

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ  
ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 551.501.81

В.Ф. Терзи, А.Г. Конохов, Ф.С. Якупова, Л.В. Курт

ОСЛАБЛЕНИЕ И РАССЕЯНИЕ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН  
ЧАСТИЦАМИ ОБЛАКОВ И ОСАДКОВ

Рассмотрено моделирование на ЭВМ оптических характеристик различных полидисперсных систем сферических частиц, описывающих различные формы облаков и осадков (дожди, снег, град) в области спектра от 0,5 до 10 мм. Расчеты выполняются по известным формулам теории Ми [8, 10]. Входными параметрами являются микроструктура и оптические постоянные частиц.

Широкое практическое развитие методов микроволнового дистанционного зондирования влагосодержания атмосферы из космоса [1, 2] и с подстилающей поверхности [3, 4] требует уточнения оптических характеристик (ОХ) атмосферы в миллиметровой области спектра, включая поглощение миллиметровых волн молекулярными компонентами [5–7], а также ослабление и рассеяние дисперсной фазой [7–9] атмосферы.

Настоящая статья посвящена моделированию на ЭВМ ОХ (спектральные коэффициенты ослабления, рассеяния, матрица рассеяния) различных полидисперсных систем сферических частиц, описывающих различные формы облаков и осадков (дожди, снег, град) в области спектра от 0,5 до 10 мм.

Микроструктура облаков и осадков

Для описания распределения числа частиц по размерам (радиусом  $r$ )  $n(r)$  используются различные аналитические выражения [8, 9], среди которых наиболее известны:

1) распределение Лоусса – Парсона [8]

$$n(r) = \frac{10^3}{4,8\pi} \frac{RM(r)}{r^3 V(r)}, \quad (1)$$

где  $R$  – интенсивность дождя, мм/ч;  $V$  – скорость падения капель у поверхности, м/с;  $r$  – радиус частиц,  $M(r)$  – объемное процентное содержание воды, определяется из экспериментальных табличных данных;

2) распределение Маршалла – Палмера [9]

$$n(r) = 1,6 \cdot 10^4 \exp(-8,2 R^{-0,21} \cdot r), \quad (2)$$

3) модифицированное гамма-распределение Дейрменджана [10]

$$n(r) = Ar^a \exp(-br^c), \quad (3)$$

где параметры микроструктуры  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и нормировочный множитель  $A$  для различных форм облаков и осадков приведены в табл. 1. В этой же таблице приведены теоретические значения модального радиуса частиц  $r_m$  (для которого распределение  $n(r)$  принимает максимальное значение), число частиц в единице объема  $N$ , водность  $W$ , а также коэффициент ослабления  $\sigma_a$  на длине волны 0,55 мкм, вычисленный по точным формулам теории Ми.

Распределения (1)–(3) хорошо согласуются между собой в области крупных частиц для интенсивности дождя 4, 10 и 50 мм/ч и соответствующих параметров,  $a$ ,  $b$  и  $c$  из табл. 1.

Оптические постоянные воды, льда и снега

Оптические постоянные воды и льда  $m = n - ik$  вычислялись по аналитическим формулам [11] и приведены на рис. 1 и 2 для двух значений температур плюс 20 и минус 20°C. Из рис. 1 видно, что действительная часть показателя преломления  $n$  льда не меняется в области спектра от 0,5 до 100 мм и равна 1,78, а  $n$  воды увеличивается почти в пять раз. Мнимая часть показателя преломления  $k$  воды достигает максимума при  $\lambda = 10$  мм, а  $k$  льда на четыре порядка меньше.

Исходные модели, используемые для расчета ослабления и рассеяния миллиметровых волн частицами облаков и осадков

