

УДК 533.1

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ПАРАМЕТРА КОНДЕНСАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ПРИЗЕМНОГО АЭРОЗОЛЯ

© А.А. Исаков, А.В. Тихонов, Е.В. Ромашова

Ключевые слова: аэрозоль; конденсационная активность; спектральные зависимости; спектрополяриметр; метод главных компонент.

Проведен статистический анализ пяти годовых спектральных зависимостей параметра конденсационной активности приземного аэрозоля, полученных в 2004–2008 гг. на Звенигородской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН.

Исследование конденсационной активности аэрозоля (способности частиц ассимилировать и диссимилировать влагу при изменении относительной влажности воздуха) важно, в частности, в связи с влиянием аэрозоля на радиационный баланс системы Земля – атмосфера и тем самым на климат планеты. Конденсационная активность влияет как на прямой (способность частиц поглощать и рассеивать солнечное излучение), так и на косвенный (влияние аэрозоля на процессы облакообразования, время жизни и микроструктуру облаков) радиационные эффекты аэрозоля. В данной статье приводятся результаты статистического анализа пяти годовых массивов спектральных зависимостей параметра конденсационной активности приземного аэрозоля, полученных в 2004–2008 гг. на Звенигородской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН. Измерения проводились с помощью спектрополяриметра [1]. Спектрополяриметр регистрирует ортогонально поляризованные (в плоскости рассеяния и перпендикулярно к ней) составляющие коэффициента направленного светорассеяния D на углах рассеяния 45° , 90° и 135° в спектральном диапазоне $0,4\text{--}0,75$ мкм с шагом по длине волны 20 нм.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Измерения проводились практически ежедневно. Количество пропусков (по причинам неисправности прибора и отключения электропитания) составляло единицы дней за год. Прибор оборудован нагревателем потока воздуха, просасываемого через рабочую камеру, на $10\text{--}15^\circ\text{C}$. В результате нагрева происходит контролируемое уменьшение относительной влажности воздуха. С помощью такого воздействия на аэрозоль и измерения оптических параметров до и после нагрева можно оценить конденсационную активность аэрозоля. Конденсационная активность аэрозоля зависит от его физико-химических свойств, а ее проявление в оптических свойствах аэрозоля еще и от оптических постоянных вещества частиц.

Для описания трансформации частиц в поле переменной относительной влажности воздуха часто ис-

пользуется однопараметрическая эмпирическая формула Хенела [2]:

$$r(Rh) = r(0)(1 - Rh)^{-\varepsilon}, \quad (1)$$

где r – радиус частицы; Rh – относительная влажность воздуха. Кастеном [3] предложено аналогичное выражение для зависимости от влажности коэффициента рассеяния σ :

$$\sigma(Rh) = \sigma(0)(1 - Rh)^{-\gamma}. \quad (2)$$

Такая же формула достаточно хорошо выполняется и для коэффициента направленного светорассеяния D (см., например, [4]):

$$D(Rh) = D(0)(1 - Rh)^{-\lambda}. \quad (3)$$

В работе [5] показано, что χ для угла рассеяния 45° на длине волны $0,5$ мкм примерно равно удвоенному значению ε . В дальнейшем под параметром конденсационной активности мы будем подразумевать его оптический аналог χ , рассчитанный для угловых характеристик рассеяния. Параметр χ , вообще говоря, зависит от длины волны и угла рассеяния. Зависимости $\chi(\lambda, \varphi)$, очевидно, несут больше информации о физико-химических свойствах частиц, чем измерения на одной длине волны. Ниже анализируются зависимости $\chi(\lambda)$ для угла рассеяния $\varphi = 45^\circ$.

Весь пятилетний массив данных был разбит на пять подмассивов, содержащих данные с 1 января по 31 декабря каждого года. Анализ выполнялся *методом главных компонент* (МГК). Этот подход позволяет выделить основные характеристики изменчивости компонент случайного вектора и сократить его размерность. Коротко напомним основные моменты (МГК). Каждая реализация, состоящая из m чисел, представляется в виде m -мерного вектора, а весь набор данных из n реализаций – в виде двумерного массива $n \times m$. Для него рассчитывается ковариационная матрица, система ее собственных векторов и собственных чисел. Вектора

используются как базис для разложения конкретных реализаций, при этом собственные числа имеют смысл дисперсий соответствующих коэффициентов разложения. Если ряд собственных чисел быстро убывает, то для разложения (т. е. параметризации) реализаций можно использовать несколько первых коэффициентов разложения (их число определяется соотношениями между собственными числами), в чем и заключается основной аспект метода главных компонент. Второй аспект связан с тем, что собственные векторы, соответствующие наибольшему собственному числу, указывают на «направление» преобладающих вариаций исследуемой характеристики. Отметим еще очевидное свойство коэффициентов разложения, вытекающее из их определения, – равенство нулю средних по массиву значений $\langle C^i \rangle = 0$.

