

С.Д. Андреев, Л.С. Ивлев

ВРЕМЕННАЯ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОЛЕЙ ОПТИЧЕСКИХ И АЭРОЗОЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В АТМОСФЕРЕ. ЧАСТЬ II. АЭРОЗОЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Рассматриваются результаты применения метода нормированного размаха для анализа наблюдений аэрозольных характеристик – счетной и дифференциальной концентрации, функции распределения аэрозольных частиц по размерам. Значения постоянной Херста для рассматриваемых характеристик микроструктуры существенно зависят от масштаба времени, что позволяет обсуждать природу процессов, определяющих их вариации. Показано, что счетная концентрация аэрозолей приземного слоя и их дисперсный состав имеют упорядоченный суточный ход, как это следует и непосредственно из результатов традиционных микрофизических измерений, но закономерности изменчивости в отдельных диапазонах размеров существенно различны.

В [1] рассмотрены результаты применения метода нормированного размаха для анализа нескольких выборок экспериментальных данных об оптических характеристиках атмосферы. Основной вывод [1] можно кратко сформулировать следующим образом: временные вариации оптических характеристик атмосферы – значений оптической толщины или рассчитанных на их основе коэффициентов ослабления – подчиняются закону Херста, причем значения постоянной Херста H существенно отличаются от $H = 0,5$, что свидетельствует об отличии процессов, определяющих их временную изменчивость, от случайных. Согласно [1] вариации оптических характеристик атмосферы полностью согласуются с вариациями их аэрозольной компоненты (в [1] рассматриваются данные для видимой и ближней инфракрасной ($\lambda = 2,2$ мкм) областей спектра). Это можно рассматривать как еще одно свидетельство определяющей роли аэрозолей в формировании оптических свойств атмосферы в этих областях спектра или как свидетельство того обстоятельства, что аэрозольное состояние атмосферы определяется теми же законами, что и стратификация атмосферы, ее молекулярный состав (прежде всего – содержание водяного пара) и пространственное распределение поглощающих излучение газов.

Оптические характеристики аэрозолей, временная изменчивость одной из которых – аэрозольного ослабления – анализируется в [1], являются сложной функцией многих параметров, описывающих микроструктуру и состав частиц, и определить, изменения каких из них приводят к вариациям наблюдаемой оптической характеристики, достаточно сложно. Можно также предположить, что пространственное распределение атмосферных аэрозолей имеет сложную макроструктуру: на фоне относительно однородного поля аэрозольных частиц одного состава («фоновые» аэрозоли) «плавают» облакоподобные образования из частиц с другой микроструктурой. В соответствии с современными представлениями о закономерностях образования и развития подобных систем [2] следует ожидать, что структура такого поля подчиняется законам фрактальной геометрии.

Из многочисленного набора характеристик микроструктуры аэрозолей наиболее доступны для измерений счетная и дифференциальная концентрации частиц (как правило, в некотором ограниченном диапазоне размеров).

Лаборатория физики аэрозолей располагает уникальными массивами соответствующих данных. Подобные измерения в районе Ст. Петергофа проводятся с момента создания Университетского комплекса, т.е. с 1976 г., ежегодно, как правило, в летние (май – июль) или осенние (сентябрь – октябрь) месяцы. Измерения проводятся с помощью фотоэлектрического счетчика частиц АЗ-5 м, который регистрирует счетную концентрацию аэрозольных частиц в нескольких диапазонах размеров при $d \geq 0,2$ мкм. (Границы диапазонов указаны на рисунке, где приведены примеры результатов измерений. Здесь можно отметить, что указанные в тексте значения d соответствуют паспортным данным прибора и в значительной мере условны; установле-

ние истинных значений границ измеряемых диапазонов размеров частиц является достаточно сложной метрологической задачей и требует специального обсуждения). Верхний предел размеров регистрируемых частиц расположен в области $d \approx 15$ мкм (более крупные частицы имеют очень низкий коэффициент аспирации). Погрешность измерений концентрации, составляющая в средней части диапазона измеряемых размеров частиц $\delta N/N \approx 15\%$, резко возрастает в области размеров частиц $d \geq 3,5$ мкм из-за крайне малой статистики (в этой области размеров частиц статистическая погрешность измерений колеблется в пределах от 30 до 100%).

