

Российский государственный гидрометеорологический университет

На правах рукописи

УДК 551.510.7

Ржонсницкая Юлия Борисовна

**Обращение измеренных и модельных  
лидарных сигналов**

Специальность 25.00.30 – метеорология,  
климатология и агрометеорология

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико – математических наук

Санкт – Петербург

2007

Диссертация выполнена в Российском Государственном  
Гидрометеорологическом университете (РГГМУ)

Научный руководитель: доктор физико - математических наук  
А.Д. Егоров

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
Л. И. Дивинский  
кандидат физико-математических наук, доцент  
В.А.Ременсон

Ведущая организация: Главная геофизическая  
обсерватории им. А.И.Воейкова

Защита состоится «13» ноября 2007г. в \_\_час. \_\_мин. на заседании  
диссертационного совета Д 212.197.01 в Российском государственном  
гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г.Санкт-Петербург,  
Малоохтинский пр., 98

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского  
Государственного Гидрометеорологического университета

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» октября 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук  
проф. А.Д.Кузнецов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Методы лидарного (дистанционного лазерного) зондирования среды интенсивно разрабатываются в нашей стране и за рубежом для определения пространственного распределения атмосферного аэрозоля, газовых компонентов атмосферы. В большой степени это вызвано необходимостью мониторинга загрязнения воздушного бассейна.

В настоящее время в практике определения концентраций загрязняющих веществ используются, в основном, контактные методы измерений. Недостаток этих методов состоит в том, что они дают возможность определять локальные значения характеристик загрязнения атмосферы. В частности, оптическими счетчиками частиц и фильтровыми аспирационными устройствами измеряются параметры аэрозоля лишь в непосредственной близости от этих приборов. Это делает трудно разрешимой задачу оперативного определения пространственного распределения загрязняющих компонентов.

Применение лидарных методов может обеспечить оперативность выполнения измерений, их дистанционность и высокое пространственное разрешение. Т.о. лидарная информация о природной среде важна для решения проблемы экологического мониторинга, в том числе, при возникновении чрезвычайных ситуаций, когда отсутствует доступ к объектам мониторинга и его выполнение использующимися методами контактных измерений невозможно.

Вместе с тем, разработка метода лидарного зондирования атмосферы предполагает решение обширной научной проблемы, предусматривающее учет ряда особенностей приемопередающей аппаратуры, особенностей распространения излучения в рассеивающей среде, а также решение проблемы интерпретации лидарной информации. Успешное развитие лидарной техники привело к необходимости сконцентрировать усилия на решении методических задач. В свою очередь, результаты решения методических задач позволяют скорректировать направления развития лидарной техники.

Особенно сложной является задача дистанционного лазерного зондирования слабо рассеивающей атмосферы, зондирования, выполняемого на значительных расстояниях от лидара. Это связано с существенной ролью случайной и систематической погрешности измерений, включая погрешности из-за фоновой засветки, сдвига нуля эхо-сигнала и неточности его коррекции на геометрический фактор.

Работа посвящена проблеме интерпретации результатов зондирования атмосферы лидарными системами и направлена на совершенствование методов лидарных измерений параметров атмосферного воздуха. Рассматриваются вопросы достоверности, с которой оптические характеристики атмосферы определяются по результатам измерений сигналов обратного рассеяния малой мощности. Решение проблемы совершенствования методов дистанционного зондирования атмосферы в настоящее время приобретает особую актуальность. Большая трудность, с которой сталкивается разработка методов лидарного зондирования атмосферы, обусловлена неопределенностью лидарного уравнения, обращение которого

лежит в основе интерпретации результатов и математической некорректностью обратной задачи, прежде всего, в условиях зондирования слабо рассеивающей атмосферы. Эти особенности негативно сказываются на достоверности определения искомых величин и существенно усложняют проблему.

**Цель работы** - повышение достоверности результатов интерпретации лидарной информации на основе применения алгоритмов обработки экспериментальных результатов, базирующихся на строгом решении обратной задачи, апостериорной оценке возможности введения дополнительных данных, учете особенностей измерительной аппаратуры и условий зондирования. Исследование направлено на разработку метода лидарного зондирования слабо рассеивающей атмосферы, зондирования, выполняемого на значительных расстояниях от лидара.

**Основные задачи исследования,** которые решаются для достижения цели и решение которых составляет содержание работы:

- анализируются особенности методов, применяемых для определения оптических параметров атмосферы, оцениваются систематические погрешности, существенно влияющие на результаты решения обратной задачи, и разрабатываются схемы обработки сигналов лидарного зондирования атмосферы и алгоритмы, учитывающие особенности измерительной аппаратуры и условия зондирования;

- осуществляется моделирование эхо-сигнала, принимаемого лидаром, решение прямой и обратной задачи с введением возмущения в сигнал обратного рассеяния при вычислении коэффициента ослабления с учетом экспериментальных данных;

- оценивается эффективность методов лидарного зондирования рассеивающей среды, предназначенных для повышения достоверности результатов лидарного зондирования атмосферы.

