

Н.И. Горшкова, О.М. Коростина, В.А. Смеркалов

СПЕКТРАЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ОСЛАБЛЕНИЯ И АСИММЕТРИИ РАССЕЙЯНИЯ СВЕТА АЭРОЗОЛЕМ СО СРЕДНЕВЗВЕШЕННЫМ СПЕКТРОМ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ

Исследованы оптические характеристики аэрозоля со средневзвешенным спектром размеров частиц $dN / d \log r = A / (r_0^{\bar{\nu}} + |r - r_0|^{\bar{\nu}})$.

Показано, что при эффективном показателе преломления частиц $m = 1,53 - 007i$ спектральный ход коэффициентов ослабления и форма индикатрисы рассеяния света частицами такого аэрозоля соответствуют реально наблюдаемым оптическим характеристикам континентального аэрозоля.

Получены полуэмпирические зависимости между оптическими и микроструктурными характеристиками аэрозоля со средневзвешенным спектром размеров частиц.

Атмосферный аэрозоль является исключительно изменчивым как во времени, так и в пространстве образованием. Весьма сильно может изменяться и спектр размеров частиц (плотность распределения числа частиц по размерам) с изменением метеорологических, синоптических и других условий.

На основании результатов измерений спектров как случайных функций, в [1,2] путем статистической обработки более 250 спектров был определен средневзвешенный спектр размеров частиц, который может рассматриваться в качестве оценки математического ожидания вида такого рода случайных функций.

Непохожий на логнормальное или гамма-распределение полученный спектр хорошо аппроксимировался аналитической функцией вида

$$\frac{dN}{d \log r} = \frac{A(r, \nu', \kappa)}{r_0^{\bar{\nu}} + |r - r_0|^{\bar{\nu}}},$$

где r_0 — модальный радиус частиц.

В монографии В.Е. Зуева и Г.М. Крекова [3] в качестве недостатка полученной аппроксимационной функции была отмечена ее многопараметричность. Как указывается в [4], для оптически активных частиц эта функция может быть значительно упрощена, с определенным приближением коэффициент $A(r, \nu', \kappa)$ может быть принят постоянным значением $A(r, \nu', \kappa) \approx A$, а показатель степени $\nu = \bar{\nu}$. В этом случае средневзвешенная функция распределения аппроксимируется простейшей двухпараметрической функцией вида

$$\frac{dN}{d \log r} = \frac{A}{r_0^{\bar{\nu}} + |r - r_0|^{\bar{\nu}}}. \quad (1)$$

Для континентального аэрозоля нижней тропосферы, в соответствии с [1, 2], $r_0 = 0,03$ мкм, $\bar{\nu} = 3$.

Представлялось интересным сравнить оптические свойства (форму индикатрисы рассеяния, спектральный ход коэффициентов ослабления) такого аэрозоля с данными прямых натурных измерений оптических характеристик континентального аэрозоля.

Сравнение формы (вытянутости) индикатрисы аэрозольного светорассеяния $\gamma(\theta)$ проводилось по коэффициенту асимметрии индикатрисы

$$\Gamma = \frac{\int_0^{\pi/2} \gamma(\theta) \sin \theta d\theta}{\int_{\pi/2}^{\pi} \gamma(\theta) \sin \theta d\theta}.$$

Публикаций результатов измерений коэффициентов асимметрии весьма мало. К тому же большинство из них относятся к интегральным по спектру измерениям. Не во всех случаях измерений

индикатрис определялись коэффициенты асимметрии. Тем не менее определенные оценки реально наблюдаемых коэффициентов Γ могут быть сделаны.

Так, в результате прямых оптических измерений индикатрис аэрозольного рассеяния, выполненных Г.И. Горчаковым с сотрудниками [5] под Звенигородом, было получено медианное значение $\bar{\Gamma} = 8-10$. Т.П. Тороповой и др. [6] по данным измерений индикатрис в приземном слое атмосферы было установлено, что среднее значение коэффициента асимметрии $\bar{\Gamma} = 4,5-7,2$; максимальные значения $\Gamma_{\max} = 8-11,3$. Аналогичные результаты при интегральных измерениях (близких к результатам измерений Γ на участке спектра $0,5-0,7$ мкм) были получены О.Д. Бартеневой, Зидентопфом, Фойциком, Цшаеком и др.

