

О.Е. Баженов, Е.И. Касьянов, Д.Н. Ромашов

ВЛИЯНИЕ МИКРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОБЛАКОВ НА РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗОРВАННОЙ ОБЛАЧНОСТИ

Рассматриваются семь облачных моделей, различающихся параметрами функции распределения облачных капель по размерам. Исследовано влияние микрофизических параметров облачных моделей на радиационные характеристики разорванной облачности. Показано, что вариации микроструктуры могут приводить к существенным изменениям средних лучистых потоков.

В настоящее время накоплен большой статистический материал о микроструктуре реальных облаков. Распределение облачных капель по размерам зависит от времени года, географического положения, формы облаков, а также может значительно изменяться и в пределах отдельного облака [1–3]. Поскольку спектр размеров капель зависит от многих факторов, то задача построения облачной модели является сложной проблемой. При решении многих практически важных прикладных задач используются облачные модели, различающиеся как параметрами [4], так и самими функциями распределения облачных капель по размерам [5, 6]. В связи с этим возникает вопрос о том, насколько сильно радиационные свойства облаков зависят от используемой модели.

В [5] были рассмотрены восемь облачных моделей, описывающих различные формы облаков и их географическое положение, и оценено влияние микроструктуры на коэффициенты обратного рассеяния (β) и ослабления. Показано, что оптические, а следовательно, и радиационные свойства облаков определяются в основном крупными частицами. Например, при обрезании спектра для капель больших, чем 25μ , и уменьшении общей концентрации всего на 10% β уменьшился в два раза, тогда как неучет капель, размеры которых не превышают 10μ (уменьшение концентрации на 70%), приводит к изменению β не более чем на 10%.

Исследование чувствительности пропускания и отражения солнечной радиации облаками к различным распределениям капель по размерам проведено в [7]. Параметры распределений были подобраны таким образом, что шесть облачных моделей различались только индикатрисой рассеяния. Из результатов расчетов следует, что радиационные характеристики могут существенно зависеть от микроструктуры, даже если оптическая толщина облаков (τ) постоянна. В [8] оценено влияние микроструктуры, изменяющейся с высотой в пределах облака, на пропущенный и отраженный потоки солнечной радиации в видимой части спектра. Было использовано три различных вертикально постоянных спектра размеров облачных капель: первый — наблюдаемый у основания, второй — в середине и третий — у вершины облака. Результаты расчетов показали, что даже при постоянном водозапасе облаков радиационные свойства могут иметь существенные различия, которые для пропущенного потока достигают 23, а для отраженного 7%.

В [5, 7, 8] рассматривались горизонтально однородные облачные слои. Цель данной статьи — исследовать влияние микрофизических параметров облаков на радиационные характеристики разорванной облачности.

Облачные модели

В статье использовались семь облачных моделей, различающихся параметрами модифицированного гамма-распределения

$$n(r) = ar^{\alpha} \exp\left(-\frac{\alpha}{\gamma} \left(\frac{r}{r_m}\right)^{\gamma}\right), \quad (1)$$

где $n(r)$ — функция распределения; r_m — модальный радиус; α , γ и a — параметры, значения которых представлены в табл. 1.

Здесь $r_{\text{экв}}$ и $r_{\text{ср}}$ — эквивалентный и средний радиусы, N_0 и w — средние значения концентрации капель и водности соответственно. Модели С1, С2 и С3 взяты из [4], а С5 и С6 из [9]. Поскольку модальные радиусы облачных моделей С5 и С6 различаются более чем в 3 раза, дополнительно были построены модели С7 и С8 с модальными радиусами 10 и 15 мкм соответственно. Графики функций распределения представлены на рис. 1. Здесь и на последующих рисунках номер кривой соответствует номеру облачной модели.

