

В.А. Смеркалов

ДИСТАНЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСРЕДНЕННОГО ПО ТРАССЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

Путем анализа 110 моделей атмосферного аэрозоля исследованы статистические связи между показателем преломления частиц аэрозоля, коэффициентом асимметрии аэрозольного светорассеяния, коэффициентом асимметрии индикатрисы обратного рассеяния и параметром Ангстрема, характеризующим спектральный ход коэффициентов рассеяния (оптической толщи).

Установленные зависимости аппроксимированы аналитическими соотношениями, позволяющими с точностью до 1,3–3,8% оценивать среднее по трассе значение показателя преломления частиц аэрозоля по его полидисперсным характеристикам.

Получаемые оценки показателя преломления могут использоваться при обращении измеренных оптических характеристик аэрозоля в микрофизические характеристики.

В последние годы с развитием вычислительных методов и средств становится возможным определение спектра размеров и показателя преломления аэрозольных частиц по данным об оптических свойствах аэрозоля [1].

Однако итерационные процедуры, связанные с одновременным поиском оптимального значения показателя преломления и определением гистограммы размеров частиц, продолжают оставаться достаточно громоздкими и требуют больших затрат машинного времени. Это в определенной мере ограничивает возможности и области практического использования разработанных методов и программ для обработки больших массивов оптических измерений.

Решение задачи в значительной мере упрощается в математическом плане и во много раз сокращается требуемое машинное время, если априори известен (хотя бы приближенно) эффективный показатель преломления оптически активных частиц.

Однако, как это справедливо отмечается, например в [2], для аэрозольных структур характерны исключительное разнообразие и изменчивость. Поэтому достаточно надежно принять какое-либо априорное значение показателя преломления частиц во многих случаях представляется затруднительным.

Анализируя решения прямых задач аэрозольной оптики, нетрудно заметить, что с изменением показателя преломления частиц весьма резко изменяются спектральный ход коэффициентов ослабления (оптической толщи) и форма (асимметрия) индикатрисы аэрозольного светорассеяния. Следовательно, если бы можно было по данным о спектральном ходе коэффициентов рассеяния и асимметрии индикатрисы рассеяния хотя бы приближенно определять показатель преломления аэрозольных частиц — решение обратных задач аэрозольной оптики значительно бы упростилось.

Задачей настоящей статьи являлась попытка выражения простейшими полуэмпирическими соотношениями зависимости показателя преломления от указанных оптических характеристик аэрозоля.

Для характеристики спектрального хода коэффициента аэрозольного ослабления $\beta(\lambda)$ чаще всего используется показатель Ангстрема ω в формуле $\beta(\lambda) = a\lambda^{-\omega}$.

Этот показатель тесно связан со спектром размеров частиц. В случае обратностепенного распределения частиц по размерам

$$dN(r)/d\log r \sim r^{-\nu^*}$$

при достаточно широком спектре размеров частиц $\omega = \nu^* - 2$.

В качестве характеристики формы (асимметрии) аэрозольной индикатрисы $\gamma(\theta)$ будем использовать коэффициент асимметрии

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

Коэффициент Γ зависит прежде всего от показателя преломления частиц m , но зависимость эта весьма неоднозначная. С изменением показателя преломления (например, за счет обводнения частиц при развитии конденсационных процессов) могут происходить различного рода перераспределения частиц по размерам, следовательно, по-разному будут изменяться и коэффициент асимметрии Γ , и показатель ω . В частности, с увеличением числа крупных частиц, как правило, уменьшается показатель ω и возрастает коэффициент асимметрии Γ , но в разных случаях по-разному.

Подобного рода заключения чисто качественного характера содержатся в публикациях многих авторов, однако каких-либо количественных соотношений обычно не приводится.

Исходя из стохастического характера процессов и условий формирования аэрозолей, искомые соотношения также должны носить статистический характер. Поэтому естественным было попытаться определить эти соотношения путем статистического анализа имеющихся оптических моделей аэрозоля.

