

И.Б. Ивасив

АППРОКСИМАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНОГО ХОДА КОЭФФИЦИЕНТА ОСЛАБЛЕНИЯ ДЛЯ АЭРОЗОЛЕЙ, СОДЕРЖАЩИХ БОЛЬШИЕ СИЛЬНОПОГЛОЩАЮЩИЕ ЧАСТИЦЫ

Рассматриваются спектральные зависимости коэффициента аэрозольного ослабления для аэрозолей в приземных слоях атмосферы вблизи источников выбросов. Показано, что эти спектральные зависимости для больших сильнопоглощающих частиц хорошо аппроксимируются квадратичной зависимостью. На основе модельных расчетов показана область применения предложенной аппроксимации. Анализируется влияние погрешностей измерения на погрешность аппроксимации.

В задачах восстановления спектра размеров частиц аэрозолей путем обращения оптических данных (в частности, спектрального хода коэффициента аэрозольного ослабления электромагнитного излучения) во многих случаях приходится сталкиваться с проблемами недоопределенности этих задач, возникающими из-за ограниченности набора длин волн, на которых проводится зондирование. Для решения этих проблем используются различные методы, одним из которых есть доопределение задачи с помощью аппроксимации спектральной характеристики по измеренным значениям [1] и вычисления ее значений в промежуточных точках. При этом необходимо обеспечить приемлемую точность аппроксимации для эффективного решения обратной задачи [2].

В данной статье рассматриваются спектральные зависимости коэффициента аэрозольного ослабления для аэрозолей в приземных слоях атмосферы. Особенностью рассматриваемых аэрозолей является преобладание сильнопоглощающих частиц, отличающихся более регулярным спектральным ходом оптических характеристик [3], а также наличие большого количества крупных частиц размером от 1 до 10 мкм и выше [3, 4]. Таким образом, диапазон размеров частиц намного превышает спектральный интервал зондирования, который применяется в оптической локации атмосферы, вследствие чего спектральные зависимости могут существенно отличаться от обычно наблюдаемых, например, в [5, 6].

В качестве моделей аэрозолей в приземных слоях атмосферы выбирались полидисперсные системы сферических частиц, являющиеся хорошим приближением для систем выпуклых частиц произвольной формы [6]. На основании большого количества проведенных ранее модельных расчетов для спектрального хода коэффициента ослабления $\beta_p(\lambda)$, выполненных по формулам Ми (использовались программы, приведенные в [2]) предлагается выбирать:

$$\tilde{\beta}(\lambda) = a\lambda^2 + b\lambda + d. \quad (1)$$

Для проверки этого предположения проводились модельные расчеты для ансамблей сферических частиц с логнормальным законом распределения [7]. Параметры распределения выбирались следующими:

