

РАССЕЯНИЕ И ПЕРЕНОС ОПТИЧЕСКИХ ВОЛН В АТМОСФЕРЕ И ОКЕАНЕ

УДК 551.521

Г.А. Титов

АЛЬБЕДО И ПРОПУСКАНИЕ КУЧЕВЫХ ОБЛАКОВ

Рассматривается трехмерная модель переноса видимой солнечной радиации в статистически неоднородных кучевых облаках. Показано, что двумерные поля альбедо и пропускания имеют большую горизонтальную изменчивость. Для отдельного пикселя сумма альбедо и пропускания может сильно отличаться от 1. Приближение независимых пикселей, не учитывающее горизонтальный перенос излучения, неудовлетворительно описывает радиационные эффекты кучевых облаков.

1. Введение

В настоящее время радиационные блоки моделей общей циркуляции атмосферы (МОЦА) все еще основаны на плоскопараллельной модели, которая неудовлетворительно описывает радиационные эффекты неоднородных слоистых и кучевых облаков, поскольку их оптические параметры экстремально изменчивы не только в вертикальном, но и горизонтальном направлении. Для улучшения параметризации взаимодействия радиации с кучевыми облаками в МОЦА потребуются не только данные наблюдений, но и более реалистичные модели переноса излучения. В данной статье представлена трехмерная модель переноса излучения, которая используется для изучения взаимосвязи между пространственным распределением кучевых облаков и потоков (альбедо и пропускание) видимой солнечной радиации.

В этой области спектра рассеяние каплями воды можно считать консервативным (альбедо однократного рассеяния равно 1), поэтому средние альбедо \bar{R} и пропускание \bar{Q} связаны соотношением $\bar{R} + \bar{Q} = 1$, которое выражает баланс лучистой энергии. Пусть облака занимают некоторую область пространства в виде параллелепипеда толщиной ΔH , основанием которого является квадрат со стороной Xl . В горизонтальной плоскости разобьем эту область на ячейки (пиксели) одинакового размера Δl и для каждой ячейки рассчитаем альбедо R_{ij} и пропускание Q_{ij} , $i, j = 1, \dots, nx$, где $nx = Xl/\Delta l$ – число ячеек вдоль каждой из осей OX и OY . Общее число ячеек равно nx^2 .

Если рассматриваемая область является фрагментом плоскопараллельного облака, то с учетом однородности граничных условий для каждой ячейки выполняется равенство $Q_{ij} + R_{ij} = 1$, $i, j = 1, \dots, nx$. Будет ли это равенство выполняться в случае *кучевых* облаков? Как скажется *горизонтальная неоднородность* кучевых облаков на распределении в пространстве однородного потока падающей солнечной радиации? Результаты математического моделирования, которые приведены ниже, позволяют в какой-то степени ответить на эти вопросы, а также получить плотности вероятности и энергетические спектры альбедо и пропускания в *статистически неоднородных* кучевых облаках.

2. Модель кучевых облаков и метод решения

Стохастическая геометрия кучевых облаков все еще плохо изучена. Чтобы избежать больших затрат компьютерного времени, мы используем простую модель кучевых облаков, генерируемую пуассоновским потоком точек в пространстве. Кучевые облака аппроксимируются опрокинутыми усеченными параболоидами вращения, высота которых H равна диаметру D . Последний имеет экспоненциальную функцию распределения $f(D) \sim \exp(-\alpha D)$, $D_{\min} \leq D \leq D_{\max}$. Оптические параметры (коэффициент ослабления, альбедо однократного рассеяния и индикатриса рассеяния) внутри облака считаются постоянными. Для простоты радиационные эффекты атмосферного аэрозоля и подстилающей поверхности не учитываются.

На рис. 1, *a* представлена реализация облачного поля, построенная на компьютере при горизонтальном размере пикселя $\Delta l = 0,1$ км, $n_x = 64$ ($n_x^2 = 4096$ и $Xl = 6,4$ км), $\alpha = 2$, $D_{\min} = 0,03$ км, $D_{\max} = 1,2$ км, балле облачности $N = 0,5$ и коэффициенте ослабления $\sigma = 20 \text{ км}^{-1}$. Если ячейка принадлежит группе (двум и более) облаков, то его оптическая толщина рассчитывается для облака, имеющего наибольшие размеры в данной группе.

