

Л.С. Ивлев, О.М. Коростина, А. Лейва, А. Мулья

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЗЕМНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В РАЙОНЕ г. МЕХИКО ДЛЯ СУХОГО И ВЛАЖНОГО СЕЗОНОВ ГОДА

Проведены модельные расчеты оптических характеристик рассеяния света в приземном слое в районе г. Мехико для сухого и влажного сезонов года для видимой области спектра. Результаты численного моделирования свидетельствуют о важности учета не только изменения спектров размеров частиц, но и их микроструктуры – несферичности и неоднородности состава, в особенности последней характеристики.

На базе имеющихся данных о микроструктуре аэрозолей в приземном слое в районе г. Мехико для сухого и влажного сезонов года была предпринята попытка построить полные модели структуры аэрозолей, годные для расчетов их оптических характеристик.

Основной массив данных получен с помощью электростатического спектрометра аэрозольных частиц (TSI-2000). Дополнительно использовались данные электронно-микроскопического анализа, позволяющие сделать некоторые выводы о происхождении частиц и их форме. К сожалению, при построении предлагаемых моделей не использовались данные фотоэлектрического счетчика АЗ-5, с помощью которого измерения начались в конце 1991 г.

Функции распределения частиц по размерам  $f(R)$  для соответствующих периодов представлены на рис. 1, а, б. В диапазоне размеров 0,003–0,3 мкм используются осредненные табличные данные для сухого и влажного периодов, полученные по результатам экспериментальных измерений электростатическим счетчиком. Для проведения расчетов по этим данным проводилось их сглаживание (кривые вместо гистограммы) и экстраполяция на диапазон размеров 0,3–10 мкм. В рассматриваемом варианте экстраполяция осуществлялась по закону  $f(R) = AR^{-4}$ , причем для сухого периода  $A = 0,613186$ , а для влажного  $A = 0,471033$ , где  $R$  – радиус однородных сферических частиц.

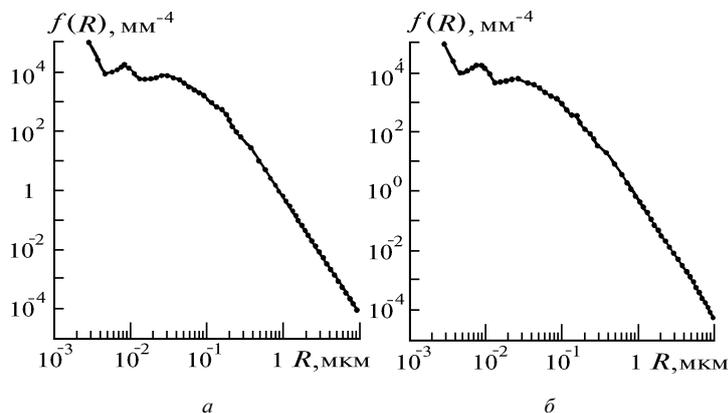


Рис. 1. Модельные функции распределения частиц по размерам  $f(R)$  для влажного (а) и сухого (б) сезонов года в районе г. Мехико для видимой области спектра

Расчеты оптических характеристик проводились для диапазона длин волн  $\lambda = 0,35$ – $1,0$  мкм с шагом 0,05 мкм.

В частности, нами исследовалось влияние неоднородности и несферичности рассеивающих частиц на следующие оптические характеристики: коэффициенты ослабления, рассеяния, поглощения, обратного рассеяния ( $K_{ext}$ ,  $K_{sca}$ ,  $K_{abs}$ ,  $K_{back}$ ), индикатриса рассеяния  $I(\Theta)$ , коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния

$$\gamma = \int_0^{\pi/2} I(\Theta) \sin\Theta \, d\Theta / \int_{\pi/2}^{\pi} I(\Theta) \sin\Theta \, d\Theta,$$

степень линейной поляризации

$$Pol = [I_{\perp}(\Theta) - I_{\parallel}(\Theta)] / [I_{\perp}(\Theta) + I_{\parallel}(\Theta)].$$

Для влажного периода были рассмотрены модели: I – для изучения влияния двухслойности (неоднородности микроструктуры) и II – для изучения влияния несферичности частиц.

