

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ. ОБРАБОТКА  
ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 551.521

Л.С. Ивлев, К.Я. Кондратьев, О.М. Коростина

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАЧНЫХ ЧАСТИЦ  
СЛОЖНОГО СОСТАВА

Изложены результаты численного моделирования оптических характеристик рассеяния полидисперсных систем однородных и двухслойных сферических частиц, представляющих набор мод, соответствующих частицам разного происхождения. Определены зависимости характеристик от внутренней структуры и размеров частиц, содержащих загрязняющие вещества, в первую очередь сажу.

При исследовании облачных образований экспериментально показано, что в жидких облачных элементах, кроме воды, находятся различные вещества, как в растворенном, так и в твердом состоянии. Однако для нерастворенного вещества капля неясно его распределение внутри капли или во внешней оболочке. В некоторых случаях обнаруживаются оболочка из твердого вещества, а также капли, покрытые смолообразным веществом, слоистые ледяные частицы. В то же время часть мелкодисперсных частиц существует достаточно длительное время внутри облака, не сливаясь с каплями.

Поскольку классифицировать различные типы распределения диспергированного вещества в облаках по данным наблюдений технически сложно, важное значение приобретает численное моделирование оптических характеристик, что, в частности, может представлять интерес и для обоснования возможных методик оптической идентификации микроструктуры облаков и других аэрозольных образований.

Оптические свойства малых частиц определяются в первую очередь их оболочкой. Поэтому вполне адекватны модели сферических частиц, которые могут быть описаны с учетом нескольких основных типов частиц; однородные и многослойные сферы, сферы с вкраплениями сильно поглощающих радиацию микрочастиц, смесь частиц с разными оптическими константами.

Третий упомянутый тип аэрозоля может быть сведен приближенно к первому с более высокой мнимой частью комплексного показателя преломления, чем у основного вещества сферы с вкраплениями. Многослойные сферы приближенно можно аппроксимировать двухслойными, что следует, например, из работ А.П. Пришивалко и др. [1–3].

Вообще говоря, правомерность замены частицы-конгломерата из микрочастиц с разным комплексным показателем преломления требует проверки. Однако имеющиеся результаты [4–5] позволяют считать это предположение справедливым с достаточно высокой степенью точности. Отсюда следует, что для весьма больших значений относительной влажности (для большинства частиц до  $f \approx 90–95\%$  и лишь для отдельных случаев до  $f \approx 75–80\%$ ) предположение о применимости модели равномерного смешения воды с другими соединениями, входящими в состав вещества частиц, является правомерным.

Обратимся теперь к обсуждению результатов численного моделирования влияния неоднородности частиц на оптические характеристики аэрозоля для полидисперсных моделей *A* и *B*, состоящих из нескольких мод (фракций). Все моды описываются одинакового вида функцией распределения частиц по размерам:

$$dN_i/dr = N_{0i}r^{-6}e^{-6r_{0i}/r}, \quad (1)$$

где  $N_{0i}$  — счетная концентрация,  $r_{0i}$  — модальный радиус, которые соответствуют следующим модам.

Мода I. Ядра конденсации — свежеевозникающие частицы конденсационного происхождения:  $r_{01} = 0,026$  мкм,  $r_{\min} = 0,0026$  мкм,  $r_{\max} = 0,13$  мкм,  $N_{01} = 10^4$ .

Мода II. Очень старые частицы:  $r_{02} = 0,14$  мкм,  $r_{\min} = 0,014$  мкм,  $r_{\max} = 0,7$  мкм,  $N_{02} = 10^3$ .

Мода III. Продукты химических и фотохимических реакций в загрязненной атмосфере:  $r_{03} = 0,22$  мкм,  $r_{\min} = 0,022$  мкм,  $r_{\max} = 1,1$  мкм,  $N_{03} = 10^2$ .

Мода IV.  $r_{04} = 0,45$  мкм,  $r_{\min} = 0,045$  мкм,  $r_{\max} = 2,25$  мкм,  $N_{04} = 10^1$ .

Мода V: Дисперсионные частицы эрозионного происхождения:  $r_{05} = 2$  мкм,  $r_{\min} = 0,2$  мкм,  $r_{\max} = 10$  мкм,  $N_{05} = 10^0 = 1$ .

Таблица 1

«Эффективный» комплексный показатель преломления  $\tilde{m} = (\tilde{n} - i \cdot \tilde{\kappa})$  для модели A

$\lambda$ , мкм	Моды									
	1		2		3		4		5	
	$\tilde{n}$	$\tilde{\kappa}$	$\tilde{n}$	$\tilde{\kappa}$	$\tilde{n}$	$\tilde{\kappa}$	$\tilde{n}$	$\tilde{\kappa}$	$\tilde{n}$	$\tilde{\kappa}$
0,32	1,486	0,075	1,52	0,075	1,538	0,05	1,538	0,0226	1,556	0,0091
0,40	1,47	0,075	1,52	0,075	1,53	0,05	1,53	0,021	1,54	0,007
0,55	1,47	0,0745	1,52	0,07475	1,53	0,05	1,53	0,021	1,53975	0,00375
0,65	1,47	0,0735	1,52	0,07425	1,53	0,05	1,53	0,021	1,53925	0,00325
1,03	1,4739	0,06961	1,54871	0,071129	1,5439	0,04761	1,54	0,02061	1,53761	0,003
1,40	1,48	0,0684	1,566	0,0694	1,556	0,047	1,546	0,01866	1,535	0,003
2,40	1,48	0,0745	1,5375	0,0735	1,5225	0,04835	1,51	0,02675	1,5005	0,00675

Таблица 2

Отношение эффективностей поглощения  $\sigma_{\text{abs}}(\text{двухсл.})/\sigma_{\text{abs}}(\text{однородн.})$ .

