

В.Ф. Радионов¹, Г.Г. Сакунов¹, А.А. Яковлев²

Статистика индикатрис рассеяния света в Антарктическом регионе

¹ ГНЦ АА НИИ,² ФГУП НИИ ФООЛИОС при ВНЦ ГОИ им. С.И. Вавилова, г. Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 30.03.2004 г.

Проведен анализ статистик вариаций индикатрис рассеяния света в приземном слое атмосферы в диапазоне углов рассеяния от 20 до 160°, измеренных на Антарктическом континенте и в прилегающей морской акватории. Рассчитаны средние значения и среднеквадратические отклонения направленных коэффициентов рассеяния для условий измерений на антарктических станциях и у берегов Антарктиды. Показано, что распределение вероятностей для коэффициентов аэрозольного рассеяния света близко к логарифмически нормальному. Отмечен высокий уровень взаимной корреляции между коэффициентами рассеяния света при разных углах рассеяния. Установлено, что 99% дисперсии индикатрис рассеяния описывается двумя первыми собственными векторами ковариационной матрицы.

Исходная выборка представлена массивом из 461 индикатрисы рассеяния света, из них 365 получены для прибрежной зоны Антарктического континента [1]. Остальные 96 индикатрис рассеяния света измерены на судах Гидрометеослужбы в акватории Мирового океана южнее 55° ю.ш. в трех рейсах: НИСП «Прилив» в Тихом океане в период январь–февраль 1981 г.; НИС «Профессор Визе» в Атлантическом океане, декабрь 1982 г.; НЭС «Академик Федоров» в Атлантическом и Индийском океанах, апрель–июнь 1992 г. Прибор и методика измерений на антарктической станции Мирный описаны в работах [1, 2]. При измерении на судах нефелометр устанавливался на треноге на одном из крыльев палубы ходового мостика или на верхней палубе на высоте 10–20 м над уровнем моря с наветренной стороны, чтобы исключить влияние аэрозолей, образуемых на судне (дым, вентиляционные выбросы и т.п.). Место установки прибора не освещалось посторонними источниками света.

На ст. Мирный в большинстве случаев измерения проводились в условиях высокой прозрачности атмосферы [1]. Для 336 из 365 индикатрис рассеяния света значения метеорологической дальности видимости (МДВ) в приземном слое атмосферы превышали 70 км, а относительная влажность воздуха была менее 80% (минимальная – 35%). Поэтому результаты измерений на ст. Мирный обрабатывались отдельно для исследования статистики вариаций коэффициентов рассеяния света в условиях с предельно высоким уровнем прозрачности атмосферы. Метеорологические условия измерений в прилегающей морской акватории существенно отличались от условий на ст. Мирный. В зимнее время при образовании припайного льда влияние стокового ветра в районе ст. Мирный распространяется всего на несколько десятков километров от границы материкового льда. За пределами пояса

морского льда метеорологические условия соответствуют морскому субантарктическому климату. Более 80% судовых измерений выполнено при относительной влажности воздуха от 70 до 100% (минимальная – 55%) и при МДВ менее 70 км. Из 96 морских индикатрис рассеяния при статистическом анализе результатов измерений были исключены пять индикатрис, полученных в условиях тумана.

Наши исследования показывают [3, 4], что распределение вероятностей для аэрозольной составляющей индикатрисы рассеяния света в различных регионах земного шара близко к логарифмически нормальному. Это же справедливо и для выборки антарктических измерений.

На рис. 1 приведены графики выборочных интегральных функций распределения для логарифмов аэрозольного, молекулярного и суммарного коэффициентов рассеяния.



Рис. 1. Интегральное распределение вероятностей для логарифмов коэффициентов рассеяния по данным выборки в 456 измерениях (1 – полное, 2 – аэрозольное, 3 – молекулярное рассеяние)

Масштаб вдоль оси вероятностей (оси абсцисс) выбран таким образом, чтобы выборка из нормального

распределения представлялась графиком, близким к прямой линии. Деления на оси абсцисс соответствуют 0, ± 1 , ± 2 , и ± 3 среднеквадратическим отклонениям от математического ожидания для нормального закона распределения.

Из рис. 1 видно, что распределение вероятностей для аэрозольной компоненты рассеяния можно считать близким к логарифмически нормальному для области значений коэффициентов рассеяния, превышающих пороговый уровень $0,001 \text{ км}^{-1}$. Аналогичное утверждение справедливо и для угловых коэффициентов рассеяния света (индикатрис).

Распределение вероятностей для молекулярной компоненты рассеяния близко к нормальному в линейном масштабе, но имеет дисперсию на два порядка меньше дисперсии аэрозольного рассеяния.

Распределение вероятностей для полной индикатрисы рассеяния отличается от логарифмически нормального, но в то же время к нормальному в логарифмическом масштабе ближе, чем в линейном. Кроме того, коэффициенты рассеяния света и их вариации для разных углов рассеяния отличаются на порядок. Поэтому анализ статистических параметров вариаций индикатрис полного рассеяния проводился для логарифмов угловых коэффициентов рассеяния света.

