

Министерство образования и науки  
Федеральное агентство по образованию  
ГОУ ВПО  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
(РГГМУ)

УДК 551.510.7

На правах рукописи



003491675

Сапоцкая Надежда Александровна

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ  
ПО ДАННЫМ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Специальность 25.00.30 –  
метеорология, климатология и агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

11 Фев 2010

Санкт-Петербург 2010

Работа выполнена в ГОУВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
Егоров Александр Дмитриевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Ивлев Лев Семенович  
кандидат физико-математических  
наук, доцент  
Кашлева Лариса Владимировна

Ведущая организация: ГУ «Главная геофизическая  
обсерватория им. А.И. Воейкова»

Защита состоится «25» февраля 2010 года в 15<sup>30</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.197.01 при ГОУВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет» по адресу: 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет».

Автореферат разослан «21» января 2010 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д-р физ.- мат. наук, профессор



А.Д.Кузнецов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Решение проблемы совершенствования методов расчета в области атмосферной оптики в настоящее время приобретает особую актуальность в связи с постоянно увеличивающейся загрязненностью атмосферы и со сложностью параметризации оптико-микроструктурных свойств аэрозольных частиц.

В настоящее время в практике определения концентраций загрязняющих веществ в воздухе используются, в основном, контактные методы измерений. В частности, оптическими счетчиками частиц и фильтровыми аспирационными устройствами измеряются параметры аэрозоля в непосредственной близости от этих приборов. Применение оптических методов позволяет автоматизировать процесс измерений.

Недостаток оптических методов состоит в том, что они не дают возможности непосредственного определения характеристик загрязнения атмосферы.

Исследование проблемы интерпретации результатов, получаемых в процессе определения характеристик атмосферного аэрозоля оптическими методами, позволит усовершенствовать эти методы.

Цель работы – повышение достоверности результатов интерпретации оптической информации об атмосферном аэрозоле на основе применения алгоритмов обработки экспериментальных результатов, базирующихся на теории рассеяния света.

### Основные задачи исследования:

- анализ особенностей оптических методов, применяемых для определения параметров атмосферного аэрозоля;

- оценка систематических погрешностей, существенно влияющих на результаты оптических измерений, с учетом особенностей измерительной аппаратуры;

- разработка модели сигнала направленного рассеяния с учетом экспериментальных данных;

- оценка эффективности методов оптических измерений параметров атмосферного аэрозоля, предназначенных для повышения достоверности результатов измерений.

Методы исследования базируются на решении уравнений Максвелла. Используются методы численного анализа, компьютерное моделирование с применением данных натуральных экспериментов, статистический анализ.

Научная новизна работы:

- определено, что направленное рассеяние излучения частицей с приведенным размером, значительно превышающим единицу, может существенно зависеть от структуры частицы;

- установлено практическое отсутствие зависимости направленного рассеяния излучения частицей с приведенным размером порядка единицы от структуры частицы;

- найденными результатами, описывающими зависимость направленного рассеяния излучения частицей от структуры частицы, удастся объяснить имеющиеся экспериментальные данные;

- установлено уменьшение зависимости направленного рассеяния излучения частицей от структуры частицы при уменьшении угла рассеяния.

Основные положения, выносимые на защиту:

- зависимость направленного рассеяния излучения частицей с приведенным размером, значительно превышающим единицу, от структуры частицы;

- отсутствие зависимости направленного рассеяния излучения частицей с приведенным размером порядка единицы от структуры частицы;

- основы метода оптических измерений аэрозольных характеристик, базирующегося на уменьшении направленного рассеяния излучения частицей при уменьшении угла рассеяния зависимости от структуры частицы.

Достоверность полученных результатов подтверждается хорошими результатами сопоставления теоретических и экспериментальных результатов определения характеристик атмосферного аэрозоля, а также использованием современных физико-математических методов анализа и обобщения данных.

Практическая значимость работы определяется, в соответствии с поставленной целью, повышением достоверности результатов интерпретации оптической информации об атмосферном аэрозоле. Полученные результаты использованы в учебном процессе в РГГМУ и могут быть использованы для целей совершенствования оптических технических средств, предназначенных для мониторинга загрязнения атмосферы.

