

На правах рукописи

Потапова Ирина Александровна

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ
ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология и
агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико – математических наук

Санкт – Петербург

2009

Работа выполнена в ГОУВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет»

Официальные оппоненты: доктор географических наук,
профессор
Мазуров Геннадий Иванович

доктор физико–математических
наук, профессор
Ивлев Лев Семенович

доктор физико–математических
наук, профессор
Покровский Олег Михайлович

Ведущая организация: Военно–космическая академия
имени А.Ф.Можайского

Защита состоится «15» октября 2009 года в 15³⁰ 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 « » сентября 2009 года.

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

А.Д.Кузнецов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа посвящена проблеме интерпретации результатов зондирования атмосферы лидарными системами и направлена на совершенствование методов лидарных измерений параметров атмосферного воздуха. Особое внимание уделяется лидарному измерению наклонной дальности видимости (НДВ).

Наиболее острой задачей метеорологического обеспечения современной авиации является получение оперативной информации о состоянии нижнего слоя атмосферы, от которого зависит возможность посадки и взлета самолетов, особенно, в сложных метеорологических условиях. При решении этой задачи необходима достоверность получаемой информации, в том числе, визуальной НДВ взлетно–посадочной полосы. Резко выраженная пространственно–временная изменчивость величины НДВ существенно затрудняет получение надежной информации. Кроме того, для определения такого весьма важного параметра как НДВ метеослужба до настоящего времени вообще не располагает необходимой аппаратурой.

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. Например, оптическими счетчиками частиц и фильтровыми аспирационными устройствами измеряются параметры аэрозоля лишь в непосредственной близости от этих приборов, что не позволяет оперативно определять пространственное распределение загрязняющих компонентов.

Для измерения НДВ, для определения пространственного распределения атмосферного аэрозоля, газовых компонентов

атмосферы в нашей стране и за рубежом интенсивно разрабатываются методы лидарного зондирования среды. Применение лидарных методов для мониторинга состояния атмосферы целесообразно в связи с тем, что они обеспечивают дистанционность, высокое пространственное разрешение и оперативность выполнения измерений.

Важные для решения проблемы лидарного зондирования среды результаты получены многими исследователями. В частности, достигнуты значительные успехи в решении комплексной научной проблемы создания приемопередающей аппаратуры для определения концентраций аэрозоля и концентраций газовых компонентов, загрязняющих атмосферу. Решен ряд вопросов, связанных с особенностями спектрального диапазона лазерного излучения; особенностями регистрирующей аппаратуры, кратностью рассеяния лазерного излучения частицами аэрозоля.

Вместе с тем, остается трудность, обусловленная следующими особенностями проблемы: неопределенностью лидарного уравнения, обращение которого лежит в основе интерпретации результатов (оно содержит более чем одну величину, неизвестную во многих точках пространства – коэффициент ослабления и коэффициент обратного рассеяния) и математической некорректностью обратной задачи. Эти особенности негативно сказываются на достоверности определения искомых величин и существенно усложняют проблему. Информативность лидарных измерений оказывается низкой при зондировании неоднородной атмосферы.

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.

Сложность учета рассмотренных особенностей лидарного определения оптических характеристик атмосферы в проблеме интерпретации данных зондирования дополняется сложностью параметризации оптико–микроструктурных свойств аэрозольных частиц.

Таким образом, совершенствование методов интерпретации данных лидарного зондирования атмосферы в настоящее время, приобретает особую актуальность.

Цель работы – повышение достоверности результатов интерпретации лидарной информации на основе применения усовершенствованных алгоритмов обработки экспериментальных результатов.

Алгоритмы базируются на строгом решении обратной задачи, апостериорной оценке возможности введения дополнительных данных, реалистическом описании физических свойств аэрозольных частиц. Исследование направлено на разработку метода лидарного зондирования неоднородной атмосферы, не требующего привлечения непроверяемой априорной информации и процедуры непосредственного дифференцирования сигналов обратного рассеяния; метода лидарного зондирования слабо рассеивающей атмосферы. В отличие от традиционного подхода рассматривается статистическое интегральное решение обратной задачи многолучевого лидарного зондирования среды. Решение предназначено для практики лидарного определения НДС и атмосферных загрязнений.

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

– анализируются особенности методов, применяемых для определения 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;

– оцениваются возможности методов, предназначенных для повышения достоверности результатов лидарного определения НДС;

– 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;

– осуществляется моделирование процесса рассеяния электромагнитных волн облучаемыми структурами, необходимое для уточнения микрооптических характеристик аэрозоля, с учетом экспериментальных данных;

– анализируется наблюдательный материал, собранный в процессе выполнения натуральных экспериментов, позволяющий учесть при исследовании и разработке схем обработки эхо сигналов особенности аппаратуры и условия зондирования атмосферы;

– выполняется сравнительный анализ данных лидарных, трансмиссометрических и других измерений, выполненных в Ленинградской области и в разнообразных других условиях (в крупном промышленном центре, пустынной, горной зонах) в целях расширения области применимости разрабатываемых схем.

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

Научная новизна работы. В работе систематизируются и обобщаются итоги исследований точностных характеристик методов лидарного зондирования атмосферы, включая интерпретацию данных натурных экспериментов (Комплексного ленинградского эксперимента - КЛЭ, Советско–американского эксперимента АВТОЭКС и др.), авиалидарного зондирования. К основным научным результатам работы, относятся:

– 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,

– выполнен анализ погрешностей определения искомым характеристик для симметричных схем обработки данных (для двух равных шагов дифференцирования) и несимметричных схем (для двух разных шагов дифференцирования). На основе анализа показано, что погрешность коэффициента ослабления для несимметричной схемы обработки данных может быть существенно меньше соответствующей величины для симметричной схемы;

– установлена специфика применения дифференциальных и интегральных методов в практике лидарного зондирования;

– построены новые интегральные решения лидарного уравнения, на которых базируется метод измерения прозрачности атмосферы и НДС;

– на основе найденных решений лидарного уравнения на уровне изобретений разработаны методы многопозиционного лидарного зондирования;

– показано, что повышенная точность методов лидарного зондирования атмосферного аэрозоля, базирующихся на строгом решении лидарного уравнения, обусловлена определенностью их области применимости;

– установлено, что для адекватного описания характеристик неоднородной атмосферы необходимо сочетание строгого и интегрального решений лидарного уравнения и учет возможности существенных вариаций связей между коэффициентами ослабления и обратного рассеяния;

– показано, что повышение достоверности результатов интерпретации данных лидарного зондирования нетрадиционными методами достигается посредством привлечения апостериорной информации.

Таким образом, совокупность сформулированных и обоснованных в диссертационной работе положений можно квалифицировать как новое крупное научное достижение в области многопозиционного лидарного зондирования атмосферного аэрозоля, базирующегося на строгом решении лидарного уравнения.

Основные положения, выносимые на защиту:

– новое строгое решение 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,

– симметричные и несимметричные схемы реализации найденного решения, отличающиеся случайной погрешностью коэффициента ослабления и фоновой засветки,

– основы метода лидарного зондирования, осуществляемого в неоднородной атмосфере вдоль трасс, пересекающихся в точках, принадлежащих исследуемому объему;

– интегральные решения лидарного уравнения, исключаящие процедуру дифференцирования на участках неоднородной среды и предназначенные для обработки сигналов многопозиционного лидарного зондирования атмосферы;

– схемы лидарного зондирования атмосферы с апостериорно проверяемой эффективностью, предназначенные для достижения приемлемых погрешностей измерения НДС.