Модель A: однородная частица  $m = \tilde{m} = (\tilde{n} - i \cdot \tilde{\kappa})$ , двухслойная – сажевая оболочка, ядро –  $\tilde{m}$  без поглощения  $\tilde{m} = (\tilde{n} - i \cdot \tilde{\kappa})$  для модели A

$\lambda$ , мкм	Моды														
	1			2			3			4			5		
	Сажа, %														
	10	1	10	1	10	1	10	1	0,1	10	1	0,1			
0,32	0,86	0,1	0,74	0,16	0,81	0,21	0,97	0,34	0,05	0,97	0,6	0,13			
0,4	0,87	0,1	0,75	0,14	0,84	0,2	1,04	0,34	0,05	1,12	0,65	0,14			
0,55	0,89	0,1	0,77	0,13	0,89	0,18	1,16	0,34	0,045	1,74	0,89	0,17			
0,65	0,9	0,1	0,79	0,12	0,92	0,17	1,22	0,33	0,044	2,09	0,92	0,186			
1,03	0,92	0,1	0,82	0,1	1,02	0,15	1,46	0,31	0,037	2,86	1,14	0,182			
1,4	0,93	0,1	0,84	0,1	1,09	0,15	1,79	0,33	0,037	3,39	1,21	0,187			
2,4	0,89	0,1	0,87	0,1	1,23	0,14	1,77	0,25	0,027	2,46	0,74	0,100			

Таблица 3

Отношение эффективностей поглощения  $\sigma_{\text{abs}}(\text{двухсл.})/\sigma_{\text{abs}}(\text{однородн.})$ .

Модель B: двухслойная – вода + сажа (10; 1; 0,1%), однородная – сажа

$\lambda$ , мкм	Моды														
	1			2			3			4			5		
	Сажа, %														
	10	1	10	1	10	1	10	1	0,1	10	1	0,1			
0,32	0,17	0,016	0,6	0,12	0,7	0,19	0,85	0,32	0,05	0,98	0,64	0,15			
0,4	0,15	0,016	0,52	0,09	0,66	0,15	0,81	0,28	0,04	0,98	0,61	0,13			
0,55	0,14	0,014	0,42	0,06	0,57	0,11	0,75	0,22	0,03	0,97	0,53	0,11			
0,65	0,14	0,014	0,37	0,05	0,51	0,09	0,71	0,19	0,02	0,95	0,49	0,09			
1,03	0,15	0,015	0,25	0,03	0,36	0,05	0,58	0,12	0,013	0,88	0,38	0,06			
1,4	0,16	0,018	0,2	0,02	0,28	0,03	0,48	0,09	0,017	0,83	0,35	0,095			
2,4	0,19	0,02	0,16	0,02	0,2	0,02	0,34	0,05	0,01	0,78	0,26	0,06			

Полидисперсные системы аэрозольных частиц были представлены однородными и двухслойными сферами, причем по массе оболочка составляла 0,1; 1 и 10% от массы всей сферы. Варьировались комплексные показатели преломления вещества оболочки и ядра.

В качестве модели A в случае однородных частиц использовалась модель атмосферных аэрозолей [6] с «эффективными» комплексными показателями преломления вещества частиц  $\tilde{m} = (\tilde{n} - i\tilde{\kappa})$  для разных мод, заданных в предположении равномерности распределения вещества разного происхождения, причем поглощение  $\tilde{\kappa}$  обусловлено присутствием сажевого материала. В табл. 1 представлены значения  $\tilde{n}$  и  $\tilde{\kappa}$ . В случае двухслойных частиц ядро состоит из вещества модельных аэрозолей без поглощения  $\tilde{m}_y = (\tilde{n} - i0)$ , оболочка – сажа с комплексным показателем преломления  $m_{об} = (n - i\kappa)$ . Модель B описывает систему однородных водяных капель или сажевых частиц и двухслойных частиц, покрытых сажевой оболочкой.

Рассматривались энергетические (коэффициент ослабления  $\sigma_{\text{ext}}$ , рассеяния  $\sigma_{\text{sc}}$ , поглощения  $\sigma_{\text{abs}}$ ) и угловые характеристики: индикатриса рассеяния  $I(\Theta)$ , коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния  $G$ , степень линейной поляризации  $P(\Theta)$  (см. табл. 2–5).