#### Личный вклад автора

Все основные результаты получены автором лично. Автор выполнил анализ современного состояния проблемы. Нашел новые результаты в области исследования рассеяния излучения частицей.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались на международном симпозиуме «33 International symposium on remote sensing of environment», 2009, на Международном симпозиуме стран СНГ «Атмосферная радиация и динамика» МСАР, 2009, на итоговых сессиях ученого совета РГГМУ, 2008, 2009.

Публикации. Основные результаты исследований опубликованы в 5 статьях.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы - 120 наименований, списка обозначений и сокращений. В ней содержится 121 страница текста, 8 таблиц, 25 рисунков.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** анализируется современное состояние рассматриваемой проблемы, обосновывается актуальность темы диссертации, указывается цель работы, формулируются основные задачи исследования и положения,

выносимые на защиту, отмечается научная новизна работы, ее практическая значимость, аргументируется обоснованность и достоверность полученных результатов, дается краткая характеристика диссертации.

В первой главе осуществляется физическая и математическая постановка задачи интерпретации данных, получаемых в процессе оптических измерений характеристик атмосферного аэрозоля.

Задача установления оптико-микроструктурных связей аэрозольных частиц достаточно сложна из-за существования различных аэрозольных фракций. При ее решении следует учитывать существование различных источников аэрозоля, поставляющих в атмосферу частицы, различающиеся по размеру, химическому составу, оптическим характеристикам. Среди других факторов, усложняющих задачу, можно выделить значительную изменчивость микрооптических характеристик частиц, не укладывающуюся в рамки теории рассеяния света однородной частицей. В связи с этим в работе осуществляется моделирование микрооптических свойств частиц атмосферного аэрозоля с радиально изменяющимся показателем преломления в оболочке, покрывающей однородное ядро.

Во второй главе разрабатываются методы интерпретации данных оптических измерений.

Математическое моделирование рассеяния частицей электромагнитных волн с круговой частотой  $\omega = kc$  и напряженностями электрического  $E_{exp}(i\alpha t)$  и магнитного  $H_{exp}(i\alpha t)$  полей предполагает решение относительно векторов  $E, H$  системы уравнений Максвелла:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} H &= ikm^2 E, \\ \operatorname{rot} E &= -ikH, \end{aligned} \tag{1}$$

где

$k$  – волновое число,

$c$  – скорость света,

$m = n - i\chi$ , – комплексный показатель преломления частицы.

Обозначим через  $r_1$  радиус частицы,  $r$  – расстояние от центра,  $\rho = kr$  – волновое расстояние,  $\rho_1 = kr_1$  – приведенный радиус частицы,  $m_1$  – показатель преломления атмосферы. Показатель преломления  $m(\rho)$  частицы задается функцией от  $\rho$  ( $0 \leq \rho \leq \rho_1$ ); частица характеризуется показателем преломления в виде:

$$\begin{aligned} m(\rho_0) &= m_0 & 0 \leq \rho \leq \rho_0, \\ m(\rho) & & \rho_0 < \rho \leq \rho_1, \\ m(\rho_1) &= m_1 & \rho > \rho_1. \end{aligned} \quad (2)$$

С целью решения этой системы уравнений для моделирования рассеяния плоских волн облучаемыми частицами в работе вводятся потенциалы Дебая  $D$ ,  $B$ , с которыми компоненты напряженностей, электрического и магнитного полей в сферической системе координат связаны известными соотношениями.

Уравнения, которыми описываются потенциалы  $D$ ,  $B$ , можно записать в виде:

$$\Delta(D\rho^{-1} \cos \varphi) + (D m^2 - 2 m' / m) \rho^{-1} \cos \varphi = 0, \quad (3)$$

$$\Delta(B\rho^{-1} \sin \varphi) + B m^2 \rho^{-1} \sin \varphi = 0.$$

Уравнения (3) решаются методом разделения переменных, в результате:

$$\begin{aligned} D &= \sum_1^{\infty} D_j(\rho) P_j^1(\cos \theta), \\ B &= \sum_1^{\infty} B_j(\rho) P_j^1(\cos \theta), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $P_j^1(\cos \theta)$  – присоединенная функция Лежандра, функции  $D_j(\rho)$ ,  $B_j(\rho)$  удовлетворяют уравнениям:

$$m^2 \frac{d}{d\rho} (D_j' / m^2) + (m^2 - j(j+1) \rho^{-2}) D_j = 0, \quad (5)$$

$$B_j' + (m^2 - j(j+1) \rho^{-2}) B_j = 0.$$

В работе находятся численные решения уравнений (5), что позволяет рассмотреть достаточно общий случай моделирования рассеяния аэрозольными частицами. Эти уравнения решаются для неоднородной оболочки, и используется представление потенциалов плоской волны.

На поверхностях раздела: ядро – оболочка, оболочка – среда задаются граничные условия, следующие из непрерывности тангенциальных составляющих векторов напряженностей полей.

Для решения уравнений (5) для потенциалов  $D$ ,  $B$  их можно преобразовать введением функций:

$$Y_j(\rho) = \frac{1}{m^2(\rho)} \frac{D_j'(\rho)}{D_j(\rho)}, \quad (6)$$

$$Z_j(\rho) = \frac{B_j'(\rho)}{B_j(\rho)},$$

в дифференциальные уравнения Риккати:

$$Y_j'(\rho) = -m^2(\rho) Y_j^2(\rho) + \frac{j(j+1)}{\rho^2 m^2(\rho)} - 1, \quad (7)$$

$$Z_j'(\rho) = -Z_j^2(\rho) + \frac{j(j+1)}{\rho^2} - m^2(\rho)$$

Функции  $Y_j(\rho)$ ,  $Z_j(\rho)$  находятся путем численного решения дифференциальных уравнений (7).

Эти уравнения решаются для неоднородной оболочки ( $\rho_0 \leq \rho \leq \rho_1$ ), причем задаются следующие начальные условия:

$$Y_j(\rho_0) = \frac{1}{m_0} \frac{\Psi_j'(m_0 \rho_0)}{\Psi_j(m_0 \rho_0)},$$

$$Z_j(\rho_0) = m_0 \frac{\Psi_j'(m_0 \rho_0)}{\Psi_j(m_0 \rho_0)},$$
(8)

учитывая, что величина  $m(\rho_0 - 0)$  – показатель преломления ядра, может не совпадать со значением  $m(\rho_0)$ , где  $\rho_0$  – приведенный радиус ядра частицы.

Исходные для параметров рассеянной волны коэффициенты  $a_j$ ,  $b_j$  находятся по формулам:

$$a_j = -\alpha_j \frac{m_1 Y_j(\rho_1) \Psi_j(m_1 \rho_1) - \Psi_j'(m_1 \rho_1)}{m_1 Y_j(\rho_1) \xi_j(m_1 \rho_1) - \xi_j'(m_1 \rho_1)},$$

$$b_j = -\beta_j \frac{Z_j(\rho_1) \Psi_j(m_1 \rho_1) - m_1 \Psi_j'(m_1 \rho_1)}{Z_j(\rho_1) \xi_j(m_1 \rho_1) - m_1 \xi_j'(m_1 \rho_1)},$$
(9)

которые получаются с учетом граничных условий.

Здесь

$$a_j = (-i)^j E_0, \quad \beta_j = \frac{1}{m_1} \alpha_j,$$
(11)

$E_0$  – амплитуда вектора электрического поля облучающей волны,

$$\xi_j = \Psi_j + i \chi_j.$$
(11)

Функции  $\Psi_j(\rho)$ ,  $\chi_j(\rho)$  удовлетворяют рекуррентным соотношениям следующего вида:

$$\Psi_{j+1}(m\rho) = \frac{2j+1}{m\rho} \Psi_j(m\rho) - \Psi_{j-1}. \quad (12)$$