Форма облаков и модели осадков	Параметры микроструктуры						Водность	Коэффициент ослабления
	$a$	$b$	$c$	$r_m$ (мкм)	$N$ (см <sup>-3</sup> )	$A$	$W$ , (г/м <sup>3</sup> )	$\sigma_a$ , км <sup>-1</sup>
Слоистые	5	0,939	1,05	4,70	10 <sup>2</sup>	9,792 (-1)	0,114	23,78
Слоисто-кучевые	5	0,576	1,19	5,33	10 <sup>2</sup>	2,823 (-1)	0,141	28,40
Мощно-кучевые	4	0,667	1,00	6,00	10 <sup>2</sup>	0,548	0,297	44,20
Слоисто-дождевые	5	0,402	1,24	6,61	10 <sup>2</sup>	8,061 (-1)	0,235	37,03
Высоко-слоистые	2	0,0027	2,46	10,19	10 <sup>2</sup>	1,978 (-1)	0,796	88,71
Кучево-дождевые	1	0,0017	2,41	9,67	10 <sup>2</sup>	1,097	1,034	100,30
Модель С.6	2	0,100	1,00	20,00	10 <sup>-1</sup>	0,500 (-4)	0,025	0,67
Дождь-4	2	0,057	0,50	70,0	10 <sup>-3</sup>	0,497 (-7)	0,117	0,366
Дождь-10	4	0,012	1,00	333,0	10 <sup>-3</sup>	1,033 (-14)	0,509	1,32
Дождь-50	6	0,010	1,00	600,0	10 <sup>-3</sup>	1,383 (-20)	2,110	3,54

Примечание. Модель С. 6 соответствует водной фракции дождевых облаков, модели дождь-4, -10 и -50 соответствуют осадкам с интенсивностью 4, 10 и 50 мм.час. Запись, например, 9,792 (-1) соответствует  $9,792 \cdot 10^{-1}$ .

Таблица 2

Оптические постоянные воды для различных температур

$T$	Частота волн, см <sup>-1</sup>	[14]			$n$	$\epsilon'$	$\epsilon''$
		$n$	$\epsilon'$	$\epsilon''$			
283 К	5,86	2,72	5,71	7,10	2,62	5,76	5,51
	6,84	2,61	5,41	6,24	2,55	5,65	4,72
	7,81	2,56	5,35	5,57	2,50	5,58	4,14
	8,79	2,50	5,29	4,95	2,47	5,54	3,68
	9,77	2,46	5,21	4,44	2,44	5,50	3,32
	10,74	2,42	5,15	4,14	2,42	5,48	3,02
	11,72	2,38	5,05	3,78	2,41	5,46	2,77
	12,70	2,36	5,02	3,46	2,39	5,45	2,55
	13,67	2,33	4,86	3,57	2,38	5,43	2,37
	303 К	5,86	2,94	6,28	8,99	2,89	5,96
6,84		2,82	5,85	8,16	2,76	5,65	7,75
7,81		2,65	5,55	6,37	2,66	5,45	6,81
8,79		2,62	5,36	6,43	2,59	5,31	6,07
9,77		2,53	5,21	5,54	2,53	5,20	5,47
10,74		2,49	5,16	5,05	2,48	5,13	4,98
11,72		2,46	5,12	4,72	2,44	5,07	4,57
12,70		2,43	5,13	4,28	2,41	5,02	4,22
13,67		2,43	5,25	3,97	2,38	4,99	3,93

В [14] приведены последние экспериментальные исследования диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  воды в миллиметровой области спектра ( $m = \sqrt{\epsilon}$ ). При этом получены новые данные для диэлектрической проницаемости Дебая  $\epsilon_\infty$ , равные 4,93; 4,86; 4,73 и 4,72 для  $T = 283, 293, 303$  и  $313^\circ\text{K}$  соответственно. Выполненные нами расчеты  $\epsilon$  и  $m$  по формулам [11] с этими значениями  $\epsilon_\infty$  меньше согласуются с приводимыми в [14] результатами  $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$ , чем используемые нами данные [11], а именно 5,356; 5,179; 4,74 и 4,038 для аналогичных температур (см. табл. 2).

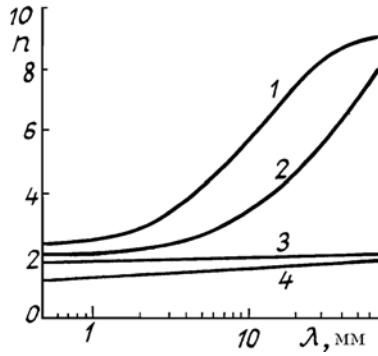


Рис. 1. Спектральная зависимость действительной части показателя преломления в миллиметровом диапазоне: кривая 1 —  $n_b$ ,  $T = -20^\circ\text{C}$ ; 2 —  $n_b$ ,  $T = 20^\circ\text{C}$ ; 3 —  $n_s$ ,  $T = -20^\circ\text{C}$ ; 4 —  $n_c$ ,  $T = -20^\circ\text{C}$ ; ( $W = 7\%$ )