Таблица 4

Степень вытянутости индикатрисы Г.  
 Модель А: двухслойная –  $\tilde{m}$  (без поглощения) + сажа (10; 1; 0,1%), однородная –  $\tilde{m}$

$\lambda$ , мкм	Моды																
	1		2			3			4			5					
	одно- род- ная	двухслой- ная	одно- род- ная	двухслой- ная	од- норо- дная	двухслойная	одно- родная	двухслойная	одно- родная	двухслойная	одно- родная	двухслойная	одно- родная	двухслойная	одно- родная	двухслойная	одно- родная
	10 %	1 %		10 %	1 %		10 %	1 %		10 %	1 %	0,1 %		10 %	1 %	0,1 %	
0,32	0,37	0,38	0,36	2,20	1,80	1,30	2,97	2,37	1,50	4,51	4,07	2,30	1,90	50,0	58,3	17,9	—
0,4	0,28	0,28	0,28	1,80	1,50	1,20	2,31	2,04	1,38	3,35	3,49	2,05	1,74	0	25,9	11,7	7,7
0,55	0,19	0,19	1,19	1,30	1,20	1,02	1,73	1,65	1,24	2,35	2,71	1,68	1,48	21,8	13,8	6,4	4,5
0,65	0,16	0,16	0,16	1,15	1,11	0,98	1,50	1,47	1,15	2,01	2,38	1,53	1,37	0	10,2	4,8	3,6
1,03	0,12	0,12	0,12	0,72	0,73	0,69	1,03	1,03	0,92	1,44	1,68	1,24	1,16	7,02	5,2	2,8	2,3
1,4	0,11	0,11	0,11	0,48	0,49	0,47	0,81	0,93	0,78	1,17	1,35	1,08	1,04	4,90	3,9	2,3	1,9
2,4	0,10	0,10	0,11	0,25	0,25	0,25	0,43	0,45	0,43	0,98	1,02	0,95	0,93	2,70	2,7	1,7	1,5
														2,10			
														1,80			

Таблица 5

Степень вытянутости индикатрисы Г.  
 Модель В: двухслойная – вода + сажа (10; 1; 0,1%), однородная вода, однородная сажа

$\lambda$ , мкм	Моды																					
	1		2			3			4			5										
	Однород- ная	Двухслой- ная	Однород- ная	Двухслой- ная	Однород- ная	Двухслой- ная	Однород- ная	Двухслойная	Однород- ная	Двухслойная	Однород- ная	Двухслойная	Однород- ная	Двухслойная	Однород- ная	Двухслойная	Однород- ная					
	H <sub>2</sub> O	сажа	10%	1%	H <sub>2</sub> O	сажа	10%	1%	H <sub>2</sub> O	сажа	10%	1%	H <sub>2</sub> O	сажа	10%	1%	0,1%	H <sub>2</sub> O	сажа	10%	1%	0,1%
0,32	0,36	0,31	0,38	0,37	2,13	3,00	2,80	2,30	2,20	4,60	3,40	2,50	2,43	6,35	4,36	3,06	2,53	14,40	38,6	38,4	22,90	16,40
0,40	0,27	0,25	0,28	0,27	2,06	2,30	2,50	2,20	2,22	3,84	3,10	2,46	2,27	5,87	3,88	2,76	2,33	13,20	20,6	26,8	15,60	18,20
0,55	0,18	0,18	0,19	0,18	1,82	1,44	1,99	1,87	2,15	2,69	2,68	2,29	2,23	5,04	3,49	2,59	2,27	5,89	15,3	13,9	8,82	6,46
0,65	0,15	0,16	0,16	0,15	1,60	1,13	1,70	1,63	2,11	2,15	2,46	2,22	2,29	4,56	3,37	2,60	2,33	4,80	11,9	10,4	6,87	5,17
1,03	0,12	0,13	0,12	0,12	0,83	0,58	0,89	0,85	1,59	1,10	1,69	1,63	2,26	2,99	2,82	2,43	2,28	3,07	7,5	5,53	4,01	3,22
1,40	0,11	0,11	0,12	0,11	0,50	0,40	0,54	0,51	1,06	0,70	1,12	1,08	2,18	1,98	2,41	2,27	2,19	2,62	6,3	4,2	3,23	2,71
2,40	0,11	0,11	0,11	0,11	0,23	0,22	0,25	0,23	0,44	0,35	0,48	0,44	1,48	0,88	1,53	1,51	1,48	—	4,91	3,9	3,66	3,22

Анализ результатов вычислений свидетельствует о том, что для коэффициентов ослабления  $\sigma_{\text{ext}}$  эффекты неоднородности структуры частиц (двухслойности) в случае модели А оказываются на уровне погрешностей измерений. Так, например, даже для очень крупных частиц относительная погрешность  $\sigma_{\text{ext}}$  составляет 0,1–2%.

В случае модели В замена двухслойных водно-сажевых частиц на однородные водные или сажевые частицы приводит к большим изменениям и лишь для крупных частиц с сажевой оболочкой, составляющей 1 и 10% по массе, можно пренебречь влиянием водяного ядра и рассматривать их как чисто сажевые частицы. Следует отметить, что в случае ослабления двухслойность сказывается сильнее для мелких частиц.

