

*А.Д. Егоров, И.А. Потапова, Ю.Б. Ржонсницкая, Н.А. Саноцкая*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ  
ИЗЛУЧЕНИЯ ЧАСТИЦАМИ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ**

*A.D. Egorov, I.A. Potapova, Yu.B. Rzhonsnitskaya, N.A. Sanotskaya*

**MODELING OF SCATTERING CHARACTERISTICS  
OF ATMOSPHERIC AEROSOLS PARTICLES**

*Выполнено моделирование рассеивающих свойств аэрозольных частиц. Получено адекватное описание процесса рассеяния с использованием модели неоднородной частицы. Для этой модели могут иметь место существенные ошибки в оптическом определении размеров частиц.*

*Ключевые слова: атмосферный аэрозоль, рассеяние света частицами, структура, моделирование, адекватное описание.*

*It was carried out modeling of scattering characteristics of atmospheric aerosols particles. Adequate description of scattering process was obtained using model of inhomogeneous particle. Essential errors can take place in coarse particle optical sizing for this model.*

*Key words: atmospheric aerosols, light scattering by particles, structure, modeling, adequate description.*

Разработка методов лидарного зондирования атмосферы, важных для целей экологического мониторинга, предполагает решение ряда научных проблем, включая задачу интерпретации лидарной информации. Существенно усложняют проблему неопределенность лидарного уравнения, обращение которого лежит в основе интерпретации результатов, и математическая некорректность обратной задачи. Эти особенности негативно сказываются на достоверности определения искомых величин. Для повышения достоверности определения оптических характеристик атмосферного аэрозоля в работах [1, 2, 3] развиты интегральные методы многопозиционного зондирования атмосферы.

В условиях лидарного зондирования слабо рассеивающей атмосферы, зондирования атмосферного аэрозоля, выполняемого на значительных расстояниях от приемопередатчика, возрастает значение случайной и систематической погрешности измерений, в том числе, погрешности из-за неточного знания фоновой засветки, как это показано в работе [2].

В случае неоднородной непрозрачной атмосферы необходимо учитывать конечность длительности зондирующего импульса. Анализ результатов работы [2] показывает, что погрешности искомых величин, связанные с конечностью длительности импульса, находятся в данном случае в пределах 10 %. При произвольной длительности зондирующего импульса задача решается методом последовательных приближений.

По оптическим характеристикам можно определить характеристики микроструктуры аэрозольных частиц. В частности, коэффициент ослабления оказался

связанным с концентрацией атмосферного аэрозоля. При этом коэффициент ослабления определялся лидарами, трансмиссометрами, а концентрация частиц – оптическими счетчиками. Однако результаты измерений размеров частиц оптическими счетчиками зависят от рассеивающих свойств частиц, поэтому проблема изменчивости рассеивающих свойств частиц, рассматриваемая в работе, является достаточно интересной как составляющая проблемы интерпретации данных лидарного зондирования.

### **1. Результаты анализа данных аэрозольных экспериментов**

Необходимость параметризации оптико-микроструктурных свойств аэрозольных частиц связана с определением характеристик микроструктуры аэрозоля, в том числе по коэффициенту ослабления частиц. Выполнение такой параметризации осложняется из-за существования различных аэрозольных фракций, найденных в работе [4].

Среди других факторов, усложняющих задачу, можно выделить значительную изменчивость рассеивающих характеристик частиц, не укладывающуюся в рамки теории рассеяния света однородной частицей. В связи с этим осуществляется моделирование рассеивающих свойств атмосферного аэрозоля с учетом данных эксперимента. В процессе выполнения совместных лидарных, трансмиссометрических и фотоэлектрических измерений была установлена корреляция между коэффициентом ослабления и концентрацией частиц. В частности, оказалось, что существует тесная связь между коэффициентом ослабления и интегральной счетной концентрацией частиц. Найденную связь можно использовать для определения содержания аэрозоля в воздухе. Она оказалась стабильной в серии выполненных экспериментов.