Мо- дель	a	α	γ	$r_{п},$ МКМ	$r_{экв},$ МКМ	$r_{ср},$ МКМ	$N_0,$ см ⁻³	$\omega,$ г/м ³
C1	2,373	6	1	4	6,0	4,7	100	0,0625
C2	$1,0851 \cdot 10^{-2}$	8	3	4	4,3	4,0	100	0,0301
C3	5,5556	8	3	2	2,2	2,0	100	0,00377
C5	0,5481	4	1	6	10,5	7,5	100	0,297
C7	0,05	3	1	10	20,0	13,3	37	0,689
C8	0,005	3	1	15	30,0	19,9	18,7	1,174
C6	0,0005	2	1	20	49,4	29,1	1,0	0,251

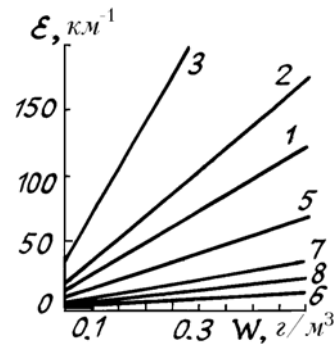
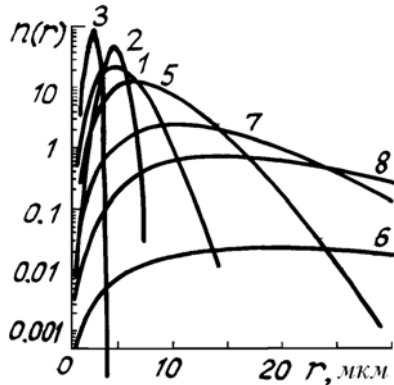


Рис. 1. Функция распределения облачных капель по размерам. Здесь и на остальных рисунках номер кривой соответствует номеру облачной модели

Рис. 2. Зависимость показателя ослабления ϵ от водности ω

Перейдем к рассмотрению оптических характеристик, которые, как хорошо известно, определяются микроструктурой облаков.

Для видимой области спектра показатель ослабления (ϵ) связан с $r_{экв}$ соотношением [3]:

$$\epsilon = \frac{3}{2} \frac{\omega}{\rho r_{экв}}, \tag{2}$$

где ρ — плотность воды, г/м³,

$$r_{экв} = \frac{\int_0^\infty n(r) r^3 dr}{\int_0^\infty n(r) r^2 dr}. \tag{3}$$

Из (2) и табл. 1 следует, что показатели ослабления облачных моделей могут отличаться более чем на порядок, даже при одной водности (рис. 2).

Существенные различия имеют и индикатрисы рассеяния, которые были рассчитаны для длины волны 0,69 мкм на основе теории Ми по схеме, изложенной в [10]. Так, при нулевом угле рассеяния индикатрисы могут различаться приблизительно на три порядка (рис. 3).

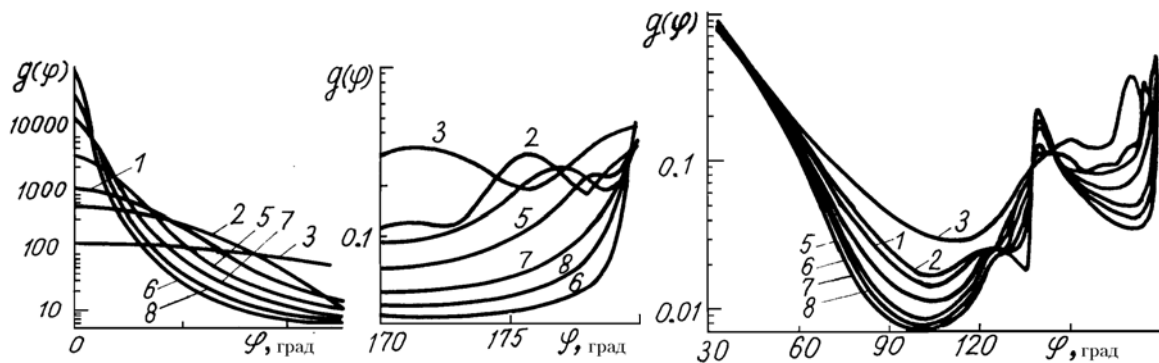


Рис. 3. Индикатриса рассеяния

Средние лучистые потоки

Радиационные характеристики вычислялись на основе прямого моделирования [11] для статистически однородной и неизотропной модели разорванной облачности, построенной на пуассоновских потоках точек на прямых [12]. Взаимодействие излучения с аэрозольно-газовой атмосферой и подстилающей поверхностью не учитывалось.

Расчеты выполнены для потока солнечной радиации единичной мощности и облаков, имеющих высоту $H = 0,5$ км и средний горизонтальный размер $D = 0,25$ км; значения остальных параметров указаны в подписях к рисункам.