### **Научная новизна работы**

К основным научным результатам работы, в которой систематизируются и обобщаются итоги исследований эффективности методов лидарного зондирования атмосферы, включая интерпретацию данных натуральных экспериментов, моделирование слабого эхо-сигнала, принимаемого лидаром, решение прямой и обратной задачи с введением возмущения в сигнал обратного рассеяния, относятся:

- разработаны основы нового метода лидарного зондирования слабо рассеивающей атмосферы,

- найдены новые схемы реализации строгого решения лидарного уравнения, включающего мощность фоновой засветки, в котором, в общем случае, в качестве независимых переменных рассматриваются координаты точек послылки зондирующих импульсов и зондируемого объема и которое решается относительно мощности фоновой засветки и двух неизвестных функций - коэффициента ослабления и коэффициента обратного рассеяния,

- в результате анализа погрешностей определения искомых характеристик, выполненного на новой основе с привлечением натуральных данных для симметричных и несимметричных схем обработки (два равных и два разных шага дифференцирования), показано, что погрешность коэффициента ослабления для

несимметричной схемы обработки данных может быть существенно меньше соответствующей величины для симметричной схемы.

**Практическая значимость работы** определяется, в соответствии с поставленной целью, повышением достоверности результатов лидарного зондирования атмосферы. Полученные результаты использованы в учебном процессе в РГГМУ и могут быть использованы для целей совершенствования лазерных технических средств, предназначенных для лидарного мониторинга загрязнения атмосферы.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается тем, что в работе используется подход, базирующийся на строгом решении лидарного уравнения, являющегося следствием фундаментального уравнения переноса радиации в дисперсных средах, причем данное решение не предполагает введения традиционных непроверяемых априорных допущений. Разработка методов лидарного зондирования производится на основе найденных решений и с учетом данных натурных экспериментов. Установлена сопоставимость результатов определения характеристик атмосферы лидарными методами и традиционными контактными методами измерений.

**Обоснованность** результатов обусловлена аргументированностью исходных положений выполненных исследований с применением современного математического аппарата и логической последовательностью рассуждений.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- основы нового метода лидарного зондирования слабо рассеивающей атмосферы,
- новые схемы реализации строгого решения лидарного уравнения,
- результаты анализа погрешностей определения искомых характеристик, выполненного с привлечением натурных данных для симметричных и несимметричных схем обработки (два равных и два разных шага дифференцирования), как для модельного, так и для измеренного сигнала показывающие, что погрешность коэффициента ослабления для несимметричной схемы обработки данных может быть существенно меньше соответствующей величины для симметричной схемы.

#### **Личный вклад автора**

Все основные результаты получены автором лично. Автор выполнил анализ современного состояния проблемы. Нашел новые решения лидарного уравнения. Разработал эффективные схемы реализации найденного решения.

#### **Апробация работы**

Результаты исследований докладывались на международной школе – конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Изменение климата и окружающая среда», РГГМУ, 2005, на итоговой сессии ученого совета РГГМУ, 2006, на Международном симпозиуме МСАР, 2006.

### Структура и объем работы

Работа состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы - 139 наименований, списка обозначений и сокращений. В ней содержится 146 страниц текста, 6 таблиц, 19 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертационной работы, излагаются цель и задачи исследования и формулируются положения, выносимые на защиту.

В **главе1** на основании аналитического обзора существующих работ осуществляется постановка задачи обращения лидарных сигналов малой мощности.

Интерпретация данных лидарного зондирования атмосферы основывается на обращении лидарного уравнения, записанного для коротких зондирующих импульсов и в приближении однократного рассеяния. Это уравнение связывает сигнал эластичного обратного рассеяния с оптическими характеристиками атмосферы следующим образом:

$$P(\vec{R}_i, \vec{r}_j) = P_* (\vec{R}_i) + Af b(\vec{r}_j) \cdot T_{i,j}^2, \quad (1)$$

$$T_{i,j} = \exp \left( - \int_{C_{i,j}} S(\vec{r}) dr \right),$$

где

$T$  - коэффициент пропускания атмосферы,

$P_{i,j} = P(R_i, r_j)$  - мощность сигнала обратного рассеяния,

$\vec{r}_j$  - радиус-вектор зондируемого рассеивающего элемента,

$\vec{R}_i$  - радиус-вектор точки посылки световых импульсов и приема сигналов обратного рассеяния, причем рассматривается как однопозиционное зондирование

с фиксированным радиус-вектором  $\vec{R}_i$ , так и многопозиционное зондирование

( $i$  - ой точке расположения приемопередатчика соответствует радиус-вектор  $\vec{R}_i$ ,  $i=1,2,\dots$ ),

$f = K(\vec{r}_j - \vec{R}_i)^{-2}$  - геометрический фактор лидара,

$K$  - коэффициент заполнения,

$A$  - постоянная лидара,

$\beta$  - коэффициент обратного рассеяния,

$\sigma$  - коэффициент ослабления,

$\vec{r}$  - текущий радиус-вектор точки прямой, проходящей через точки  $i, j$ ,

$c_{i,j}$  - отрезок  $[R_i, r_j]$ , по которому вычисляется интеграл в уравнении (1),

$dr$  - элемент длины отрезка,

$P_*(R_i)$  - мощность солнечного излучения, рассеянного атмосферой в направлении на приемное устройство лидара, зависящая от положения точки посылки импульсов и связанного с ним направления на исследуемый объект.