$$r_m = 0,5 \text{ мкм}, \quad \sigma = 0,5 \text{ мкм} \quad (S = 0,200);$$

$$r_m = 0,5 \text{ мкм}, \quad \sigma = 4,0 \text{ мкм} \quad (S = 0,680);$$

$$r_m = 6,0 \text{ мкм}, \quad \sigma = 0,5 \text{ мкм} \quad (S = 0,083);$$

$$r_m = 6,0 \text{ мкм}, \quad \sigma = 4,0 \text{ мкм} \quad (S = 0,541);$$

$$r_m = 2,0 \text{ мкм}, \quad \sigma = 1,5 \text{ мкм} \quad (S = 0,570),$$

где r_m – среднегеометрический радиус; σ – стандартное отклонение для r ; S – стандартное отклонение для $\ln(r)$, что соответствует широкому классу аэрозольных загрязнений в приземных слоях атмосферы вблизи источников выбросов (например, для предприятий бытовой химии, цветной металлургии и энергетики, угольной и стекольной промышленности, по производству цемента [4]). Также выбирались «монодисперсные» аэрозоли ($\sigma = 0,1$ мкм по определению в [8]) с $r_m = 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6$ мкм. Комплексный показатель преломления выбирался равным $m = 1,59 - 0,66i$, (уголь, сажа и т.п. [9]) и $m = m(\lambda)$ (для тех же частиц), где зависимость m от λ рассчитывалась с помощью соотношений Крамерса – Кронига [2] для начальных значений $m(\lambda = 0,436 \text{ мкм}) = 1,90 - 0,68i$ и $m(\lambda = 0,546 \text{ мкм}) = 1,96 - 0,66i$ [9]. Также выбиралось $m = 1,33 - 0,0i$ (капельки воды).

Расчеты показали, что для углеродных сильнопоглощающих аэрозолей спектральный ход коэффициента ослабления в диапазоне длин волн $\lambda = 0,5 \div 1,5$ мкм действительно напоминает восходящую ветвь перевернутой параболы I (рис. 1). На первый взгляд, такой характер спектральной зависимости не согласуется с данными многих расчетов и экспериментов, приведенных, например, в [5, 6]. Однако если учесть, что в данном случае расчеты проводились для крупных частиц с $r_m \geq 0,5$ мкм, ($x_m = 2\pi r_m/\lambda \geq 2,09$), а в указанных работах спектральные характеристики получены для тонкодисперсных атмосферных аэрозолей с $r_m \approx 0,2$ мкм ($x_m \leq 2,51$), то противоречие устраняется. Проведенные расчеты для больших длин волн показали, что при значениях $\lambda > 2$ мкм и $r_m = 1$ мкм ($x_m < 3,14$) наблюдается убывающий характер спектральной характеристики (см. рис. 1, кривая I), что полностью согласуется с данными, приведенными в [5, 6], если учесть значения x_m . Кроме того, косвенные данные о возрастающем характере $\beta_D(\lambda)$ для сильнопоглощающих частиц в диапазоне длин волн $0,5 \div 1,5$ мкм можно получить из [10].

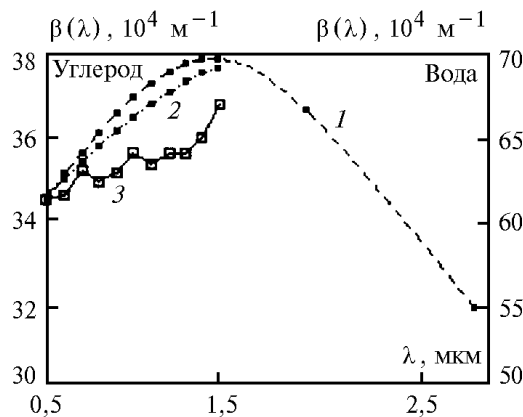


Рис. 1. Спектральный ход $\beta_D(\lambda)$ для ансамбля углеродных частиц и ансамбля водяных капелек с одинаковыми дисперсными составами ($r_m = 1$ мкм, $\sigma = 1,5$ мкм): $1 - m = 1,59 - 0,66i$, $2 - m = m(\lambda)$ (углерод); $3 - m = 1,33 - 0,0i$ (вода)

Для воды зависимость $\beta_D(\lambda)$ имеет нерегулярный характер и не может аппроксимироваться выражением (1) с приемлемой точностью.

Для построения аппроксимационных зависимостей выбирались расчетные данные $\beta_D(\lambda)$, соответствующие длинам волн $\lambda = 0,5; 0,8; 1,2$ и $1,5$ мкм. Относительные погрешности аппроксимации вычислялись в точках $\lambda = 0,5; 0,6; \dots; 1,5$ мкм по формуле

$$\delta(\lambda_j) = [\tilde{\beta}(\lambda) - \beta_D(\lambda_j)]/\beta_D(\lambda_j). \quad (2)$$

Результаты расчетов показали, что ни в одном случае погрешность аппроксимации в контрольных точках λ_j не превышала 0,15%, что в 5 – 10 раз меньше обычных погрешностей измерения $\beta_D(\lambda)$ (см. таблицу). Также установлено, что с увеличением в ансамбле количества больших частиц погрешности аппроксимации уменьшаются.