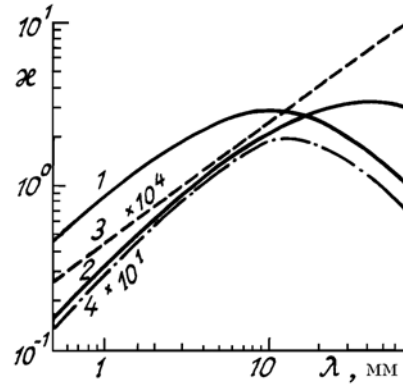


Рис. 2. Спектральная зависимость мнимой части показателя преломления воды, льда и снега (см. обозначения на рис. 1)

Оптические постоянные снега вычисляются согласно аналитическим выражениям [12] с учетом в смеси льда, воды и воздуха. Формула для расчета диэлектрической проницаемости снега  $\epsilon_c$  имеет вид

$$\frac{\epsilon_c - 1}{\epsilon_c + U} = W \frac{\epsilon_b - 1}{\epsilon_b + U} + \frac{\sqrt{W} - W}{0,92} \frac{\epsilon_l - 1}{\epsilon_l + U}, \quad (4)$$

где  $\epsilon_b$  и  $\epsilon_l$  — диэлектрическая проницаемость воды и льда;  $W$  — влажность снега;  $U$  — формфактор, который зависит от формы и ориентации кристалликов в снежинках. Согласно [14] для сухого снега  $0 < W < 0,05$ ,  $U = 2$ , влажного снега  $0,3 < W < 3$ ,  $U = 8$ , мокрого снега  $5 < W < 10$ ,  $U = 20$ , слякоти  $15 < W < 30$ ,  $U = \infty$ . Вычисленные по формуле (4) оптические постоянные снега  $n$  и  $\kappa$  для  $W = 7\%$  и  $U = 20$  также приведены на рис. 1 и 2. Значение  $n$  слабо меняется в области 0,5–100 мм для влажного снега, а  $\kappa_c$  — повторяет ход  $\kappa_b$  с меньшим на порядок абсолютным значением.

### Оптические характеристики облаков и осадков

В оптическом и радиодиапазонах используются различные определения функции пропускания атмосферы, т. е.

$$\tau_{\text{опт}} = \exp(-\sigma_a z), \quad \tau_{\text{рад}} = 10^{-\sigma'_a z}, \quad (5)$$

где  $\sigma_a z$  — оптическая толщина;  $\sigma_a$  — коэффициент ослабления,  $\text{км}^{-1}$ ;  $z$  — расстояние вдоль трассы наблюдения;  $\sigma'_a z$  — ослабление слоем атмосферы  $z$ , дБ;  $\sigma'_a$  — коэффициент ослабления, дБ/км. Ниже используется только первое обозначение (5), переход к  $\sigma'_a$  осуществляется согласно (5) очень просто  $\sigma'_a = 0,4343\sigma_a$ .

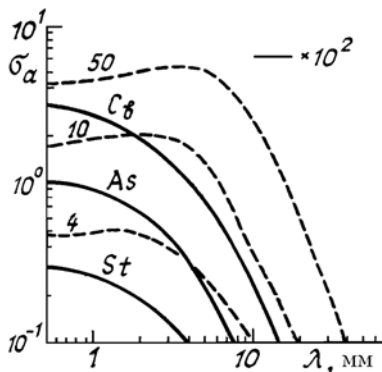


Рис. 3. Спектральная зависимость коэффициентов ослабления облаками Cb, As, St (кривые подняты на два порядка) и соответствующими моделями дождя 4, 10 и 50 (микроструктура в табл. 1)

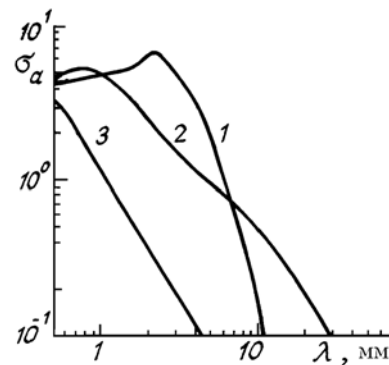


Рис. 4. Спектральная зависимость коэффициентов ослабления: кривая 1 — лед-50; 2 — снег-50 ( $W = 7\%$ ); 3 — снег-50 ( $W = 1\%$ )

На рис. 3 и 4 приведены результаты расчетов по теории Ми спектральных коэффициентов ослабления  $\sigma_a$  для различных форм облаков, дождей, снега и льда.