Измерения с помощью фотоэлектрического счетчика, как правило, сопровождаются периодическим забором проб аэрозолей на фильтры Петрянова с их последующей лабораторной обработкой (дисперсионный и элементный состав проб). Однако, к сожалению, периоды наблюдений непродолжительны: как правило, они составляют 15–20 дней. Эта малая продолжительность отдельных циклов наблюдений не позволяет подробно анализировать изменчивость аэрозолей за долговременные периоды.

В июне 1994 г. в пос. Дубочки (южный берег Финского залива, приблизительно в 15 км к западу от Университетского комплекса в Ст. Петергофе, где получена большая часть имеющегося массива результатов наблюдений) в ходе комплексных аэрозольных и оптических исследований [3] производились наблюдения счетной концентрации аэрозолей приземного слоя. В период с 3 июня по 3 июля 1994 г. ежедневно (разумеется, при отсутствии интенсивного дождя) с 9 до 23 ч каждый час проводились наблюдения концентрации и распределения по размерам частиц. Периодически такие измерения проводились на протяжении 2–3 суток непрерывно. Такого рода данные использованы нами для анализа внутрисуточной изменчивости аэрозолей. Используемые для анализа ряды содержат до 40–50 серий наблюдений. (К сожалению, к концу указанного срока начались грозы, что не позволило провести планировавшиеся наблюдения в полном объеме).

Следует отметить, что хотя подобная ограниченность имеющихся в нашем распоряжении выборок, безусловно, может внушать определенные сомнения в надежности результатов их статистической обработки, такая продолжительность отдельных циклов, учитывая типичные погодные условия Ленинградской области в период наблюдений, позволяет гарантировать относительную стабильность воздушной массы на протяжении всего цикла измерений. Иными словами, изменения интегральной концентрации и спектра размеров аэрозолей обусловлены в данном случае преимущественно локальными процессами (действие источников и стоков аэрозолей, расположенных в непосредственной близости от пункта измерений), а также такими процессами, как суточная перестройка стратификации атмосферы и системы конвективных потоков.

Сравнение результатов измерений [3] с аналогичными данными за весь период измерений в районе Ст. Петергофа позволяет констатировать, что общие закономерности изменения концентрации частиц и внутрисуточной трансформации функции распределения частиц по размерам, а также данные о составе аэрозольных частиц хорошо согласуются с соответствующими средними многолетними характеристиками и их достаточно обоснованно можно считать типичными для данного региона и сезона. В то же время при анализе результатов [3] обнаружился ряд особенностей, приводящих к их отличию от типичных многолетних данных:

1. Полученные распределения частиц по размерам нестандартны и, очевидно, в значительной степени деформированы присутствием в воздухе значительного числа крупнодисперсных частиц, по-видимому, органического (растительного) происхождения.

2. Как правило, наблюдается резкий спад значений $N(d)$ в области размеров $d \approx (0,4 \div 0,6)$ мкм, что свидетельствует о нестационарности процесса эволюции спектра размеров частиц (наличие близко расположенных источников частиц, работающих прерывисто).

3. Часто наблюдается клочковатая (типа облачной) пространственная структура поля аэрозолей, что отчетливо проявляется при проведении ряда последовательных измерений как спектров размеров частиц, так и концентрации при практически непрерывных наблюдениях в фиксированном диапазоне размеров. Отмечаемые неоднородности пространственного распределения аэрозолей сравнительно мелкомасштабны (десятки – сотни метров). Однако достаточно часто наблюдающиеся резкие отклонения микроструктурных характеристик от средних во временных интервалах до 1–2 ч свидетельствуют о существовании и более крупномасштабных неоднородностей аэрозольной структуры.