Влияние неоднородности частиц наиболее значительно сказывается на характеристиках поглощения. В качестве критерия подобного влияния было рассмотрено отношение коэффициентов поглощения для моделей двухслойных и однородных частиц (см. табл. 2, 3):  $K_{\text{п}} = \sigma_{\text{abs}}(\text{двухсл.})/\sigma_{\text{abs}}(\text{однородн.})$ .

Для модели А в случае тонких оболочек при замене двухслойных частиц на однородные с «эффективным» комплексным показателем наблюдается значительное уменьшение величины  $K_{\text{п}}$  до 0,03–0,2. В случае толстых оболочек (10% сажи) для мелкодисперсной фракции изменение  $K_{\text{п}}$  незначительно (~ 0,8–1,2), а для крупнодисперсной фракции  $K_{\text{п}}$  становится больше единицы. Так, например, при  $\lambda = 1,4$  мкм для моды V значение  $K_{\text{п}}$  равно 3,39.

Для модели В замена двухслойных водно-сажевых частиц на однородные сажевые приводит к уменьшению  $K_{\text{п}}$ , который зависит от толщины оболочки и параметра дифракции  $\rho = 2\pi r/\lambda$ , причем  $K_{\text{п}}$  везде меньше 1.

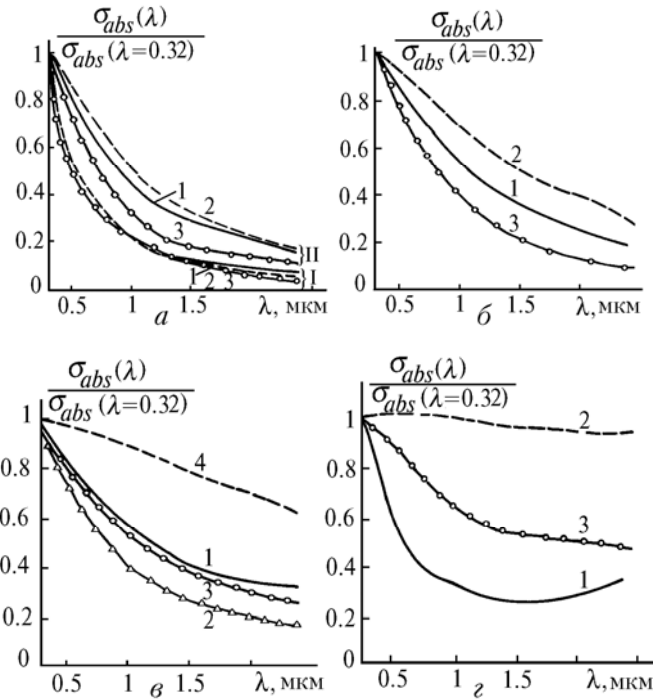


Рис. 1. Относительный спектральный ход поглощения  $K_n = \sigma_{abs}(\lambda) / \sigma_{abs}(\lambda = 0,32 \text{ мкм})$  для модели А: а, б – моды I, II, III, в – мода IV, г – мода V (кривые 1 – однородные частицы с «эффективным» комплексным показателем преломления  $\tilde{m} = (\tilde{n} - i \cdot \tilde{\kappa})$ , кривые 2, 3, 4 – двухслойные частицы с сажевой оболочкой 10; 1; 0,1%.  $m_{\text{ядра}} = (\tilde{n} - i \cdot 0)$ ,  $m_{\text{обол.}} = m_{\text{сажи}}$ )

Спектральный ход нормированного коэффициента поглощения  $\sigma_{abs}^n(\lambda) = \sigma_{abs}(\lambda) / \sigma_{abs}(\lambda = 0,32 \text{ мкм})$  представлен на рис. 1 для модели А и на рис. 2 для модели В. Наблюдается монотонное уменьшение  $\sigma_{abs}^n(\lambda)$  при увеличении  $\lambda$  во всем рассмотренном диапазоне длин волн для модели А. В случае модели В увеличение  $\sigma_{abs}^n(\lambda)$  при росте  $\lambda$  обусловлено спектральным ходом коэффициента поглощения сажи. Появление скачка при  $\lambda = 1 \text{ мкм}$  объясняется влиянием коэффициента поглощения воды. Спектральный ход энергетических характеристик рассеяния не позволяет судить о размерах и типе рассеивающих частиц. Для того чтобы правильно оценить энергетические характеристики рассеивающей среды, необходимо знать тип частиц (их размеры, внутреннюю структуру, оптические константы).

Некоторые выводы о типе частиц позволяют сделать рассмотренные нами угловые характеристики рассеяния, причем наиболее важными являются поляризационные характеристики рассеяния. Интенсивность рассеянного излучения  $I(\Theta) / I(0^\circ)$  при  $\lambda = 0,55 \text{ мкм}$  представлена на рис. 3 для модели А и на рис. 4 для модели В.