Видно, что ослабление облаками на два порядка меньше, чем осадками, причем облака, в основном, поглощают миллиметровое излучение, т.к. вероятность выживания кванта  $\omega_0$  (см. рис. 5) очень мала  $\left(\omega_0 = \frac{\sigma_a^p}{\sigma_a}\right)$ , где  $\sigma_a^p$  — спектральный коэффициент рассеяния). Абсолютные значения  $\sigma_a$  для обла-

ков составляют порядка  $10^{-2} \text{ км}^{-1}$ , что соответствует дальности видимости  $V \left(V = \frac{3,91}{\sigma_a}\right)$  более

100 км. Дожди (в зависимости от размера частиц) имеют дальность видимости порядка  $(1 \div 0,5) \text{ км}$ , что соответствует в видимой области легкому туману с достаточно сильным поглощением (см.  $\omega_0$  на рис. 5). С увеличением длины волны  $\lambda > 5 \text{ мм}$  наблюдается резкое уменьшение  $\sigma_a$  для всех моделей дождя. На рис. 4 приведены значения  $\sigma_a$  для самой крупной фракции распределения частиц по размерам. Видно, что хотя  $\sigma_a$  льда для  $\lambda < 2 \text{ мм}$  больше, чем  $\sigma_a$  воды (рис. 3), однако  $\sigma_a$  льда и снега резко уменьшаются уже при  $\lambda > 2 \text{ мм}$ , причем  $\omega_0$  снега значительно выше  $\omega_0$  дождя для  $\lambda < 3 \text{ мм}$  и меньше для  $\lambda > 3 \text{ мм}$ . Из-за малых значений  $\kappa_1$  вероятность выживания кванта для льда практически равна единице, что приводит к чистому рассеянию миллиметровых волн в ледяных облаках или граде.

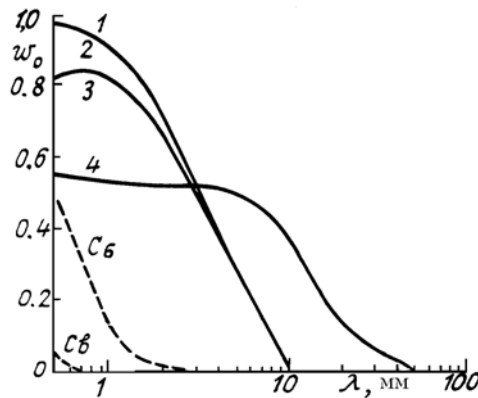


Рис. 5. Спектральная зависимость вероятности выживания кванта: кривая 1 — лед-50; 2 — снег-50 ( $W = 1\%$ ); 3 — снег-50 ( $W = 7\%$ ); 4 — дождь-50

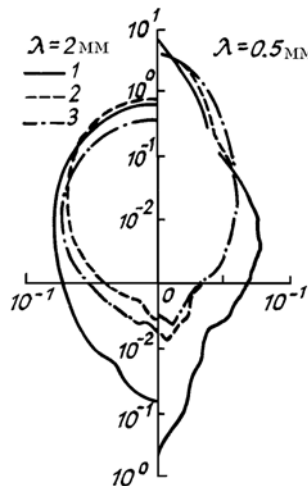


Рис. 6. Индикатрисы рассеяния для двух длин волн: кривая 1 — дождь-4; 2 — дождь-10; 3 — дождь-50

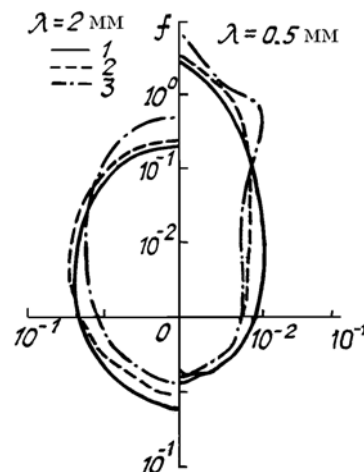


Рис. 7. Индикатрисы рассеяния для двух длин волн: кривая 1 — лед-50; 2 — снег-50 ( $W = 7\%$ ); 3 — снег-10 ( $W = 7\%$ )

