую распределению С1 [7], $\tau_{x2} = 7$. Нижний слой ха-

рактируется индикатрисой, соответствующей распределению частиц по размерам S_3 [7], $\tau_{x_3} = 6$. Для приведенной модели вычислялись коэффициенты пропускания и отражения излучения трехслойной облачностью в зависимости от ее поперечных оптических размеров.

Как следует из результатов, приведенных на рис. 5, наблюдается очень сильная зависимость (на порядок) коэффициентов пропускания T и отражения R излучения от поперечных оптических размеров облачности.

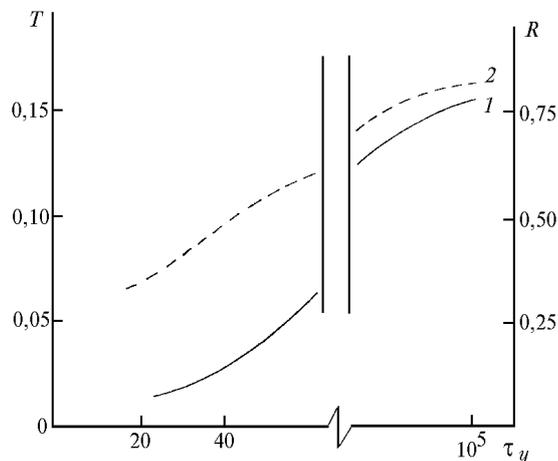


Рис. 5. Зависимость коэффициентов пропускания T (кривая 1) и отражения R (кривая 2) трехслойной облачной среды от поперечных оптических размеров $\tau_y = \tau_z$

Таким образом, по полученным результатам можно сделать следующие выводы:

1. Наибольший вклад в альbedo облачной атмосферы вносят облака с максимальной степенью симметрии.
2. Эффект «аномального» пропускания излучения в разорванной облачности является следствием эффектов «просветления» слоя дисперсной среды при его дроблении и резкого уменьшения поглощения при увеличении числа облаков, сопровождаемом уменьшением оптических размеров отдельного облака.
3. В слоистой облачности определяющее влияние на величину коэффициентов T и R оказывает верхний слой облачности.

1. Ку - Н а н - Л и о у . Основы радиационных процессов в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 458 с.
2. Зуев В.Е., Титов Г.А. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. N 1–2. С. 201–223.
3. Каргин Б.А., Пригорин С.М. Моделирование стохастических полей в кучевой облачности и исследование их радиационных свойств методом Монте-Карло. Новосибирск, 1988. 18 с. (Препринт/ВЦ СО АН СССР, № 817).
4. Davies R. // J. Atmos. Sci. 1978. V. 35. N 6. P. 1712–1725.
5. Горячев Б.В., Ларионов В.В., Могильницкий С.Б., Савельев Б.А. // ДАН СССР. 1987. Т. 294. N 2. С. 318–320.
6. Горячев Б.В., Ларионов В.В., Могильницкий С.Б., Савельев Б.А. // Оптика и спектроскопия. 1987. Т. 63. Вып. 4. С. 914.
7. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 168 с.

Томский государственный университет

Поступила в редакцию
1 августа 1997 г.

B.V. Goryachev, M.V. Kabanov, S.B. Mogilnitskii. Some Peculiarities of Radiation Transfer in Cloudy Atmosphere.

Some peculiarities of the optical radiation propagation through clouds are treated in the paper. The clouds with maximal degree of symmetry are shown to be the main contributors into albedo of the cloudy atmosphere. An effect of the radiation «anomalous» transmission in broken clouds is a consequence of both the «clearness» effect in the disperse medium layer at its breaking and sharp lowering of the absorption caused by increase of the clouds quantity followed by decrease of optical size of an isolated cloud. Under stratified cloudiness the deciding influence on the transmittance and reflectance is exerted by the upper layer of the clouds.