При малых углах рассеяния ( $\Theta < 60^\circ$ ) безразмерная интенсивность зависит, в основном, от параметра дифракции, но с увеличением угла рассеяния становится существенной зависимость от величины комплексного показателя преломления  $m$  и внутренней структуры: возникает асимметрия рассеяния. Угловая зависимость интенсивности рассеяния приобретает более сложный вид; в области больших углов появляются дополнительные минимумы рассеяния. Так, первый минимум для рассмотренных моделей появляется в области углов  $\Theta = 120 - 130^\circ$ , а второй минимум возникает (в зависимости от показателя преломления) в области углов  $\Theta = 160 - 170^\circ$ . В [7, 8] сделана попытка найти аналитические выражения, связывающие показатель преломления частиц с параметрами распределения частиц по размерам и коэффициентом асимметрии индикатрисы рассеяния:

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

Эти аналитические выражения не учитывают, однако, внутреннюю структуру частиц.

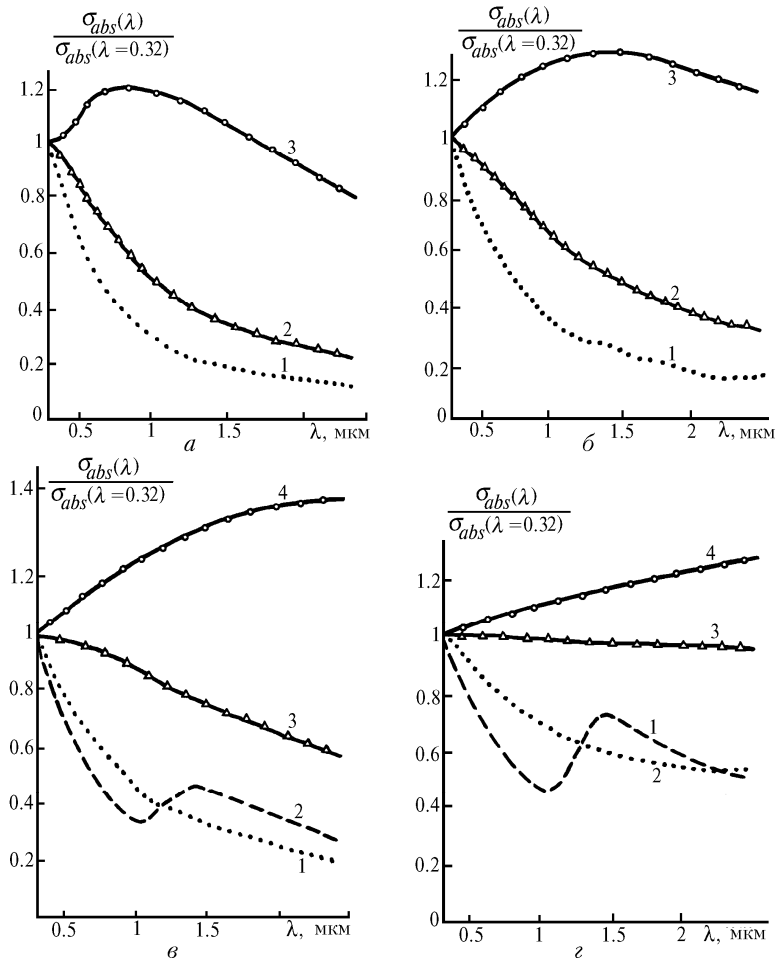


Рис. 2. Относительный спектральный ход поглощения  $K_{\pi} = \sigma_{abs}(\lambda) / \sigma_{abs}(\lambda=0,32)$  для модели B: а, б – моды II, III (кривые 1, 2 – двухслойные частицы с сажевой оболочкой I; 10%, комплексный показатель преломления  $m_{\text{ядра}} = m_{\text{воды}}$ ,  $m_{\text{обол.}} = m_{\text{сажи}}$ , 3 – однородные частицы с  $m = m_{\text{сажи}}$ ); в, з – моды IV, V (кривые 1, 2, 3 – двухслойные частицы с сажевой оболочкой 0,1; 1; 10%,  $m_{\text{ядра}} = m_{\text{воды}}$ ,  $m_{\text{обол.}} = m_{\text{сажи}}$ , 4 – однородные частицы с  $m = m_{\text{сажи}}$ )