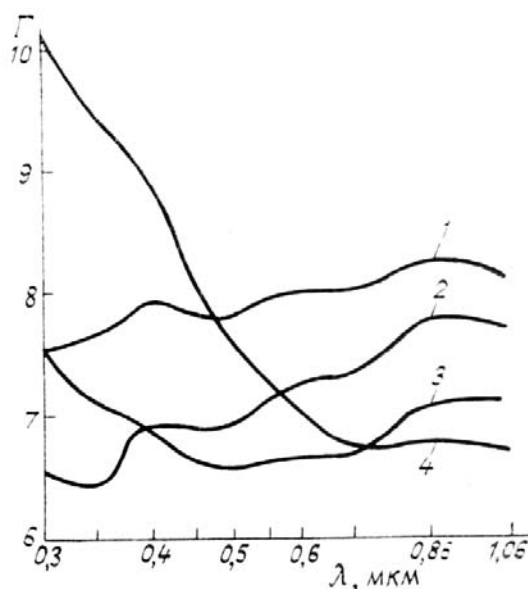
Анализ всех этих данных показывает, что среднее $\bar{\Gamma}$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma\Gamma$ значений коэффициентов асимметрии индикатрис аэрозольного светорассеяния в приземном слое атмосферы в летнее время года в видимой части спектра ($0,5-0,7$ мкм) составляют

$$\Gamma = 6 \div 7; \sigma\Gamma = 1.$$

О спектральном ходе коэффициентов $\Gamma(\lambda)$ сделать статистически обоснованные заключения пока затруднительно из-за дефицита экспериментальных данных. Из имеющихся сообщений (например, [6]) следует лишь, что с ростом длины волны может наблюдаться увеличение, уменьшение и знакопеременный спектральный ход асимметрии индикатрис рассеяния.

В качестве характеристики спектрального хода объемных коэффициентов аэрозольного светорассеяния β_{ex} использовался показатель Ангстрема

$$\omega = \frac{\ln [\beta_{ex}(\lambda_1)/\beta_{ex}(\lambda_2)]}{\ln(\lambda_2/\lambda_1)}.$$



Спектральный ход коэффициентов асимметрии индикатрис аэрозольного светорассеяния:
 $m = 1,53 - 0,007i$, $\bar{v} = 3$; $1 - r_0 = 0,005$ мкм; $2 - r_0 = 0,015$ мкм; $3 - r_0 = 0,03$ мкм; $4 - r_0 = 0,05$ мкм

К настоящему времени накоплен большой массив измерений показателей Ангстрема (см., например, [6, 7]). Спектральные коэффициенты рассеяния весьма изменчивы, показатель Ангстрема может изменяться в широких пределах ($0 \leq \omega \leq 2,5$) в зависимости от происхождения (природы) аэрозоля, типа подстилающей поверхности, метеоусловий, синоптической ситуации, участка спектра и т.д.

Анализ экспериментальных данных показывает, что для приземного слоя континентального аэрозоля в видимой части спектра среднее значение $\bar{\omega}$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma\omega$ показателя Ангстрема составляют $1,3; 0,4$ соответственно.

Из определения функции (1) как средневзвешенной следует, что оптические свойства аэрозоля со спектром размеров частиц по (1) должны получаться близкими к среднестатистическим свойствам континентального аэрозоля. Одной из задач данной работы как раз и являлась проверка этого следствия. А в более общем плане представлялось интересным определить, как изменяются оптические свойства аэрозоля, частицы которого распределены по (1), с изменением показателя преломления частицы m и значений параметров распределения r_0 и \bar{v} .

В связи с этим нами были проведены расчеты по Ми индикатрис рассеяния (коэффициентов Γ) и объемных коэффициентов ослабления света таким аэрозолем $\beta_{ex}(\lambda)$ в 10 участках спектра (от 0,3 до 1,06 мкм) для 11 значений показателя преломления (от $m = 1,34$ до $1,70 - 0,005i$) при изменении модального размера частиц r_0 от 0,005 до 0,1 мкм и показателя степени $\bar{\nu}$ от 2,65 до 3,3. При этом учитывались частицы с радиусами от 0,01 до 20 мкм. Всего было рассчитано по Ми свыше 140 индикатрис и коэффициентов ослабления.

Таблица 1

m	$1,34 - 0,0i$	$1,38 - 0,0015i$	$1,43 - 0,0015i$	$1,5 - 0,01i$	$1,53 - 0,007i$	$1,54 - 0,01i$	$1,6 - 0,005i$	$1,625 - 0,005i$	$1,65 - 0,005i$	$1,675 - 0,005i$	$1,70 - 0,005i$
Γ	9,615	8,599	7,722	6,873	6,486	6,372	5,698	5,520	5,367	5,225	5,052
$\Gamma(2)$	9,574	8,645	7,727	6,872	6,486	6,410	5,792	5,589	5,401	5,228	5,067
$\delta\Gamma, \%$	-0,43	0,53	0,06	0	0	0,60	1,65	1,24	0,64	0,05	0,29

В табл. 1 приводятся полученные в результате расчетов значения коэффициентов асимметрии рассеяния света Γ аэрозолем с различными показателями преломления $m = n - ki$ при $\lambda = 0,55$ мкм, $r_0 = 0,03$ мкм и $\bar{\nu} = 3$.