Для объяснения экспериментальных фактов рассматривается оптическая модель частиц, основанная на данных выполненных экспериментов, и полученное в них распределение частиц по размерам, т.е. факторы, которыми определяется коэффициент ослабления аэрозоля. При этом учитываются результаты фильтровых измерений, выполненных одновременно с фотоэлектрическими измерениями. Принимается во внимание, что между результатами, найденными фотоэлектрическим и фильтровым методами, имело место удовлетворительное согласие в п. Воейково в условиях замутненной атмосферы, в Репетеке, а также в Абастумани в эксперименте АФАЭК-79. Важным для обоснования модели является факт существенного различия этих результатов в п. Воейково.

Известно, что в атмосфере наблюдаются частицы, состоящие из ядра и оболочки, обладающие разными оптическими свойствами. Примером могут служить обводненные частицы аэрозоля. Рассмотрим зависимость отношений размеров частиц  $D(OC)$ ,  $D(FU)$ , найденных, соответственно, оптическим счетчиком  $OC$  и фильтровым устройством  $FU$  от коэффициента ослабления  $\sigma$  км<sup>-1</sup> в п. Воейково, представленную на рис. 1.

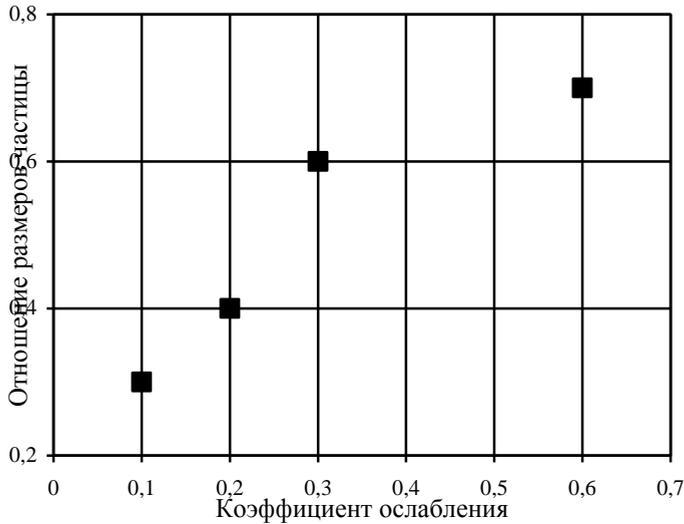


Рис. 1. Результаты сравнительного анализа размеров частиц, измеренных ОС и ФУ

Представленные результаты показывают, что размеры частиц, полученные оптическим счетчиком, меньше размеров частиц, полученных фильтровым аспирационным устройством. Это означает, что индикатриса рассеяния под прямым углом, пропорциональная квадрату размера частицы, у натуральных частиц меньше индикатрисы рассеяния градуировочных частиц, причем различие, достигая в среднем порядка величины, может значительно превышать порядок величины. Следует обратить внимание на то, что этот факт относится, в основном, к частицам грубодисперсной фракции, размеры которых существенно превышают 1 мкм.

## 2. Результаты моделирования характеристик рассеяния излучения частицей

Для детального анализа данных натуральных измерений рассматривается модель неоднородной частицы с радиально изменяющимся показателем преломления в оболочке, покрывающей однородное ядро. Результаты расчетов для частицы с ядром из сажи, показатель преломления которой  $1,82-0,64i$ , представлены на рис. 2.

Здесь  $IR(1)/IR(1,33)$  – относительная индикатриса рассеяния. Угол рассеяния  $90^\circ$  выбран для моделирования процесса рассеяния в фотоэлектрическом счетчике частиц,  $IR = I(L)/I(0)$ ,  $L = \rho_1 - \rho_0$  – безразмерная толщина покрытия,