При вычислении радиационных характеристик разорванной облачности наиболее часто используется модель облака С1 (см., например, [12, 13, 14]), поэтому средние потоки, вычисленные для различных облачных моделей, будем сравнивать с радиационными характеристиками, полученными для облака С1. Отметим, что в [12] подробно исследована зависимость средних потоков от зенитного угла Солнца и оптико-геометрических параметров облачности.

Обозначим через $g(\kappa)$, $\epsilon(\kappa)$ — индикатрису рассеяния и показатель ослабления κ -й облачной модели, $S(\kappa)$, $Q_s(\kappa)$ и $R(\kappa)$ — средние потоки нерассеянной, рассеянной пропущенной и отраженной радиации, вычисленные при оптических характеристиках $g(\kappa)$ и $\epsilon(\kappa)$, $\delta S(\kappa)$, $\delta Q_s(\kappa)$ и $\delta R(\kappa)$ — относительные различия потоков, рассчитанных для первой (С1) и κ -й модели.

Если Солнце находится в зените, то для среднего потока нерассеянной радиации имеем

$$S(\kappa) = 1 - N + N e^{-\tau(\kappa)}, \quad (4)$$

где $\tau(\kappa) = \epsilon(\kappa)H$ — оптическая толщина облаков; N — балл облачности.

Из (4) следует, что $S(\kappa)$ достигают максимальных различий при $N = 1$ (рис. 4). С увеличением зенитного угла Солнца ξ и фиксированном $N \neq 1$ возрастает доля нерассеянного излучения, проходящего через вершину и боковые, стороны облаков ($\sim H \operatorname{tg} \xi$), а следовательно, $S(\kappa)$ уменьшаются, а максимум абсолютных различий $\Delta S(\kappa)$ смещается в сторону меньших N . Для заданных параметров задачи и $\xi = 60^\circ$ $\Delta S(6)$ достигает максимальных значений при $N \sim 0,4$, относительные различия $|\delta S(6)|$ составляют $\sim 160\%$ (рис. 4, б). При увеличении водности в два раза максимум $|\delta S(6)|$ уменьшается до $\sim 70\%$ (рис. 4, в).

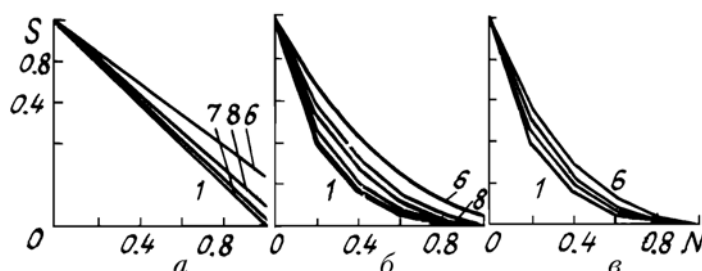


Рис. 4. Средний поток нерассеянной радиации S в зависимости от балла облачности N при $w = 0,1$ г/м³, $\xi = 0^\circ$ (а), $\xi = 60^\circ$ (б); $w = 0,2$ г/м³, $\xi = 60^\circ$ (в)

Перейдем к рассмотрению потоков рассеянной радиации. Поскольку оптические параметры модели С1 и соответствующие оптические характеристики моделей С3 и С6 имеют максимальные различия (рис. 1, 2, 3), то в дальнейшем будем сравнивать только эти три модели.

Оценим прежде всего влияние индикатрисы рассеяния (при фиксированном ϵ) на δQ_s и δR . Результаты расчетов для сплошного облачного слоя ($\xi = 0^\circ$) и двух значений оптической толщины τ представлены в табл. 2.

Таблица 2

Модель	$\tau=5$				$\tau=20$			
	$Q_s(\kappa)$	$ \delta Q_s(\kappa) $	$R(\kappa)$	$ \delta R(\kappa) $	$Q_s(\kappa)$	$ \delta Q_s(\kappa) $	$R(\kappa)$	$ \delta R(\kappa) $
С6	0,818	7	0,176	25	0,466	20	0,534	12
С1	0,763	—	0,231	—	0,392	—	0,608	—
С3	0,692	9	0,302	30	0,328	16	0,672	10

Из табл. 2 следует, что с ростом τ относительные различия альбедо $|\delta R(3)|$ и $\delta R(6)$ уменьшаются, а для $|\delta Q_s(6)|$ и $\delta Q_s(3)$ наблюдается обратная зависимость. Например, согласно табл. 2, при увеличе-

нии оптической толщины в 4 раза $|\delta R(3)|$ и $\delta R(6)$ уменьшаются приблизительно в три и два раза, а $|\delta Q_s(6)|$ и $\delta Q_s(3)$ во столько же раз возрастают.

