

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

**Драбенко Валерия Алексеевна**

**ЛИДАРНАЯ ТРАНСМИССОМЕТРИЯ  
СЛАБО ЗАМУТНЕННОЙ АТМОСФЕРЫ**

*Специальность:* 25.00.30 — метеорология, климатология и агрометеорология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук



Санкт-Петербург  
2012

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования Российский государственный гидрометеорологический университет

*Научный руководитель:* доктор физико-математических наук **Егоров Александр Дмитриевич**.

*Официальные оппоненты:* доктор физико-математических наук **Мельникова Ирина Николаевна**, кандидат технических наук, доцент **Руховец Константин Геннадьевич**.

*Ведущая организация:* ВКА им.А.Ф. Можайского.

Защита состоится 26 апреля 2012 года в 15 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.197.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования Российский государственный гидрометеорологический университет по адресу: 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования Российский государственный гидрометеорологический университет

С авторефератом диссертации можно ознакомиться на сайте [www.vak.ed.gov.ru](http://www.vak.ed.gov.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор географических наук,  
профессор

**А.И.Угрюмов**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Использование лидаров обеспечивает оперативное выполнение измерений прозрачности атмосферы, т.е. трансмиссомерии, с высоким разрешением. Разработка лидарных методов трансмиссомерии необходима для мониторинга загрязнения воздуха. Однако она предполагает решение проблемы интерпретации лидарной информации, особенно, сложной при зондировании слабо замутненной атмосферы. Это обусловлено существенной ролью случайной и систематической погрешности измерений в таких условиях. С другой стороны, для оценки степени загрязнения атмосферы аэрозольные концентрации загрязненных участков трассы зондирования сравнивают с аэрозольными концентрациями участков слабо замутненной атмосферы. Таким образом, работа посвященная проблеме интерпретации результатов лидарного зондирования слабо замутненной атмосферы, актуальна.

В работе рассматриваются вопросы достоверности, с которой оптические характеристики атмосферного аэрозоля определяются по результатам измерений сигналов обратного рассеяния. При этом учитывается, что коэффициент ослабления невелик, так что характерная оптическая толщина много меньше единицы, а зондирование осуществляется в условиях, когда нельзя пренебречь мощностью фоновой засветки.

Совершенствование методов лидарного зондирования слабо замутненной атмосферы в меньшей степени связано с решением проблемы неопределенности лидарного уравнения. Действительно, его обращение, на котором основана интерпретация результатов, осуществляется для постоянных в пространстве оптических коэффициентов. В большей степени сложности проблемы обусловлена математической некорректностью обратной задачи, что негативно сказывается на точности определения искомых величин. Пути решения проблемы, найденные в последнее время, позволяют использовать получаемую лидарную информацию не только для качественного описания состояния атмосферы. Появляется возможность решения проблемы получения достоверной количественной информации в процессе лидарного мониторинга слабо замутненной атмосферы.

Цель работы - повышение точности результатов лидарной трансмиссомерии слабо замутненной атмосферы с учетом характеристик используемой аппаратуры.

Основные задачи исследования, которые решаются для достижения цели:

- анализируются особенности методов решения обратной задачи лидарной трансмиссомерии слабо замутненной атмосферы;
- разрабатываются алгоритмы обработки сигналов лидарного зондирования слабо замутненной атмосферы, учитывающие особенности измерительной аппаратуры и условия зондирования;
- осуществляется моделирование погрешности сигнала обратного рассеяния, принимаемого лидаром;
- оценивается эффективность методов лидарной трансмиссомерии слабо замутненной атмосферы.

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

Научная новизна работы. К основным научным результатам работы, которые выносятся на защиту, относятся:

- разработанная новая методика решения обратной задачи лидарной трансмиссомерии слабо замутненной атмосферы, включающая линейризацию задачи и локализацию области измерений с допустимыми систематическими погрешностями эхо сигнала, проанализированы ее особенности;
- установлены границы области лидарной трансмиссомерии с допустимыми систематическими погрешностями эхо сигнала с учетом особенностей измерительной аппаратуры и условий зондирования;
- получена оценка эффективности метода решения обратной задачи лидарного зондирования слабо замутненной атмосферы с учетом особенностей измерительной аппаратуры.

Основные положения, выносимые на защиту:

- разработанная новая методика обработки данных лидарной трансмиссомерии слабо замутненной атмосферы;
- результаты анализа особенностей разработанного метода лидарной трансмиссомерии;
- результаты оценки эффективности метода решения обратной задачи лидарного зондирования слабо замутненной атмосферы.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается тем, что теория построена на известных фактах – проверенном практикой лидарном уравнении; использованы современные методы исследований, включающие методы математической статистики с введением обоснованных весовых факторов.