Производные этих функций выражаются через сами функции. Для обеих функций имеет место формула:

$$\Psi'_j(m\rho) = \Psi_{j-1} - \frac{j}{m\rho} \Psi_j(m\rho). \quad (13)$$

При этом

$$\Psi_{-1}(m\rho) = \cos(m\rho), \quad \chi_{-1}(m\rho) = -\sin(m\rho), \quad (14)$$

$$\Psi_0(m\rho) = \sin(m\rho), \quad \chi_0(m\rho) = \cos(m\rho).$$

Для расчета коэффициента направленного рассеяния, зависящего от вектора Поинтинга, вводится сумма  $(i_1 + i_2)$ , пропорциональная этому коэффициенту, где

$$i_1 = \left| \sum_1^{\infty} \frac{2j+1}{j(j+1)} (a_j S_j + b_j Q_j) \right|^2, \quad (15)$$

$$i_2 = \left| \sum_1^{\infty} \frac{2j+1}{j(j+1)} (a_j Q_j + b_j S_j) \right|^2, \quad (16)$$

$S_j$ ,  $Q_j$  – угловые функции, связанные с присоединенными функциями Лежандра:

$$S_{j+1} = \frac{(j+1)^2 Q_{j+2} - (j+2)^2 Q_j}{2j+3},$$

$$Q_{j+2} = \frac{(2j+3)Q_{j+1} \cos\theta - (j+2)Q_j}{j+1}, \quad (17)$$

$$Q_1 = 1, Q_2 = 3 \cos \theta, S_1 = \cos \theta.$$

Факторы эффективности ослабления и рассеяния находятся по формулам:

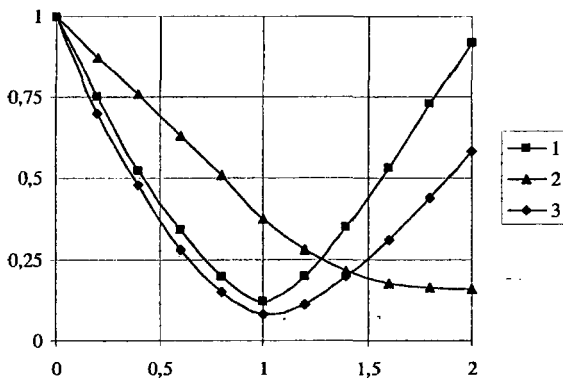
$$k = 2(\operatorname{Re} \sum_1^{\infty} (2j+1)a_j + \operatorname{Re} \sum_1^{\infty} (2j+1)b_j) / \rho_1^2. \quad (18)$$

$$k_s = 2(\sum_1^{\infty} (|a_j|^2 + |b_j|^2)(2j+1)) / \rho_1^2. \quad (19)$$

В третьей главе анализируются данные оптических измерений характеристик атмосферного аэрозоля, осуществляется моделирование направленного рассеяния, приводятся результаты моделирования.

Результаты анализа направленного рассеяния излучения (угол рассеяния 1,57, показатель преломления в ядре из сажи  $m(\rho_0) = 1,82-0,64i$ , приведенный размер частицы 30) представлены на рис. 1, 2. Здесь  $L = k(r_1 - r_0)$  – приведенная толщина покрытия,  $IR$  – индикатриса рассеяния, отнесенная к её значению для  $L = 0, j = 0, \dots, 4$ .

$IR$



$L$

Рис. 1. Результаты анализа направленного рассеяния излучения

( $\rho = 30$ )

1 –  $IR_0$ , 2 –  $IR_1$ , 3 –  $IR_2$

IR

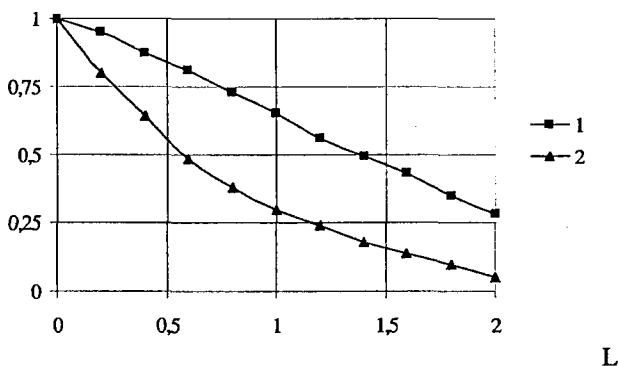


Рис.2. Результаты анализа направленного рассеяния излучения

$$\rho = 30, 1 - IR_3, 2 - IR_4$$

- индекс модельного рассеивающего центра ( $j = 0, 1, 2$  означает присутствие воды в оболочке,  $j = 3, 4$  - ее отсутствие).