Каждый из подмассивов содержал около тысячи реализаций. Из-за пространственно-временных вариаций параметров аэрозоля в процессе измерений некоторое количество регистрограмм было отбраковано. Этим объясняется разница в числе реализаций в подмассивах. Каждая реализация представлялась в виде 16-мерного вектора $\chi(\lambda_i)$. Значения λ_i находились в спектральном диапазоне $\lambda = 400\text{--}700$ нм. Для больших длин волн ошибка определения $\chi(\lambda)$ часто оказывалась сравнимой с величиной самого параметра – 0,2 и более.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В дополнение к ковариационным матрицам для всех подмассивов были рассчитаны и корреляционные матрицы R_k^i . Общей особенностью для всех пяти корреляционных матриц является монотонное падение величины коэффициента корреляции с увеличением разности $i - k$ в номерах компонент вектора реализации, т. е. разности соответствующих длин волн. Так, величина R_{16}^1 для всех пяти массивов не превышает 0,7, т. е. с вариациями первой компоненты $\chi(\lambda = 0,4$ мкм) связаны лишь 50 % дисперсии вариаций $\chi(\lambda = 0,7$ мкм). Первые собственные числа составляют от 0,86 до 0,92 следа ковариационных матриц, вторые – 0,04–0,08. Первые собственные векторы у всех массивов очень схожи – слабый рост в «красную область» (рис. 1); в первом же приближении их можно считать постоянными. Знакопеременные вторые векторы практически линейно зависят от длины волны и имеют один «ноль» (в том смысле, в каком имела бы ноль интерполирующая их непрерывная функция) в области $\lambda = 0,6$ мкм. На рис. 1 по оси абсцисс показан номер компоненты векторов, которому однозначно соответствует длина волны в спектральной зависимости параметра Хенела. Средние по ансамблям $\langle \chi(\lambda) \rangle$ заметно различаются по уровню, но имеют сходные спектральные зависимости – почти линейный рост с длиной волны в области 0,4–0,6 мкм, далее следуют резкий излом и нейтральный спектральный ход (рис. 1). Интерпретировать такие закономерности, на наш взгляд, можно следующим образом. Для спектральных зависимостей ряда оптических характеристик аэрозоля диапазон длин волн $\lambda = 0,65 \div 0,7$ мкм является особой областью. По нашим данным, здесь нередко наблюдаются заметные отклонения спектрального хода $D(\lambda)$ от обратнотемпературной зависимости, прекращается рост (а иногда и начинает-

ся спад) модуля степени линейной поляризации света, рассеянного под углами $\varphi \geq 90^\circ$. По данным ИОА СО РАН [6, 7], в этой же примерно области длин волн меняется спектральный ход коэффициента экстинкции и т. д. В отмеченных работах высказывалось естественное предположение, что в этом диапазоне длин волн происходит перераспределение вкладов в рассеяние субмикронной и грубодисперсной фракций аэрозоля. Применительно к конденсационной активности аэрозоля это означает ее уменьшение для частиц с радиусами $r \approx 0,5$ мкм и более. Статистический анализ не только позволяет параметризовать исследуемые характеристики, но выявить особенности их вариаций. Так, постоянство первого вектора отражает тот факт, что основные изменения χ происходят без значительных изменений его спектрального хода. Последние описываются вторым собственным вектором с заметно меньшим соответствующим собственным числом.

На рис. 2 приведены гистограммы распределений первых собственных чисел для пяти лет 2004–2008 гг. За исключением несколько выпадающего заметно более широкого распределения 2006 г. эти кривые очень похожи. Интересная особенность этих распределений состоит в том, что максимумы их смещены в область отрицательных значений (напомним, что средние по ансамблю для C^i равны нулю). Асимметрия распределения связана с более «длинным» правым крылом, т. е. ситуации с большими значениями χ более вероятны, чем малыми.

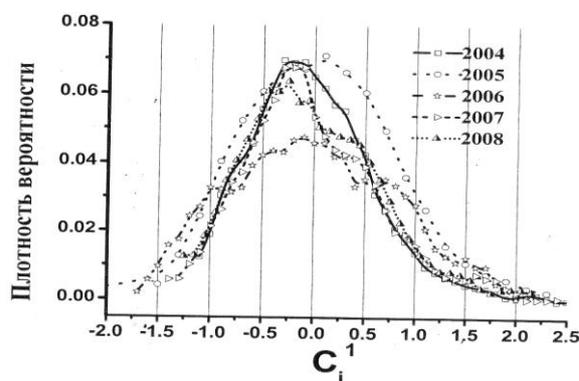


Рис. 1. Средний спектральный ход параметра конденсационной активности и собственные векторы ковариационной матрицы $\chi(\lambda)$