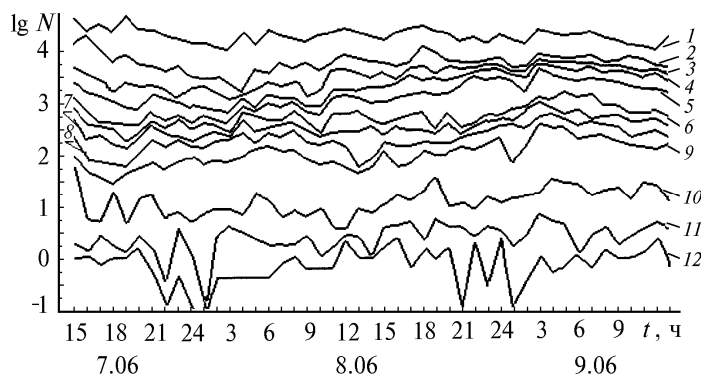
Учитывая изложенное, для анализа структуры временных рядов результатов измерений концентрации и распределения по размерам аэрозольных частиц были сформированы следующие массивы:

I – наблюдения суточного хода 7–9 июня 1994 г. (Дубочки, 47 серий наблюдений; шаг по времени $\Delta t = 1$ ч).

II – наблюдения суточного хода 11–13 июня 1994 г. (Дубочки, 42 серии наблюдений; шаг по времени $\Delta t = 1$ ч).

III – наблюдения суточного хода 6 июня – 3 июля 1994 г. (Дубочки, 141 серия наблюдений; шаг по времени $\Delta t = 1$ ч). Этот массив объединяет массивы I и II, а также данные, полученные при измерениях 20–21 июня, 30 июня – 1 июля и 2 – 3 июля, когда суточные наблюдения прерывались в связи с ливневыми дождями или по техническим причинам (отключения энергоснабжения).

IV – наблюдения в июне – июле 1994 г. (Дубочки, Ст. Петергоф, 67 серий; шаг по времени $\Delta t = 12$ ч). Этот массив сформирован из результатов измерений в указанный период в Дубочках и в районе здания НИИ физики СПб ГУ в Ст. Петергофе. Учитывая значительный суточный ход измеряемых величин (рисунок), для обработки использованы только наблюдения в периоды 9–10 и 18–20 ч.



Временные изменения счетной концентрации аэрозольных частиц, размеры которых превышают $d_0 = 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,5; 2; 4; 7; 10$ мкм (кривые 1–12 соответственно)

В табл. 1–3 приведены результаты анализа методом нормированного размаха экспериментальных данных о короткопериодной изменчивости аэрозолей.

Таблица 1

Постоянная Херста H для счетной концентрации аэрозольных частиц $N (d > d_0, \text{мкм})$

$d_0, \text{мкм}$	I	II	III	IV
0,4	$0,212 \pm 0,007$	$0,207 \pm 0,006$	$0,21 \pm 0,01$	$0,62 \pm 0,05$
0,5	$0,255 \pm 0,007$	$0,248 \pm 0,007$	$0,25 \pm 0,01$	$0,67 \pm 0,06$
0,6	$0,229 \pm 0,010$	$0,235 \pm 0,009$	$0,23 \pm 0,01$	$0,67 \pm 0,07$
0,7	$0,282 \pm 0,012$	$0,277 \pm 0,010$	$0,28 \pm 0,01$	$0,70 \pm 0,07$
0,8	$0,331 \pm 0,013$	$0,340 \pm 0,011$	$0,34 \pm 0,01$	$0,76 \pm 0,07$
0,9	$0,303 \pm 0,013$	$0,311 \pm 0,012$	$0,31 \pm 0,015$	$0,75 \pm 0,07$
1,0	$0,352 \pm 0,02$	$0,360 \pm 0,015$	$0,36 \pm 0,02$	$0,75 \pm 0,08$
1,5	$0,380 \pm 0,03$	$0,392 \pm 0,02$	$0,39 \pm 0,04$	$0,78 \pm 0,07$
2	$0,445 \pm 0,04$	$0,450 \pm 0,04$	$0,45 \pm 0,05$	$0,58 \pm 0,09$
4	$0,320 \pm 0,03$	$0,350 \pm 0,04$	$0,34 \pm 0,04$	$0,62 \pm 0,08$
7	$0,355 \pm 0,04$	$0,362 \pm 0,03$	$0,36 \pm 0,04$	$0,60 \pm 0,08$
10	$0,368 \pm 0,04$	$0,380 \pm 0,03$	$0,37 \pm 0,04$	$0,61 \pm 0,09$