Перечень характеристик рассеивающего центра представлен в табл. 1, где  $d = (\rho - \rho_0)/(\rho_1 - \rho_0)$ .

Таблица 1 - Характеристики рассеивающего центра

j	$m(\rho)$
0	1,33
1	$m_0 - (0,49 - 0,64i)d$
2	$(0,98 - 1,28i)/(1+d) + 0,84 + 0,64i$
3	$m_0 - (0,82 - 0,64i)d$
4	$(1,64 - 1,28i)/(1+d) + 0,18 + 0,64i$

Как следует из рис. 1, 2 индикатриса направленного рассеяния может существенно изменяться при изменении структуры аэрозольной частицы (в

частности, при ее обводнении). Характер модельных изменений структуры рассеивающего центра ( $j = 4$  – табл. 1,  $L = 2,0$  – рис. 2) соответствует экспериментальным результатам.

Результаты расчетов относительной величины  $IR(1)/IR(1,33)$  (отношения индикатрисы рассеяния для покрытия, не содержащего воду, когда  $m_1 = 1$ , к индикатрисе рассеяния для покрытия, содержащего воду, когда  $m_1 = 1,33$ ) для разных величин  $\rho$  при заданном отношении  $g = (r_1 - r_0)/r_0$  показывают существенную изменчивость величины  $IR$ .

На рис. 3 представлено значение  $G$  величины  $g$ , соответствующее максимальному уменьшению относительной индикатрисы рассеяния при наличии покрытия (рис. 4).

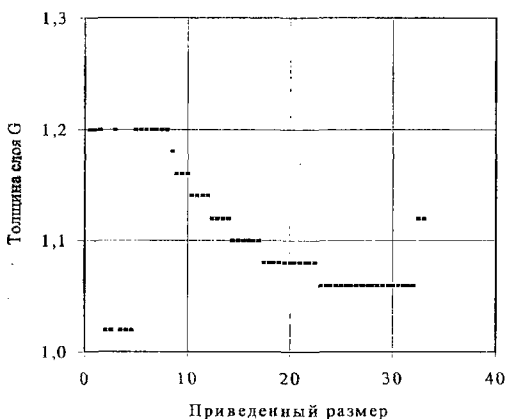


Рис. 3. Значение  $G$  величины  $g$ , соответствующее максимальному уменьшению относительной индикатрисы рассеяния при наличии покрытия

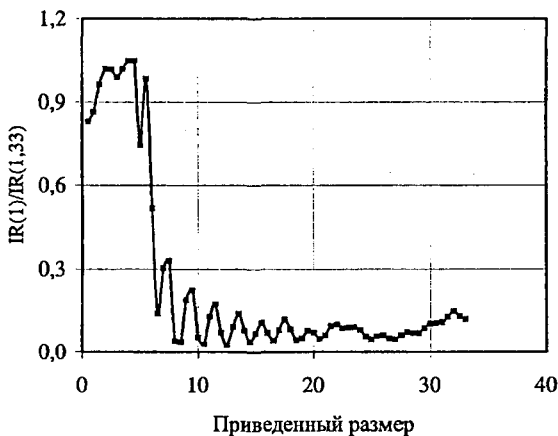


Рис. 4. Максимальное уменьшение индикатрисы  
рассеяния за счет неоднородности частицы

Таким образом, проблема интерпретации данных оптических измерений распределений частиц по размерам достаточно сложна.

С другой стороны, известен результат, когда в лабораторных условиях удалось радикально уменьшить влияние неоднородности частицы на результаты измерений, уменьшая угол рассеяния до  $30^\circ$ .

В табл. 2 приведены результаты модельных расчетов для характеристик рассеивающего центра, представленных в табл. 1, для частиц с приведенным радиусом ядра  $R_a = 30$ .

Здесь  $I$ ,  $I(j)$  – индикатрисы рассеяния однородной и неоднородной частицей сажи ( $R_1 = 32$ ). Их отношение  $I(j)/I$  может быть очень малой величиной (несколько процентов для  $j = 4$ ) при рассеянии под углом  $\theta = 90^\circ$ . Оно существенно увеличивается при меньших углах рассеяния (составляет 30 % при  $\theta = 30^\circ$  для  $j = 4$ ).