Из этой таблицы видно, что при показателе преломления $m = 1,53 - 0,007i$ коэффициент асимметрии получается наиболее близким к среднестатистическому значению $\bar{\Gamma} = 6,5$.

Таким образом, получается, что индикатриса рассеяния аэрозоля, частицы которого распределены по (1) и имеют показатель преломления $m = 1,53 - 0,007i$, адекватна по коэффициенту асимметрии (в среднем) реально наблюдаемым индикатрисам светорассеяния континентального аэрозоля.

Но является ли показатель преломления $m = 1,53 - 0,007i$ типичным для континентального аэрозоля? По данным Радиационной комиссии МАМФА [8] основные компоненты континентального аэрозоля при $\lambda = 0,55$ мкм имеют именно такие показатели преломления (растворимые частицы — $m = 1,53 - 0,006i$, пыль — $m = 1,53 - 0,008i$).

Учитывая важность для климатических исследований данных о соотношении потоков рассеянной радиации в переднюю и заднюю полусферы, нами была предпринята попытка аналитической аппроксимации зависимости коэффициента асимметрии Γ от показателя преломления частиц и значений параметров r_0 и $\bar{\nu}$.

В [9] было предложено весьма простое соотношение между величиной Γ и действительной частью показателя преломления n (при распределении частиц по закону Юнге)

$$\Gamma \approx \frac{3,6}{n - 1}.$$

Для аэрозоля со средневзвешенным распределением частиц по данным расчета более 140 индикатрис нами была получена следующая эмпирическая зависимость коэффициента асимметрии Γ от m , r_0 и $\bar{\nu}$:

$$\Gamma \approx \frac{a + 0,75(n - x - 1)}{n - x - 1}. \quad (2)$$

Для случая, когда $r_0 = 0,03$ мкм и $\bar{\nu} = 3$, значение $a = 3$. В общем случае

$$a \approx \frac{4}{\bar{\nu}^2(0,15 - |r_0 - 0,03|)}. \quad (3)$$

В табл. 1 приводятся также значения коэффициентов $\Gamma(2)$, рассчитанных по формуле (2), и погрешности $\delta\Gamma$ расчета при тех же параметрах, что и Γ .

Из табл. 1 видно, что погрешность аппроксимации зависимости Γ от m формулой (2) не превышает 1,65%, составляя в среднем 0,42%. В общем случае, при изменении длины волны от 0,3 до 1,06 мкм, модального радиуса частиц от 0,005 до 0,1 мкм, параметра распределения ν от 2,65 до 3,3 средняя $\delta\Gamma$ и среднеквадратическая $\sigma\Gamma$ погрешности определения Γ с помощью соотношений (2) и (3) соответственно составляют — 1,83 и 13,2%.

В выражениях (2) и (3) не учитывается зависимость коэффициента Γ от длины волны. Расчеты показывают, что форма индикатрисы рассеяния при распределении частиц по (1) при $r_0 \leq 0,03$ мкм сравнительно мало изменяется с изменением длины волны. Как видно из рисунка, при изменении

длины волны от 0,3 до 1,06 мкм коэффициент асимметрии изменяется не более чем на 15–20%. При этом коэффициент Γ может как возрастать, так и уменьшаться, как это и наблюдается в реальных условиях [6]. Однако при $r_0 \geq 0,05$ мкм с изменением длины волны асимметрия рассеяния может изменяться более резко.

Таблица 2

r_0 , мкм	λ , мкм	0,3— 0,347	0,347— 0,4	0,40— 0,45	0,45— 0,50	0,50— 0,55	0,55— 0,60	0,60— 0,694	0,694— 0,860	0,860— 1,06	$\bar{\omega}$, $\delta\omega$
0,005	ω	1,051	0,998	1,219	0,973	1,005	1,019	1,047	0,929	0,982	1,025
	$\delta\omega$, %	—1,8	3,4	—15,4	6,0	2,6	1,2	1,0	11,1	5,0	1,5
0,015	ω	1,313	1,233	1,412	1,163	1,180	1,175	1,178	1,045	1,069	1,196
	$\delta\omega$, %	—11,7	—5,9	—17,8	—0,3	—1,7	—1,3	—1,5	11,0	8,5	—2,3
0,03	ω	1,404	1,378	1,570	1,342	1,379	1,366	1,351	1,214	1,205	1,350
	$\delta\omega$, %	—4,7	—2,9	—14,8	—2,7	—2,9	—2,0	—9,2	10,3	11,1	—2,0