Делается вывод о целесообразности разработки методов лидарного зондирования атмосферного аэрозоля, базирующихся на эффекте эластичного обратного рассеяния и учитывающих эффект солнечного излучения, рассеянного атмосферой в направлении на приемное устройство лидара.

Отмечается необходимость выполнить анализ погрешности обращения лидарных сигналов малой мощности, найденных экспериментальным путем и смоделированных на этой основе.

В **главе 2** разрабатываются методы интерпретации сигналов обратного рассеяния. Детально рассматривается случай однородной атмосферы когда коэффициент ослабления определяется из уравнения

$$\frac{P_i''}{P_i'} = - \left\{ 2(1 + S_* r_i) + \frac{1}{(1 + S_* r_i)} \right\} / r_i \quad (2)$$

Здесь  $P_i = P(0, r_i)$ , т.е. начало координат связано с лидаром.

Если  $S_* = \text{const}$ , то  $S = S_*$ .

Решение этого уравнения может быть записано следующим образом:

$$S_* = \left\{ \left[ \left( \frac{P_i''}{4P_i'} \right)^2 - \frac{1}{2r_i^2} \right]^{1/2} - \frac{P_i''}{4P_i'} - \frac{1}{r_i} \right\} \quad (3)$$

С учетом найденного выражения (2) для определения величины  $P_*$  можно получить:

$$\frac{P_i''}{P_i'} = \frac{2(P_i - P_*)}{r_i^2 P_i'} + \frac{P_i'}{P_i - P_*}, \quad (4)$$

здесь  $P_* = P_*(0)$ .

Решение этого уравнения может быть записано в виде

$$P_* = \left\{ \left( \frac{r_i^2}{4} P_i'' \right)^2 - \frac{1}{2} (r_i P_i')^2 \right\}^{1/2} - \frac{r_i^2}{4} P_i'' + P_i . \quad (5)$$

В **главе 3** исследуется эффективность методов интерпретации слабых лидарных сигналов.

Для оценки влияния погрешности определения фоновой засветки на значение коэффициента ослабления находилось решение прямой и обратной задачи с введением возмущения в сигнал обратного рассеяния. Возмущение задавалось с учетом особенностей и параметров аппаратуры, используемой для зондирования атмосферы. В работе осуществлен анализ результатов зондирования с привлечением степенной зависимости погрешности измерений сигнала от его мощности. Исходные данные для расчетов погрешности коэффициента ослабления представлены на рис.1.

$C_i$

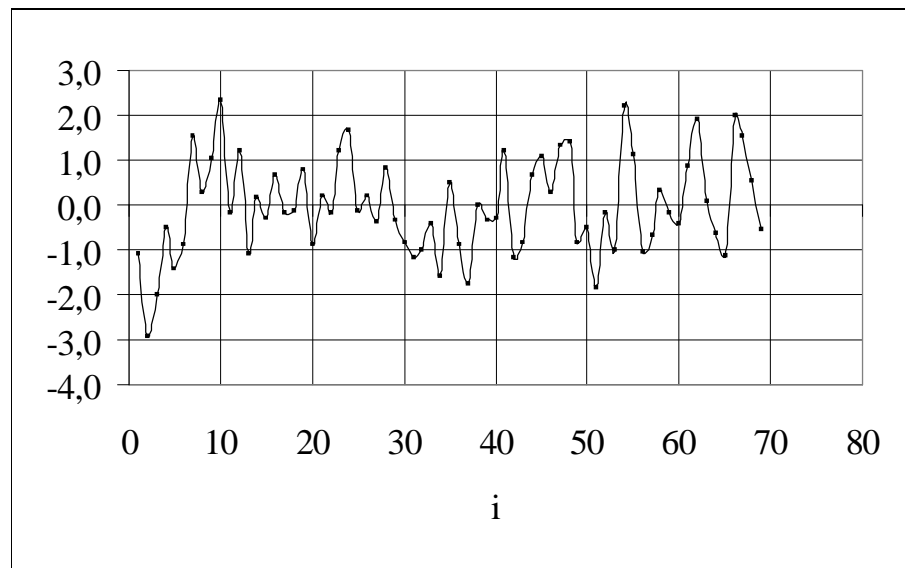


Рис.1. Исходные данные для расчетов погрешности  $\delta\sigma$

Здесь введены обозначения



$$C_i = \frac{c_i}{C_*}, \quad C_* = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{j=1}^k c_j^2}, \quad c_i = \frac{dP_i}{\sqrt{P_i}}, \quad (6)$$

где  $i$  – номер шага зондирования (шаг равен 7.5м),  $k$  – количество зондирований.