Практическая значимость работы определяется внедрением результатов в учебный процесс, кроме того, определены перспективы практического использования решения линейризованной обратной задачи лидарного зондирования слабо замутненной атмосферы.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались

- на Международном симпозиуме «Атмосферная радиация и динамика МСАРД-2012» (Санкт-Петербург, 2012);
- на научном семинаре «Экология и космос» (Санкт-Петербург, 2011),
- на итоговой сессии ученого совета РГГМУ (2012).
- на Межвузовская научно-практическая конференция военно-научного общества курсантов и молодых ученых Перспектива 2012, Воронеж 2012.

Тезисы II Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы военной геофизики и контроля состояния природной среды» СПб 2012.

Публикации. Основные результаты, обобщенные и систематизированные в работе, отражены в 11 научных трудах.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы - 102 наименований. В ней содержится 128 страниц текста, 53 рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** осуществляется физическая и математическая постановка задачи.

Лидарное уравнение, которое используется для определения оптических характеристик атмосферы, обычно записывается для коротких зондирующих импульсов:

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

$$T_{i,j} = \exp\left(-\int_{c_{i,j}} \sigma(\vec{r}) d\vec{r}\right),$$

где  $P_*$  - мощность солнечного излучения, рассеянного атмосферой в направлении на приемное устройство лидара (мощность фоновой засветки),  $T$  - коэффициент пропускания атмосферы,  $P_{i,j}$  - 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,  $f$  - геометрический фактор лидара,  $A$  - постоянная лидара,  $\beta$  - коэффициент обратного рассеяния,  $\sigma$  - коэффициент ослабления,  $c_{i,j}$  - отрезок  $[\vec{R}_i, \vec{r}_j]$ , по которому вычисляется интеграл в уравнении (1).

В общем случае следует учитывать конечную протяженность зондирующего импульса.

**Во второй главе** рассматриваются интегральные методы многопозиционного лидарного исследования слабо замутненной атмосферы.

**В разработанных ранее методах многопозиционного лидарного исследования атмосферы удалось решить ряд вопросов, в том числе, повысить точность измерений оптических характеристик благодаря учету возможной неоднородности атмосферы в пределах исследуемого объема, включая изменчивость величины  $m$ , характеризующей связь коэффициента ослабления и коэффициента обратного рассеяния.**

Вместе с тем, в них не учитывается, что мощность фоновой засветки может быть различной для разных посылок зондирующих импульсов. Для устранения этого недостатка предлагается дополнить систему решаемых уравнений Клетта, осуществляя посылки зондирующих импульсов из дополнительных точек пространства и принимая сигналы обратного рассеяния от дополнительных рассеивающих объемов.

В результате, получается замкнутая система из 15 уравнений относительно 10 неизвестных оптических характеристик атмосферного аэрозоля и 5 неизвестных мощностей фоновой засветки. Таким образом, удается повысить точность лидарных измерений оптических характеристик слабо замутненной атмосферы благодаря учету фоновой засветки в общем случае ее неоднородности. Настоящая работа ограничивается сформулированными результатами, поскольку в ней делается акцент на особенностях лидарных измерений оптических характеристик слабо замутненной однородной атмосферы.

**В третьей главе** рассматриваются методы многопозиционного лидарного зондирования атмосферы импульсами конечной длительности.

При многопозиционном лидарном зондировании загрязненной неоднородной атмосферы импульсами конечной длительности оптические характеристики находят из двух систем уравнений, записанных для многоугольников, образованных пересечением трасс зондирования, с учетом и без учета эффекта конечной длительности. Физические принципы, на которых основаны измерения предлагаемым методом, состоят в том, что измеренные мощности эхо сигналов связаны с оптическими характеристиками неоднородной атмосферы лидарным уравнением для светового импульса конечной пространственной протяженности.

С целью исследования точности методов интерпретации результатов зондирования импульсами конечной длительности аэрозоля неоднородной атмосферы для описания оптических параметров была использована степенная связь между коэффициентом ослабления и коэффициентом обратного рассеяния. Погрешность методов, связанная с конечностью длительности импульса, в рассмотренных условиях не превышает 10%, т.о. можно ограничиться приближением (1).

