

А.А. Яковлев, Г.Г. Сакунов, О.Д. Бартенева

### СТАТИСТИКА АЭРОЗОЛЬНЫХ ИНДИКАТРИС РАССЕЯНИЯ СВЕТА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ В ЦЕНТРАЛЬНОМ АРКТИЧЕСКОМ БАССЕЙНЕ

По данным измерений индикатрис рассеяния света в приземном слое атмосферы на дрейфующей станции «СП-28» рассчитаны индикатрисы аэрозольного рассеяния и проведен их статистический анализ. Рассчитаны средние значения, дисперсии, угловые корреляции и главные компоненты ковариационных матриц для логарифмов коэффициентов направленного аэрозольного рассеяния в диапазоне углов от 0 до 180°. Показано, что дисперсия аэрозольных индикатрис рассеяния существенно больше дисперсии индикатрис полного рассеяния, особенно в интервале углов рассеяния 80–140°. Автокорреляции измеренных угловых коэффициентов рассеяния превосходят уровень 0,5 для всех углов рассеяния.

В феврале – марте 1987 г. на дрейфующей станции «Северный полюс-28» («СП-28») проводились регулярные измерения индикатрис рассеяния света в приземном слое атмосферы. В результате была получена представительная выборка 78 индикатрис рассеяния, характеризующая вариации угловых спектров рассеяния при устойчивых условиях метеорологической дальности видимости в приземном слое атмосферы.

Результаты статистического анализа полученных индикатрис были представлены в [1, 2]. Но в указанных работах содержатся данные только для суммарного рассеяния света, включающего рассеяние на частицах атмосферного аэрозоля и молекулах воздуха. В то же время результаты измерений могут быть полезными в системе экологического и климатического мониторинга аэрозольной компоненты атмосферы [3], если использовать значения характеристик рассеяния света только атмосферными аэрозолями. Поэтому измеренные индикатрисы рассеяния были разделены на две составляющие: молекулярную и аэрозольную, с целью определения статистики вариаций аэрозольных индикатрис рассеяния света, а в дальнейшем и дисперсного состава аэрозоля.

В данной статье представлены результаты расчета статистических характеристик индикатрис аэрозольного рассеяния по данным измерений на дрейфующей станции «СП-28». Условия, при которых получена выборка исходных данных, использованных для расчета аэрозольных индикатрис, приведены ниже.

#### Характеристики условий эксперимента

Объем выборки . . . . .	78 индикатрис рассеяния
Период измерений . . . . .	22.02. – 16.03.1987 г.
Координаты региона . . . . .	81°00' – 81°40' с.ш. 167°08'–169°16' в.д.
Пределы изменений метеорологических условий:	
температура воздуха . . . . .	–46,3°С – –26,3 °С
атмосферное давление . . . . .	1000,8 – 1039,8 мбар
относительная влажность воздуха . . . . .	52 – 79%
метеорологическая дальность видимости [4] . . . . .	12 – 52 км

Измерения проводились визуальным нефелометром типа ИФ-14. Аппаратура и методика проведения натуральных измерений суммарных атмосферных индикатрис рассеяния были подробно описаны в [4, 5].

Эффективная спектральная чувствительность аппаратуры соответствует спектральной чувствительности глаза. Измерения проводились для углов рассеяния от 16 до 164°. Время измерения одной индикатрисы рассеяния составляло около 3 мин, погрешность полученных значений коэффициентов рассеяния 5–10% [4].

При статистическом анализе в работах [1, 2] рассматривались вариации полных индикатрис рассеяния в диапазоне углов от 0 до 180°, представленных с шагом по углу 10°. При этом экспериментальные данные были экстраполированы до углов 0 и 180° в косинусной шкале по методике, описанной в [4].

Аэрозольные индикатрисы рассеяния  $\rho_a(\varphi)$  были рассчитаны по индикатрисам полного рассеяния по формуле

$$\rho_a(\varphi) = \rho(\varphi) - \frac{P}{T} \frac{T_0}{P_0} \rho_m^*(\varphi) \int_{\lambda} V(\lambda) \beta_m(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где  $\rho(\varphi)$  – коэффициент полного рассеяния света под углом  $\varphi$  ( $\varphi = 0^\circ$  – направление падающего луча);  $P$  – атмосферное давление;  $T$  – температура воздуха ( $P_0$  и  $T_0$  – значения давления и температуры для стандартной атмосферы);  $V(\lambda)$  – нормированная спектральная чувствительность дневного зрения согласно условиям нормирования  $\int_{\lambda} V(\lambda) d\lambda = 1$ ;  $\beta_m(\lambda)$  – коэффициент

молекулярного рассеяния при значениях температуры воздуха  $T_0$  и атмосферного давления  $P_0$ ;  $\rho_m^*(\varphi)$  – нормированная рэлеевская индикатриса рассеяния,

$$\rho_m^*(\varphi) = \frac{1}{4\pi} 0,7629 (1 + 0,9324 \cos^2 \varphi). \quad (2)$$

Для численных расчетов значения  $\beta_m(\lambda)$  и  $V(\lambda)$  были взяты из [6]. Конкретные значения атмосферного давления и температуры воздуха задавались с точностью 1 мбар и 1°C соответственно. Для наглядной иллюстрации реального соотношения между аэрозольными и суммарными индикатрисами рассеяния на рис. 1 представлены результаты расчетов для трех типичных индикатрис, измеренных при значениях метеорологической дальности видимости 16, 30 и 51 км.