Все это позволяет утверждать о справедливости модели (1) для больших сильнопоглощающих аэрозольных частиц.

λ , МКМ	δ , $10^{-3}\%$												
	r_m , МКМ	0,5	0,5	6,0	6,0	2,0	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
	σ , МКМ	0,5	4,0	0,5	4,0	1,5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
S :	0,68	1,93	0,083	0,541	0,57	0,2	0,1	0,1	0,05	0,03	0,026	0,021	0,017
	$m = 1,59 - 0,66i$												
0,5	17	8	7	6	12	-17	24	15	12	10	9	8	
0,6	-43	-18	-17	-13	-26	35	-52	-34	-27	-23	-19	-17	
0,7	-55	-24	-23	-18	-36	56	-72	-46	-37	-31	-26	-23	
0,8	-41	-19	-18	-14	-28	41	-59	-36	-29	-24	-21	-18	
0,9	-16	-9	-8	-6	-13	8	-27	-15	-13	-11	-9	-8	
1,0	9	3	3	2	5	-25	10	6	5	4	3	3	
1,1	29	13	12	9	19	-43	41	25	20	17	14	13	
1,2	39	19	18	14	27	-40	56	34	29	24	20	18	
1,3	36	18	17	14	27	-22	51	32	28	23	20	18	
1,4	18	10	10	7	14	1	22	17	15	13	11	10	
1,5	-15	-8	-7	-6	-11	16	-22	-14	-11	-9	-8	-7	
	$m = m(\lambda)$												
0,5	44	2	0	-1	9	-47	-	-	10	4	1	-2	
0,6	-58	4	7	5	-2	66	-	-	-1	10	11	9	
0,7	-106	0	5	5	-15	121	-	-	-15	-2	1	5	
0,8	-103	-4	1	3	-21	117	-	-	-24	-19	-3	0	
0,9	-62	-6	-3	-1	-18	71	-	-	-19	-12	-7	-4	
1,0	-3	-5	-5	-3	-7	9	-	-	-7	-6	-5	-7	
1,1	57	-1	-4	-4	6	-44	-	-	7	-1	-2	-6	
1,2	98	4	-1	-2	20	-83	-	-	21	9	3	-2	
1,3	105	8	3	0	27	-108	-	-	30	17	10	1	
1,4	62	7	4	1	19	-70	-	-	20	11	7	3	
1,5	-38	-2	0	1	-8	22	-	-	-4	-2	-1	1	

С целью дополнительной проверки модели (1) и определения пределов ее применения были проведены расчеты $\beta_D(\lambda)$ для различных комплексных показателей преломления m , соответствующих сильнопоглощающим частицам. При этом для всех значений m спектральный ход $\beta_D(\lambda)$ хорошо согласуется с моделью (1) в пределах спектрального интервала зондирования (рис. 2).