Величина  $C_*$  может быть найдена по формуле

$$C_* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (P_i - 2P_{i+1} + P_{i+2})^2}{\sum_{i=1}^k (P_i + 4P_{i+1} + P_{i+2})}}. \quad (7)$$

В работе осуществлен анализ эффективности методов зондирования и без привлечения степенной зависимости погрешности измерений сигнала от его мощности. Сравнение показывает удовлетворительную сопоставимость оценки в двух приближениях (рис.2)

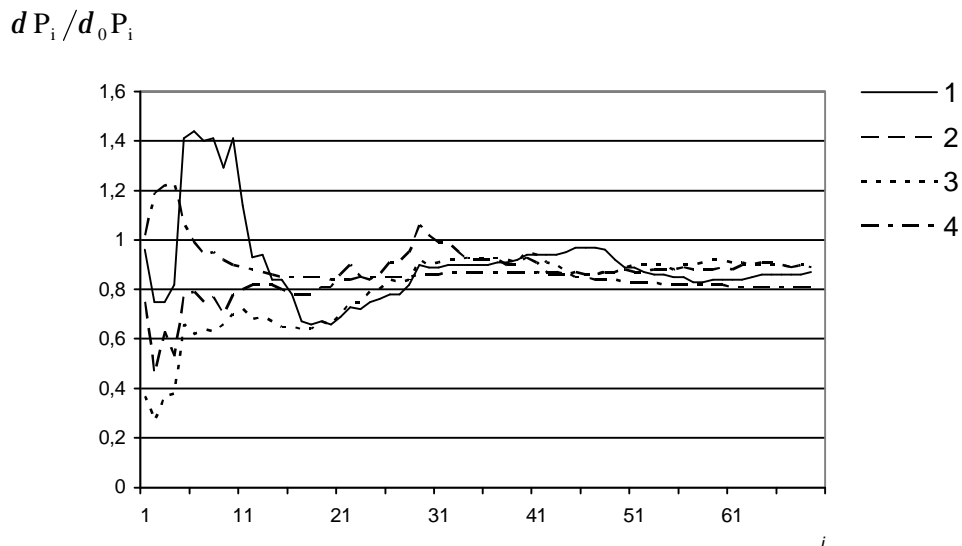


Рис.2. Отношение различных приближений погрешностей эхо-сигнала для различных расстояний от лидара (1– ближняя зона – 4– максимальное удаление)  
Здесь  $d_0P_i$  - измеренная , а  $dP_i$  - смоделированная погрешность сигнала.

Анализ результатов исследований показал, что погрешность определения коэффициента ослабления многократно превышает погрешность определения фоновой засветки. Случайные погрешности определения искомых характеристик в значительной степени зависят от алгоритмов, используемых для обработки измеряемых сигналов. Случайная погрешность коэффициента ослабления для несимметричной схемы обработки данных (два разных шага дифференцирования) может быть существенно меньше соответствующей величины для симметричной схемы (два равных шага дифференцирования). Для сравнения на рис.3,4 представлены результаты расчетов относительной погрешности  $ds/s$  для этих двух типов схем обработки. Расчеты выполнены для  $E = 0.5 \text{ км}^{-2}$ ,  $D = 0,003 \text{ км}^{-1}$  для двух одинаковых шагов зондирования  $\Delta r$  (рис.3) и для шагов зондирования  $\Delta r = 1 \text{ км}$ ,  $\Delta R$  (рис.4). Здесь 1 -  $r = 1,0 \text{ км}$ ,  $\sigma = 0,06 \text{ км}^{-1}$ ; 2 -  $r = 1,0 \text{ км}$ ,  $\sigma = 0,3 \text{ км}^{-1}$ ; 3 -  $r = 2,0 \text{ км}$ ,  $\sigma = 0,06 \text{ км}^{-1}$ , введены характеристики  $D = C_* (A\beta)^{-1/2}$ ,  $E = \frac{P_*}{Ab}$ .

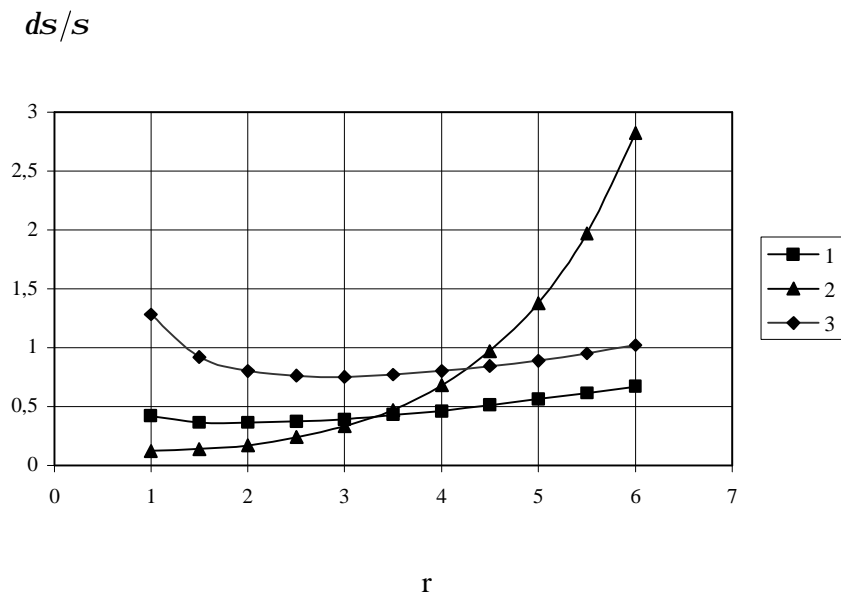


Рис.3. Зависимость величины относительной погрешности  $ds/s$  от переменных  $\Delta r$ ,  $r$ ,  $\sigma$  для симметричной схемы обработки данных .