$$IR(1,33): \quad m = (0,98 - 1,28i)/(1 + d) + 0,84 + 0,64i; \quad (1)$$

$$IR(1): \quad m = (1,64 - 1,28i)/(1 + d) + 0,18 + 0,64i; \quad (2)$$

где  $d = (\rho - \rho_0)/(\rho_1 - \rho_0)$ ,  $\rho = \rho_0 (1 + 0,01k)$ . Величина  $(1 + 0,01k)$  представляет собой отношение размера частицы, включая покрытие, к размеру ее ядра. Формула (1) моделирует неоднородное покрытие из сажи с водой. Формула (2) моделирует неоднородное покрытие из сажи без воды. На рис. 2 приведены зависимости величины  $IR(1)/IR(1,33)$  от величин  $\rho_0, k$  и хорошо видна область минимумов отношений  $IR(1)/I(1,33)$ . На рис. 3 представлено значение  $G$  величины  $k$ , соответствующее минимуму относительной индикатрисы рассеяния при наличии увлажненного покрытия.

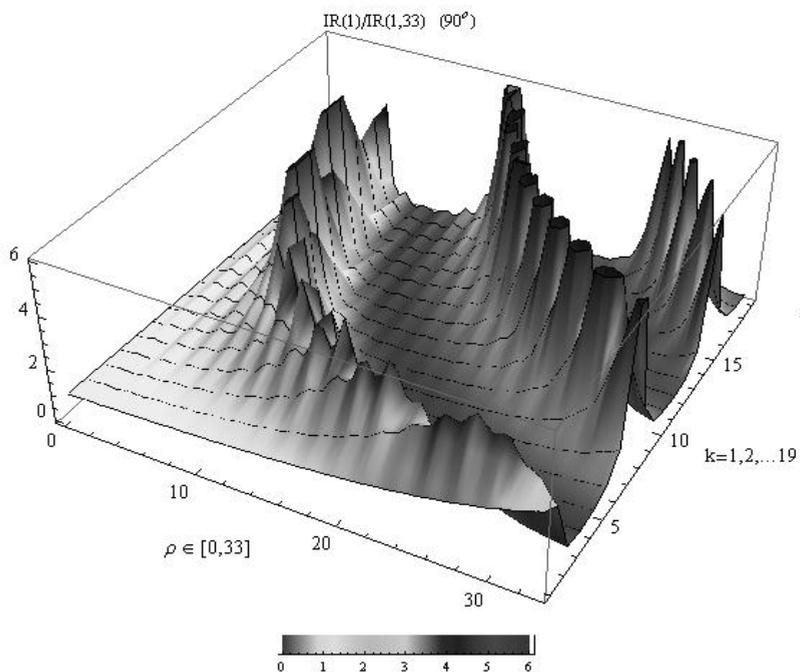


Рис. 2. Зависимость относительной индикатрисы рассеяния от структуры и размера частицы

На рис. 4 представлен минимум относительной индикатрисы рассеяния для разных размеров частиц, факт существования которого негативно сказывается на достоверности результатов оптических измерений аэрозольных характеристик.