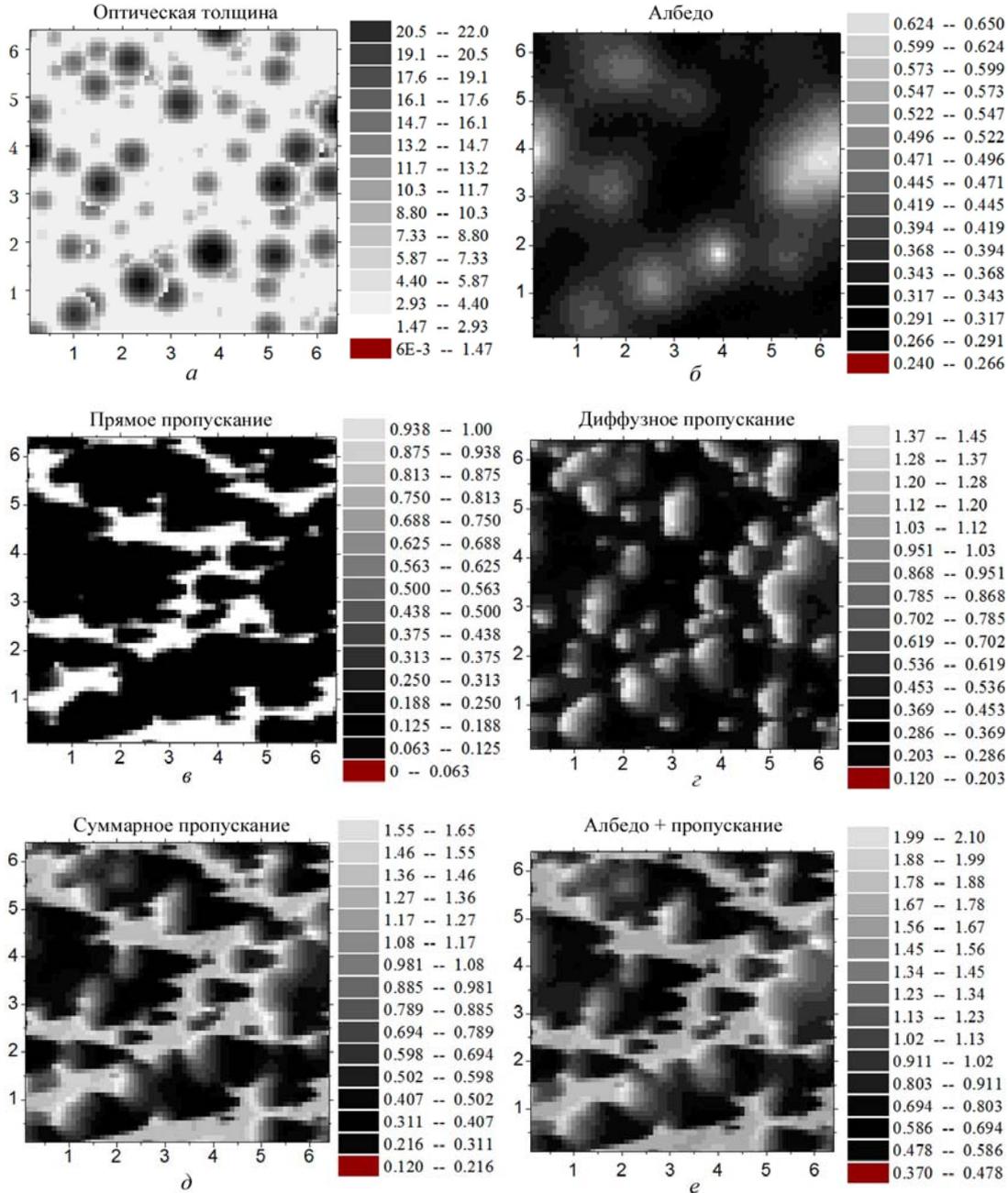


Рис. 1. Двумерные поля оптической толщины (*a*), альbedo (*б*), пропускания прямой (*в*), диффузной (*г*) и суммарной (*д*) радиации и суммы альbedo плюс пропускание (*e*) при балле облачности $N = 0,5$, горизонтальном размере пикселя $0,1$ км, коэффициенте ослабления $\sigma = 20 \text{ км}^{-1}$ и зенитном угле Солнца $\xi_{\odot} = 60^{\circ}$