Оценивая результаты проведенной обработки экспериментальных данных, следует отметить следующее:

1. При анализе данных по концентрации частиц, размеры которых превышают d_0 или заключены в определенном диапазоне (см. табл. 1, 2), прежде всего обращает на себя внимание различие значений постоянной Херста H при изменении шага по времени: если при $\Delta t = 1$ ч (массивы I, II, III) значения H , как правило, малы ($H \leq 0,3$), то при $\Delta t = 12$ ч (массив IV) $H \geq 0,5$. Это, как представляется, свидетельствует о том, что концентрация частиц на разных масштабах времени определяется различными процессами. (Сходная ситуация имеет место и для результатов наблюдений аэрозольной составляющей оптической толщины атмосферы [1].)

Постоянная Херста H для дифференциальной концентрации аэрозольных частиц $\Delta N / \Delta d$

Δd , мкм	I	II	III	IV
0,4–0,5	0,182±0,008	0,207±0,006	0,20±0,02	0,60±0,04
0,5–0,6	0,202±0,006	0,218±0,007	0,21±0,02	0,68±0,06
0,6–0,7	0,104±0,004	0,085±0,009	0,10±0,015	0,63±0,06
0,7–0,8	0,082±0,007	0,077±0,010	0,08±0,01	0,72±0,06
0,8–0,9	0,053±0,008	0,048±0,011	0,05±0,01	0,74±0,07
0,9–1,0	0,031±0,006	0,043±0,012	0,04±0,015	0,73±0,07
1,0–1,5	0,048±0,007	0,060±0,015	0,05±0,02	0,76±0,08
1,5–2	0,069±0,009	0,082±0,010	0,08±0,03	0,73±0,07
2–4	0,045±0,008	0,045±0,015	0,05±0,04	0,56±0,09
4–7	0,066±0,006	0,053±0,012	0,06±0,03	0,60±0,08
7–10	0,055±0,012	0,062±0,011	0,06±0,03	0,58±0,08
10–15	0,055±0,014	0,068±0,018	0,07±0,04	0,57±0,09

Постоянная Херста H для нормированной функции распределения аэрозольных частиц по размерам $\Delta N(N\Delta d)$

Δd , мкм	I	II	III	IV
0,4–0,5	0,112±0,007	0,097±0,006	0,11±0,01	0,22±0,02
0,5–0,6	0,105±0,007	0,086±0,007	0,09±0,01	0,17±0,02
0,6–0,7	0,079±0,010	0,065±0,009	0,07±0,01	0,12±0,07
0,7–0,8	0,082±0,012	0,077±0,010	0,08±0,02	0,11±0,07
0,8–0,9	0,031±0,013	0,054±0,011	0,05±0,02	0,11±0,07
0,9–1,0	0,033±0,013	0,053±0,012	0,05±0,015	0,07±0,05
1,0–1,5	0,042±0,02	0,060±0,015	0,06±0,02	0,07±0,06
1,5–2	0,038±0,017	0,039±0,02	0,04±0,03	0,08±0,07
2–4	0,045±0,025	0,045±0,04	0,05±0,05	0,08±0,08
4–7	0,025±0,020	0,053±0,04	0,05±0,04	0,06±0,05
7–10	0,075±0,035	0,062±0,030	0,06±0,04	0,07±0,05
10–15	0,097±0,040	0,080±0,035	0,09±0,05	0,10±0,09

Отметим, что $H \rightarrow 0$ для периодических (или близких к периодическим) вариаций наблюдаемой величины. Таким образом, очевидно, что изменения концентрации частиц претерпевают в достаточной мере упорядоченные суточные колебания. При наблюдениях с шагом по времени, сравнимым с периодом вариаций или превышающим его, такой процесс не может быть зафиксирован.