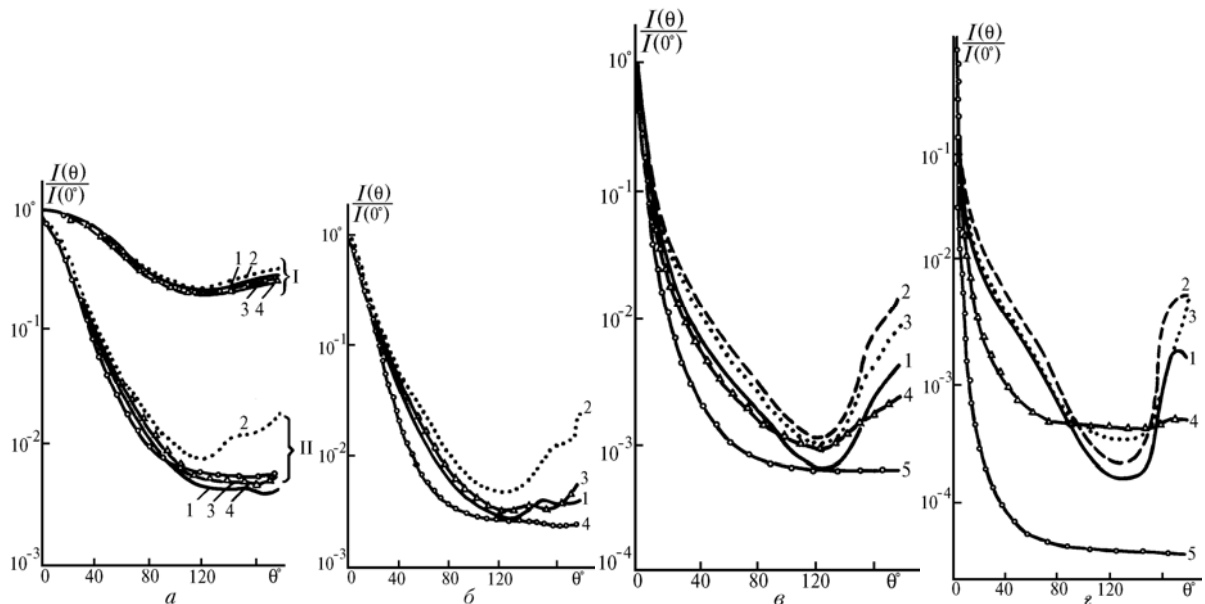


Рис. 3. Индикатрисы рассеяния света  $I(\theta)/I(0^\circ)$  при  $\lambda = 0,55$  мкм, для модели A: а, б – моды I, II, III (кривые 1 – однородные частицы с «эффективным» комплексным показателем преломления  $\tilde{m} = (\tilde{n} - i\tilde{\kappa})$ , 2, 3 – двухслойные частицы с сажевой оболочкой I; 10%,  $m_{\text{ядра}} = (\tilde{n} - i \cdot 0)$ ,  $m_{\text{обол.}} = m_{\text{сажи}}$ ), в, з – моды IV, V (кривые 1 – однородные частицы с  $\tilde{m} = (\tilde{n} - i\tilde{\kappa})$ , кривые 2, 3, 4 – двухслойные частицы с сажевой оболочкой 0,1; 1; 10%,  $m_{\text{ядра}} = (\tilde{n} - i \cdot 0)$ ,  $m_{\text{обол.}} = m_{\text{сажи}}$ , 5 – однородные частицы с  $m = m_{\text{сажи}}$ )