- 1-  $r = 1,0 \text{ км}$ ,  $\sigma = 0,06 \text{ км}^{-1}$ ;
- 2-  $r = 1,0 \text{ км}$ ,  $\sigma = 0,3 \text{ км}^{-1}$ ;
- 3-  $r = 2,0 \text{ км}$ ,  $\sigma = 0,06 \text{ км}^{-1}$

Здесь  $\Delta r$ - шаг дифференцирования,  $r$  – точка дифференцирования.

$\delta\sigma/\sigma$

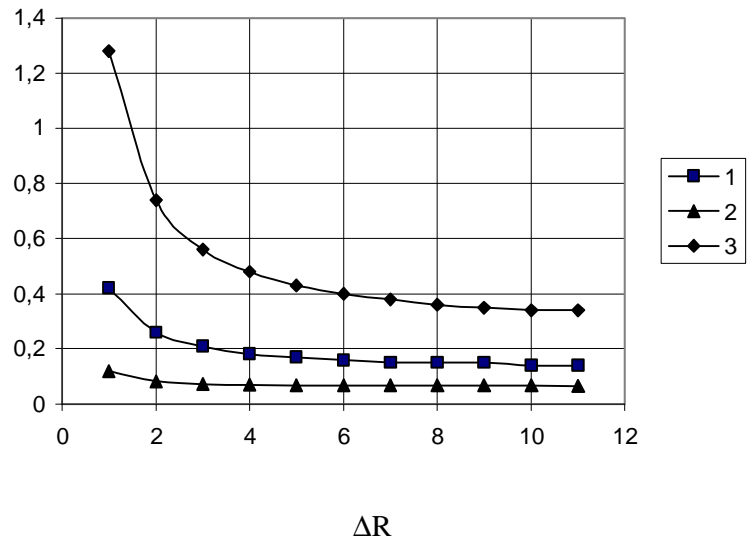


Рис.4. Зависимость величины относительной погрешности  $\delta\sigma/\sigma$  от переменных  $\Delta r$ ,  $r$ ,  $\sigma$  для несимметричной схемы обработки данных ( $E = 0.5 \text{ км}^{-2}$ ).  $\Delta r$  – ближний к лидару шаг,  $\Delta R$  - дальний от лидара шаг. Здесь  $\Delta r = 1 \text{ км}$ .

- 1 -  $r = 1,0 \text{ км}$ ,  $\sigma = 0,06 \text{ км}^{-1}$ ;
- 2 -  $r = 1,0 \text{ км}$ ,  $\sigma = 0,3 \text{ км}^{-1}$ ;
- 3 -  $r = 2,0 \text{ км}$ ,  $\sigma = 0,06 \text{ км}^{-1}$

Относительная погрешность коэффициента ослабления, найденного по схеме с известной фоновой засветкой, в которой она предварительно определяется по данным эксперимента путем решения лидарного уравнения, близка к погрешности определения искомой величины по несимметричной схеме.

С использованием экспериментальных данных в настоящей работе был выполнен анализ систематической погрешности коэффициента ослабления атмосферы. Решалась прямая и обратная задача. Для заданного значения  $\sigma$  рассчитывалась мощность  $P$ , которая изменялась на величину  $\Delta P$ . По измененной мощности вычислялось приближенное значение коэффициента ослабления. Погрешность  $\delta\sigma$  определялась как разность между приближенным и заданным значениями рассматриваемого коэффициента. На рис.5 представлена зависимость от расстояния до лидара отношения погрешности определения коэффициента ослабления ( $\delta\sigma / \sigma$ ) к искажению сигнала  $\delta_b$  (1-  $\Delta r = 1 \text{ км}$ , 2 -  $\Delta r = 2 \text{ км}$ ,  $\sigma = 0,06 \text{ км}^{-1}$ ).

$$(\delta\sigma / \sigma) / \delta_b$$

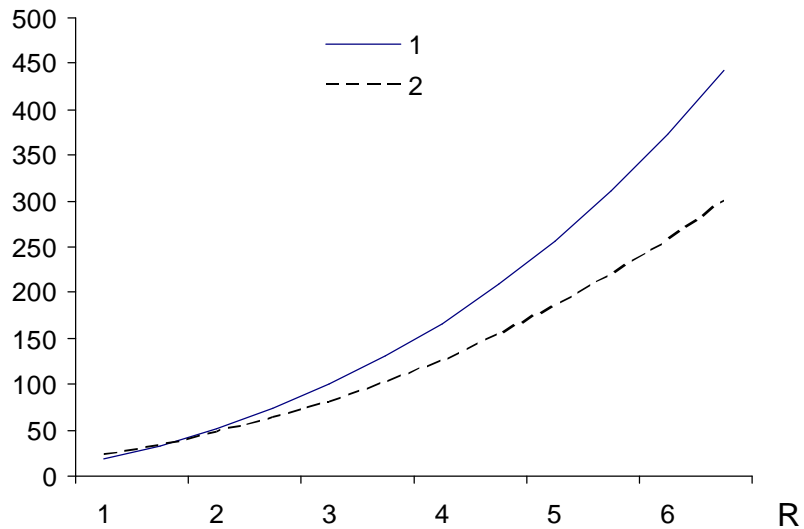


Рис.5. Зависимость погрешности  $\delta\sigma$  от возмущения сигнала

Здесь R- расстояние до лидара

Результаты показывают, что небольшие систематические погрешности существенно влияют на результаты решения обратной задачи.