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 натуральных экспериментов. Установлена сопоставимость результатов определения характеристик атмосферы лидарными методами и традиционными контактными методами измерений.

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

Практическая значимость работы определяется, в соответствии с поставленной целью, повышением достоверности результатов лидарного зондирования атмосферы. Полученные результаты использованы в учебном процессе, для интерпретации данных натуральных экспериментов и могут быть использованы для целей

совершенствования лазерных технических средств, предназначенных для определения НДС, для наземного и авиалидарного мониторинга загрязнения атмосферы.

Личный вклад автора

Все основные результаты получены автором лично. Автор выполнил анализ современного состояния проблемы. Нашел новые дифференциальные и интегральные решения лидарного уравнения. Разработал эффективные схемы реализации найденного решения. Применил полученные результаты для интерпретации данных натурных экспериментов.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались на ряде научных конференций:

- конференции-выставке “Экология и современные технологии” (Санкт-Петербург, 1995),
- Четвертой международной школе–семинаре–выставке “Лазеры и современное приборостроение” (Санкт-Петербург, 1995),
- семинаре Российского аэрозольного общества (Санкт–Петербург, 1997),
- Международном конгрессе PARTEC 98 (Нюрнберг, 1998),
- семинаре “Аналитическое приборостроение для энергетики и точного машиностроения” (Сосновый Бор, Ленинградская область, 2001),
- III, IV Международной конференции “Естественные и антропогенные аэрозоли” (Санкт-Петербург, 2001, 2003),
- научно-технической конференции, посвященной 75–летию Архангельского ГТУ (2004),
- международной школе – конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Изменение климата и окружающая среда», РГГМУ, 2005,
- итоговой сессии Ученого совета РГГМУ (2006, 2008).

Публикации. Основные результаты, обобщенные и систематизированные в работе, отражены в 33 научных трудах и изобретениях.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы – 203 наименования, списка обозначений и сокращений. В ней содержится 290 страниц текста, 19 таблиц, 45 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 лидарного зондирования атмосферы, которая основывается на обращении лидарного уравнения, записанного для коротких зондирующих импульсов и в приближении однократного рассеяния

$$P(\vec{R}_i, \vec{r}_j) = P_*(\vec{R}_i) + Afb(\vec{r}_j) \cdot \exp(-2 \int_{C_{i,j}} S(\vec{r}) d\vec{r}), \quad (1)$$

P – 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 – й 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,

β – коэффициент обратного рассеяния,

σ – коэффициент ослабления,

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

$c_{i,j}$ – отрезок $[\vec{R}_i, \vec{r}_j]$, по нему вычисляется интеграл в уравнении (1),

$d\vec{r}$ – элемент длины отрезка,

P_* – мощность солнечного излучения, рассеянного атмосферой в направлении на приемное устройство лидара, зависящая от положения точки посылки импульсов и связанного с ним направления на исследуемый объем.

Рассматривается задача нахождения оптико–микроструктурных связей аэрозольных частиц.

Делается вывод о целесообразности разработки методов лидарного зондирования атмосферного аэрозоля, сочетающих преимущества строгого и интегрального решения лидарного уравнения, а также об актуальности теоретического анализа оптико-микроструктурных связей аэрозольных частиц, найденных экспериментальным путем, и моделирования их оптических свойств на этой основе.

Во второй главе разрабатываются методы интерпретации сигналов обратного рассеяния.

Анализируются особенности методов, связанные с неопределенностью лидарного уравнения. Отмечается, в частности,

что за счет введения традиционных предположений для определения неизвестных величин систематическая погрешность коэффициента ослабления может превысить сотни процентов. Делается вывод о необходимости поиска новых подходов к решению рассматриваемой проблемы.

Вычитанием из проходящего сигнала величины фоновой засветки выделяется сигнал, зависящий от коэффициента обратного рассеяния и коэффициента ослабления. В этом случае строгое решение уравнения (1) записывается в виде:

$$[b_j^n] = [a_{ij}^n]^{-1} \left([\ln S] \right)'_i, \quad (2)$$

где S – скорректированный эхо сигнал, равный P/f ,

$(\ln S)'_i$ – производная по i – му направлению зондирования,

n – размерность пространства зондирования,

$$a_{ij}^n = \begin{cases} \cos \alpha_{ij}, & i \leq n, \\ -2, & i = n + 1; \end{cases} \quad b_i^n = \begin{cases} \frac{\partial \ln b}{\partial X_i} & i \leq n, \\ S, & i = n + 1; \end{cases} \quad (3)$$

$\cos \alpha_{ij}$ – направляющие косинусы, равные $(X_i - x_i) \times \left\{ \sum_i (X_i - x_i)^2 \right\}^{-1/2}$;

где X_i, x_i – декартовы координаты, соответственно, рассеивающего элемента и приемопередатчика.

Если фоновая засветка P^* не определена экспериментально, она может быть найдена из решения уравнения (1). Коэффициент ослабления, его производные и производные коэффициента обратного рассеяния определяются тогда (вне ближней зоны лидара – при $K = 1$) на основании решения системы уравнений:

$$\frac{1}{W_i} \left((\ln b)_i'' + 2 \left(\frac{1}{R_i^2} - S_i' \right) \right) + W_i = \left(\ln P_i' \right)', \quad (4)$$

$i = 1, 2, \dots, 8$

где

$$\begin{aligned}
 (\ln b)_i'' &= \frac{\partial^2 \ln b}{\partial x^2} \cos^2 a_i + \frac{\partial^2 \ln b}{\partial y^2} \sin^2 a_i + \\
 &+ 2 \frac{\partial^2 \ln b}{\partial x \partial y} \sin a_i \cos a_i,
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

$$W_i = (\ln b)_i' - 2 \left(\frac{1}{R_i} + s \right)
 \tag{6}$$

$$(\ln b)_i' = \frac{\partial \ln b}{\partial x} \cos a_i + \frac{\partial \ln b}{\partial y} \sin a_i, \quad s_i' = \frac{\partial s}{\partial x} \cos a_i + \frac{\partial s}{\partial y} \sin a_i,
 \tag{7}$$

где a_i – угол места.

При выполнении условия, которое можно рассматривать как уравнение, определяющее коэффициент ослабления однородной атмосферы, система может быть решена (ее решение записано ниже в конечно-разностном виде).

Решение (2), включающее процедуру дифференцирования, отягчено значительной случайной погрешностью. Оно может быть реализовано, например, на участках достаточно однородной атмосферы. На таких участках различие логарифмических производных сигналов, принятых с различных направлений, не должно быть значимым. Другая возможность реализации строгого решения уравнения (1) связана с существованием физических причин, способствующих образованию в атмосфере горизонтально однородных слоев.

