

С.Д. Андреев, Л.С. Ивлев

ВРЕМЕННАЯ И ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПОЛЕЙ ОПТИЧЕСКИХ И АЭРОЗОЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В АТМОСФЕРЕ. ЧАСТЬ III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК В АТМОСФЕРЕ

Анализируются результаты моделирования влияния неоднородности пространственной структуры поля аэрозолей на наблюдаемые оптические характеристики трассы (оптическая толщина или определяющееся на ее основе эффективное значение коэффициента ослабления). Показано, что случайное распределение характеристик аэрозолей приводит к смещенным оценкам среднего значения оптической толщины атмосферы. В случае, когда пространственное распределение аэрозолей описывается фрактальными закономерностями, обнаруживается полимодальный характер вероятности наблюдения оптической толщины.

Обсуждающиеся в [1, 2] свидетельства фрактальности структуры временной изменчивости аэрозольного ослабления в атмосфере приводят к мысли о пространственной неоднородности поля атмосферных аэрозолей как одной из вероятных причин наблюдаемого эффекта и о возможности ее описания на основе законов фрактальной геометрии.

Сама идея неоднородности пространственного распределения атмосферных аэрозолей тривиальна и находит многочисленные экспериментальные подтверждения [2–4]. Однако детальных исследований структуры поля аэрозолей, на основе которых можно было бы анализировать количественные закономерности или моделировать реальную ситуацию в условиях атмосферы, до настоящего времени не проводилось прежде всего в связи с отсутствием достаточно надежных и полных массивов соответствующих экспериментальных данных.

Представляется, что полученные в [1, 2] оценки структуры временных рядов результатов наблюдений оптических и аэрозольных характеристик атмосферы создают определенную базу для такого рода исследования. Как отмечено в [1], значение постоянной Херста H связано со значением фрактальной размерности изучаемого процесса D . Приписывая причину обнаруженных в [1, 2] особенностей временных характеристик неоднородности пространственной структуры поля аэрозолей, представляется достаточно разумным описывать последнюю соответствующими закономерностями.

В качестве первого шага исследований избран метод численного моделирования. Проведена серия численных экспериментов по моделированию возможных проявлений неоднородности пространственного распределения оптических аэрозольных характеристик при проведении экспериментальных исследований типа [5] (измерения спектрального пропускания атмосферы на горизонтальных трассах – наиболее простой, с точки зрения интерпретации, вид эксперимента).

Оптические характеристики атмосферных аэрозолей сложным образом связаны с состоянием атмосферы (в первую очередь, с такими характеристиками состояния, как влажность воздуха, степень развития конвективных потоков, структура атмосферной турбулентности) и характеристиками подстилающей поверхности, которая является одним из основных источников (и стоков) аэрозольных частиц. Многие из этих характеристик успешно моделируются методами теории фрактальных систем, что создает определенные основания для испытания подобного подхода и при описании структуры поля аэрозолей в атмосфере.

На данном этапе исследований мы не ставили задачи проследить влияние на свойства атмосферы особенностей пространственного распределения всех характеристик аэрозолей, в той или иной степени определяющих их оптические свойства. Предполагается, что атмосфера состоит из двух компонент, оптические характеристики одной из которых (молекулярной) по-

стоянны и распределены по трассе равномерно, а другой (аэрозольной) – имеют определенную пространственно-неоднородную структуру. Для простоты на этом этапе предполагается, что поле аэрозолей в области R , где расположена трасса L , на которой проводятся измерения оптической толщины, может быть либо однородным, но одновременно во всех точках рассматриваемой области изменяющимся во времени, либо имеет структуру, подобную облачной, причем оптические свойства в областях «сгущения» аэрозолей одинаковы, и все подобные области имеют одинаковый характерный размер l .

В данном случае области задания параметров R и l определяются в достаточной степени произвольно (для удобства расчетов используются нормированные характеристики $R' = R/L$ и $L' = L/l$, так что формально вопрос о реальных значениях параметров не рассматривается). Однако поскольку делается попытка моделирования трассовых измерений типа [5], можно констатировать, что размер модельных ячеек l предполагается порядка десятков или сотен метров, а длина трассы $L \sim 1 - 10$ км. Характерный размер R при этом составляет десятки километров. Таким образом, в данном случае моделируются условия, подобные, скорее, описывавшимся в [2, 3], чем ситуации [4].