К настоящему времени опубликованы данные о тысячах полидисперсных индикатрис рассеяния света аэрозолей для различных сочетаний действительных и мнимых частей показателя преломления $m = n - ki$, для различных видов функций распределения и параметров распределения числа частиц по размерам, комбинаций минимальных и максимальных размеров частиц и т. д.

Однако далеко не во всех случаях приводится спектральный ход коэффициентов рассеяния (оптических толщ), по которому можно было бы определить показатель ω . Еще реже указывается коэффициент асимметрии Γ .

Из массивов индикатрис с известными параметрами m , ω и Γ нами отбирались индикатрисы, наиболее адекватные реально наблюдаемым. Прежде всего обращалось внимание на адекватность условий формирования тыльной части индикатрисы в пределах углов рассеяния $\theta = 90 - 180^\circ$ (индикатрисы обратного рассеяния). Дело в том, что эта часть индикатрисы наиболее чувствительна к изменению показателя преломления (в малоугольной части индикатриса практически не зависит от показателя преломления).

В [3] и в работах других авторов показано, что при формировании реальных индикатрис большой вклад в тыльную часть индикатрисы вносит фракция микрочастиц ($r < 0,1$ мкм). При дефиците микрочастиц, характерном для одномодальных колоколообразных логнормальных и гамма-распределений, в тыльной части образуется нереально глубокий минимум, что приводит к завышению коэффициента асимметрии Γ и деформации спектрального хода коэффициентов рассеяния в сторону уменьшения показателя Ангстрема ω .

Исходя из этого, из рассмотрения исключались аэрозольные модели с дефицитом микрочастиц и рассматривались лишь модели с умеренными значениями коэффициентов асимметрии и показателей Ангстрема. Значительную часть использованной для анализа выборки индикатрис составили индикатрисы, рассчитанные С.В. Дышлевым [4] и О.М. Коростиной (по договору о научном сотрудничестве) для континентального и морского типов аэрозоля со средневзвешенным спектром размеров частиц [5].

В общей сложности нами были использованы для анализа 110 индикатрис, рассчитанных различными авторами для области спектра от 0,347 до 1,06 мкм, показателей преломления m от 1,33 до 1,65 - 0,005i, параметров ω от 0,375 до 1,8, коэффициентов асимметрии Γ от 5,4 до 16,5. При значениях $k \leq 0,015$ принималось $m = n$. Случаи с $k > 0,015$ не рассматривались.

В результате анализа было установлено, что при значениях $\omega \leq 1,6$ зависимость между параметрами Γ , ω и m сравнительно хорошо аппроксимируется выражением

$$\Gamma \simeq a / (m - 0,4)^2 (2 + \omega^2)$$

или

$$m^1 \simeq 0,4 + \sqrt{a / \Gamma (2 + \omega^2)}, \quad (1)$$

где $a \approx 33$.

Для оценки точности формулы (1) нами было проведено сравнение получаемых по ней значений m^1 с исходными (принятыми при расчетах по Ми) значениями m .

В результате расчетов было получено, что средние ($\bar{\delta}$) и среднеквадратические (σ^1) погрешности определения показателя преломления составляют: $\bar{\delta}^1 = N^{-1} \sum_i \delta_i^1 = 1,92\%$ и

$$\sigma^1 = \sqrt{(N - 1)^{-1} \sum_i (\delta_i^1 - \bar{\delta}^1)^2} = 3,75 \%$$

при $\omega \leq 1,6$ и $N = 91$.

При значениях $\omega > 1,6$ пользоваться формулой (1) не рекомендуется, так как могут получаться сильно заниженные значения показателя преломления.

Кроме того, в результате анализа отобранных нами индикатрис было установлено, что с показателем преломления m тесно связано отношение $\eta = \gamma(120^\circ - 30^\circ) / \gamma(120^\circ + 30^\circ)$, характеризующее асимметрию индикатрис обратного рассеяния. Чем больше показатель преломления m , тем больше и коэффициент асимметрии η , причем эта связь весьма устойчива и слабо зависит от распределения частиц по размерам, т. е. от показателя Ангстрема ω .