При решении трехмерного уравнения переноса использовались периодические граничные условия, которые предполагают, что весь слой $0 \leq z \leq \Delta H$ заполнен данной реализацией облачного поля. Лучистые потоки рассчитаны методом Монте-Карло с моделированием ста и более

миллионов траекторий, что обеспечивает относительную погрешность вычислений, не превышающую 2%. Усредненные по площади ячейки значения пропускания определены на нижней (плоскость $z = 0$), а альbedo – на верхней границе облаков (плоскость $z = \Delta H$). Детально модель кучевых облаков и алгоритмы метода Монте-Карло описаны в работах [1, 2]. Все расчеты выполнены для индикатрисы рассеяния Хенни–Гринштейна с параметром асимметрии 0,843 (типичное значение для длин волн 0,3–3,0 мкм). Азимутальный угол Солнца, отсчитываемый от оси OX , равен нулю.

3. Двумерные поля альbedo и пропускания

Многочисленное рассеяние играет существенную роль в формировании радиационного поля в облаках, поэтому альbedo R и пропускание диффузной радиации Q_s достигают больших значений даже в тех ячейках, которые расположены вне облаков (рис. 1, б, г). Облака имеют различную толщину, которая в данной реализации облачного поля изменяется от 0,033 до 1,174 км. Поле излучения, отраженное отдельным облаком, расплывается в пространстве и перекрывается с радиационными полями других облаков прежде, чем оно достигнет плоскости $z = \Delta H$, где определяется альbedo. Эффекты расплывания и перекрывания настолько сильно сглаживают зависимость альbedo от горизонтальных координат, что многие детали маскируются и по известным значениям альbedo трудно визуальным образом восстановить реальную картину распределения облаков в пространстве (рис. 1, а, б). Вершины наиболее мощных облаков хорошо видны, поскольку в этом случае влияние указанных выше эффектов не является достаточно сильным. Альbedo изменяется в интервале от 0,24 до 0,65.

Пропускание прямой радиации S , проходящей в просветах между облаками (направление на Солнце не закрыто облаками), равно 1, и при наклонных зенитных углах Солнца отчетливо видны тени облаков (рис. 1, в). Оптически тонкие области, локализованные вблизи основания облака и непосредственно освещенные падающей солнечной радиацией, способны пропустить без рассеяния значительную часть излучения, поэтому границы теней несколько размыты.

Пропускание диффузной радиации Q_s имеет наибольшие значения в ячейках, которые имеют сравнительно небольшую (около 2–3) оптическую толщину и не экранируются окружающими облаками, т. е. падающая солнечная радиация достигает ячейки без взаимодействия с ними (рис. 1, г). Интересным является то, что в таких ячейках значения Q_s могут заметно превосходить 1. Это объясняется тем, что дополнительный вклад в пропускание диффузной радиации этими ячейками дает излучение, которое падает на соседние оптически более плотные ячейки и после многократного рассеяния «скатывается» в оптически тонкие ячейки и проходит через них. Естественно, что существуют ячейки, где значения Q_s малы (0,1–0,2), и они либо удалены от облаков на значительное расстояние, либо расположены в тени наиболее мощных из них. Пропускание диффузной радиации может изменяться больше чем на порядок величины (от 0,12 до 1,45).