На рис.6 представлена относительная погрешность  $\delta\sigma/\sigma$ , найденная путем решения прямой и обратной задачи, с учетом суммарной погрешности. Перед решением обратной задачи сигнал умножается на величину  $Q = \exp(c_1 + c_2 R + c_3 R^2)$ , изменяющуюся от 0,998 до 1,003. В однородной атмосфере, как следует из вычислений рис.6, коэффициент ослабления изменяется с расстоянием. Следовательно, в результате существования небольших систематических погрешностей возможны значительные количественные и качественные ошибки.

Анализ результатов исследований выполнен выше для определения прозрачности атмосферы с помощью однопозиционной лидарной системы. Такая система может использоваться при определении прозрачности однородной рассеивающей среды.

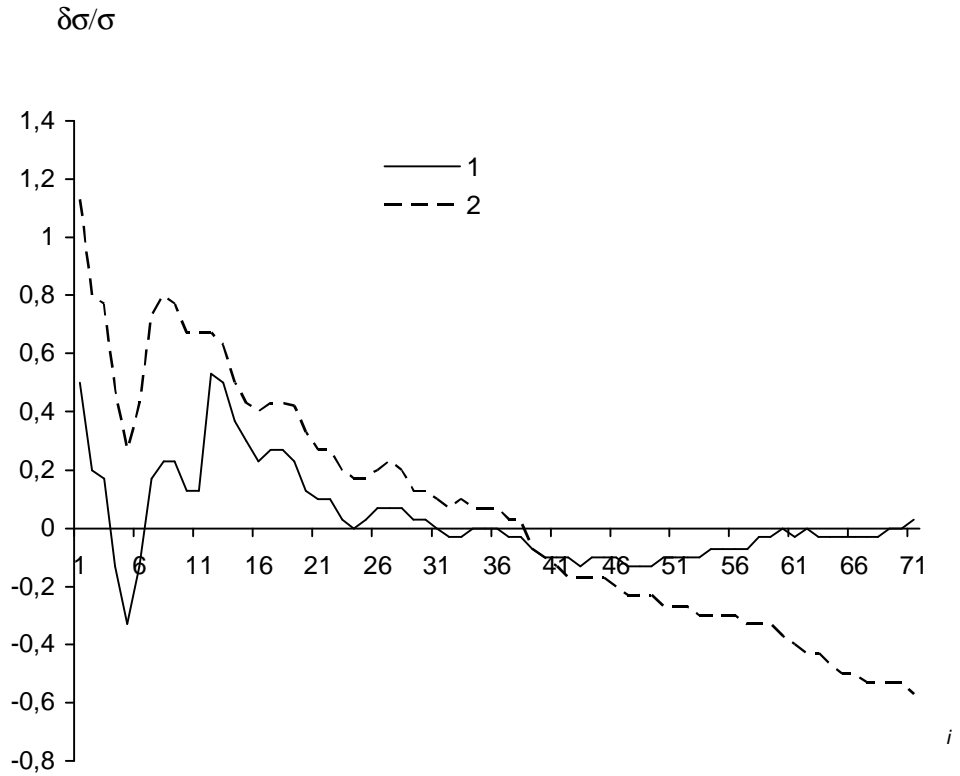


Рис.6. Относительная погрешность  $\delta\sigma/\sigma$ , найденная путем решения прямой и обратной задачи, с учетом меньшей (1) и большей суммарной (2) погрешности

$$r = 3,0 \text{ км}, \quad \sigma = 0,06 \text{ км}^{-1}$$

При измерении коэффициента ослабления неоднородной атмосферы требуется осуществлять зондирование более чем из одной точки пространства. В работе рассматривается способ определения прозрачности путем послышки в атмосферу световых импульсов из двух точек, разнесенных в пространстве, в одном направлении вдоль прямой, проходящей через точки послышки, и приема в точках послышки эхо-сигналов от рассеивающих объемов атмосферы, общих для точек послышки. Способ дает возможность определить прозрачность атмосферы на участке, ограниченном точками послышки импульсов.

На рис.7 представлена относительная случайная погрешность фоновой засветки  $dP_*/P_*$  в зависимости от расстояния между точками послышки импульсов (кривые 2, 3 отличаются разными знаками величины  $R_2 - R_1$ ,  $\sigma = 0,06 \text{ км}^{-1}$ ,  $E = 0.5 \text{ км}^{-2}$ ).