Строгое решение лидарного уравнения может быть использовано и при определении параметров приближенных решений. В частности, удастся определить постоянную s в степенной связи коэффициента обратного рассеяния с коэффициентом ослабления

$$b = DS^c, \quad (8)$$

которая привлекается при разработке методов зондирования неоднородной атмосферы. Величина c определяется соотношением

$$c = \frac{F_1}{F_2'} \frac{(\ln S)'_2 - (\ln S)'_1}{\operatorname{cosec} \varphi_1 - \operatorname{cosec} \varphi_2}, \quad (9)$$

где $j_m = \frac{\rho}{2} - a_{m_2}$ угол места,

$$F_1 = (\lg S)'_2 \sin j_1 - (\lg S)'_1 \sin j_2, \quad (10)$$

$$F_2 = (\lg S)'_2 \sin^2 j_1 - (\lg S)'_1 \sin^2 j_2, \quad (11)$$

Коэффициент ослабления неоднородной атмосферы $\sigma_*(R_*)$ вне горизонтально однородной области связывается с его значением $\sigma(R)$ внутри этой области интегральным соотношением:

$$\frac{S_*^m}{S_*} - \frac{S^m}{S} = 2g \int_{R_*}^R S^m dR, \quad (12)$$

в котором $m = 1/c$.

Для получения аналога традиционного интегрального решения лидарного уравнения оно заменяется системой уравнений Клетта на трассах многопозиционного зондирования. Проблема неопределенности рассматриваемой задачи решается тогда разработкой схем обработки сигналов обратного рассеяния, предполагающих пересечение трасс в точках, принадлежащих исследуемому объему, и апостериорным определением связи неизвестных коэффициентов в конкретных условиях зондирования неоднородной среды.

Запишем эту систему уравнений на пересекающихся трассах, формирующих замкнутый многоугольник, введя в рассмотрение новую неизвестную функцию

$$v(r) = \mathbf{b}(r) \cdot \mathbf{S}^{-c}(r), \quad (13)$$

где c – постоянная, определяющаяся минимизацией погрешности решаемой системы уравнений.

Если обозначить

$$a_{i,j} = \sqrt[c]{S_{i,j}}, \quad (14)$$

$$z_i = \{\mathbf{b}(r_i)\}^m, \quad (15)$$

$$b_i = \pm 2m \int_{c_i} \left\{ \frac{S(R_i, r)}{v(r)} \right\}^m dr, \quad (16)$$

(знак зависит от направления зондирования) c_i и c_k , отрезки $[r_i, r_{i+1}]$ и $[r_k, r_1]$, то система уравнений, позволяющая связать значение Z_1 в i -ой вершине многоугольника с введенной функцией $v(r)$, интегрируемой по сторонам многоугольника, запишется в виде:

$$a_{i,i} z_i - a_{i,i+1} z_{i+1} = b_i, \quad i=1, 2, \dots, k-1 \quad (17)$$

$$a_{k,k} z_k - a_{k,1} z_1 = b_k, \quad (18)$$

а её решение – следующим образом:

$$Z_1 = A^{-1} B, \quad (19)$$

где

$$A = a_{k,k} (1 - B_k), \quad (20)$$

$$B = \frac{a_{k,k}}{a_{1,1}} (b_1 + \sum_{i=2}^k b_i B_{i-1}), \quad (21)$$

$$B_i = \frac{a_{1,2} \cdot a_{2,3} \cdot \dots \cdot a_{i,i+1}}{a_{2,2} \cdot a_{3,3} \cdot \dots \cdot a_{i+1,i+1}}, \quad (22)$$

$$B_k = \frac{a_{k,1}}{a_{1,1}} B_{k-1} . \quad (23)$$

Данное решение особенно полезно, если функция $v(r)$ может быть представлена в виде степенного ряда. Рассмотрением различных многоугольников, имеющих общие точки, определяется искомая величина, для чего целесообразно ограничиться первым членом ряда в разложении функции $v(r)$.

В настоящей главе для анализа экспериментальных результатов определения свойств аэрозольных частиц рассматривается модель частицы с радиально изменяющимся показателем преломления в оболочке, покрывающей однородное ядро. Показатель преломления частицы задается действительной или комплексной величиной.

Моделирование рассеяния излучения частицами основывается на решении системы уравнений Максвелла относительно векторов напряженностей электрического и магнитного полей. Традиционные методы решения уравнений Максвелла базируются на использовании специальных функций. Это ограничивает область их применимости: рассматриваются частные случаи неоднородных облучаемых структур, в основном, разрывных. С тем, чтобы существенно расширить область применимости, предлагается решение системы уравнений Максвелла для случая модельного радиального распределения комплексного показателя преломления как разрывного, так и непрерывного. Уравнения, которыми описываются потенциалы Дебая (переходящие в уравнение Гельмгольца при постоянном показателе преломления), решаются методом разделения переменных. В результате каждое из уравнений разделяется на три обыкновенных дифференциальных уравнения. При этом вместо дифференциальных уравнений Бесселя получаются дифференциальные уравнения второго порядка с переменными

коэффициентами (переходящие в уравнение Бесселя при постоянном показателе преломления), которые интегрируются численно для неоднородной оболочки, покрывающей однородное ядро и находящейся в однородной среде.

В третьей главе исследуется интегральный метод многопозиционного лидарного зондирования.

Исследуется решение (19) системы интегральных уравнений многопозиционного зондирования (17) – (18), связывающей неизвестные величины в точках замкнутого многоугольника, сформированного пересечением трасс зондирования, с измеряемыми мощностями эхо сигналов.

Среднее квадратичное отклонение d_1 коэффициента ослабления в вершине 1 многоугольника ($\sigma(r_1) = Y_1$) рассчитывается в линейном приближении:

$$d_1 = \left\{ \sum_{i=1}^k \left(\frac{\int Y_1}{\int S_{i,i}} d S_{i,i+1} \right)^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \left(\frac{\int Y_1}{\int S_{i,i+1}} d S_{i,i+1} \right)^2 + \left(\frac{\int Y_1}{\int S_{k,1}} d S_{k,1} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (24)$$

по формуле, получающейся с учетом решения (21):

$$d_1 = \frac{Y_1}{m} (1-B_k)^{-1} \left\{ \left(\frac{dS_{1,1}}{S_{1,1}} \right)^2 + B_k \left(\frac{dS_{k,1}}{S_{k,1}} \right)^2 + Y_1^2 \sum_{i=1}^k \left[\left(\frac{dS_{i-1,i}}{S_{i-1,i}} \right)^2 + \left(\frac{dS_{i,i}}{S_{i,i}} \right)^2 \right] \cdot \left(\frac{B_{i-1}}{Y_i} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (25)$$

Система (17) - (18) решается также и приближенно умножением i -го уравнения на коэффициент A_i и сложением уравнений, в связи с большими величинами погрешностей

$$A_i * (a_{ii} z_i - a_{i,i+1} z_{i+1} = b_i), \quad i=1, 2, \mathbf{K}, k-1, \quad (26)$$

$$A_k * (a_{kk} z_k - a_{k1} z_1 = b_k), \quad (27)$$

где коэффициенты A_i выбираются из условия минимума погрешности определения искомых величин.

Анализ предлагаемого решения выполнен на примере конкретных схем зондирования атмосферы ($k = 3; 4$) (трехпозиционное зондирование – рис.1).

Исследование характеристик разрабатываемых новых схем обработки данных выполняется с учетом реалистических зависимостей погрешностей эхо сигнала от его величины. В работе применяется степенная зависимость (показатель степени 0.5).

Сравнение результатов определения коэффициента ослабления методом лидарного зондирования с данными регистратора дальности видимости (РДВ) дает возможность оценить погрешность лидарных измерений в однородной атмосфере и погрешность эхо сигнала.

Используя результаты оценки на основании выражения для определения случайной погрешности в линейном приближении можно проанализировать эффективность интегрального метода многопозиционного зондирования.