На рис. 1, д представлено пропускание суммарной радиации $Q = S + Q_s$. Двумерное поле пропускания рассчитано в плоскости $z = 0$, совпадающей с нижней границей облаков. Это обстоятельство, а также сильная вытянутость вперед индикатрисы рассеяния облачных капель и вклад прямой радиации приводят к тому, что поле пропускания суммарной радиации гораздо меньше сглажено в пространстве, чем поле альbedo. Небольшая доля падающей солнечной радиации может достичь пикселей, которые расположены в тени наиболее мощных кучевых облаков. По этой причине своих наименьших значений Q достигает в таких пикселях независимо от их оптической толщины. В ячейках, расположенных в просветах между облаками, $S = 1$, и из-за дополнительного вклада диффузной радиации всегда справедливо неравенство $Q > 1$. Очевидно, что последнее неравенство будет выполняться в тех ячейках, где $Q_s > 1$. Значения $Q > 1$ уже давно были получены в натурных измерениях [3], в теоретических же исследованиях такие значения Q получены, насколько нам известно, впервые.

Результаты моделирования показывают, что альbedo и пропускание кучевых облаков имеют большие горизонтальные градиенты. Поэтому баланс лучистой энергии выполняется в среднем для всей рассматриваемой области пространства, а в каждой ячейке сумма $Q_{ij} + R_{ij}$, $i, j = 1, \dots, nx$ может сильно отличаться от 1 и изменяться от 0,37 до 2,10 (рис. 1, е).

Эффект локального отклонения баланса лучистой энергии от 1 представляется чрезвычайно важным, поскольку наглядно иллюстрирует, что для радиационных характеристик и полей яркости горизонтально неоднородных облачных систем могут не выполняться некоторые хорошо известные закономерности, полученные для плоскопараллельной модели облаков.

Неучет этого обстоятельства может привести к неверным физическим выводам при интерпретации данных натурных измерений в реальных облаках. Например, по результатам измерения альbedo и пропускания небольшого числа пикселей можно сделать ошибочное предположение о присутствии в облаках неизвестного мощного поглотителя (усилителя). Горизонтальная неоднородность лучистых потоков в кучевых облаках может оказать заметное влияние на такие атмосферные процессы, как нагревание подстилающей поверхности, образование и динамика облаков, фотохимические реакции и т.д.

4. Статистика альbedo и пропускания

Минимальные и максимальные значения, среднее и дисперсия оптической толщины, альbedo, различных составляющих пропускания и суммы альbedo и пропускания представлены в таблице. Здесь также приведены вероятности $P\{Q > 1\}$ и $P\{R + Q > 1\}$ того, что значения Q и $R + Q$ превосходят 1. Минимальные значения τ и S равны нулю, а $S_{\max} = 1$. Теоретические оценки вероятности $P\{Q > 1\}$ неплохо согласуются с данными судовых измерений, выполненных в тропической зоне Тихого океана (альbedo подстилающей поверхности близко к нулю): при балле кучевых облаков $0,6 \div 0,8$ эта вероятность приблизительно равна $0,16$ [4]. Видно, что при всех баллах облачности наблюдаются сильные локальные отклонения баланса лучистой энергии от 1. При малых баллах облачности чаще наблюдаются значения $Q > 1$ и $R + Q > 1$, а при больших N справедливо обратное. В соответствии с вышесказанным дисперсия альbedo значительно меньше дисперсии пропускания.

Статистические характеристики оптической толщины, альbedo и пропускания видимой солнечной радиации, рассчитанные для различных значений балла облачности при $\sigma = 20 \text{ км}^{-1}$ и $\xi_{\Phi} = 60^\circ$

Характеристики		Балл облачности			
		0,1	0,3	0,5	0,7
τ	max	22,78	22,82	23,25	23,76
	среднее	0,73	2,29	4,03	6,70
	дисперсия	8,64	20,70	30,69	38,69
S	среднее	0,83	0,53	0,25	0,05
	дисперсия	0,1253	0,2166	0,1494	0,0294
Q_s	min	0,02	0,05	0,12	0,15
	max	1,21	1,37	1,45	1,58
	среднее	0,11	0,28	0,42	0,45
Q	дисперсия	0,0355	0,0696	0,0758	0,0557
	min	0,03	0,08	0,12	0,15
	max	1,39	1,51	1,65	1,82
R	среднее	0,94	0,81	0,67	0,50
	дисперсия	0,0834	0,1720	0,1839	0,0925
	$P\{Q > 1\}$	0,80	0,55	0,30	0,10
$R+Q$	min	0,03	0,10	0,24	0,34
	max	0,444	0,56	0,65	0,80
	среднее	0,068	0,19	0,33	0,50
$R+Q$	дисперсия	0,0012	0,0025	0,0039	0,0060
	min	0,08	0,20	0,38	0,54
	max	1,53	1,77	2,10	2,38
$R+Q$	дисперсия	0,0790	0,1632	0,1781	0,1024
	$P\{Q + R > 1\}$	0,84	0,59	0,40	0,32