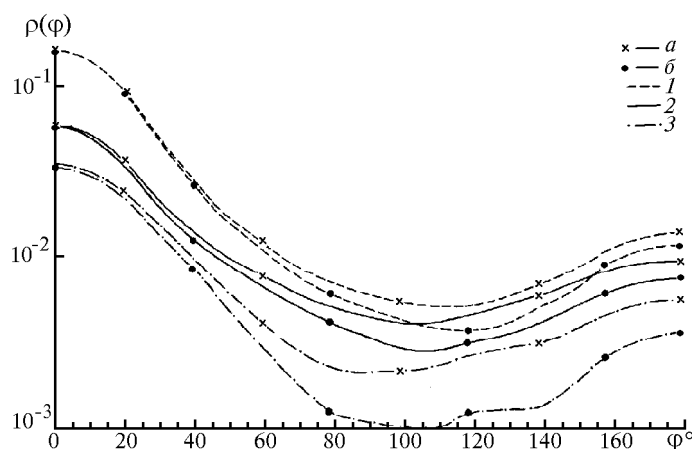


Рис. 1. Суммарные (а) и аэрозольные (б) индикатрисы рассеяния света при различной метеорологической дальности видимости, км: 1 – 16, 2 – 30, 3 – 51

Для всех трех случаев аэрозольные и суммарные индикатрисы близки между собой при малых углах рассеяния, так как при этих углах вклад молекулярного рассеяния мал по сравнению с аэрозольным. Наибольшее различие наблюдается при углах рассеяния более 60°, причем с увеличением значения метеорологической дальности видимости относительная роль молекулярного рассеяния возрастает и увеличивается различие между аэрозольными и полными индикатрисами рассеяния.

Для адекватного описания статистики вариаций коэффициентов аэрозольного рассеяния индикатрисы (как было предложено в [7]) представлялись в логарифмическом масштабе. Во-первых, это обусловлено тем, что выборочное распределение коэффициентов аэрозольного рассеяния близко к логарифмически нормальному. А во-вторых, использование логарифмиче-

ского масштаба при анализе структуры вариаций всей индикатрисы в целом позволяет согласовать уровни вариаций при разных углах, отличающиеся по абсолютным значениям на порядки, и наглядно представить изменение формы индикатрисы в целом. Кроме того, при аппроксимации индикатрис в логарифмическом масштабе с использованием уравнений регрессии или путем разложения по естественным ортогональным составляющим [8, 9] обеспечиваются положительность коэффициентов рассеяния и равномерная относительная погрешность для всего диапазона углов.

Статистика вариаций логарифмов аэрозольных индикатрис рассчитывалась с использованием непосредственного логарифмирования коэффициентов аэрозольного рассеяния, найденных по формуле (1), так как погрешности измерения индикатрисы и расчета вклада молекулярного рассеяния, составляющие в сумме ошибку определения аэрозольного рассеяния, для рассматриваемой выборки оказались сравнительно небольшими.

Рассмотрим некоторые особенности основных характеристик, полученных при статистическом анализе. На рис. 2 представлены результаты расчетов в виде средних полных и аэрозольных индикатрис рассеяния, а также диапазон вариаций полных и аэрозольных коэффициентов рассеяния, определенный по уровню  $\pm 3\sigma$  от среднего значения ( $\sigma$  – среднеквадратический уровень отклонений от среднего для выборочных значений логарифмов коэффициентов рассеяния).