Статистический анализ показал, что в среднем эта зависимость хорошо аппроксимируется выражением

$$m^{\text{II}} = 1,3 + \eta^2 \sqrt{\omega/3\pi} \quad (2)$$

при значениях $\omega > 0$.

Средняя ($\bar{\delta}^{\text{II}}$) и среднеквадратическая (σ^{II}) погрешности оценки m по этой формуле составляют: $\bar{\delta}^{\text{II}} = 0,8\%$, $\sigma^{\text{II}} = 3,12\%$, при $N = 110$.

Таким образом, если для исследуемой модели аэрозоля известны значения Γ и ω , то оценка значения m может быть произведена по формуле (1); если известны значения η и ω — показатель m оценивается по формуле (2). В большинстве случаев погрешности оценок m по формулам (1) и (2) получаются с разными знаками. В связи с этим если имеется возможность рассчитать значения m^{I} и m^{II} по формулам (1) и (2), то в качестве оценки показателя m целесообразно принимать значение

$$m = \frac{m^{\text{I}} + m^{\text{II}}}{2}. \quad (3)$$

Средняя квадратическая погрешность оценки m в этом случае снижается до $\sigma = 1,33\%$, т. е. уменьшается более чем в два раза.

Следует, однако, иметь в виду, что:

— все эти оценки относятся лишь к ситуациям, когда характеристики m , Γ , ω и η (как для морского, так и для континентального типов аэрозоля) имеют умеренные значения, индикатрисы (по классификации О.Д. Бартеновой) имеют пологий тип, а спектр размеров частиц имеет вид, близкий к среднезвешенному [5]. Возможность оценки по формулам (1)–(3) показателя преломления частиц аэрозоля других типов, резко отличающихся от указанных, не исследовалась.

— при оценках погрешностей определения показателя m по данным единичных измерений характеристик Γ , ω и η необходимо учитывать еще и погрешности измерений этих характеристик. В частности, формула (2) может оказаться неэффективной из-за больших погрешностей измерений коэффициента η .

В заключение автор считает своим долгом с признательностью отметить, что написание этой статьи стало возможным в значительной мере благодаря использованию результатов расчетов полидисперсных индикатрис, проведенных О.М. Коростиной и С.В. Дышлевским

1. На а ц И. Э. Метод обратной задачи в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1980. 198 с.
2. И в л е в Л. С., А н д р е е в С. Д. Оптические свойства атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. 360 с.
3. С м е р к а л о в В. А., Т у л и н о в Г. Ф. Методологические вопросы построения яркостных моделей атмосферы Земли. М.: ИПГ им. академика Е.К. Федорова, 1988. Деп. в ВИНТИ 14.04.1988 г. № 2884-B88.
4. Р а з р а б о т к а пространственно-временной модели интенсивности рассеянного излучения атмосферы в области спектра 0,2–0,8 мкм. Отчет по НИР ИПГ им. академика Е.К. Федорова, 1988, Инв. № 028. 90.024478.
5. С м е р к а л о в В. А. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1984. С. 317–321.

Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова,
Москва

Поступила в редакцию
27 ноября 1989 г.

V. A. Smerkalov. Remote Method for Evaluating the Path-Averaged Refractive Index of Aerosol Particles.

The analysis of 110 atmospheric aerosol models allowed us to study statistical relationships between the refractive index of aerosol particles, asymmetry coefficient of aerosol light scattering, asymmetry coefficient of backscattering phase function and Angstrom parameter describing the spectral behavior of scattering coefficients (optical thickness).

Obtained dependences were approximated using analytical relations which allowed the evaluation of the path-averaged refractive index of aerosol particles to be made from polydisperse aerosol optical characteristics accurate to 1.3–3.8%.

Such estimates of the refractive index can be used for inverting the measured optical parameters of aerosol onto the microphysical ones.