На рис. 2 представлены плотности вероятности альbedo $f(R)$ и пропускания суммарной радиации $f(Q)$. С увеличением N мода $f(R)$ смещается в сторону больших значений R , дисперсия возрастает и распределение становится более симметричным. При малых и средних значениях N плотность вероятности пропускания имеет два четко выраженных максимума, наличие которых имеет очевидное физическое объяснение. Бимодальные $f(Q)$ получены при обработке экспериментальных данных [3, 4].

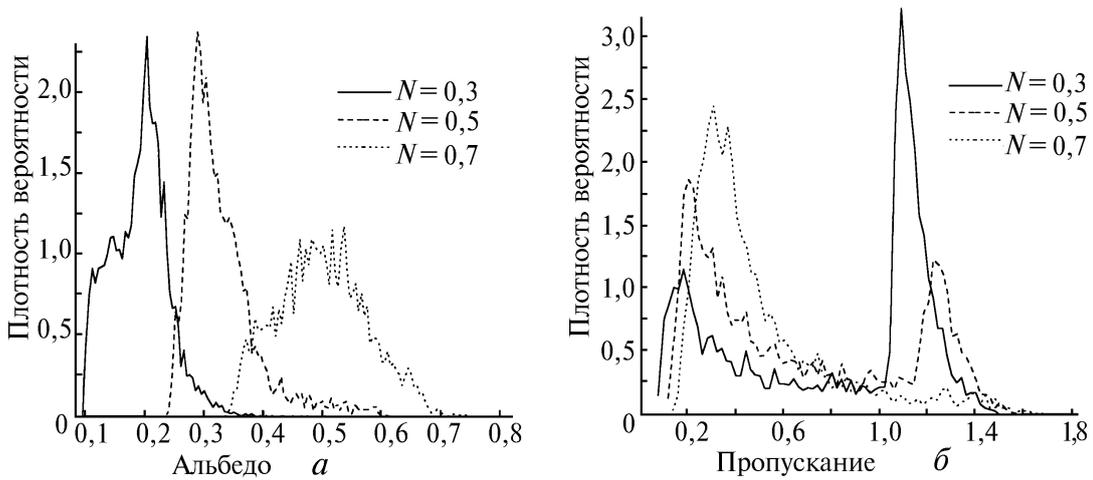


Рис. 2. Плотности вероятности альbedo (а) и пропускания суммарной радиации на уровне нижней границы облаков (б) при $\xi_{\text{об}} = 60^\circ$, $\sigma = 20 \text{ км}^{-1}$ и различных значениях балла облачности

В логарифмическом масштабе зависимость спектральной плотности E оптической толщины, альbedo и пропускания от номера бина $k = \omega_k X l$ иллюстрирует рис. 3, где ω_k – пространственная частота. Эффекты многократного рассеяния, расплывания и перекрытия гораздо сильнее сглаживают поле отраженной солнечной радиации, чем пропущенной. Поэтому $E(R)$ значительно уже и сильнее отличается от $E(\tau)$, чем $E(Q)$.