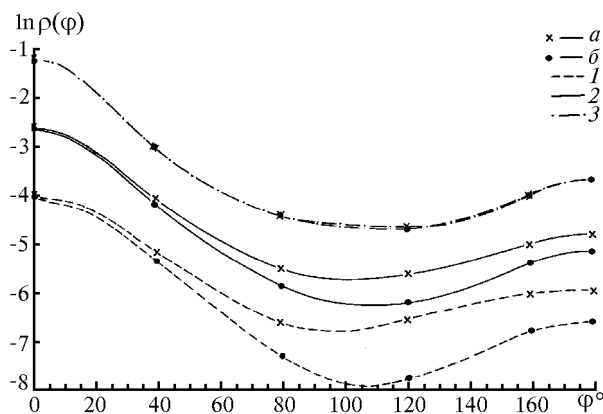


Рис. 2. Средние (кривая 1) индикатрисы рассеяния света и диапазон их изменений по уровню  $\pm 3\sigma(\phi)$  (2, 3);  $a$  – суммарные индикатрисы рассеяния,  $b$  – аэрозольные индикатрисы рассеяния

Средние значения коэффициентов аэрозольного рассеяния всегда несколько ниже суммарных, а их различие полностью согласуется с картиной хода индикатрис рассеяния для отдельных реализаций, приведенной на рис. 1. Верхние границы диапазона изменения коэффициентов аэрозольного и полного рассеяния практически совпадают, что вполне закономерно, так как при высоких значениях коэффициентов суммарного рассеяния и, соответственно, низких уровнях прозрачности атмосферы практически все рассеяние определяется аэрозольной составляющей. Минимальные же значения, соответствующие условиям слабо замутненной атмосферы, для аэрозольной компоненты существенно ниже суммарных коэффициентов рассеяния, за исключением углов рассеяния менее  $40^\circ$ , при которых в рассматриваемом эксперименте аэрозольное рассеяние имело определяющее значение. Поэтому дисперсия для аэрозольной компоненты рассеяния заметно больше дисперсии суммарного рассеяния, особенно при углах рассеяния  $100\text{--}150^\circ$ .

На рис. 3 представлены угловой ход среднеквадратических отклонений  $\sigma_a(\phi)$  коэффициентов аэрозольного рассеяния, а также графики первых четырех собственных векторов ковариационной матрицы логарифмов аэрозольных индикатрис. Для наглядного представления значимости вклада каждого из векторов в вариацию индикатрис значения компонент каждого вектора  $U_j(\phi)$  умножены на корень квадратный из соответствующего собственного числа  $\mu_j$ . На рис. 3 хорошо видно наличие максимума вариаций аэрозольных коэффициентов рассеяния в области углов  $100\text{--}110^\circ$ , где определяющую роль играет первый собственный вектор, дающий основной вклад в формирование этого максимума. Последующие векторы несут информацию о вариациях формы индикатрис рассеяния, причем с увеличением номера вектора увеличива-

ется частота угловых вариаций. При этом представленные на рис. 3 первые четыре вектора описывают 99% суммарной дисперсии вариаций угловых коэффициентов рассеяния. Напомним при этом, что значения коэффициентов для углов 0, 10, 170 и 180° получены с использованием экстраполяции. Поэтому представленные данные реально характеризуют вариации в диапазоне углов 20–160° и асимптотическое стремление хода всех векторов к константе в области углов 0 и 180°, возможно, определяется именно этим обстоятельством.

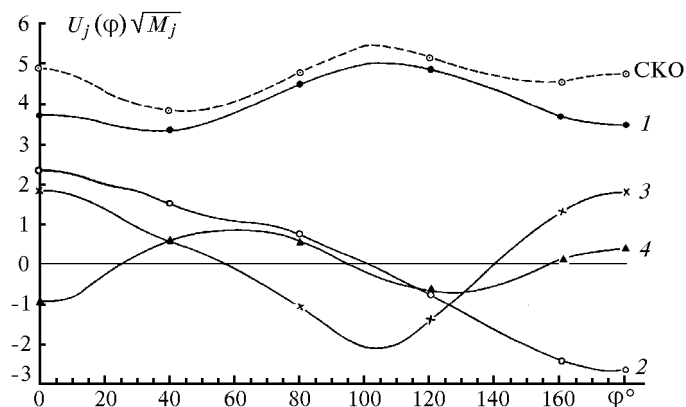


Рис. 3. Среднеквадратические отклонения логарифмов коэффициентов аэрозольного рассеяния (СКО) и первые четыре (кривые 1 – 4) собственных вектора  $U_j(\varphi)$  их ковариационной матрицы в масштабе, пропорциональном  $\sqrt{\mu_j}$

Значительная роль вариаций общего уровня рассеяния (связанных с первым вектором, см. рис. 3) в структуре вариаций коэффициентов аэрозольного рассеяния определяет высокий уровень угловых корреляционных связей в индикатрисах аэрозольного рассеяния.

На рис. 4 представлены графики численных оценок угловых корреляций аэрозольных коэффициентов рассеяния, полученных по всем 78 индикатрисам. Корреляции положительны для всех углов рассеяния и превосходят уровень 0,5 в диапазоне 20–160°. Характерен гладкий угловой ход коэффициентов корреляции и наличие колоколообразного максимума вблизи опорного угла рассеяния. Примечательно, что в целом ход угловых корреляций для коэффициентов аэрозольного рассеяния весьма близок к ходу угловых корреляций для коэффициентов суммарного рассеяния. Причиной этого являются постоянство формы и относительно малая изменчивость абсолютного уровня второй компоненты полной индикатрисы рассеяния – индикатрисы молекулярного рассеяния.