При фиксированной водности δQ_s и δR определяются различиями как индикатрисы рассеяния, так и показателя ослабления. С увеличением $r_{\text{экв}}$ уменьшается оптическая толщина облаков и возрастает вытянутость вперед индикатрисы рассеяния (рис. 2, 3). Поскольку каждый из этих эффектов приводит к увеличению Q_s и уменьшению R , то с ростом $r_{\text{экв}}$ (водность фиксирована) различия потоков рассеянной радиации δQ_s и δR увеличиваются.

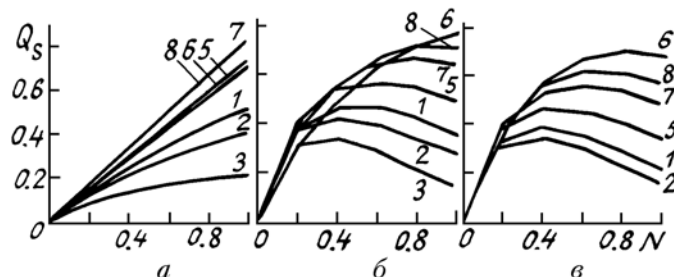


Рис. 5. Влияние балла облачности N на средний поток рассеянного пропущенного излучения Q_s при $w = 0,1 \text{ г/м}^3$, $\xi = 0^\circ$ (а), $\xi = 60^\circ$ (б); $w = 0,2 \text{ г/м}^3$, $\xi = 60^\circ$ (в)

Зависимости средних потоков рассеянной радиации Q_s и R от балла N представлены на рисунках 5, 6. Если Солнце находится в зените, то для заданных параметров задачи с ростом N $\delta Q_s(3)$ и $|\delta Q_s(6)|$ увеличиваются и достигают максимальных значений при $N = 1$, которые составляют соответственно ~ 60 и 40% (рис. 5, а). Различия в альbedo практически не зависят от N и при $N = 1$ $|\delta R(3)| \sim 65\%$, а $\delta R(6) \sim 90\%$ (рис. 6, а). С увеличением зенитного угла Солнца ξ , водности w , балла N различия $\delta Q_s(3)$ и $|\delta Q_s(6)|$ увеличиваются, а $|\delta R(3)|$ и $\delta R(6)$ уменьшаются. Например, при $N = 1$, $w = 0,1 \text{ г/м}^3$ и $\xi = 60^\circ$ $\delta Q_s(3) \sim 60\%$, $|\delta Q_s(6)|$ возрастает до 115% (рис. 5, б), а $|\delta R(3)|$ и $\delta R(6)$ уменьшаются соответственно до ~ 35 и 70% (рис. 6, б). При увеличении водности в два раза и $N = 1$, $\xi = 60^\circ$ различия $|\delta Q_s(6)|$ достигают 210% (рис. 5, в), а $\delta R(6)$ уменьшается до 60% (рис. 6, в). Отметим, что для водности $w = 0,2 \text{ г/м}^3$ радиационные характеристики $S(3)$, $Q_s(3)$ и $R(3)$ не вычислялись, поскольку при данном значении показателя ослабления $\epsilon(3)$ имеет физически нереальное значение ($\epsilon(3) \approx 150 \text{ км}^{-1}$) [2].

Обозначим через $Q'_s(\kappa)$ и $R'(\kappa)$ — средние потоки рассеянной пропущенной и отраженной радиации слоистой облачности, вычисленные при оптических характеристиках $g(\kappa)$ и $\epsilon(\kappa)$. Зависимости $Q'_s(\kappa)$ и $R'(\kappa)$ от балла имеют вид

$$Q'_s(\kappa) = N Q_s^*(\kappa), \quad (5)$$

$$R'(\kappa) = N R^*(\kappa), \quad (6)$$

где $Q_s^*(\kappa)$, $R^*(\kappa)$ — соответствующие радиационные характеристики, рассчитанные для сплошного облачного слоя.