В табл.1 представлены величины погрешностей треугольной схемы зондирования, рассчитанные для параметров лидара, выполненного на основе лазерного измерителя высоты облаков (ЛИВО), для различных значений коэффициента A включая 0 и 1 (в системе уравнений (26–27) два коэффициента равны A , один – 1).

Рассматривается случай расположения точек посылок импульсов на общей прямой. Зондирование из точки R_3 вдоль трассы содержащей точки Γ_1, Γ_3 осуществляется перпендикулярно к этой прямой. Зондирование из точек R_1, R_2 по направлению к точке Γ_2 осуществляется под равными углами к ней.

В табл.1 $\delta\sigma_1/\sigma_1$ – среднее квадратичное отклонение, $d_i = l_i/L_{\max}$,

$$l_1 = |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1| = |\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_2| \cdot \quad l_2 = |\mathbf{r}_3 - \mathbf{r}_1| \cdot \quad L_3 = |\mathbf{R}_3 - \mathbf{r}_1|, \quad L_{\max} \text{ – максимальная дальность}$$

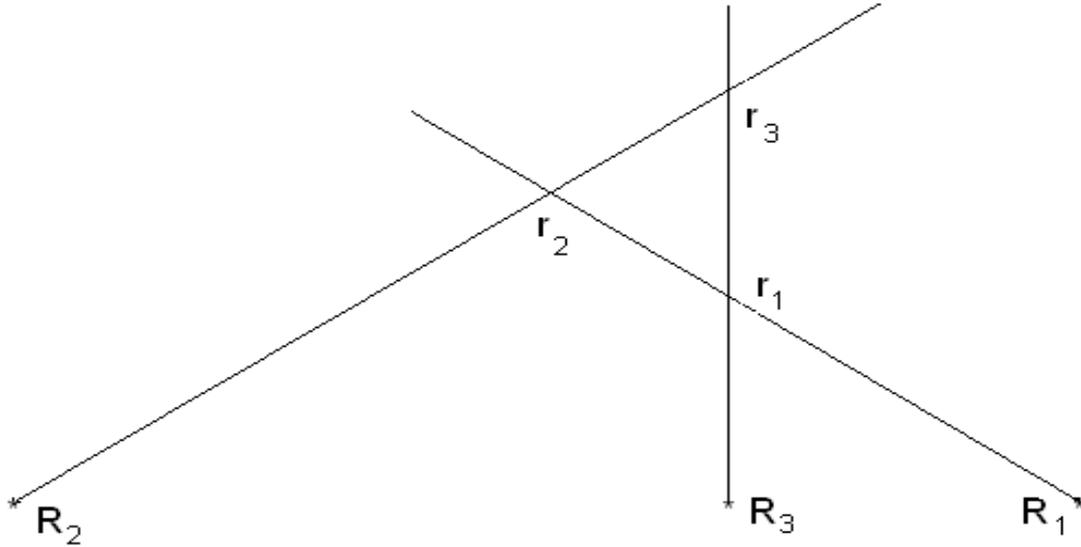


Рис 1. Лидарная система посылающая импульсы вдоль трех направлений (1–2, 2–3, 1–3) (треугольная схема лидарного зондирования атмосферы), *– позиции лидара

зондирования (отношение сигнал/шум = 2).

Результаты расчетов показывают, что при увеличении глубины зондирования в многопозиционных схемах случайная погрешность становится чрезвычайно большой. Вместе с тем, ее удастся уменьшить до уровня погрешности традиционных измерений за счет рационального выбора коэффициента А, причем систематическая погрешность оказывается значительно меньше, чем ее традиционная величина.

Анализ показал, что для типичных атмосферных условий приемлемой является треугольная схема. Наибольшая точность

достигается для измерений в ближней вершине треугольника. Отношение случайных погрешностей в ближней и дальней вершинах не превышает 0,5. Еще более точной оказывается схема

Таблица 1

Точностные характеристики интегрального многопозиционного алгоритма

d_1	d_2	d_3	$\sigma_1, 1/\text{км}$	$\delta\sigma_1/\sigma_1$	$\delta_1(\text{сист})/\sigma_1$	A
0,09	0,14	0,63	3,0	300	0	1,0
				30	30	0,4
				30	70	0,0
0,20	0,34	0,52	2,0	200	0	1,0
				20	30	0,4
				15	50	0,0
0,12	0,18	0,58	1,0	500	0	1,0
				30	40	0,4
				30	80	0,0
0,17	0,35	0,65	0,5	700	0	1,0
				30	40	0,4
				30	80	0,0

четырёхпозиционного зондирования: отношение погрешностей, характерных для нее и треугольной схемы, не превышает 0,6.

Исследование точностных характеристик схем зондирования неоднородной атмосферы выполнено посредством решения прямой и обратной задачи на основе собранного наблюдательного материала, что позволяет учесть в процессе моделирования особенности аппаратуры и условий зондирования атмосферы.

Для описания оптических параметров на основе данных, полученных вблизи С. –Петербурга и в п.Сиверский, была

использована степенная связь между коэффициентом ослабления и коэффициентом обратного рассеяния (см. ниже).

На рис.2 представлены погрешности $\delta m/m$ для схемы рис.1. Анализ результатов показал, что точность интегрального метода многопозиционного зондирования обеспечена возможностью апостериорного определения связи между коэффициентами обратного рассеяния и ослабления. Новый метод более эффективен для оптически более плотной и (или) неоднородной атмосферы.

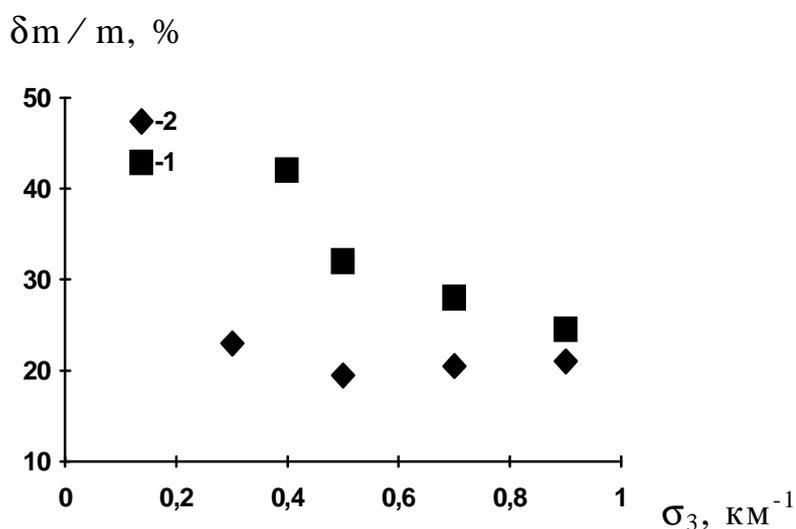


Рис.2. Точностные характеристики треугольной схемы, углы зондирования $90^\circ, 30^\circ, m=1$,
1 - $\sigma_3/\sigma_2 = 0,5$; 2 - $\sigma_2 = 2 \text{ км}^{-1}$

Дополнительная точность при использовании схемы связана с увеличением угла между направлениями 3–2, 1–3. Ошибка может быть меньше 20%.

В четвертой главе рассматриваются результаты применения интегрального метода обработки данных лидарного зондирования атмосферы.