G

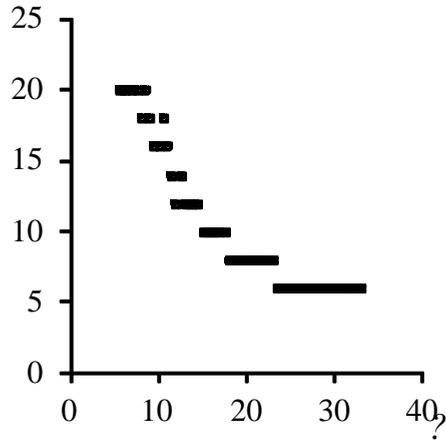


Рис. 3. Значение величины  $k$ , соответствующее минимуму индикатрисы

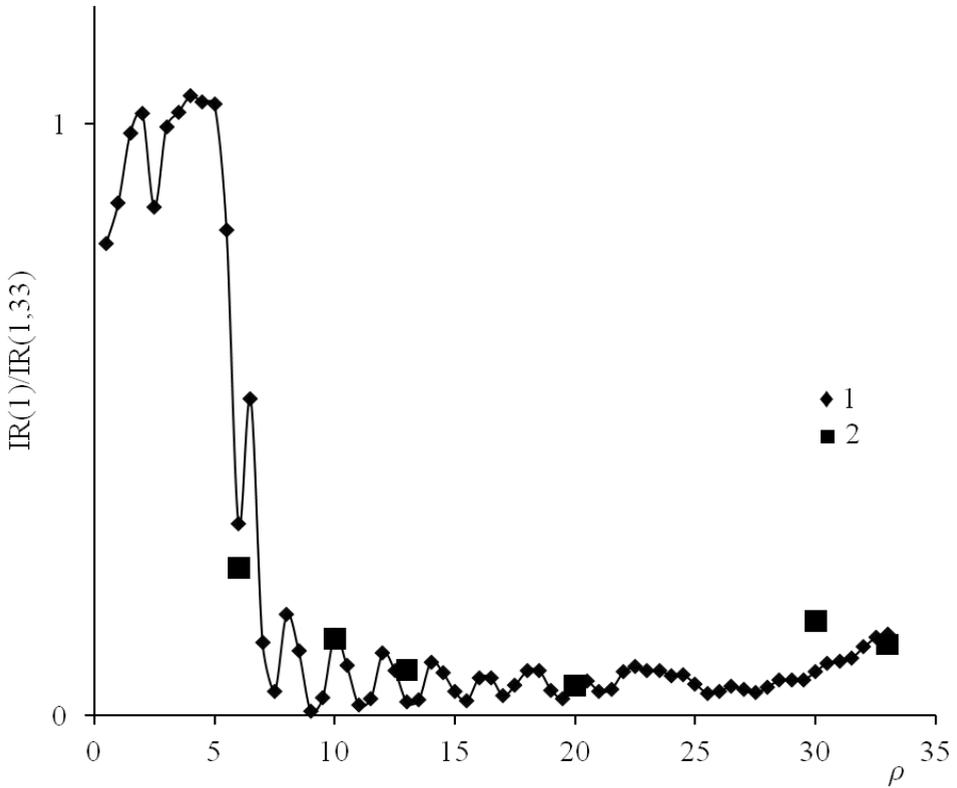


Рис. 4. Минимум относительной индикатрисы рассеяния при наличии увлажненного покрытия. Результаты измерений (1) и расчетов (2)

Приведенные данные согласуются с экспериментальными результатами, показывающими существенное уменьшение индикатрисы рассеяния, которое объясняется структурированностью частицы. Расчеты показывают, что проинтегрированный по углам и при углах рассеяния, меньших  $30^\circ$ , эффект уменьшения индикатрисы рассеяния за счет структурированности частицы выражен значительно слабее.

Таким образом, разработана модель сферически неоднородной рассеивающей частицы, включающей однородное ядро и оболочку с радиально-переменным показателем преломления, отличающаяся диапазоном отношений оболочка/ядро, что позволило достаточно адекватно описать данные эксперимента.

### **Заключение**

Для целей определения микроструктурных характеристик по результатам оптических измерений разработана модель сферически неоднородной рассеивающей частицы, включающей однородное ядро и оболочку с радиально-переменным показателем преломления, отличающаяся диапазоном отношений оболочка/ядро, адекватно описывающая данные эксперимента. Установлено слабое влияние структурированности малых частиц на их рассеивающие свойства, что повышает точность оптических измерений их микроструктурных характеристик.

### **Литература**

1. *Егров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Саноцкая Н.А.* Определение оптических и микроструктурных характеристик атмосферного аэрозоля // Уч. зап. РГГМУ, 2009, № 11, с. 71-79.
2. *Egorov, A.D., Potapova, I.A., Rzhonsnitskaya, Yu.B.* Atmospheric aerosols measurements and reliability problem/ International Journal of Remote Sensing, 2008, 29, p. 2449-2468.
3. *Egorov, A.D., Potapova, I.A., Rzhonsnitskaya, Yu.B.* The treatment of low-power lidar signals // J. Opt. Technol., 2007, 74, 665-668.
4. *Whitby, K.T.* (1978). The Physical Characteristics of Sulfur Aerosols // Atmos. Environ. Vol. 12, p. 135-159.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.2.2 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № П1037 от 31 мая 2010 г.) по направлению «Физика атмосферы».