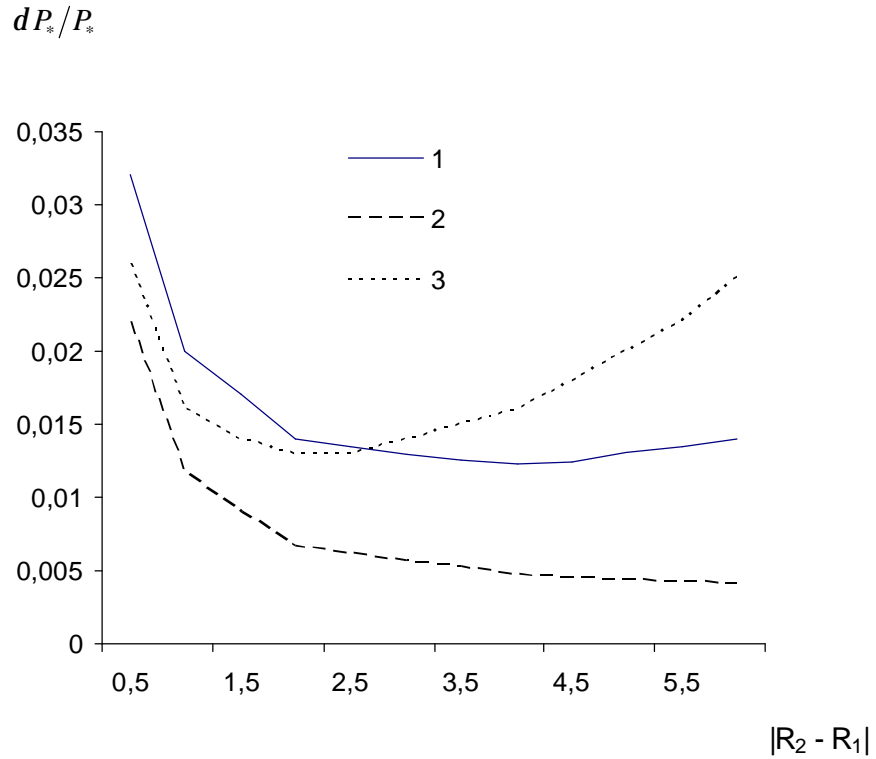


Рис.7. Зависимость относительной погрешности фоновой засветки  $dP_*/P_*$  от расстояния между точками посылки импульсов.

1 -  $r_i - r_j = 1$  км    2 -  $r_i - r_j = 4$  км    3 -  $r_i - r_j = 4$  км

Для сравнения на рис.8 представлена зависимость величины относительной погрешности  $dP_*/P_*$  от шага  $\Delta r$  ( $E = 0.5 \text{ км}^{-2}$ ). Можно отметить отсутствие значительных различий погрешностей двухпозиционного и однопозиционного зондирования.

Таким образом, в работе развито направление интерпретации лидарной информации, основанное на строгом решении лидарного уравнения, содержащего фоновую засветку. Рассмотрены алгоритмы с предварительно определенной фоновой засветкой, включающие процедуру дифференцирования. Анализ результатов исследований показал, что небольшие систематические погрешности существенно влияют на результаты решения обратной задачи.

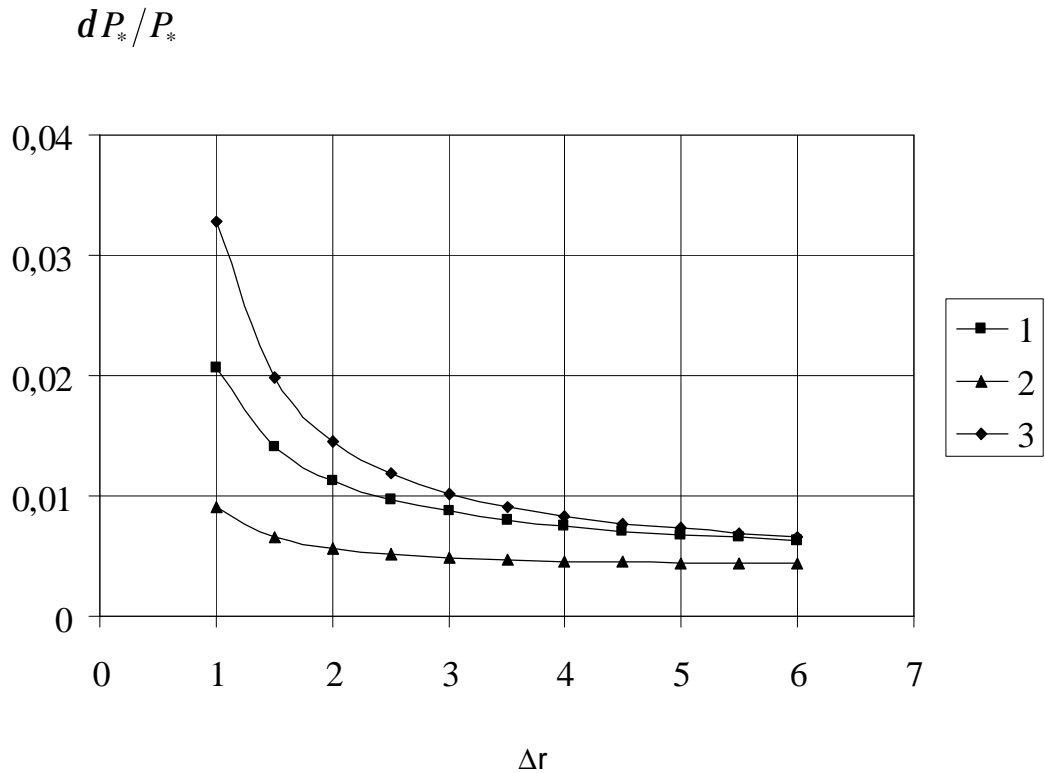


Рис.8. Зависимость величины относительной погрешности  $dP^*/P^*$  от переменных  $\Delta r$ ,  $r$ ,  $\sigma$  ( $E = 0.5 \text{ км}^{-2}$ )