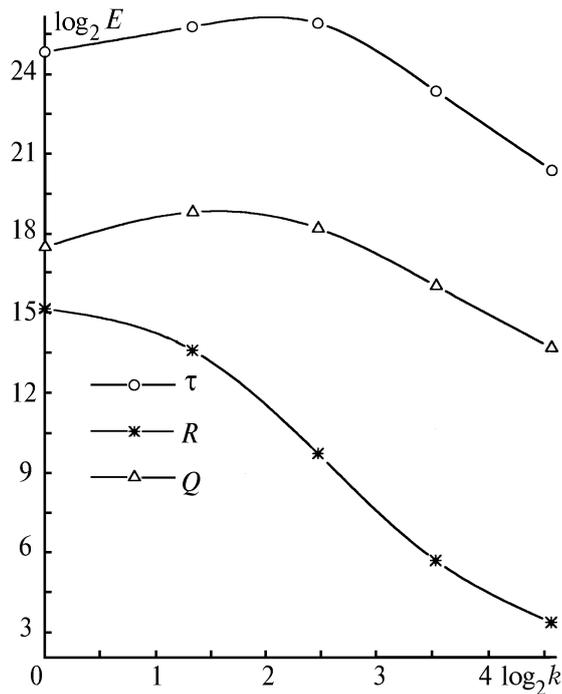


Рис. 3. Зависимость спектральной плотности E оптической толщины, альbedo и пропускания от номера бина k при $\xi_{\text{об}} = 60^\circ$, $N = 0,5$ и $\sigma = 20 \text{ км}^{-1}$

Статистические характеристики пропускания, представленные выше, получены для высоты, совпадающей с нижней границей облаков. На практике пропускание солнечной радиации обычно измеряется прибором, расположенным на уровне подстилающей поверхности (ПП). Поскольку эффекты расплывания и перекрытия радиационных полей облаков зависят от высоты, то и плотности вероятности пропускания $f(Q)$, рассчитанные для этих двух высот, будут различаться (рис. 4, а). Максимумы $f(Q)$ на уровне ПП смещаются в сторону больших

значений Q , а при $N=0,7$ распределение становится более узким. При малых N плотность вероятности $f(R+Q)$ является бимодальной (рис. 4, б). Результаты расчетов показывают, что $f(R+Q)$ слабо зависит от высоты, на которой измеряется пропускание.

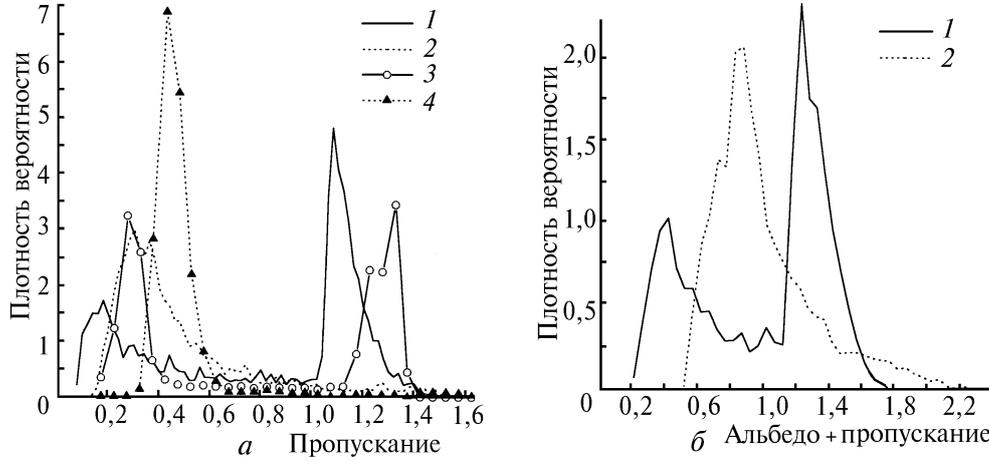


Рис. 4. Плотности вероятности пропускания суммарной радиации (а) и суммы $R+Q$ (б) при $\xi_{\oplus} = 60^\circ$ и $\sigma = 20 \text{ км}^{-1}$: 1, 3, – $N=0,3$; 2, 4 – $N=0,7$; 1, 2 – нижняя граница облаков; 3, 4 – подстилающая поверхность. Высота основания облаков равна 1 км

5. Приближение независимых пикселей (ПНП)