В январе-феврале 1991 г. было произведено лидарное зондирование атмосферы в окрестности перекрёстка:

пр.Непокоренных и Пискаревского пр. Для обеспечения более полного анализа состояния воздушного бассейна лидар был установлен в фургоне передвижной лаборатории. Лидарные измерения осуществлялись ГГО им А.И.Воейкова с использованием устройства, выполненного на базе серийного лазерного измерителя высоты облаков (ЛИВО).

Посылка импульсов осуществлялась из нескольких точек обследованного района в различных направлениях. Было отмечено существенное затухание светового импульса, связанное со значительной концентрацией частиц, содержащихся в воздухе.

Его изменение вдоль трассы может быть связано не только с ослаблением излучения, но и с изменением коэффициента обратного рассеяния в пространстве. Разделить эти два фактора можно, осуществив посылку зондирующих импульсов по одной прямой в противоположных встречных направлениях из двух различных точек. В таком случае эхо сигналы для каждой из точек посылки импульсов будут убывать с расстоянием, если определяющим фактором является ослабление излучения. Если определяющим фактором является изменение коэффициента обратного рассеяния, то эхо сигнал, принятый в одной точке, будет убывать, а в другой - возрастать с расстоянием от точки приема (посылки).

Анализ результатов выявил определяющую роль фактора ослабления излучения. В частности, отношение сигналов в сериях зондирования в двух противоположных направлениях не отличалось значимо от единицы.

Для интерпретации результатов лидарного зондирования атмосферы в окрестности пересечения городских автомагистралей, наряду с дифференциальным методом, был применён интегральный метод. В табл.2 представлены результаты определения коэффициентов ослабления в окрестности пересечения пр.

Непокорённых и Пискарёвского пр. Для сравнения в ней приведены результаты ослабления найденные дифференциальным (σ) и

Таблица 2

Коэффициенты ослабления в окрестности пересечения пр.Непокорённых и Пискарёвского пр.

Дата	Время	σ , км ⁻¹	σ_i , км ⁻¹	МДВ, км
23.01.91	11.00	3 ± 1	3,0/2,7	1
24.01.91	10.30	0.7 ± 0.2	0.6/0,5	5-6
30.01.91	12.40	2.4 ± 0.9	2.4/2,5	1
20.02.91	16.00	1.1 ± 0.2	1.0/1,2	3
22.02.91	15.00	0.8 ± 0.1	0.7/0,6	4-5

интегральным (σ_i —от/к пересечению) методами.

Анализ представленных данных показывает удовлетворительную сопоставимость результатов применения двух методов. Случайная погрешность методов в зависимости от условий измерений меняется в пределах 0.1–1 км⁻¹ и определяется пространственной протяжённостью участка трассы зондирования (не превышая, как правило, 30%). Можно отметить наличие существенной загрязнённости атмосферы. Этот факт приводит к МДВ в пределах 1 – 6 км (см. табл.2).

В эксперименте КЛЭ, выполненном ГГО им А.И.Воейкова, регистрирующая аппаратура была установлена в помещении телебашни на уровне 200 м.

Анализ данных эксперимента показывает, что результаты применения интегрального метода не отличаются значимо от

результатов, полученных ранее дифференциальным методом. Это связано с существованием сравнительно однородной атмосферы в период проведения эксперимента в окрестности телебашни.

Советско–американский эксперимент по исследованию загрязнения воздуха автотранспортом АВТОЭКС–88 был проведен в сентябре 1988 г. в окрестности аэропорта Пулково. Лидарное зондирование атмосферы в ходе выполнения эксперимента осуществлялось ГГО. Во время проведения эксперимента был применён лидар ЛИВО. Лидар был расположен в помещении на расстоянии 400 м от Киевского шоссе приблизительно в 3–4 км от аэропорта Пулково.

Прозрачность атмосферы в окрестности лидара определялась путем зондирования атмосферы по трем направлениям с небольшим положительным углом места. Обработка данных измерений в однородной атмосфере над дорогой, выполненная интегральным методом, привела к результатам, не отличающимся значимо от результатов, полученных дифференциальным методом.

Аналогичные результаты были получены при интерпретации данных лидарного зондирования атмосферы в районе Аральского моря и в районе г. Ереван, полученных с самолета–лаборатории ГГО.

Наиболее сложными для интерпретации оказались результаты лидарного аэрозольного зондирования, выполненного в п. Сиверский Ленинградской области в 1968 г. Наряду с лидарными данными в ходе эксперимента были получены данные измерений прозрачности (дальности видимости) стандартным трансмиссометром – регистратором дальности видимости (РДВ). Сравнение лидарных данных с независимыми измерениями прозрачности однородной атмосферы, осуществленное в этом эксперименте с помощью РДВ, показало их удовлетворительное согласие. С другой стороны, результаты зондирования неоднородной атмосферы удалось

обратить лишь после создания алгоритмов, осуществленного в настоящей работе.

Для измерений в эксперименте использовался лидар на основе рубинового лазера (длина волны излучения 0,6943 мкм), который имел энергию в импульсе 0,2–1,0 Дж и длительность импульса 50 нс.

Для описания оптических параметров на основе данных, полученных этим лидаром, была использована степенная связь между коэффициентом ослабления и коэффициентом обратного рассеяния. Связь была найдена посредством решения лидарного уравнения в терминах Клетта для различных направлений зондирования и зондируемых слоёв. Эти решения были использованы для определения константы c в атмосфере под слоем 200-600 м (углы зондирования 80° , 40° , 30° , 20° – цикл 1) и в атмосфере под слоем 300-600 м (углы зондирования 90° , 40° , 20° – цикл 2).

На рис.3 для двух циклов измерений представлено найденное относительное среднее квадратичное отклонение δ решений интегрального уравнения по совокупности направлений зондирования и зондируемых слоев.

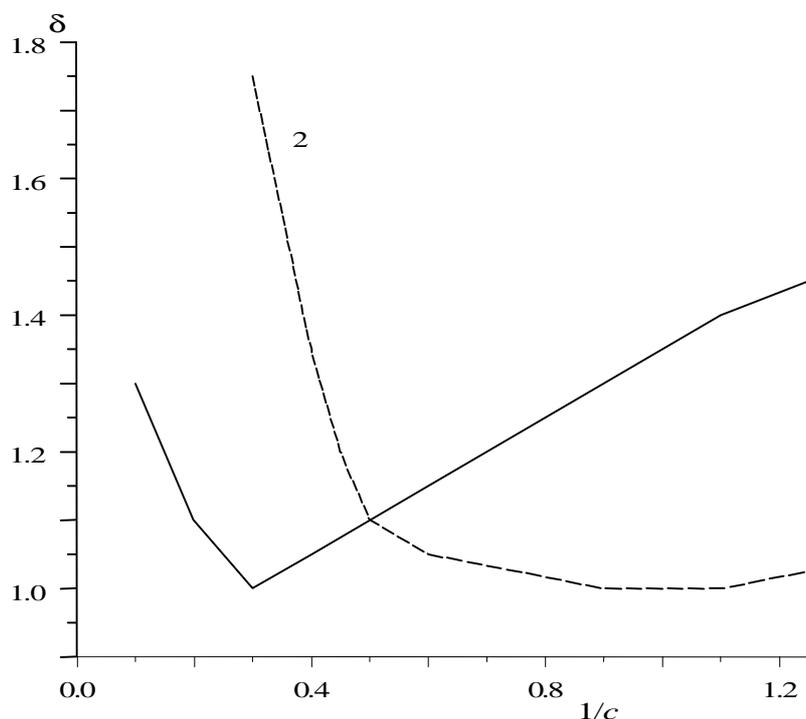


Рис.3. Среднее квадратичное отклонение решений интегрального уравнения

Искомое значение c определяется из условия минимума функции $\delta(c)$. Сравнение показывает, что степень (величина c), найденная для двух зависимостей, представленных на рис.3, различается почти в 3 раза. Таким образом, расчеты, выполненные с использованием результатов лидарных измерений, приводят к выводу, что степень в связи оптических коэффициентов может существенно изменяться в зависимости от состояния атмосферы. Анализ показывает, что погрешность лидарных измерений величины c не превышает, как правило, 30%.