2. При анализе данных по нормированной функции распределения частиц по размерам (см. табл. 3) для всех рассмотренных массивов значения постоянной Херста оказываются малы (во многих случаях их отличие от нуля сравнимо с погрешностью определения). Физический смысл подобного результата не вполне ясен. Возможно, это связано с тем обстоятельством, что при наблюдениях в Дубочках (массивы I, II, III) функция распределения достаточно закономерно изменяется на протяжении суток (в [2], в частности, анализируются суточные вариации медианного радиуса), а при объединении этих данных с результатами наблюдений в Ст. Петергофе (массив IV) существенно возрастает разброс точек на графике (следует отметить, что на графиках зависимости нормированного размаха от времени, используемых с целью определения значений постоянных Херста, для массивов III и IV периодически наблюдаются скачкообразные изменения).

3. В табл. 1 обращает на себя внимание то, что значения H для канала $d \geq 2$ мкм (массивы I, II, III) и для каналов $d \geq 2, 4, 7, 10$ мкм (массив IV) близки к $H = 0,5$. Это может свидетельствовать либо о преимущественно антропогенной природе частиц в соответствующих областях размеров, либо о большой погрешности измерений в указанных каналах (напомним, что погрешность измерения счетной концентрации гигантских частиц может достигать 30–100%), причем такой значительной, что результаты практически не содержат информации об аэрозоле. Однако сопоставление данных табл. 1–3 делает более предпочтительным первое предположение.

4. В [1] показано, что кривые зависимости нормированного размаха от времени для атмосферного ослабления и его аэрозольной составляющей практически совпадают, в то время как

анализ соответствующих закономерностей для микроструктурных характеристик приводит к существенно иным оценкам постоянных Херста. Однако представляется, что противоречий в этих оценках нет, поскольку, с одной стороны, цикличность изменений оптических и микроструктурных характеристик аэрозолей одинаково проявляется в [1] (дни с «нормальными» условиями) и в данном случае, а с другой – вариации свойств аэрозолей приземного слоя, рассматривающиеся здесь, безусловно, играют важную роль в формировании оптических характеристик толщи атмосферы, но вряд ли полностью определяют ее. В настоящем случае наиболее явно проявляются свойства подстилающей поверхности и приповерхностных локальных источников аэрозолей, в то время как при наблюдениях всей толщи атмосферы их вклад существенно меньше.

1. Андреев С.Д., Ивлев Л.С. Временная и пространственная изменчивость полей оптических и аэрозольных характеристик в атмосфере. Ч. I. Оптические характеристики атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 12. С. 00–00.
2. Федер Ф. Фракталы. М.: Мир, 1991. 260 с.
3. Андреев С.Д., Жуков В.М., Ивлев Л.С. и др. // II Межреспубликанский симпозиум «Оптика атмосферы и океана»: Тезисы докл. Ч. I. Томск: ИОА СО РАН, 1995. С. 95–96.

Научно-исследовательский институт физики
при Санкт-Петербургском государственном университете

Поступила в редакцию
1 августа 1997 г.

S. D. Andreev, L. S. Ivlev. Temporal and Spatial Variation of Optical and Aerosol Characteristics Fields in the Atmosphere. Part II. Aerosol Characteristics.

The results of application of the normalized amplitude method to an analysis of aerosol characteristics – number and differential concentrations and the size distribution function – are discussed in the paper. The values of the Hurst factor for the characteristics of the aerosol microstructure significantly depend on the temporal scale, what allows us to discuss the nature of the processes governing their variability. The aerosols number concentration in the atmospheric ground layer and their dispersion composition are shown to have an ordered 24-hour behaviour (it immediately follows from the results of traditional microphysical measurements), but the regularities of the variability in separate size ranges differ considerably.