На рис. 2 приведены результаты оценок средних логарифмов направленных коэффициентов рассеяния и их среднеквадратических отклонений (СКО) для измерений на ст. Мирный и в акватории Южного океана по данным судовых измерений.

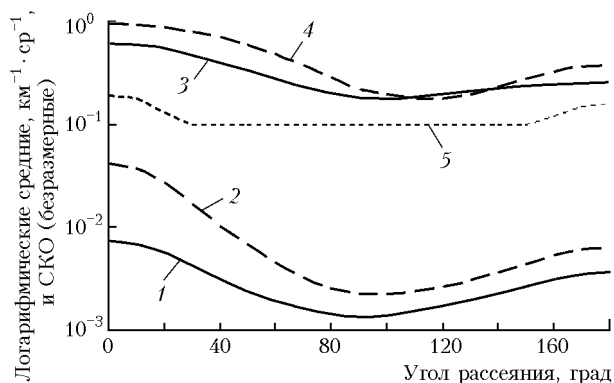


Рис. 2. Среднелогарифмические индикатрисы рассеяния и среднеквадратические отклонения угловых коэффициентов рассеяния: 1 – среднелогарифмическая индикатриса рассеяния для измерений на континентальных станциях; 2 – среднелогарифмическая индикатриса рассеяния по данным 91 корабельного измерения на широтах свыше 55° ю.ш.; 3 – оценка среднеквадратических вариаций угловых коэффициентов рассеяния для измерений на континентальных станциях; 4 – оценка среднеквадратических вариаций угловых коэффициентов рассеяния для корабельных измерений; 5 – оценка среднеквадратического уровня ошибок измерений [5]

Оценки вариаций получены методами информационно-статистического анализа [5] с учетом поправок на уровень ошибок измерений. При этом поправка введена только на измерительные ошибки, нестабильность же аэрозольной компоненты за время

измерения индикатрисы (что требуется учитывать, например, при восстановлении спектра размеров аэрозольных частиц) не учитывалась.

Расчитанные средние индикатрисы рассеяния света могут быть приняты за достаточно статистически обеспеченную характеристику углового распределения рассеянного света в приземном слое атмосферы над Антарктидой и субантарктической акваторией океана. Представленная оценка вариаций угловых коэффициентов рассеяния соответствует достаточно устойчивому состоянию атмосферы при отсутствии осадков и тумана.

Автокорреляции логарифмов угловых коэффициентов рассеяния, рассчитанные по всей выборке из 456 измерений, представлены на рис. 3. Следует отметить в целом высокий уровень корреляций (свыше 0,75), что объясняется коррелированностью всей индикатрисы рассеяния с интегральным коэффициентом рассеяния. Напомним, что экспериментально получены значения коэффициентов рассеяния только в области углов от 20° до 160° [1]. Значения для углов рассеяния 0° , 10° , 170° и 180° определялись путем экстраполяции логарифмов коэффициентов рассеяния по косинусам углов рассеяния [6]. При высокой прозрачности атмосферы рассеяние при малых углах выделяется слабо, и погрешность экстраполяции невелика при выбранном алгоритме [6].

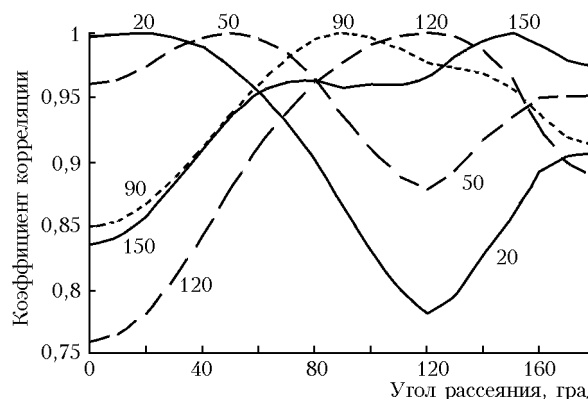


Рис. 3. Автокорреляции логарифмов угловых коэффициентов рассеяния. Цифры у кривых соответствуют углу рассеяния, для которого угловой ход корреляции представлен данной кривой

Корреляционные связи логарифмов угловых коэффициентов рассеяния с логарифмом интегрального коэффициента рассеяния, а также с абсолютной и относительной влажностью воздуха для всей выборки (456 измерений) показаны на рис. 4.

Логарифмы угловых коэффициентов рассеяния заметно связаны как с абсолютной, так и с относительной влажностью воздуха, причем средний уровень корреляции с абсолютной влажностью составляет около 0,6.

В связи с высокой взаимной коррелированностью значений угловых коэффициентов рассеяния вся индикатриса в логарифмическом масштабе может быть хорошо аппроксимирована с использованием разложения по ограниченному числу собственных векторов автоковариационной матрицы.