Другой важной характеристикой рассеяния света частицами является индикатриса рассеяния  $f$ , описывающая угловое распределение рассеянного излучения. На рис. 6 и 7 приведены некоторые значения индикатрисы рассеяния для  $\lambda = 0,5$  и  $2 \text{ мм}$  с нормировкой

$$\int_{\Omega} f(Q) d\Omega = \omega_0, \quad (6)$$

где интегрирование выполняется, по всей сфере. Учитывая, что для сферических частиц  $f(Q)$  не зависит от азимутального угла и симметрична относительно  $Q$ , на рис. 6 и 7 приведены  $f(Q)$  для обла-

ти углов рассеяния от  $0^\circ$  (вверх) до  $180^\circ$  (вниз). Из рис. 6 видно, что наиболее вытянутую вперед индикатрису рассеяния имеет наиболее крупная фракция частиц, хотя более мелкие фракции дают большой вклад в рассеяние назад. На рис. 7 аналогичная картина наблюдается для моделей Снег-10 и Снег-50, причем в области углов рассеяния  $Q \sim 160-170^\circ$  наблюдается максимум рассеяния (более четко заметный для  $\lambda = 0,5$  мм), обусловленный глорией. Существенное отличие в области обратного рассеяния наблюдается для частиц льда: индикатриса рассеяния увеличивается более чем на порядок по сравнению с моделями дождя и снега.

Особое влияние на форму индикатрисы рассеяния оказывает форма частиц [13], хотя результаты расчета, приведенные в [9], при небольшом отклонении формы частиц от сферической показывают, что коэффициенты ослабления и индикатриса рассеяния мало отличаются от аналогичных величин для сферических частиц.

1. Кондратьев К. Я., Мелентьев В. В. Космическая дистанционная индикация облаков и влагосодержания атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 263 с.
2. Электромагнитные волны в атмосфере и космическом пространстве. М.: Наука, 1986. 272 с.
3. Жевакин С. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1978. Т. 21. № 8. С. 1122–1131.
4. Косцов В. С., Тимофеев Ю. М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31. № 5. С. 519–327.
5. Жевакин С. А., Наумов А. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 1966. Т. 9. С. 433–450.
6. Жевакин С. А., Наумов А. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 1967. Т. 10. № 9. С. 1213–1243.
7. Соколов А. В., Сухонин Е. В. Ослабление миллиметровых волн в толще атмосферы. М.: ВИНТИ «Радиотехника». 1980. Т. 20. С. 109–205.
8. Розенберг В. И. Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами. Л.: Гидрометеоздат, 1972. 348 с.
9. Огути Т. // ТИИЭР. 1983. Т. 71. № 9. С. 6–65.
10. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.
11. Ray P. S. // Appl. Opt. 1972. V. 11. № 8. P. 1836–1844.
12. Sadiku M. N. O. // Appl. Opt. 1985. V. 24. № 4. P. 572–575.
13. Mugnai A., Wiscombe W. J. // J. Atmos. Sci. 1980. V. 37. № 6. P. 11291.
14. Hasted J. B., Husain S. K., Frescura F. A. M., Birch J. R. // Infrared Phys. 1987. V. 27. № 1. P. 11.

Государственный институт прикладной оптики,  
Казань

Поступила в редакцию  
14 августа 1991 г.

V. F. Terzi, A. G. Konyukhov, F. S. Yakupova, L. V. Kurt. **Extinction and Scattering of Millimeter Waves by Cloud and Precipitation Particles.**

This paper is devoted to computer simulations of the optical characteristics (spectral values of the extinction coefficient, scattering coefficient and scattering matrix) of different polydisperse systems of spherical particles relevant to represent various forms of clouds and precipitation (rains, snow, hail) in the spectral region from 0,5 to 10 mm. The calculations are made using the Mie theory formulas [8, 10]. The microstructure parameters and optical constants of the particulate matter are used as the input parameters for simulations.