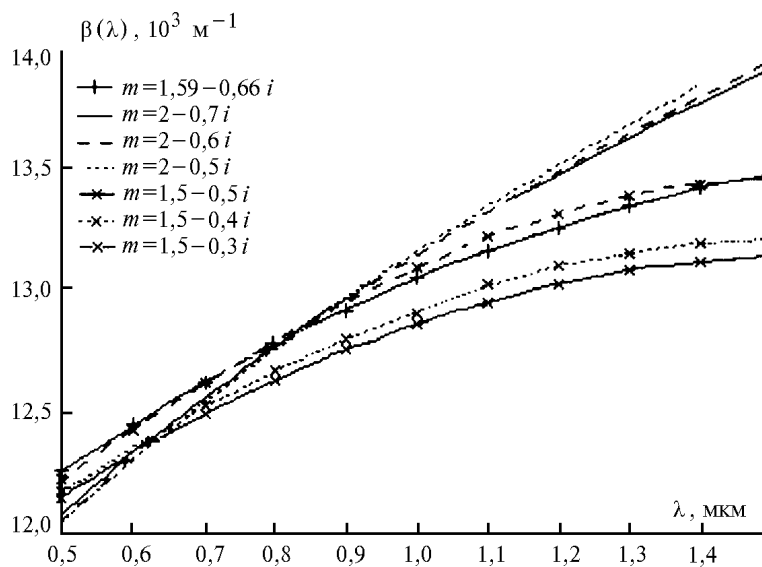


Рис. 2. Спектральный ход $\beta_D(\lambda)$ для ансамбля аэрозольных частиц с $r_m = 0,5$ мкм, $\sigma = 0,5$ мкм при различных комплексных показателях преломления

Проводился также анализ погрешностей (2) при отклонении $\beta_D(\lambda)$ в точках 0,5; 0,8; 1,2 и 1,5 мкм от точных значений на 1%. Расчеты проводились для углеродных частиц с параметрами распределения $r_m = 0,5$ мкм и $\sigma = 0,5$ мкм. Знак погрешности изменялся произвольно для

каждой длины волны. Результаты расчетов показали, что при любом сочетании знаков отклонений погрешность аппроксимации не превышала 1,5%, что является вполне приемлемым для обращения этих данных в спектр размеров частиц [11].

Суммируя вышесказанное, можно утверждать, что для аэрозолей в приземных слоях атмосферы (а также в рабочих помещениях, горных выработках и т.п), характеризующихся значительным количеством больших (свыше 1 мкм) сильнопоглощающих частиц, спектральный ход коэффициента аэрозольного ослабления можно аппроксимировать в спектральном интервале $0,5 \div 1,5$ мкм квадратической зависимостью с достаточной точностью для доопределения и решения задачи восстановления спектра размеров частиц.

1. Chen H.Y., Iskander M.F., Penner J.E. // *Appl. Optics*. 1991. V. 30. N 12. P. 1547–1551.
2. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. Справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1986. 544 с.
3. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. М.: Мир, 1986. 664 с.
4. Клименко А.П., Королев В.И., Шевцов В.И. Непрерывный контроль концентрации пыли. Киев: Техника, 1980. 181 с.
5. Knestrik G.L., Cosden T.H., Curcio J.A. // *J. Opt. Soc. Amer.* 1962. V. 52. N 9. P. 1010.
6. Зуев В.Е., Наац И.Э. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1982. 242 с.
7. Кабанов М.В., Панченко М.В. Рассеяние оптических волн дисперсными средами. Часть III. Атмосферный аэрозоль. Томск: Изд-во ТФ СО АН СССР, 1984. 189 с.
8. Marple V.A., Rubov K.L. Instruments and Techniques for Dynamic Particle Size Measurements of Coal Dust. BuMines OFR 173–83, 1986. 242 p. (Contract H0177026 Univ. MN).
9. Okuda S., Takano H. // *The Science Engineering Review of Doshisha University*. V. 25. N 1. April 1984. Kyoto. Japan. P. 41–50.
10. Таблицы по светорассеянию. Т. 3. Коэффициенты ослабления, рассеяния и лучевого давления. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 432 с.
11. Наац И.Э. // *Распространение света в дисперсной среде*. Минск: Наука и техника, 1982. С. 187 – 207.

Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины,
г. Львов

Поступила в редакцию
9 января 1996 г.

I. B. Ivasiv. Approximation of Spectral Dependence of Extinction Coefficient for Aerosol with Large and Intensively Absorbing Particles.

The spectral dependences of aerosol extinction coefficients are considered for the aerosol in the near-ground atmospheric layers, near the pollution sources. It is shown that these spectral dependences are well approximated by quadratic dependence for the large and intensively absorbing particles. The application range of the proposed approximation is shown based on the model computations. The influence of the measurement errors on the approximation errors is analyzed.