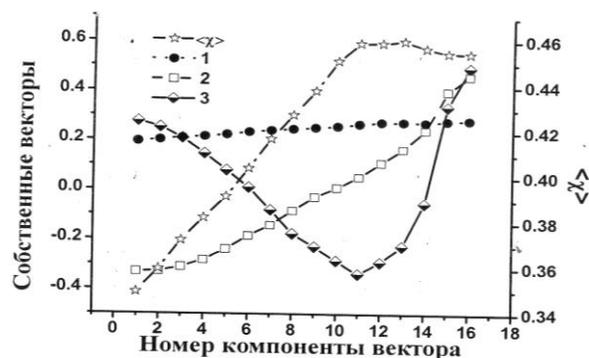


Рис. 2. Распределения первых коэффициентов разложения $\chi(\lambda)$ для пяти годов наблюдений

Для одномодального распределения однородных оптически мягких (т. е. показатель преломления вещества аэрозоля близок к единице) сферических частиц изменчивость индикатрисы рассеяния под углом рассеяния 45° определяется аргументом $(2\pi r/\lambda) \cdot (n-1)^{0.5}$ [8], где n – показатель преломления вещества частиц. При осушении аэрозоля происходят два конкурирующих процесса – уменьшение радиуса r и, как следствие, повышения концентрации растворенных солей, увеличение n . Реакция параметра Ангстрема α для такой модели на изменение аргумента зависит от того, какой из множителей превалирует. Если произведение размера на корень квадратный из разности $n - 1$ при нагреве уменьшается, то параметр α по модулю увеличивается. Спектральный ход оптического параметра конденсационной изменчивости χ для угла $\varphi = 45^\circ$ обычно характеризуется уменьшением χ с ростом длины волны [9]. Эта картина чаще других реализуется в природных условиях. Для обратностепенного распределения частиц по размерам с постоянной по радиусу частиц конденсационной активностью параметр Ангстрема не меняется в процессе осушки, а параметр Кастена имеет нейтральный спектральный ход (если не учитывать ограничения на концентрацию частиц при размерах, стремящихся к нулю и бесконечности). И, наконец, в случае бимодальных распределений с разной во фракциях природной частиц, возможен, в зависимости от параметров частиц, случай инверсного спектрального хода χ и уменьшение α при осушке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исаков А.А., Груздев А.Н., Тихонов А.В. О долгопериодных вариациях оптических и микрофизических параметров приземного аэрозоля // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 18. № 5–6. С. 393–399.
2. Hanel G. The properties of atmospheric aerosol particles as function of relative humidity at the thermodynamic equilibrium with surrounding moist air // Advances in Geophys. 1976. V. 19. P. 73–188.
3. Kasten F. Visibility forecast in the phase of precondensation // Tellus. 1969. V. 21. № 3. P. 631–635.
4. Панченко М.В., Свириденков М.А., Терпугова С.А., Козлов В.С. Активная спектрофелометрия в исследовании микрофизических характеристик субмикронного аэрозоля // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17. № 5–6. С. 428–436.
5. Терпугова С.А., Панченко М.В., Свириденков М.А., Докукина Т.А. Соотношения между оптическими и микрофизическими параметрами конденсационной изменчивости приземного аэрозоля // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 7. С. 629–634.
6. Ужегов В.Н., Пхалагов Ю.А., Панченко М.В., Козлов В.С., Терпугова С.А., Юшьева Е.П. Статистическая оценка поглощения атмосферного аэрозоля по данным оптических измерений // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20. № 1. С. 25–30.
7. Ужегов В.Н., Кабанов Д.М., Пхалагов Ю.А., Сакерин С.М. Взаимосвязь вариаций аэрозольного ослабления видимой и ИК-радиации приземного слоя воздуха и всей атмосферной толщи // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 4. С. 386–391.
8. Свириденков М.А. Корреляционные связи между оптическими характеристиками и микроструктурой приземного аэрозоля // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т. 16. № 5–6. С. 418–421.
9. Панченко М.В., Терпугова С.А., Юшьева Е.П., Тумахов А.Г. Внутригодовая изменчивость конденсационной активности атмосферного аэрозоля // Физика атмосферного аэрозоля: тезисы трудов Междунар. конф. М., 1999. С. 254–255.

БЛАГОДАРНОСТИ: Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 12-05-00938.

Поступила в редакцию 11 апреля 2013 г.

Isakov A.A., Tikhonov A.V., Romashova E.V. STATISTICAL CHARACTERISTICS OF SPECTRAL DEPENDENCIES OF PARAMETER OF CONDENSATE ACTIVITY OF NEAR-LAND AEROSOL

The statistical analysis of five year spectral dependencies of parameter of condensate activity of near-land aerosol, received in 2004–2008s at Zvenigorod scientific station named after A.M. Obukhov RAS, is made.

Key words: aerosol; condensate activity; spectral dependencies; spectral polar-meter; method of main components.