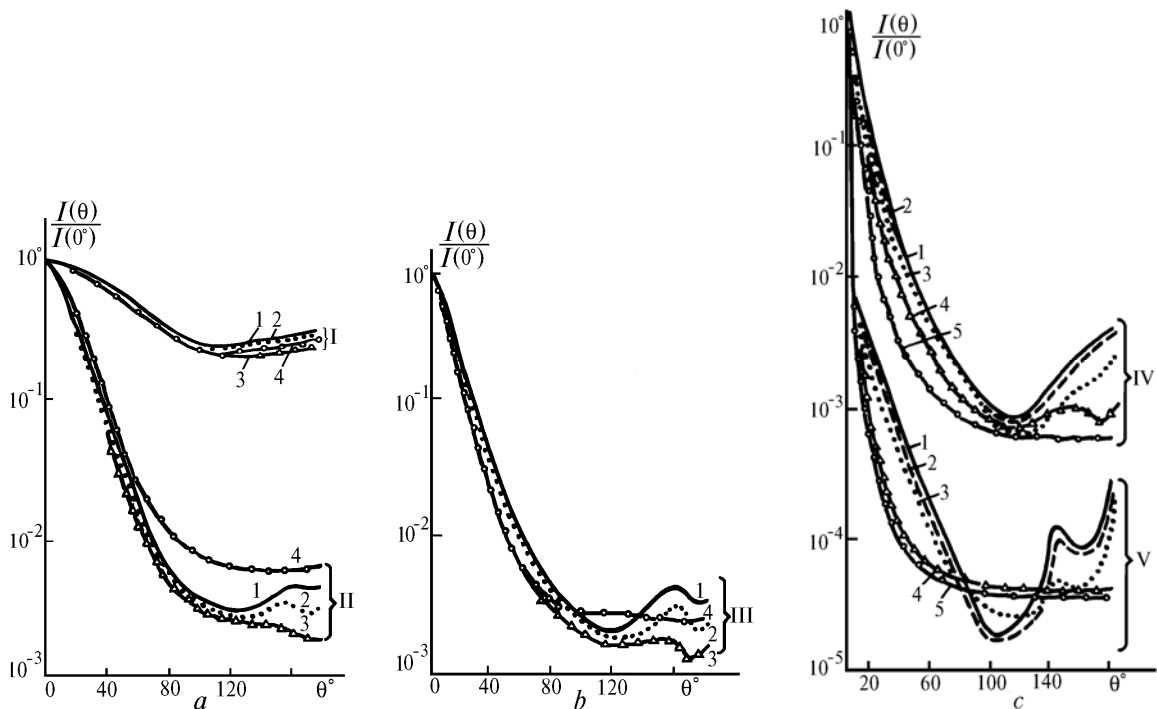


Рис. 4. Индикатрисы рассеяния света  $I(\theta)/I(0^\circ)$  при  $\lambda = 0,55$  мкм, для модели В: а, б — моды I, II, III (кривые 1 — однородные частицы с «эффективным» комплексным показателем преломления  $m = m_{\text{воды}}$ , 2, 3 — двухслойные частицы с сажевой оболочкой I; 10%,  $m_{\text{ядра}} = m_{\text{воды}}$ ,  $m_{\text{обол.}} = m_{\text{сажи}}$ ), 4 — однородные частицы с  $m = m_{\text{сажи}}$ ), в — моды IV, V (кривые 1 — однородные частицы с  $m = m_{\text{воды}}$ , кривые 2, 3, 4 — двухслойные частицы с сажевой оболочкой 0,1; 1; 10%,  $m_{\text{ядра}} = m_{\text{воды}}$ ,  $m_{\text{обол.}} = m_{\text{сажи}}$ , 5 — однородные частицы с  $m = m_{\text{сажи}}$ )

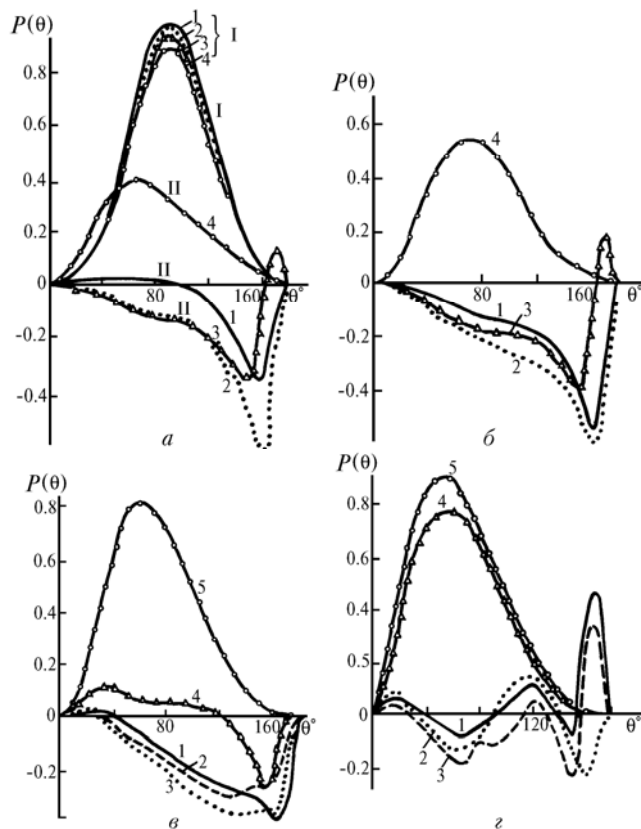


Рис. 5. Степень линейной поляризации рассеянного излучения  $P(\theta)$  при  $\lambda = 0,55$  мкм, для модели А: а — моды I, II; б — мода III (кривые 1 — однородные частицы с «эффективным» комплексным показателем преломления  $\tilde{m} = (\tilde{n} - i\tilde{\kappa})$ , 2, 3 — двухслойные частицы с сажевой оболочкой I; 10%,  $m_{\text{ядра}} = (\tilde{n} - i \cdot 0)$ ,  $m_{\text{обол.}} = m_{\text{сажи}}$ ), 4 — однородные частицы с  $m = m_{\text{сажи}}$ ); в, г — моды IV, V (кривые 1 — однородные частицы с  $m = \tilde{m}$ , кривые 2, 3, 4 — двухслойные частицы с сажевой оболочкой 0,1; 1; 10%,  $m_{\text{ядра}} = (\tilde{n} - i \cdot 0)$ ,  $m_{\text{обол.}} = m_{\text{сажи}}$ , 5 — однородные частицы с  $m = m_{\text{сажи}}$ )