Предположение о фрактальности пространственной структуры поля аэрозолей означает, что области «сгущения» аэрозолей располагаются по закону $N \sim r^D$, где N – количество ячеек, характеризующихся линейным масштабом l , и D – фрактальная размерность. Максимально возможное в области R количество заполненных аэрозолем элементов при подобной ячеистой структуре поля есть $N_0 = l R^D$. Таким образом, в качестве меры заполнения ω ($0 \leq \omega \leq 1$), которая при случайном распределении может быть задана произвольно, в этом случае используется величина $\omega = l^3 R^D / R^2$ и при $l \ll R$ она имеет ограниченный диапазон изменения, верхняя граница которого определяется значением фрактальной размерности.

Примеры реализаций пространственного распределения неоднородностей для моделей, использовавшихся при расчетах, схематически изображены на рис. 1. Следует отметить, что визуально представляется затруднительным оценить различия пространственной структуры в рассматриваемых случаях. В этой связи можно отметить, что случайное распределение, вообще говоря, может рассматриваться как частный случай фрактального при значении фрактальной размерности $D = 1,5$.

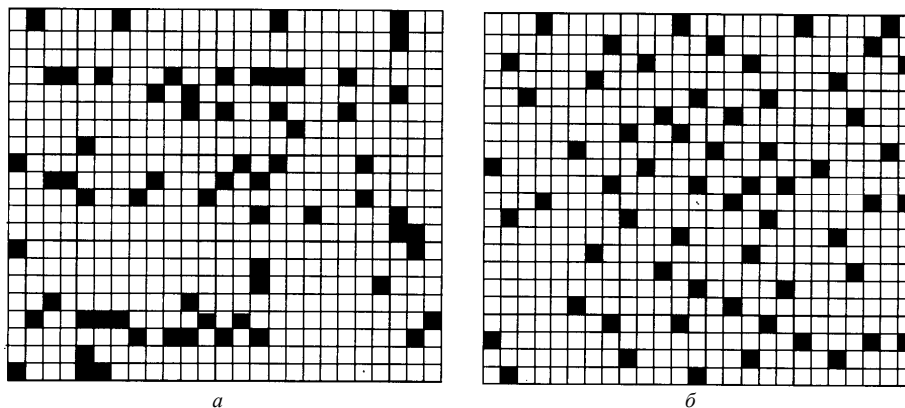


Рис. 1. Фрагменты модельных полей аэрозолей: a – случайное распределение, b – фрактальное ($D = 1,7$) распределение

Некоторые результаты численного эксперимента представлены на рис. 2, 3, где приведены расчетные кривые повторяемости наблюдений определенных значений оптической толщины слоя атмосферы при различных предположениях о пространственном распределении аэрозольного ослабления.

Если области сгущения аэрозолей равномерно заполняют всю трассу, то значения коэффициента аэрозольного ослабления изменяются во времени случайным образом одновременно по всей трассе: результаты измерений (среднее значение измеряемого коэффициента ослабления и его дисперсия) адекватно отражают реальную ситуацию (кривая 1 на рис. 2).

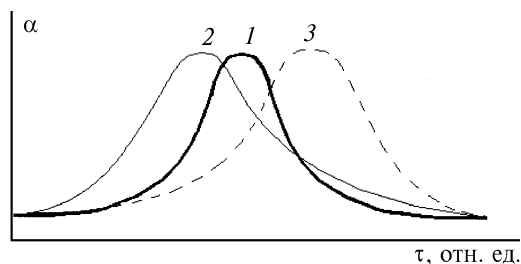


Рис. 2. Повторяемость α (отн. ед.) наблюдений оптической плотности на горизонтально-неоднородной трассе: 1 – однородная трасса при одновременных случайных вариациях аэрозольных характеристик; 2, 3 – случайное распределение аэрозольных «облаков» по трассе при $L \ll R$, $\omega = 0,2$ (2) и $L \rightarrow R$ (3), $\omega = 0,7$

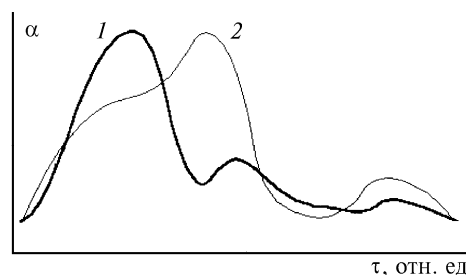


Рис. 3. Повторяемость α (отн. ед.) наблюдений оптической плотности на горизонтально-неоднородной трассе. Фрактальная структура поля аэрозолей: 1 – $D = 1,3$, 2 – $D = 1,5$

В случае, когда поле аэрозольных характеристик предполагается неоднородным, – напомним, что неоднородность моделируется как «облачная» структура – эксперимент приводит к смещенным оценкам. При случайном распределении неоднородностей смещение сложным образом зависит от соотношения размеров неоднородностей l , их дисперсии, протяженности трассы L , характерного размера рассматриваемой области пространства R и заполнения ω . Следует напомнить, что задачи сколько-нибудь детального изучения этой зависимости авторы на настоящем этапе не преследовали, ограничившись модельными расчетами для ограниченного набора конкретных ситуаций (кривые 2, 3 на рис. 2).