В модели I представлена смесь однородных и двухслойных частиц в разных диапазонах размеров (в мкм):

- I.1. 0,003–0,01–однородные сферы,  
0,01–10–двухслойные сферы с радиусом ядра  $r=R-d$ , где  $d=0,001$  мкм,  $d$ –постоянная толщина оболочки.
- I.2. 0,003–0,01–однородные сферы,  
0,01–10–двухслойные сферы с  $d=0,002$  мкм.
- I.3. 0,003–0,01–однородные сферы,  
0,01–0,05–двухслойные сферы с  $d_1=0,001$  мкм,  
0,05–10–двухслойные сферы с  $d_2=0,01$  мкм.
- I.4. 0,003–0,01–однородные сферы,  
0,01–0,05–двухслойные сферы с  $d_1=0,002$  мкм,  
0,05–10–двухслойные сферы с  $d_2=0,01$  мкм.

Проводились сравнения расчетов оптических характеристик по этим моделям с расчетами для модели однородных сфер. При этом показатель преломления однородных сфер  $\tilde{m}$  брался равным  $\tilde{m} = (1,47 - i \cdot 0,003)$  (см. [1–3]), а для двухслойных сфер показатель преломления вещества ядра  $m_{\text{ядра}} = (1,66 - i \cdot 0,005)$ , что соответствует модельному показателю преломления для почвенных аэрозолей, а  $m_{\text{обол}} = (1,33 - i \cdot 0,00)$  соответствует показателю преломления воды.

Модель II использовалась для изучения влияния несферичности на оптические характеристики рассеяния. Бралась смесь однородных сфер и цилиндров, примерно соответствующая результатам электронно-микроскопического анализа проб. Оптические характеристики рассеяния на цилиндрах рассчитывались по формулам рассеяния света на бесконечных цилиндрах, так как при отношении длины цилиндра к его радиусу  $l/r > 5$  бесконечные цилиндры можно рассматривать как цилиндры конечных размеров.

Радиус цилиндра вычислялся из равенства объемов цилиндра и сферы:  $V_{\text{цил}} = V_{\text{сф}}$ ;  $l/r = 5, 10$ . Рассматривались цилиндры различной ориентации относительно падающего излучения ( $\alpha = 0^\circ, \alpha = 89^\circ$ ), где  $\alpha$ –угол между направлением излучения и перпендикуляром к оси цилиндра.

Для влажного периода рассматривалась смесь сферических и цилиндрических частиц:  $0,003 \leq R \leq 0,1$  – однородные сферы составляют 100% частиц,  $0,1 < R \leq 10$  мкм – однородные сферы составляют 95% частиц, цилиндры – 5%. Показатель преломления цилиндров  $m_{\text{цил}} = (1,65 - i \cdot 0,005)$ , показатель преломления сфер  $m_{\text{сф}} = (1,47 - i \cdot 0,003)$ .

Для сухого периода рассматривалась модель III: смесь однородных сфер с показателями преломления  $m_1 = (1,55 - i \cdot 0,003)$  и сажи  $m_2(\lambda)$ , представленными в табл. I.

В модели III принято следующее распределение частиц по составу:  $R=0,003-0,1$  мкм – 10% сажевые частицы с  $\tilde{m} = m_2$  и 90% частиц с  $\tilde{m} = m_1$ ;  $R = 0,1 - 10$  мкм – 100% частиц с  $\tilde{m} = m_1$ .

Результаты расчетов представлены в таблицах и на рисунках. В табл. 2 представлены относительные погрешности коэффициентов рассеяния  $\delta^i = (K_{\text{смеси}}^i - K_{\text{одн}}^i) / K_{\text{одн}}^i$  для моделей I.1–I.4 на длинах волн  $\lambda = 0,35; 0,55$  и  $1,0$  мкм.