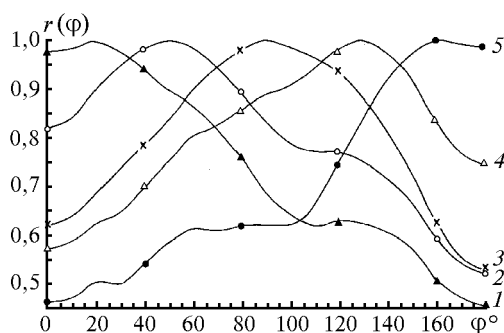


Рис. 4. Угловые корреляции логарифмов коэффициентов аэрозольного рассеяния для углов 20° – 1, 50° – 2, 90° – 3, 130° – 4, 160° – 5

Можно отметить также [10], что коэффициенты корреляции логарифмов коэффициентов рассеяния мало отличаются от коэффициентов корреляции для абсолютных коэффициентов аэрозольного рассеяния и, таким образом, характеризуют уровень корреляционных связей и для абсолютных аэрозольных индикатрис.

**Основные результаты.** Данные о средних коэффициентах аэрозольного рассеяния и их среднеквадратических отклонениях на рис. 2 и 3 определяют диапазон изменчивости коэффициентов аэрозольного рассеяния.

Представленные на рис. 3 собственные векторы в масштабе, пропорциональном  $\sqrt{\mu_i}$ , при численном моделировании параметров атмосферного рассеяния позволяют использовать четырехпараметрическую модель вариаций аэрозольных индикатрис рассеяния, аппроксимирующую эти вариации с помощью четырех собственных векторов с погрешностью менее 1% суммарной дисперсии.

В целом характер полученных статистических закономерностей вариаций аэрозольных индикатрис рассеяния полностью согласуется с физическими процессами, определяющими как аэрозольное, так и суммарное рассеяние в приземном слое арктического воздуха при устойчивых метеорологических условиях в зимний период.

Детальный анализ связи статистики вариаций аэрозольных индикатрис с микрофизическими характеристиками аэрозоля требует отдельного рассмотрения.

1. Сакунов Г. Г., Бартенева О. Д. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1990. Т. 26. N 2. С. 143–148.
2. Сакунов Г. Г., Бартенева О. Д., Козлов В. П. // Антарктика. 1993. Вып. 32. С. 22–25.
3. Gordon J., Richard W. // Appl. Optics. 1985. V. 24. N. 16. P. 2721–2723.
4. Бартенева О. Д., Довгялло Е. Н., Полякова Е. А. // Тр. ГГО. 1967. Вып. 220. 224 с.
5. Сакунов Г. Г., Бартенева О. Д., Радионов В. Ф. и др. // Полярный аэрозоль, протяженная облачность и радиация. Л.: Гидрометеиздат, 1981. С. 73–88.
6. Мак-Картни Э. Оптика атмосферы. Рассеяние света молекулами и частицами. М.: Мир, 1979. 421 с.
7. Бартенева О. Д., Веселова Л. К., Козлов В. П., Никитинская Н. М., Федорова Е. О., Яковлев А. А. Корреляционный анализ индикатрис рассеяния света в приземном слое атмосферы // Докл. на «Всесоюзном совещании по оптике аэрозоля». Звенигород, декабрь 1974 г.
8. Обухов А. М. // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1960. N 3. С. 432.
9. Багров Н. А. // Вопросы долгосрочных прогнозов погоды. Тр. ЦИП, 1959. С. 3–24.
10. Яковлев А. А. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1975. Т. 11. N 6. С. 639–642.

ВНЦ государственный институт им. С.И. Вавилова,  
Институт Арктики и Антарктики,  
С.-Петербург

Поступила в редакцию  
27 февраля 1997 г.

**A. A. Yakovlev, G. G. Sakunov, O. D. Barteneva. Statistics of Aerosol Phase Scattering Functions Derived from Measurements in Central Arctic Region.**

The aerosol phase functions have been derived from the full atmospheric phase functions that had been measured during drifting station «North Pole-28». The statistics of restored aerosol phase functions have been analyzed. The means, variances, angular correlations, and eigenvectors of covariance matrix for logarithms of directional aerosol scattering coefficients in the angle range  $0^\circ$ – $180^\circ$  have been presented. It is shown, that the variances of aerosol directional scattering coefficients are greater than those for full atmospheric scattering, especially in the scattering angles range  $80^\circ$ – $140^\circ$ . The correlations between the angular scattering coefficients are more than 0,5 for the whole range of scattering angles used in measurements.