Как известно, при достаточно широком спектре размеров частиц, распределенных по закону Юнга, показатель Ангрстрема ω связан с параметром распределения v^* соотношением

$$\omega = v^* - 2.$$

При среднем значении параметра $v^* = 3$ получается, что среднее значение параметра Ангрстрема ω должно быть равно 1. В действительности, как уже отмечалось, среднее значение $\bar{\omega} = 1,3$. В связи с этим представлялось интересным определить значение показателя ω при распределении частиц по (1). В рамках данной работы были рассчитаны более 140 значений показателя ω в достаточно широких диапазонах изменений λ , m , r_0 и \bar{v} . Это позволило нам приближенно аппроксимировать зависимость показателя ω от m , r_0 и \bar{v}

$$\omega \simeq \bar{v} \left[1 + \frac{n - x - 1}{2} (1,15 \cdot \bar{v} - 2) \left(\frac{r_0}{r_0 + 0,025} \right)^2 \right] - 2. \quad (4)$$

В табл. 2 представлены результаты расчета по Ми показателей ω при значении $m = 1,53 - 0,007i$ и $\bar{v} = 3$ для трех значений модальных размеров частиц $r_0 = 0,005$; 0,015 и 0,03 мкм. В этой же таблице приводятся погрешности $\delta\omega$ расчета значений ω по формуле (4).

Как следует из этой таблицы, средняя $\delta\omega$ и среднеквадратическая $\sigma\omega$ погрешности определения показателя ω по формуле (4) составляют соответственно $\delta\omega = -0,95\%$, $\sigma\omega = 8,48\%$. При $r_0 = 0,03$ мкм среднее значение показателя Ангрстрема составляет $\bar{\omega} = 1,35$, что весьма близко к среднестатистическому значению $\omega = 1,3$.

Выводы

1. Полученные в работе полуэмпирические зависимости оптических характеристик аэрозоля от его микроструктуры (соотношения (2)–(4)) могут найти применение при интерпретации результатов статистических исследований оптических свойств атмосферного аэрозоля в различных климатических условиях.

2. Близкое совпадение полученных значений коэффициента асимметрии Γ и показателя Ангрстрема ω со среднестатистическими значениями этих характеристик, по-видимому, подтверждает, что при разработке статистически обоснованных оптических моделей атмосферы распределение (1) может приниматься в качестве средневзвешенного распределения по размерам частиц континентального аэрозоля.

1. Смеркалов В. А. О среднем распределении аэрозольных частиц по размерам М., 1986. 23 с. Деп. в ВИНТИ 12.06.1986 № 4303-B86.
2. Смеркалов В. А. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1984. Т. 20. № 4. С. 317–321.
3. Зуев В. Е., Креков Г. М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 256 с.
4. Смеркалов В. А., Тулинов Г. Ф. Методологические вопросы построения яркостных моделей атмо-

- сферы Земли М., 1988. 27 с. Деп. в ВИНТИ 15.04.1988 № 2884-B88.
5. Горчаков Г. И., Емиленко А. С., Исаков А. А. и др. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1976. Т. 12. № 10. С. 1034–1044.
6. Торопова Т. П., Косьяненко А. Б., Саламахин К. М. и др. //Поле рассеянного излучения в земной атмосфере. Алма-Ата: Наука, 1974. С. 32–90.
7. Общее содержание атмосферного озона и спектральная прозрачность атмосферы. Справочные данные по станциям СССР/Под ред. Г.П. Гущина. Л.: Гидрометеиздат, 1972–1983.
8. A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation. Radiation commission IAMAP. Boulder. Colorado, USA, 1984.
9. Торопова Т. П., Солнцева Л. Л. //Рассеяние света в земной атмосфере. Алма-Ата: Наука, 1972. С. 81–95.

Научно-исследовательский институт физики Ленинградского государственного университета
Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова

Поступила в редакцию
27 сентября 1989 г.

N. I. Gorshkova, O. M. Korostina, V. A. Smerkalov. Spectral Attenuation Coefficients and Asymmetry of Light Scattering by Aerosols with the Weighted Mean Particle Size Spectrum.

Optical characteristics of the aerosol with the weighted mean particle size spectrum $DN/d\log r = A/(r_0^{\bar{v}} + |r - r_0|^{\bar{v}})$ are examined.

It is shown that at the effective refractive index of particles $m=1.53-0.007i$ the spectral behavior of the attenuation coefficients and the shape of the aerosol scattering phase function well agree with the observed optical characteristics of the continental aerosols.

Semiempirical relationships between the optical and microphysical characteristics of the aerosol with the weighted mean size spectrum of particles have been obtained.