Из данных табл. 2 следует, что появление двухслойных частиц, т.е. изменение их внутренней структуры, ведет к резкому увеличению относительной погрешности коэффициентов поглощения и обратного рассеяния и экспериментально значимо для этих коэффициентов.

Таблица 1

$\lambda$ , мкм	$m_2$
0,35	1,80 - $i$ 0,74
0,40	1,80 - $i$ 0,74
0,45	1,81 - $i$ 0,74
0,50	1,82 - $i$ 0,74
0,55	1,83 - $i$ 0,74
0,60	1,84 - $i$ 0,74
0,65	1,84 - $i$ 0,73
0,70	1,85 - $i$ 0,72
0,75	1,85 - $i$ 0,71
0,80	1,86 - $i$ 0,70
0,85	1,87 - $i$ 0,69
0,90	1,88 - $i$ 0,69
0,95	1,89 - $i$ 0,68
1,00	1,90 - $i$ 0,68

Таблица 2

Погрешность	Модель											
	I 1			I 2			I 3			I 4		
	$\lambda$ , мкм											
	0,35	0,55	1	0,35	0,55	1	0,35	0,55	1	0,35	0,55	1
$\delta_{\text{ext}}$	14,58	25,6	28,5	13,9	24,5	27,9	8,90	18,7	22,7	8,85	18,7	22,7
$\delta_{\text{sca}}$	12,55	23,9	27,0	11,4	23,1	26,3	6,90	17,1	21,2	6,94	17,1	21,2
$\delta_{\text{abs}}$	64,40	72,3	77,0	63,1	71,9	76,1	55,9	63,4	67,5	55,8	63,4	67,5
$\delta_{\text{back}}$	270	284	299	266	282	297	269	192,8	244	244	269	192,8

На рис. 2, *a* представлены индикатрисы рассеяния  $I(\Theta) = I(\Theta)/I(0^\circ)$  для модели однородных частиц (кривая 1) и смеси однородных и двухслойных частиц модели I.1–I.4 (кривые 2, 3, 4) для  $\lambda = 0,55$  мкм.

Анализ графиков позволяет сделать вывод, что влияние двухслойности частиц сказывается уже при  $\Theta > 40^\circ$ : меняется форма индикатрисы рассеяния, в области  $\Theta = 130^\circ$  отношение  $I_{\text{смеси}}/I_{\text{одн}} = 2$  и при  $\Theta = 180^\circ I_{\text{смеси}}/I_{\text{одн}} = 4$ .

На рис. 2, *б* представлены степень линейной поляризации  $\text{Pol}(\Theta)$  для однородной модели (кривая 1) и смеси однородных и двухслойных частиц модели I.1–I.4 (кривые 2, 3, 4).

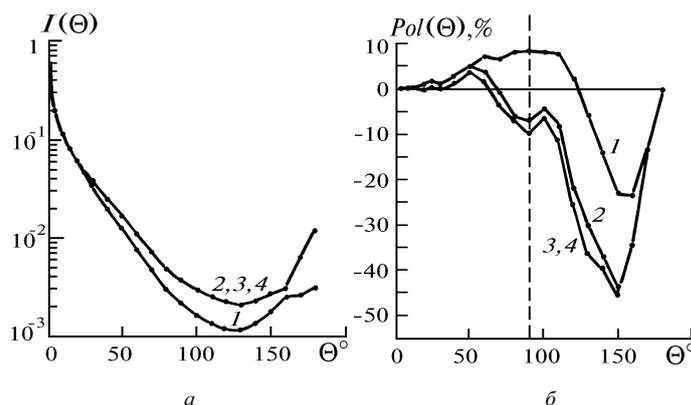


Рис. 2. Угловые характеристики рассеяния света для влажного сезона в районе г.Мехико для  $\lambda = 0,55$  мкм: *a*–индикатрисы рассеяния  $I(\Theta)$ , *б*–степень линейной поляризации  $\text{Pol}(\Theta)$  % (кривая 1–модель однородных сфер, 2, 3, 4– модели I.1 – I.4)

Влияние неоднородности частиц на степень линейной поляризации очень существенно: меняется форма кривых, отмечается сильное смещение минимума влево, появление дополнительных максимумов и минимумов.