Разработанный метод дает возможность вместе с измерением прозрачности вдоль зондирующего луча определять НДС.

В настоящей главе для условий экспериментов, выполненных в ГГО, осуществлено моделирование процесса рассеяния электромагнитных волн, основанное на решении уравнений Максвелла. Моделирование оказалось эффективным для решения проблемы дифракции в случае сферических частиц, составленных из однородного ядра и неоднородной оболочки. Результаты моделирования позволили сделать вывод о большей стабильности микрооптических параметров частиц субмикронной фракции по сравнению с крупными частицами. Имеет место факт меньшего влияния оптических свойств частиц на ослабление излучения по сравнению с их влиянием на направленное рассеяние. Это объясняет результаты измерений, которые дали возможность установить корреляцию коэффициента ослабления с концентрацией частиц (в п.Воейково, С. –Петербурге, Репетеке, Абастумани), что важно для практики лидарного мониторинга атмосферы.

В пятой главе исследуются точностные характеристики методов интерпретации слабых лидарных сигналов. Рассматривается

возможность учета фоновой засветки на основании решения лидарного уравнения (1) в случае зондирования атмосферы разной позиционности.

В случае однородной атмосферы лидарное уравнение можно записать в виде:

$$P_i = P_* + \frac{B}{R_i^2} \exp(-2s R_i), \quad (28)$$

где $B = Ab$.

Уравнение (1), записанное для двух дополнительных зондируемых элементов (j -го, k -го), дает возможность сформулировать два дополнительных равенства:

$$P_j = P_* + \frac{B}{R_j^2} \exp(-2s R_j) \quad (29)$$

$$P_k = P_* + \frac{B}{R_k^2} \exp(-2s R_k). \quad (30)$$

В результате получается система из трех уравнений относительно неизвестных величин P_* , B , s .

Исключение неизвестных P_* , B из системы (28) – (30) приводит к уравнению

$$\frac{P_i - P_j}{P_i - P_k} = \frac{1 - \frac{R_i^2}{R_j^2} \exp(-2s(R_j - R_i))}{1 - \frac{R_i^2}{R_k^2} \exp(-2s(R_k - R_j))}. \quad (31)$$

для величины s в общем случае несимметричной схемы обработки данных зондирования.

Аналогичное решение получается для величины P_* .

Случайная погрешность в линейном приближении:

$$\delta = C_* \left\{ \left(\frac{\partial P_*}{\partial P_i} \right)^2 P_i + \left(\frac{\partial P_*}{\partial P_j} \right)^2 P_j + \left(\frac{\partial P_*}{\partial P_k} \right)^2 P_k \right\}^{1/2}, \quad (32)$$

где производные вычисляются следующим образом:

$$\frac{\partial P_*}{\partial P_i} = \left\{ 1 + \frac{P_i - P_*}{R_k - R_j} \left(\frac{R_j - R_i}{P_k - P_*} - \frac{R_k - R_i}{P_j - P_*} \right) \right\}^{-1}, \quad (33)$$

$$\frac{\partial P_*}{\partial P_j} = \left\{ 1 - \frac{P_j - P_*}{R_k - R_i} \left(\frac{R_k - R_j}{P_i - P_*} + \frac{R_j - R_i}{P_k - P_*} \right) \right\}^{-1}, \quad (34)$$

$$\frac{\partial P_*}{\partial P_k} = \left\{ 1 + \frac{P_k - P_*}{R_j - R_i} \left(\frac{R_k - R_i}{P_i - P_*} - \frac{R_k - R_i}{P_j - P_*} \right) \right\}^{-1}. \quad (35)$$

Случайная погрешность мощности δP здесь пропорциональна квадратному корню из мощности, величина C_* – коэффициент пропорциональности.

Особенно простым оказывается его решение для симметричной схемы обработки данных, когда

$$j = i + m, \quad k = i + 2m. \quad (36)$$

В таком случае уравнение (31) можно записать в виде

$$\frac{P_i - P_{i+1}}{R_{i+2m}^2} X_m^2 - \frac{P_i - P_{i+2m}}{R_{i+m}^2} X_m + \frac{P_{i+m} - P_{i+2m}}{R_i^2} = 0, \quad (37)$$

где

$$X_m = \exp(-2s m \Delta), \quad R_k - R_i = 2m \Delta, \quad (38)$$

Δ – шаг зондирования.

Решением уравнения (37) является выражение

$$X_m = \frac{b_{im} \pm \sqrt{b_{im}^2 - 4a_{im}c_{im}}}{2a_{im}}, \quad (39)$$

где

$$a_{im} = \frac{P_i - P_{i+m}}{R_{i+2m}^2}, \quad b_{im} = \frac{P_i - P_{i+2m}}{R_{i+m}^2}, \quad c_{im} = \frac{P_{i+m} - P_{i+2m}}{R_i^2}. \quad (40)$$

С учетом введенных обозначений для коэффициента ослабления получается формула

$$s = -\frac{1}{2m\Delta} \ln X_m. \quad (41)$$

Для определения знака в формуле (39) решается прямая и обратная задача. Знак выбирается из условия совпадения заданной и рассчитанной величины коэффициента ослабления.

При оценке чувствительности результата расчета к величине возмущения оно задавалось по данным, характерным для ЛИВО. Исходные данные для расчетов этой величины получаются по результатам измерений мощности, например:

$$dP_i^2 = \frac{1}{6} (P_i - 2P_{i+1} + P_{i+2})^2, \quad (42)$$

$$dP_i^2 = (P_i - 2P_{i+1} + P_{i+2})^2 (P_i - 2P_{i+1} + P_{i+2})^{-1} P_i \quad (43)$$

Сравнение показало удовлетворительную сопоставимость оценки чувствительности в различных приближениях.

Анализ результатов показал, что погрешность $\delta P_*/P_*$ находится в пределах от десятых процента до нескольких процентов. Вместе с тем, относительная погрешность σ может в сотни раз и более превышать относительную погрешность P_* . Таким образом, величина $\delta\sigma/\sigma$ оказывается значительной и может достигать сотен процентов.

Результаты анализа случайной погрешности $\delta\sigma$ показывают наличие минимального значения величины $\delta\sigma = \delta\sigma_{\min}$, зависящего от условий зондирования и равного, приблизительно, $D=C_*(Ab)^{-1/2}$. Таким образом, погрешность $\delta\sigma/\delta\sigma_{\min}$ может как уменьшаться, так и увеличиваться при увеличении шага зондирования. Данный факт объясняется усилением при этом затухания эхо сигнала, с одной стороны, и увеличением погрешности мощности сигнала, с другой стороны. Путем выбора шага зондирования можно существенно (в несколько раз) уменьшить погрешность определения коэффициента ослабления методом лидарного зондирования. Путем выбора схемы обработки данных погрешность можно уменьшить до 20%. В частности, случайная погрешность коэффициента ослабления для несимметричной схемы обработки данных (два разных шага дифференцирования) может быть существенно меньше соответствующей величины для симметричной схемы.