Это приближение пренебрегает горизонтальным переносом радиации и использует плоскопараллельную модель для каждого пикселя (ячейки) [5, 6]. Другими словами, радиационные эффекты каждого облачного пикселя зависят только от его вертикальной оптической толщины и не зависят от оптической толщины соседних пикселей. В случае плоскопараллельных слоисто-кучевых облаков с неоднородным распределением оптической толщины ПНП имеет хорошую точность, если горизонтальный размер пикселя больше его толщины и намного превосходит среднюю длину пробега фотонов в облаках. В противном случае ПНП приводит к смещению среднего альбедо на 10 – 20%. В ПНП для расчета альбедо R_{IPA} и пропускания Q_{IPA} каждого пикселя можно использовать формулу, которая при консервативном рассеянии имеет вид [7]

$$R_{IPA}(\tau; \xi_{\oplus}, g) = 1 - Q_{IPA}(\tau; \xi_{\oplus}, g);$$

$$Q_{IPA}(\tau; \xi_{\oplus}, g) = \frac{\delta(\xi_{\oplus}) + [1 - \delta(\xi_{\oplus})] \exp[-\tau / a(\xi_{\oplus})]}{1 + \gamma(g)\tau}, \quad (1)$$

где τ – оптическая толщина пикселя; ξ_{\oplus} – зенитный угол Солнца и g – параметр асимметрии. Ниже использованы следующие значения функций $\delta(\xi_{\oplus})$, $a(\xi_{\oplus})$ и $\gamma(g)$: $\delta(60^\circ) = 0,8$; $a(60^\circ) = 0,8$ и $\gamma(0,843) = 0,11$.

Гораздо большие смещения альбедо можно ожидать для кучевых облаков, геометрическая структура которых очень сильно отличается от плоскопараллельного слоя, поскольку эффекты, связанные с их стохастической геометрией (затенение и многократное рассеяние между облаками), оказывают сильное влияние на перенос солнечной радиации. Согласно (1) двумерные поля R_{IPA} и Q_{IPA} подобны распределению оптической толщины (рис. 1, а) и, следовательно, визуально совершенно не похожи на поля R и Q , рассчитанные методом Монте-Карло (рис. 1, б, д). В частности, R_{IPA} и Q_{IPA} равны нулю в тех пикселях, которые расположены в просветах (дырах) между облаками, значения Q_{IPA} не могут превосходить 1, и для каждого пикселя выполняется баланс лучистой энергии $R_{IPA} + Q_{IPA} \equiv 1$. Очевидно, что ПНП не способно описать эффекты расплывания и перекрытия радиационных полей отдельных облаков.

Для оценки точности ПНП в кучевых облаках мы рассчитали следующие величины:

$$\Delta R = \frac{R + R_{IPA}}{R} 100\%, \quad \Delta Q = \frac{Q + Q_{IPA}}{Q} 100\%,$$

где значения Q рассчитаны на высоте основания облаков. ПНП занижает альбедо в тех пикселях, которые расположены в просветах (дырах) между облаками; обратное справедливо для других пикселей (рис. 5, а). Среднее и дисперсия альбедо, рассчитанного в ПНП, равны 0,25 и 0,0807 соответственно. Сравнение с приведенными выше значениями, полученными с помощью метода Монте-Карло, показывает, что ПНП приблизительно в 1,5 раза занижает среднее и в 20 раз завышает дисперсию альбедо. Последнее означает, что радиационное взаимодействие пикселей и эффекты стохастической геометрии сильно сглаживают поле отраженной солнечной радиации.

Пропускание Q больше Q_{IPA} в пикселях, которые расположены на оптически тонком основании облака или в просветах между облаками и освещаются проходящей солнечной радиацией, т. е. не находятся в тени облаков (рис. 5, б). Как и следовало ожидать, максимальных значений $|\Delta Q|$ достигает в пикселях, которые находятся в просветах и затеняются облаками. Значения Q могут заметно превышать 1, поэтому дисперсия Q в 2 раза больше, чем Q_{IPA} .

Представленные выше результаты убедительно показывают, что ПНП *неудовлетворительно* описывает радиационные эффекты кучевых облаков.