Найденное изменение, однако, существенно превышает вариации индикатрисы для различных неоднородностей частиц, найденные в работе в лабораторных условиях.

Таблица 2 – Относительная индикатриса для различных направлений рассеяния

j	0	1	2	3	4	4
угол	90°					30°
I(j)/I	0,80	0,14	0,51	0,25	0,04	0,31

Настоящее исследование относится к условиям натурных измерений в атмосфере, когда оптические свойства частиц изменяются в существенно более широких пределах. Тем не менее, и при измерениях характеристик атмосферного аэрозоля можно достичь существенного уменьшения влияния оптических свойств частиц на результаты измерений за счет выбора угла рассеяния излучения.

Важно подчеркнуть, что в рассматриваемом диапазоне углов имеет место факт меньшего влияния оптических свойств частиц на направленное рассеяние по сравнению с их влиянием на ослабление излучения. Кроме того, влияние меньше для частиц меньших размеров. Особенно это касается частиц аккумулятивной фракции. Данное обстоятельство, а также относительная стабильность распределения числа частиц атмосферного аэрозоля по размерам объясняют существование корреляции между коэффициентом ослабления и концентрацией частиц. Это, в свою очередь, расширяет возможности методов оптических измерений, в частности, лидарного зондирования атмосферного аэрозоля.

**В заключении сформулированы основные выводы работы:**

- найдено, что направленное рассеяния излучения частицей с приведенным размером, значительно превышающим единицу, может существенно зависеть от структуры частицы;

- установлено практическое отсутствие зависимости от структуры частицы направленного рассеяния излучения частицей с приведенным размером порядка единицы;

- найденными результатами, описывающими зависимость от структуры частицы направленного рассеяния излучения частицей, удастся объяснить имеющиеся экспериментальные данные;

- установлено уменьшение зависимости от структуры частицы направленного рассеяния излучения частицей при уменьшении угла рассеяния.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Егоров А.Д., Ржонсницкая Ю.Б., Потапова И.А., Саноцкая Н.А. Определение характеристик атмосферного аэрозоля по данным оптических измерений // Естественные и технические науки, 2010, №1, с.44 – 54.

Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Саноцкая Н.А. Методы лидарного определения характеристик атмосферного аэрозоля, Сборник тезисов Международного симпозиума стран СНГ «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД – 2009) 22 – 26 июня 2009 г., Санкт – Петербург, СПбГУ, МСАРД, 2009 с. 44 – 45.

Егоров А.Д., Перельман А.Я., Куликов В.Н., Саноцкая Н.А., Раух М.В., Маслова Л.А. Определение аэрозольной микроструктуры по данным оптических измерений, Сборник тезисов Международного симпозиума стран СНГ «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД – 2009) 22 – 26 июня 2009 г., Санкт – Петербург, СПбГУ, МСАРД, 2009, с. 84 – 85.

Yegorov A.D., Perelman A.Y., Maslova L., Rauch M., Sanotskaya N.A. Remote Sensing of Atmospheric Aerosols, 33

International Symposium on Remote Sensing of Environment, Stresa, Italy, 2009 [electronic resource]

<http://www.isprs.org/publications/related/ISRSE/html/papers/191.pdf>.

Yegorov A.D., Potapova I.A., Sanotskaya N.A. Lidar probing of Atmospheric Aerosols, 33 International Symposium on Remote Sensing of Environment, Stresa, Italy, 2009 [electronic resource]

<http://www.isprs.org/publications/related/ISRSE/html/papers/898.pdf>.

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'A' followed by a cursive flourish.

---

Отпечатано с готового оригинал-макета в ЦНИТ «АСТЕРИОН»  
Заказ № 388. Подписано в печать 17.12.2009 г. Бумага офсетная.  
Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Объем 1,25 п. л. Тираж 100 экз. Санкт-Петербург, 191015, а/я 83,  
тел. /факс (812) 275-73-00, 275-53-92, тел. 970-35-70