- 1 -  $r = 1,0 \text{ км}$ ,  $\sigma = 0,06 \text{ км}^{-1}$ ;
- 2 -  $r = 1,0 \text{ км}$ ,  $\sigma = 0,3 \text{ км}^{-1}$ ;
- 3 -  $r = 2,0 \text{ км}$ ,  $\sigma = 0,06 \text{ км}^{-1}$

В результате существования небольших систематических погрешностей возможны значительные количественные и качественные ошибки. Погрешность определения коэффициента ослабления многократно превышает погрешность определения фоновой засветки. Случайные погрешности определения искомым характеристик в значительной степени зависят от алгоритмов, используемых для обработки измеряемых сигналов. Приемлемые алгоритмы для анализа лидарных данных базируются на новом строгом решении лидарного уравнения, включающего мощность фоновой засветки. Строгое решение было использовано для определения коэффициента ослабления атмосферы. Для разработки лидарных методов было выполнено обращение эхо-сигналов, принятых в процессе зондирования однородной атмосферы из одной точки пространства. С использованием данных эксперимента был выполнен анализ погрешностей определения искомым характеристик. Рассмотрены симметричные (два равных шага дифференцирования) и несимметричные схемы обработки данных. (два

разных шага дифференцирования). Относительная погрешность коэффициента ослабления, найденного по схеме с известной фоновой засветкой, в которой она предварительно определяется по данным эксперимента путем решения лидарного уравнения, близка к погрешности определения искомой величины по несимметричной схеме. Рассмотрен способ определения прозрачности путем посылки в атмосферу световых импульсов из двух точек, разнесенных в пространстве, в одном направлении вдоль прямой, проходящей через точки посылки, и приема в точках посылки эхо-сигналов от рассеивающих объемов атмосферы, общих для точек посылки. Способ дает возможность определить прозрачность атмосферы на участке, ограниченном точками посылки импульсов. Сравнение показывает отсутствие значительных различий случайных погрешностей двухпозиционного и однопозиционного зондирования. Результаты анализа показали, что на основе нового строгого решения лидарного уравнения найдены эффективные алгоритмы обработки сигналов малой мощности.

В **заключении** сформулированы основные выводы диссертационной работы:

1. Найдено новое строгое решение лидарного уравнения, включающего мощность фоновой засветки, в котором, в общем случае, в качестве независимых переменных рассматриваются координаты точек посылки зондирующих импульсов и зондируемого объема и которое решается относительно мощности фоновой засветки и двух неизвестных функций - коэффициента ослабления и коэффициента обратного рассеяния. Предложены различные схемы реализации найденного решения, в том числе симметричные и несимметричные.

2. В результате анализа погрешностей определения искомых характеристик, выполненного для симметричных и несимметричных схем обработки (два равных и два разных шага дифференцирования), как для модельного, так и для измеренного сигнала, показано, что погрешность коэффициента ослабления для несимметричной схемы обработки данных может быть существенно меньше соответствующей величины для симметричной схемы.

3. Найдены новые решения лидарного уравнения, включая решение системы интегральных уравнений многопозиционного зондирования. Система связывает неизвестные коэффициенты ослабления и обратного рассеяния атмосферы в точках замкнутых многоугольников, сформированных пересечением трасс зондирования. Предложенный подход позволяет находить функции, связывающие искомые оптические коэффициенты.

### **Публикации**

Основные результаты, обобщенные и систематизированные в работе, отражены в 8 научных трудах:

в соавторстве с Егоровым А.Д., Потаповой И.А., Приваловым Д.В.:

- Систематические и случайные погрешности обращения лидарных сигналов малой мощности // Деп. в ИЦ ВНИИГМИ-МЦД, 2005.

- Особенности лидарного зондирования атмосферного аэрозоля// Сборник трудов международной школы – конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Изменение климат и окружающая среда», РГГМУ, 2005, с.24 - 25.



- Особенности лидарного зондирования атмосферного аэрозоля//Тезисы докладов итоговой сессии ученого совета РГГМУ, СПб, 2006, с.37 - 38.
- Погрешности обращения лидарных сигналов малой мощности // Ученые записки РГГМУ, 2007, в печати.
  - в соавторстве с Егоровым А.Д., Потаповой И.А.:
  - Обращение слабых сигналов и достоверность результатов лидарных измерений //Тезисы Международного симпозиума МСАР-2006, СПб, 2006
  - Обращение слабых сигналов и достоверность результатов лидарных измерений //Тезисы XIII Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск, 2006
  - Обращение лидарных сигналов малой мощности // Оптический журнал. - 2007. - том 74. - №10.
  - Atmospheric aerosols measurements and reliability problem/ International Journal of Remote Sensing/ / Int. J. of Remote Sensing (to be published).