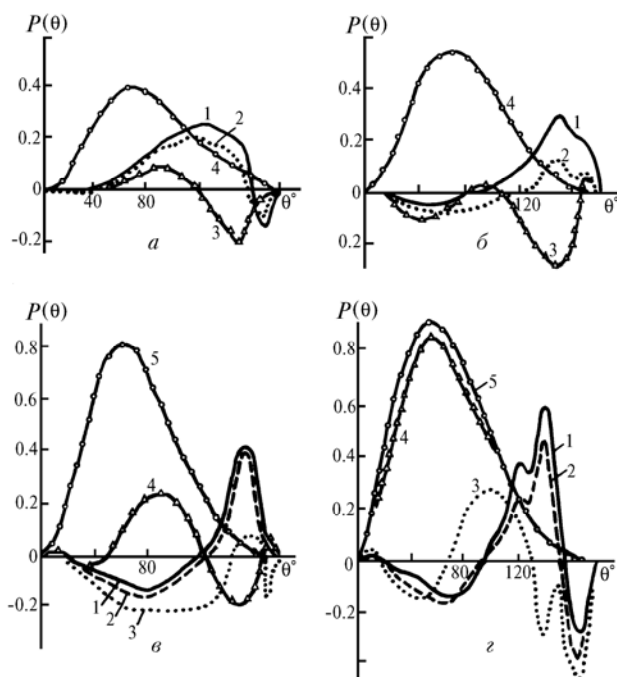


Рис. 6. Степень линейной поляризации рассеянного излучения  $P(\theta)$  при  $\lambda = 0,55$  мкм, для модели В: а, б – моды II, III (кривые 1 – однородные частицы  $m = m_{\text{воды}}$ , 2, 3 – двухслойные частицы с сажевой оболочкой I; 10%,  $m_{\text{ядра}} = m_{\text{воды}}$ ,  $m_{\text{обол.}} = m_{\text{сажи}}$ ), 4 – однородные частицы с  $m = m_{\text{сажи}}$ ); в, г – моды IV, V (кривые 1 – однородные частицы с  $m = m_{\text{воды}}$ , 2, 3, 4 – двухслойные частицы с сажевой оболочкой 0,1; 1; 10%,  $m_{\text{ядра}} = m_{\text{воды}}$ ,  $m_{\text{обол.}} = m_{\text{сажи}}$ , 5 – однородные частицы с  $m = m_{\text{сажи}}$ )

Степень линейной поляризации  $P(\Theta)$  для  $\lambda = 0,55$  мкм представлена на рис. 5 для модели А и на рис. 6 для модели В.

Как видно из рисунков, мода 1 (модели А, В) соответствует чисто рэлеевскому рассеянию. При этом ни внутреннее строение частиц, ни комплексный показатель преломления не влияют на форму кривых. С увеличением размеров частиц усиливается асимметрия рассеяния, максимальная поляризация сдвигается в сторону боковых углов (для сажи в область углов  $\Theta < 90^\circ$ ), возникает отрицательная поляризация, появляются дополнительные максимумы, специфически характерные для конкретного вещества с определенной внутренней структурой.

Таким образом, результаты анализа данных численного моделирования для различных моделей микроструктуры атмосферных аэрозолей свидетельствуют о том, что из оптических характеристик аэрозолей наиболее чувствительными к изменению микроструктуры являются угловые характеристики, особенно степень линейной поляризации. Влияние изменения микроструктуры на эти характеристики намного превосходит погрешности измерений и, следовательно, может использоваться для наблюдения конденсационных процессов в аэрозолях и облаках. Особенно сильно проявляется влияние сажевой оболочки, причем это влияние определяется как величиной размеров двухслойных частиц, так и толщиной сажевой оболочки. В случае очень мелких частиц изменчивость степени линейной поляризации и индикатрисы рассеяния практически одинакова для частиц любого состава (рэлеевское рассеяние). Для остальных мод характер  $I(\Theta)$  и  $P(\Theta)$  определяется в основном толщиной сажевой оболочки и в некоторой степени зависит от химического состава ядра (т.е.  $n$  ядра).

1. Пришивалко А. П., Астафьева Л. Г. Поглощение, рассеяние и ослабление света обводненными частицами атмосферного аэрозоля. Минск, 1975, 46 с. (Препринт/Инст-т физики АН БССР).
2. Пришивалко А. П., Бабенко В. А., Лейко С. Т. // Оптика и спектроскопия. 1975. Т. 29. № 1. С. 162–169.
3. Борен К., Хафман Д. Поглощение и рассеяние света сферическими частицами. М.: Мир, 1986. 660 с.
4. Мейсон Б. Дж. Физика облаков. Л.: Гидрометеондат, 1961. 542 с.
5. Кондратьев К. Я., Биненко В. И., Петренчук О. П. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1981. Т 17. № 2. С. 167–174.
6. Ивлев Л. С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд. ЛГУ, 1982. 366 с.
7. Горшкова Н. И., Коростина О. М., Смеркалов В. А. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. № 3. С. 242–247.
8. Смеркалов В. А. // Исследование Земли из космоса. 1991. № 3. С. 8–13.

Ленинградский госуниверситет,  
Санкт-Петербургский НИИ, Центр экологической безопасности

Поступила в редакцию  
23 июля 1992 г.

L.S. Ivlev, K.Ya. Kondrat'jev, O.M. Korostina. **Numerical Simulations of the Optical Properties of Cloud Particles of a Complex Composition.**

Some results of numerical simulations of the scattering properties of polydisperse systems of homogeneous and double layered spherical particles are discussed. The polydisperse systems are considered as a set of modes corresponding to particles of different origin. The influence of internal structure and size of particles containing contaminants (first of all the soot) on these characteristics is determined.