С использованием экспериментальных данных в настоящей работе был выполнен анализ систематической погрешности коэффициента ослабления атмосферы путем решения прямой и обратной задачи. Выполненные расчеты показали существенную чувствительность к систематическим погрешностям эхо сигнала результатов определения коэффициента ослабления.

На рис.4 приведена зависимость погрешности коэффициента ослабления от числа шагов, по которому проводится осреднение (пунктирная кривая). По измеренной мощности вычислялся коэффициент ослабления. Значение σ выбиралось, кроме того, из условия максимального соответствия рассчитанной мощности и измеренного сигнала. Погрешность коэффициента ослабления определялась как разность между выбранным и рассчитанным значениями. Видно, что погрешность может превысить 100 %.

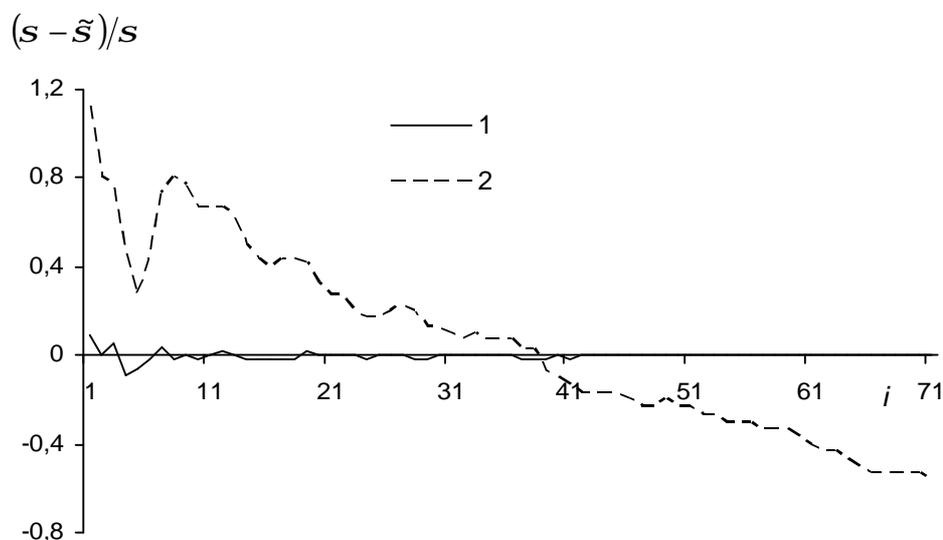


Рис.4. Зависимость величины $\delta\sigma/\sigma$, найденной путем решения прямой и обратной задачи от числа шагов

1 – скорректированные экспериментальные данные,
 2 – экспериментальные данные)

На рис.5 приведена погрешность δP^* , отнесенная к величине P^* . Существование этой погрешности обусловлено погрешностью измерения эхо сигнала. Данную погрешность можно связать с потерей чувствительности приемника при освещении его излучением, рассеянным в процессе прохождения через атмосферу лазерного импульса. Оценку систематической погрешности δP^* можно выполнить для параметров рассматриваемой аппаратуры, определяя разность между значениями фоновой засветки (заданным и вычисленным). Учет этой погрешности существенно уменьшает погрешность коэффициента ослабления.

На рис.4 сплошной кривой представлена погрешность коэффициента ослабления, рассчитанная по мощности эхо сигнала, скорректированной с учетом погрешности рис. 5. Эта погрешность невелика и уменьшается с ростом числа i .

В разделе выполнен анализ результатов измерений

$\delta P^*/P^*$

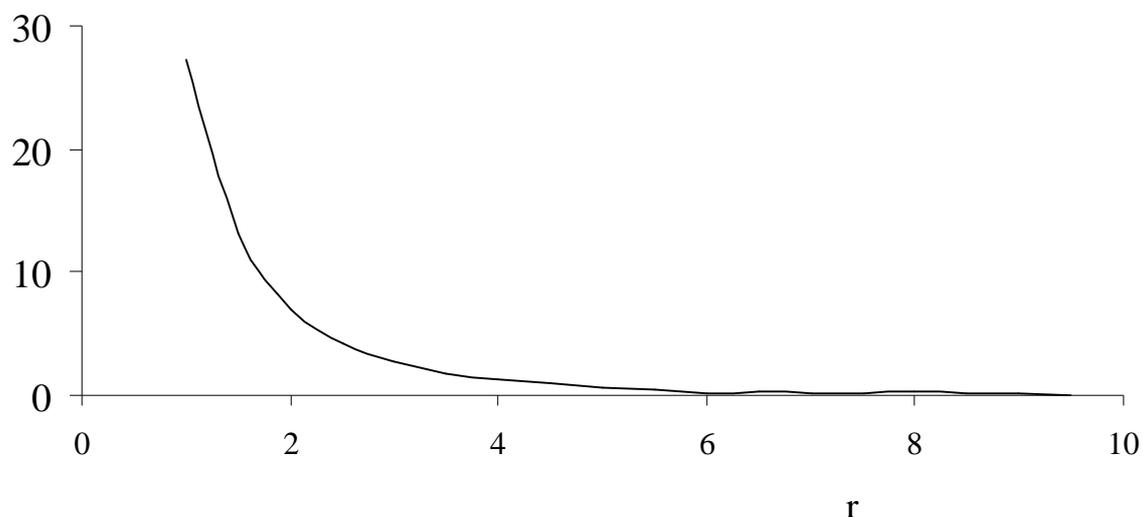


Рис.5. Зависимость величины погрешности $\delta P^*/P^*$

от расстояния зондирования r км

коэффициента ослабления неоднородной атмосферы, когда требуется осуществлять зондирование более чем из одной точки пространства.

Сравнение показало отсутствие значительных различий погрешностей двухпозиционного и однопозиционного зондирования.

В заключении сформулированы основные выводы работы:

1. Найдено новое строгое решение 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. Предложены различные схемы реализации найденного решения, в том числе симметричные и несимметричные. Случайная погрешность коэффициента ослабления для несимметричной схемы обработки данных может быть существенно меньше соответствующей величины для симметричной схемы.

2. Анализ данных, полученных в натурных экспериментах, показал, что строгое решение может быть реализовано лишь в условиях достаточно однородной атмосферы, когда выполняются критерии однородности, основанные на этом решении.

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. Ее решение позволяет находить функции, связывающие искомые оптические коэффициенты. Разработанный метод дает возможность вместе с измерением прозрачности определять НДС, концентрации частиц аэрозоля и газовых компонентов.

4. Показано, что случайная погрешность многопозиционных лидарных измерений, обеспечивающих исключение систематической погрешности, многократно превышает случайную погрешность однопозиционных измерений. В решение удалось ввести весовые коэффициенты, регулирующие случайную и систематическую погрешности измерений. При этом случайная погрешность метода многопозиционного зондирования снизилась до уровня случайной погрешности однопозиционных измерений, а систематическая погрешность измерений оказалась в несколько раз меньше, чем ее величина, характерная для распространенных в настоящее время методов.

5. Анализ данных, полученных в экспериментах АВТОЭКС, КЛЭ, в окрестности пересечения пр. Непокоренных и Пискаревского пр., подтвердил перспективность интегрального решения обратной задачи многопозиционного лидарного зондирования атмосферы.