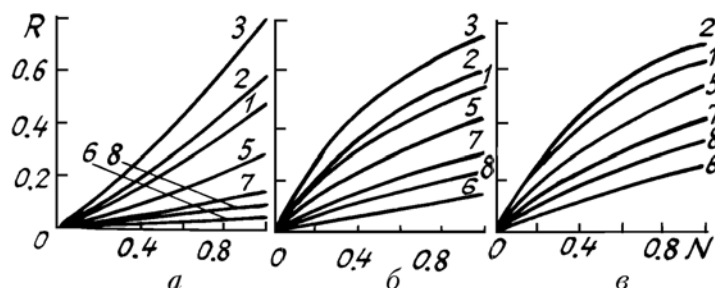


Рис. 6. Зависимость среднего потока рассеянной отраженной радиации R от балла облачности N при $w = 0,1 \text{ г/м}^3$, $\xi = 0^\circ$ (а), $\xi = 60^\circ$ (б); $w = 0,2 \text{ г/м}^3$, $\xi = 60^\circ$ (в)

Из (5), (6) следует, что $\delta Q'_s(\kappa)$ и $\delta R'(\kappa)$ не зависят от N и совпадают с $\delta Q_s(\kappa)$ и $\delta R(\kappa)$, вычисленными при $N = 1$. Поскольку при $N = 1$, $0,1 \leq w \leq 0,2$, $0 \leq \xi \leq 60^\circ$ и $H = 0,5 \text{ км}$ различия $|\delta Q_s(\kappa)|$

имеют максимальные, а $|\delta R(\kappa)|$ — минимальные значения, то для $N \neq 1$ и заданных параметров задачи выполняются неравенства $|\delta Q'_s(\kappa)| > |\delta Q_s(\kappa)|$, а $|\delta R'(\kappa)| < |\delta R(\kappa)|$.

Заключение

Анализ результатов расчетов позволяет сделать следующие выводы:

1) Существует сильная зависимость радиационных характеристик облачной атмосферы от микрофизических параметров облаков. Неучет микроструктуры может приводить к существенным различиям лучистых потоков, которые для пропущенного рассеянного излучения могут превышать 200%, а для альбедо составляют $\sim 100\%$.

2) Изменения микроструктуры слоистых облаков приводят к более существенным изменениям потока рассеянной пропущенной радиации, чем вариации микрофизических параметров кучевой облачности. Для альбедо справедливо обратное.

Авторы выражают признательность Г.А. Титову за постановку задачи, консультации и обсуждение результатов работы.

1. Мейсон Б. Дж. Физика облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1961. 542 с.
2. Облака и облачная атмосфера. Справочник. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 647 с.
3. Кондратьев К. Я., Биненко В. И. Влияние облачности на радиацию и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 240 с.
4. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 290 с.
5. Carrier L. W., Cato G. A., K. J. von Essen. //J. Appl. Opt. 1967. V. 6. № 7. P. 1209.
6. Мак-Картни Э. Оптика атмосферы. М.: Мир, 1979. 421 с.
7. Kattawar G. W., Plass G. //J. Appl. Opt. 1968. V. 7. № 5. P. 869.
8. Si-Chee Tsay, KoIf Jayaweera. //J. Geoph. Res. Let. 1983. V. 10. № 12. P. 1188.
9. Welch R. M., Cox S. K., Davis J. M. //AMS Met. Monogr. 1980. V. 17. № 39. 96 p.
10. Акулинин А. А. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 6. С. 127.
11. Касьянов Е. И., Титов Г. А. //Оптика атмосферы. 1990. Т. 10. № 3. С. 1108—1114.
12. Титов Г. А. //Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 4. С. 3—18.
13. Thomas McKee, Stephen K. Cox. //J. Atmos. Sci. 1976. V. 33. № 10. P. 2014.
14. Weinman J. A., Harshvardhan. //J. Appl. Opt. 1982. V. 21. № 16. P. 2940.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
11 декабря 1991 г.

O. E. Bazhenov, E. I. Kasianov, D. N. Romashov. **Influence of Microphysical Parameters of Clouds on Radiation Characteristics of Broken Clouds.**

In this paper seven models of clouds having different size-distribution functions of cloud particles are analyzed. Influence of microphysical parameters of cloud models on radiation properties of broken clouds is investigated. It is shown that variations of the cloud microstructure can result in essential variations of mean radiation fluxes.