Предположение о фрактальности пространственной структуры неоднородностей приводит к полимодальным распределениям вероятности наблюдения коэффициента аэрозольного ослабления, причем положение и соотношение мод определяются теми же параметрами, как в предыдущем случае, и фрактальной размерностью D (см. рис. 3).

В данном случае рассматривается горизонтально-неоднородное (плоское) поле. Возможная область значений фрактальной размерности при этом лежит в пределах $1 < D < 2$. Как уже отмечалось выше, экспериментальные данные о пространственной структуре поля аэрозолей в условиях реальной атмосферы (тем более о каких-либо закономерностях распределения неоднородностей этой структуры) отсутствуют. При подобной ситуации выбор значения фрактальной размерности D представляет собой сложную, практически неразрешимую задачу. Учитывая изложенное в [1, 2] относительно оценок значений постоянной Херста, при расчетах, результаты которых иллюстрируются кривыми рис. 3, мы использовали значения $D = 1,3$ и $1,7$.

Безусловно, полученные при численном эксперименте и приведенные здесь результаты имеют сугубо предварительный и гипотетический характер, нуждаются в дополнительной проверке и экспериментальном подтверждении. Более того, приведенные здесь результаты численного моделирования далеко не исчерпывают всего многообразия возможных ситуаций и имеют, по существу, полукачественный, грубо оценочный характер. Мы полагаем, что более тщательные оценки целесообразно проводить только после получения достаточно надежных данных о реальном характере пространственного распределения. В настоящее время, как представляется, доступен практически единственный способ проверки реальности предположения о фрактальности пространственной структуры поля аэрозолей – анализ повторяемости результатов измерений спектральной прозрачности атмосферы на протяженных горизонтальных трассах (экспериментальные исследования типа [5]). Тем не менее в связи с представляющейся реалистичностью этого предположения и принципиальной важностью учета его последствий при решении многочисленных задач, требующих информации о пространственном распределении различных характеристик атмосферных аэрозолей (из практических проблем такого рода можно прежде всего назвать проблемы дистанционного зондирования атмосферы и земной поверхности, а также проблемы оптической связи), мы считаем необходимым обратить внимание исследователей на данную возможность.

Можно также отметить, что в литературе представлены данные, свидетельствующие о полимодальности реальных кривых вероятности наблюдения прозрачности атмосферы (см., например, [6]). Однако представляется, что поскольку для такого рода выводов используются результаты многолетних циклов исследований, охватывающих все сезоны и практически все

многообразии синоптических ситуаций, данные типа [6], принципиально подобные обсуждаемым здесь и имеющие, возможно, аналогичную природу, отражают несколько иные природные процессы, прежде всего процессы, характеризующиеся существенно другими, чем рассматриваемые в данном случае, временными масштабами. Возможно также, что на данные типа [6] оказывает влияние облачная структура поля аэрозолей, подобная описываемой в [4], хотя в этой работе и отмечается относительная редкость такого рода образований.

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. N 12. С. 1440–1449.
2. Андреев С.Д., Ивлев Л.С. Временная и пространственная изменчивость полей оптических и аэрозольных характеристик в атмосфере. Ч. II. Аэрозольные характеристики // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. N 12. С. 1450–1455.
3. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 366 с.
4. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Веретенников В.В. и др. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. N 7. С. 737–743.
5. Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалагов Ю.А. и др. Оптические свойства прибрежных атмосферных дымок // Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.
6. Шифрин К.С., Шубина Г.Л. // Рассеяние света в земной атмосфере // Материалы Всесоюз. конф. по рассеянию света. Алма-Ата: Наука, 1972. С. 279–288.

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 III. Simulation of Aerosol Characteristics Spatial Distribution in the Atmosphere.

Simulation results on an influence of inhomogeneities of spatial structure of aerosols field on the observable optical characteristics of a path (optical thickness or based on it an effective value of the attenuation coefficient) are treated in this part of the paper. Random distribution of the aerosol characteristics is shown to cause biased estimates of mean value of the atmospheric optical thickness. In the case, when the aerosol spatial distribution is described by fractal regularities, a polymodal character of the probability of the optical thickness observations is being revealed.