В табл. 3 представлен коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния  $\gamma$  для модели однородных сфер и смеси.

Таблица 3

$\lambda$ , мкм	Однородная модель	Смесь
0,35	1,42	1,11
0,40	1,27	0,98
0,45	1,10	0,89
0,50	1,13	0,83
0,55	1,09	0,79
0,60	1,07	0,76
0,65	1,05	0,75
0,70	1,03	0,73
0,75	1,04	0,71
0,80	1,035	0,70
0,85	1,03	0,70
0,90	1,03	0,70
0,95	1,04	0,71
1,00	1,006	0,703

Двухслойная микроструктура сферических частиц ведет к изменению коэффициента вытянутости индикатрисы в 0,8–0,6 раза. Следовательно, можно сделать вывод, что возникновение двухслойности частиц (в частности, их обводнение) существенно изменяет оптические характеристики рассеяния. Причем изменение формы индикатрисы рассеяния, сдвиг минимума  $\rho_{01}$  могут быть хорошей индикацией появления обводненных аэрозольных частиц.

Наличие в атмосфере г. Мехико несферических частиц в тех процентных соотношениях, которые были обнаружены экспериментально, существенных изменений на оптические свойства приземных аэрозолей не вносит.

Анализ данных модельных расчетов для сухого периода (модель III) показывает, что добавка 10% сажи в диапазоне размеров  $0,003 \leq R \leq 0,1$  приводит лишь к изменению коэффициентов поглощения на 19–25% (относительная погрешность  $\delta$ ), угловые характеристики рассеяния при этом практически не изменились.

Из результатов сравнения оптических характеристик рассеяния влажного и сухого периодов (сравнение полидисперсных систем однородных сфер) можно отметить увеличение коэффициентов рассеяния в сухой период.

Эти выводы иллюстрируются табл. 4 и рис. 3, а, б, в которых представлены значения  $K(\lambda)$  для сухого и влажного периодов, а также индикатрисы рассеяния и степень линейной поляризации полидисперсных систем однородных сферических частиц для сухого и влажного периодов в диапазоне  $0,003 \leq R \leq 10$  мкм.

Таблица 4

$\lambda$	$K_{ext} \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}$		$K_{abs} \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}$		$K_{back} \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-1}$	
	Период					
	сухой	влажный	сухой	влажный	сухой	влажный
0,35	52,2	32,3	1,84	1,26	35,0	10,20
0,40	49,1	30,1	1,66	1,11	32,5	7,60
0,45	45,8	28,1	1,48	1,02	22,8	8,60
0,50	42,8	26,1	1,35	1,93	22,7	8,30
0,55	39,3	24,1	1,23	1,86	21,3	7,60
0,60	36,3	22,7	1,12	1,79	18,6	6,90
0,65	34,1	21,3	1,03	1,74	16,8	7,10
0,70	31,7	20,1	0,98	0,68	15,9	6,20
0,75	29,9	19,1	0,91	0,64	15,2	6,10
0,80	28,2	18,1	0,84	0,60	13,7	5,60
0,85	26,7	17,1	0,82	0,56	14,5	5,10
0,90	25,2	16,1	0,77	0,53	13,5	5,03
0,95	23,8	15,4	0,71	0,51	11,2	5,50

Сравнение расчетных данных по коэффициентам ослабления, поглощения и обратного рассеяния с известными данными по этим характеристикам для городской атмосферы [2,3] показы-

вадет сильно заниженные значения этих характеристик по данным электростатического счетчика. Очевидны возможные причины этого занижения значений коэффициентов: 1) неверная экстраполяция данных в область крупных частиц, 2) высокая чистота воздуха в районе измерений.