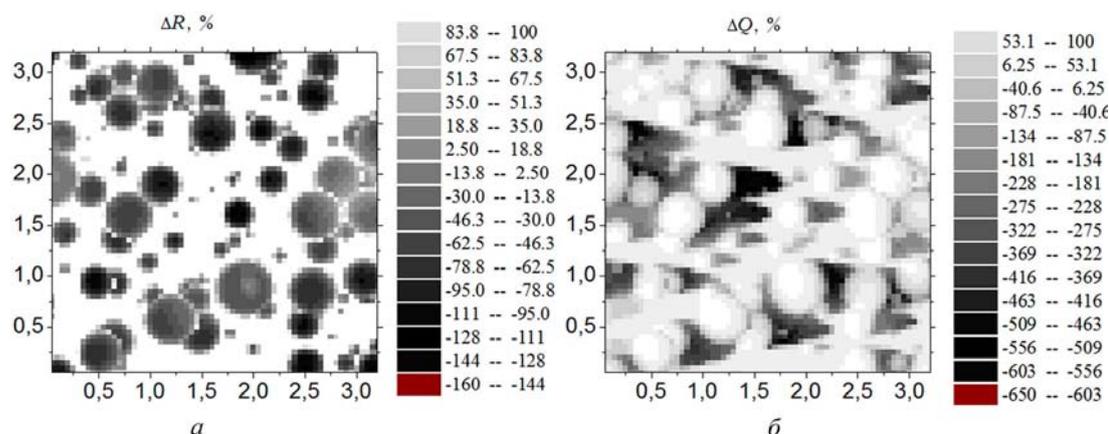


Рис. 5. Двумерные поля ΔR и ΔQ при балле облачности $N = 0,5$, горизонтальном размере пикселя 0,1 км, коэффициенте ослабления 20 км^{-1} и зенитном угле Солнца 60°

Учет взаимодействия солнечной радиации с атмосферным аэрозолем и подстилающей поверхностью, а также использование улучшенных и более сложных моделей кучевых облаков несколько изменяют количественные оценки статистических характеристик альбедо, пропускания и их суммы. Однако вряд ли нужно сомневаться в достоверности качественных результатов, касающихся влияния горизонтальной неоднородности облаков на двумерные поля потоков видимой солнечной радиации, поскольку эти результаты имеют ясное физическое обоснование.

В настоящее время скудность экспериментальных данных о пространственной неоднородности облаков является наиболее серьезным препятствием на пути развития трехмерных моделей переноса излучения. Получение таких данных позволит улучшить уже существующие и, если это будет необходимо, разработать новые более реалистичные модели переноса солнечной и тепловой радиации в облаках.

Работа выполнена при финансовой поддержке DOE's ARM Program (контракт N 350114-A-Q1), Российского фонда фундаментальных исследований (грант N 95-05-14162) и по гранту N JI7100 от Международного научного фонда (ISF) и правительства России.

1. Titov G. A. // J. Atm. Sci. 1990. V. 47. N 1. P. 24–38.
2. Zuev V. E. and Titiv G. A. // J. Atm. Sci. 1995. V. 51. N 2. P. 176–190.
3. Тимановская Р. Г., Фейгельсон Е. М. // Метеорология и гидрология. 1970. N 11. С. 44–51.
4. Тимановская Р. Г., Тимановский С. Д. // Изв. РАН. Сер. ФАО. 1994. Т. 30. N 2. С. 278–286.
5. Cahalan R. F. Advances in Remote Sens. Retrieval Methods, Deepak Pub. 1989. P. 371–388.
6. Cahalan R. F., Ridgway W., Wiscombe W. J., Bell T. L. and Snider J. B. // J. Atmos. Sci. 1994. V. 51. P. 2434–2455.
7. King M. D. and Harshvardhan // J. Atmos. Sci. 1986. V. 43. P. 784–801.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
г. Томск

Поступила в редакцию
20 мая 1995 г.

G. A. Titov. Albedo and Transmittance in Cumuli.

A 3-D visible solar radiative transfer model for statistically inhomogeneous cumuli is considered. It is shown that 2-D albedo and transmittance fields have strong horizontal variability. For an individual pixel, the sum of albedo and transmittance may substantially differ from unity (the effect of local deviation from law of energy conservation). The Independent Pixel Approximation, disregarding horizontal photon transport, is shown to unsatisfactorily describe the radiative effects in cumuli.