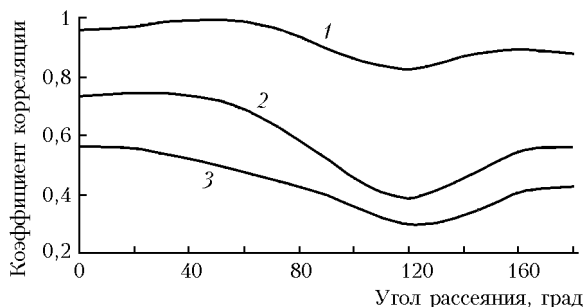


Рис. 4. Корреляции угловых коэффициентов направленного рассеяния с интегральным коэффициентом рассеяния (1), абсолютной (2) и относительной (3) влажностью

На рис. 5 представлены графики четырех первых собственных векторов ковариационной матрицы логарифмических индикатрис рассеяния в масштабе, пропорциональном корню квадратному из соответствующего собственного числа. Значения первых четырех собственных чисел составляли 5,184; 0,2126; 0,02743 и 0,01449. При этом вклад двух первых собственных чисел в след ковариационной матрицы составил более 99%. То есть с погрешностью менее 1% вариации индикатрис рассеяния в логарифмическом масштабе могут быть описаны с использованием всего двух параметров — коэффициентов разложения индикатрисы по двум собственным векторам.

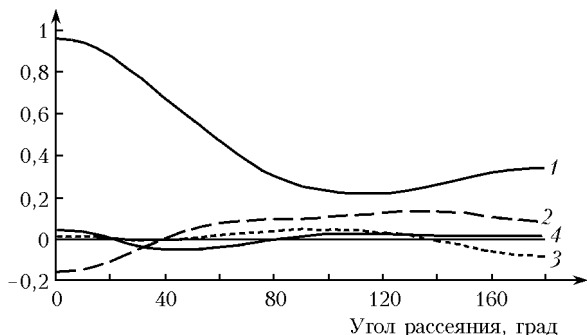


Рис. 5. Графики четырех первых собственных векторов ковариационной матрицы. Номера кривых соответствуют порядковому номеру вектора

Выводы

Получены оценки статистики вариаций индикатрис рассеяния света в приземном воздухе в Антарктике.

Показано, что распределение вероятностей для логарифмов коэффициентов аэрозольного рассеяния близко к логарифмически нормальному.

V.F. Radionov, G.G. Sakunov, A.A. Yakovlev. Statistics of light scattering phase functions in the Antarctic region.

The analysis of statistics of variations of light scattering phase functions in the surface layer of the atmosphere in the range of scattering angles from 20° to 160° is carried out for measurements on the Antarctic continent and in adjoining sea water areas. The mean values and square root deviations of angular scattering coefficients for conditions of measurements at the Antarctic stations and at the coast of Antarctica are founded. It is shown that the probability distribution of aerosol component of light scattering factors is close to lognormal. The high level of correlation between light scattering factors for various scattering angles is pointed out. It is established that 99% of variance of the scattering phase function is described by the two first eigenvectors of the covariance matrix.

Рассчитаны средние индикатрисы рассеяния для условий наблюдения на прибрежной станции Мирный и в прилегающей к Антарктиде морской акватории. Проведено сопоставление полученных результатов.

Результаты расчетов угловых корреляций в индикатрисах рассеяния демонстрируют высокую (свыше 0,75) взаимную коррелированность между логарифмами коэффициентов рассеяния света для разных углов рассеяния, а также еще большую коррелированность с интегральным коэффициентом рассеяния.

Значения коэффициентов рассеяния тесно коррелированы с абсолютной и относительной влажностью воздуха, причем с абсолютной влажностью корреляция выше.

Рассчитаны главные компоненты ковариационной матрицы логарифмических индикатрис, и установлено, что основные вариации индикатрис могут быть описаны с погрешностью менее 1% с использованием разложения только по двум первым собственным векторам.

Полученные для Антарктиды закономерности и характеристики пространственного распределения рассеянного света соответствуют условиям предельно высокой прозрачности атмосферы.

1. Радионов В.Ф., Сакунов Г.Г., Яковлев А.А. Исследование светорассеяния и горизонтальной прозрачности приземного слоя атмосферы Антарктиды // Метеорол. и гидрол. 2002. № 11. С. 31–38.
2. Сакунов Г.Г., Бартенева О.Д., Радионов В.Ф. Экспериментальные исследования индикатрис рассеяния света в приземном слое атмосферы // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1995. Т. 31. № 6. С. 782–791.
3. Яковлев А.А., Сакунов Г.Г., Бартенева О.Д. Статистика аэрозольных индикатрис рассеяния света по данным измерений в Центральном арктическом бассейне // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10. № 10. С. 1158–1163.
4. Dolgova N.A., Radionov V.F., Sakunov G.G., Yakovlev A.A. Cumulative probability distribution functions for directional light scattering coefficients in marine atmosphere // Proc. Intern. Conf. «Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW'2001)». St. Petersburg, Russia. 2001, September 25–29. P. 329–333.
5. Яковлев А.А. Информационно-статистический подход к анализу результатов натурных спектрофотометрических измерений // Оптич. ж. 2000. Т. 67. № 5. С. 42–46.
6. Бартенева О.Д., Довгялло Е.Н., Полякова Е.А. Экспериментальные исследования оптических свойств приземного слоя атмосферы // Тр. ГГО им. А.И. Воейкова. Вып. 220. Л.: Гидрометеониздат, 1967. 244 с.