Выше уже отмечалось, что для проведенных расчетов не использовались данные фотоэлектрического счетчика, так как измерения с его помощью проводились только начиная с конца 1991 г.

Отметим, что, действительно, в области гигантских частиц ( $R > 1,0$  мкм) наблюдается завышение концентрации частиц по сравнению с экстраполяцией согласно формуле Юнге  $f(R) = AR^{-4}$ . Это существенно сказывается на реальных значениях аэрозольных коэффициентов ослабления и рассеяния. Такого рода исследования предполагается провести с учетом данных, полученных в 1992–1993 г. Кроме того, необходимо подчеркнуть, что район измерений находится на окраине г. Мехико в наиболее чистой зоне (университетский городок) и измерения проводились в особо чистые дни.

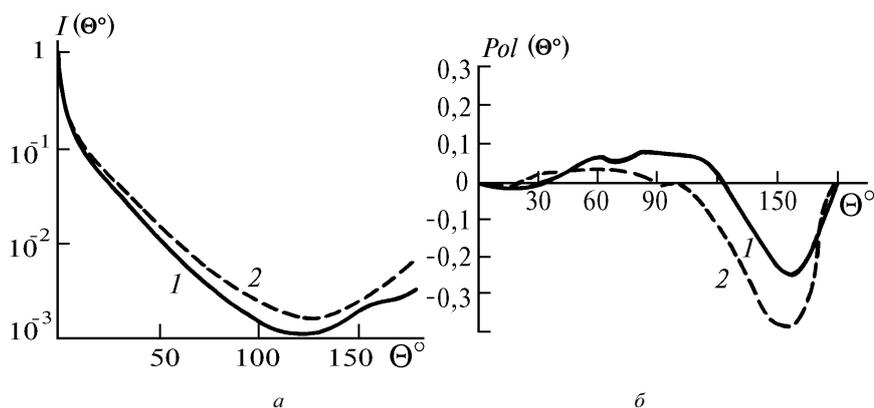


Рис. 3. Угловые характеристики рассеяния света для влажного (кривая 1) и сухого (кривая 2) сезонов года в районе г. Мехико для  $\lambda = 0,55$  мкм: а – индикатрисы рассеяния  $I(\Theta)$ , б – степень линейной поляризации  $Pol(\Theta)$

Настоящие результаты численного моделирования оптических характеристик атмосферных аэрозолей г. Мехико для сухого и влажного периодов свидетельствуют о важности учета не только изменения спектров размеров частиц, но и их микроструктуры – несферичности и неоднородности состава, в особенности последней характеристики.

Для моделирования оптических характеристик аэрозолей г. Мехико требуется проведение более полного комплекса исследований их микроструктурных и оптических свойств.

Авторы выражают благодарность Х. Луису Браво за обработку данных распределения частиц по размерам для сухого и влажного сезонов г. Мехико.

1. Ивлев Л.С., Андреев С., Д. Оптические свойства атмосферных аэрозолей. Л.:ЛГУ, 1986. 358 с.
2. Кондратьев К.Л., Москаленко Н.И., Поздняков Д.В. Атмосферный аэрозоль. Л.:Гидрометеиздат, 1983. 224 с.
3. Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.:Гидрометеиздат, 1986. 256 с.

Ленинградский госуниверситет

Поступила в редакцию  
22 октября 1992 г.

L. S. Ivlev, O. M. Korostina, A. Leiva, A. Moulia. **Modeling of Optical Characteristics of Near Ground Aerosol in City of Mexico During Dry and Moist Seasons.**

Model calculations of scattering properties of the ground atmospheric layer in the region of city of Mexico during dry and moist seasons have been carried out for visible region. The results of numerical simulations have shown the importance of correct account for variations not only in the particle size spectrum but in their microstructure (i.e. nonsphericity and especially inhomogeneities of chemical composition).