6. Анализ данных лидарного зондирования вблизи п. Сиверский (Ленинградская область) выявил существование степенной связи между коэффициентами ослабления и обратного рассеяния. Оказалось, что степень варьирует в широких пределах (1–3). Это важно учитывать для достижения достоверности результатов лидарного определения искомых оптических параметров неоднородной атмосферы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Егорова И.А.^{*} Способ оптического определения концентрации газовых компонентов атмосферы. А.с. № 1781656 // Бюл. изобр. – 1992. – № 46;
2. Егорова И.А. Способ определения концентраций газовых компонентов атмосферы. А.с. № 1822946 // Бюл. изобр. – 1993. – № 23;
3. Егоров А.Д., Егорова И.А. Способ определения концентрации газовых компонентов слоя атмосферы. Патент РФ № 2017139 // Бюл. изобр. – 1994. – № 14;
4. Егоров А.Д., Егорова И.А. Способ определения профиля коэффициента ослабления на заданном участке атмосферы. Патент РФ № 2018104 // Бюл. изобр. – 1994. – № 15;
5. Егоров А.Д., Егорова И.А. Способ определения коэффициента ослабления в центре участка неоднородной атмосферы. Патент РФ № 2041475 // Бюл. изобр. – 1995. – № 22;
6. Егоров А.Д., Потапова И.А., Щукин Г.Г. Методы лидарного зондирования атмосферного аэрозоля // Оптический журнал. – 2001. – том 68. – №11;

* Егорова И.А. – Потапова И.А. с 1998 г.

7. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б. Обращение лидарных сигналов малой мощности / Оптический журнал. – 2007. – том 74. – №10;
8. Yegorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B. Atmospheric aerosols measurements and reliability problem/ International Journal of Remote Sensing, 2008; том 29, 2449 – 2468;
9. Егоров А.Д., Потапова И.А. Определение характеристик аэрозоля лидарными системами //Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), 2002, вып.4 (Тр. ГГО им. А.И.Воейкова, вып. 552), с.14 – 18;
10. Егоров А.Д., Потапова И.А. Лидарные исследования прозрачности атмосферы //Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), 2004, вып.5 (Тр. ГГО им. А.И.Воейкова, вып. 553), с. 131 – 142;
11. Егоров А.Д., Потапова И.А. Анализ погрешностей обращения лидарных сигналов малой мощности //Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), 2005, вып.6 (Тр. ГГО им. А.И.Воейкова, вып. 554), с. 62 – 66;
12. Егоров А.Д., Потапова И.А., Привалов Д.В. Систематические погрешности обращения лидарных сигналов малой мощности //Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), 2006, вып.7 (Тр. ГГО им. А.И.Воейкова, вып. 555), с. 30 – 34;
13. Егоров А.Д., Егорова И.А. Вопросы повышения эффективности интерпретации лидарной информации // В кн “Альтернативные направления интерпретации лидарной информации”. – СПб – 1993;
14. Егоров А.Д., Егорова И.А. Альтернативные схемы обработки сигналов обратного рассеяния. СПб. – 1994;
15. Егорова И.А. Лидарное зондирование загрязняющего атмосферу аэрозоля // В кн.: IV Школа–семинар–выставка “Лазеры и современное приборостроение” (Тезисы докладов.). СПб – 1996;

16. Yegorov A.D., Yegorova I.A. Comparative analysis of multipositional remote sensing techniques // Image processing, and synthetic Aperture Radar for Remote sensing, proc. of SPIE. – 1997. – v.3217;
17. Yegorov A.D., Obraztsov S.P., Potapova I.A. Inuniform particle sizing by optical counter // PARTEC 98 7th European Symposium Particle Characterization, Nürnberg: Nürnberg Messe GmbH – 1998. – pp.863–866 // Abstracts, p.93;
18. Потапова И.А. Лазерное многолучевое определение метеорологической дальности видимости в неоднородной атмосфере // В кн.: Труды конференции молодых ученых национальных гидрометеослужб стран СНГ (Тезисы докладов.). Москва – 1999;
19. Потапова И.А. Метод интерпретации данных лидарного зондирования (на англ. яз.: Lidar data processing technique for aerosol sounding) // В кн.: III Международная конференция “Естественные и антропогенные аэрозоли. СПб – 2001;
20. Егоров А.Д., Потапова И.А., Синькевич А.А. Интерпретация данных самолётного лидарного зондирования атмосферного аэрозоля // Межвузовский сборник научных трудов “Методы и устройства передачи и обработки информации”, Санкт-Петербург: Гидрометеоиздат, 2001, с. 63 – 70;
21. Потапова И.А. Восстановление аэрозольных характеристик по данным лидарного зондирования неоднородной атмосферы // Автореферат канд. дисс., СПб – 2001;
22. Потапова И.А. Измерение аэрозольных характеристик лидарными системами / Тезисы Международного симпозиума стран СНГ МСАР-2002, СПб, 2002;
23. Потапова И.А. Метод интерпретации данных лидарного зондирования (на англ. яз.: Lidar data processing technique for aerosol

- sounding) // В кн.: Труды III Международной конференции “Естественные и антропогенные аэрозоли. СПб - 2003;
24. Егоров А.Д., Потапова И.А., Привалов Д.В. Обращение лидарных сигналов малой мощности/ Тезисы IV Международной конференции “Естественные и антропогенные аэрозоли”. – Санкт-Петербург, 2003;
25. Потапова И.А. Метод интерпретации данных лидарного зондирования атмосферного аэрозоля // Сборник научных трудов «Наука – северному региону», вып. LX, Изд. АГТУ, 2004;
26. Егоров А.Д., Потапова И.А., Привалов Д.В. Методы лидарного определения параметров атмосферы/ Тезисы Международного симпозиума стран СНГ МСАР-2004, СПб, 2004;
27. Yegorov A.D., Yegorova I.A. Error analysis of weak lidar signals inverting. 31 International Symposium on Remote Sensing of Environment, St. Petersburg, Russia, 2005,
<http://www.isprs.org/publications/related/ISRSE/html/papers/810.pdf>;
28. Егоров А.Д., Потапова И.А., Привалов Д.В., Ржонсницкая Ю.Б. Систематические и случайные погрешности обращения лидарных сигналов малой мощности / Деп. в ИЦ ВНИИГМИ–МЦД, 2005;
29. Егоров А.Д., Потапова И.А., Привалов Д.В., Ржонсницкая Ю.Б. Особенности лидарного зондирования атмосферного аэрозоля/ Сборник трудов международной школы – конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Изменение климата и окружающая среда», РГГМУ, 2005, с.24 – 25;
30. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б. Обращение слабых сигналов и достоверность результатов лидарных измерений /Тезисы Международного симпозиума МСАР–2006, СПб, 2006;
31. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б. Обращение слабых сигналов и достоверность результатов лидарных измерений

/Тезисы XIII Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Томск, 2006;

32. Егоров А.Д., Потапова И.А., Привалов Д.В., Ржонсницкая Ю.Б. Особенности лидарного зондирования атмосферного аэрозоля

/Тезисы докладов итоговой сессии ученого совета РГГМУ, СПб, 2006, с.37 – 38;

33. Потапова И.А. Методы лидарного определения наклонной дальности видимости /Международная конференция по авиационной и спутниковой метеорологии памяти профессора С.В.Солонина, СПб, 2008, с.135–137.