**В четвертой главе** рассматривается решение обратной задачи лидарной трансмиссометрии слабо замутненной однородной атмосферы

В случае однородной атмосферы при горизонтальном зондировании следует минимизировать сумму:

$$\delta^2 = \sum_1^n \left( P_i + \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i) - P_i \right)^2. \quad (2)$$

Для решения задачи в случае слабо замутненной атмосферы, т.е. в случае малых величин  $\sigma$ , ее можно линеаризовать.

На рисунке 1 представлены результаты расчетов величины  $P_i$ . На рисунке 1а рассматриваются расстояния зондирования, начиная с 750 м. На рисунке 1б рассматриваются расстояния зондирования, начиная с 2500 м.

Анализ представленных результатов показывает, что при решении обратной задачи, начиная с 750 м, величина фоновой засветки получается зависящей от расстояния зондирования. Это свидетельствует о наличии существенного искажения лидарного сигнала на таких расстояниях.

При решении обратной задачи, начиная с 2500 м, заметной зависимости фоновой засветки от расстояния зондирования не получается. Это свидетельствует об отсутствии заметных искажений лидарного сигнала на таких расстояниях.

С учетом результатов расчетов величины фоновой засветки, на рисунке 2 представлены результаты расчетов коэффициента ослабления, который оказался равным  $0,033 \text{ км}^{-1}$ . На рисунке 2а рассматриваются расстояния зондирования, начиная с 2500 м. Используется решение с линеаризацией. Для сравнения, на рисунке 2б рассматриваются расстояния зондирования, начиная с 3000 м. Используется решение нелинейной задачи с шагом дифференцирования  $m\Delta=1800 \text{ м}$ ,  $\Delta$  – шаг зондирования. В этом случае используется существенно меньшее число измерений.

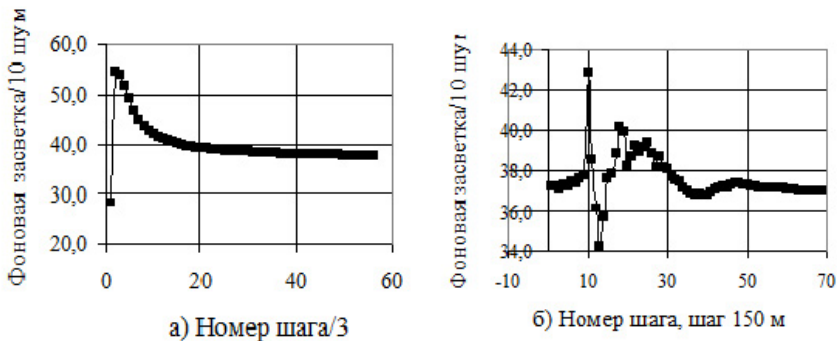


Рис.1. Результаты расчетов величины

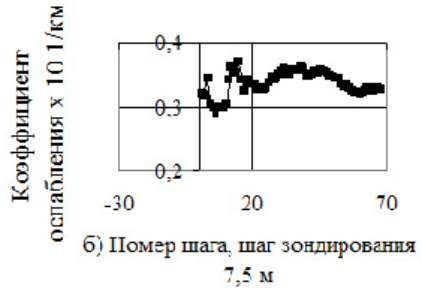
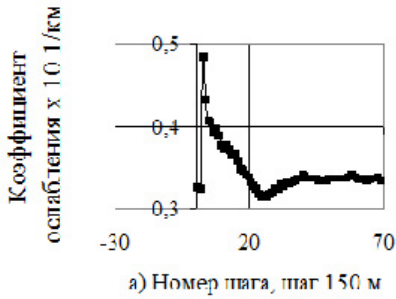


Рис.2. Результаты расчетов коэффициента ослабления

с учетом найденных значений  $\sigma$ ,  $P_e$  можно определить величину  $B$ .

На рисунке 3 представлены результаты расчетов величины  $\frac{B_i - B_n}{B_n}$ , причем  $B = 60,9$

По измеренному эхо сигналу и найденным константам можно оценить шум сигнала. Рисунок 4 показывает возможность использовать для оценки шума формулы:

$$\delta_i = C \sqrt{P_i}. \quad (3)$$

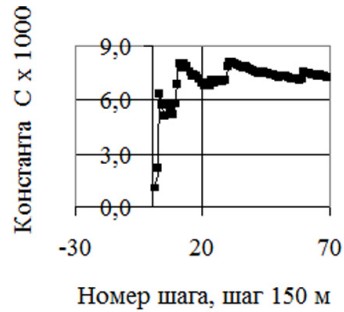
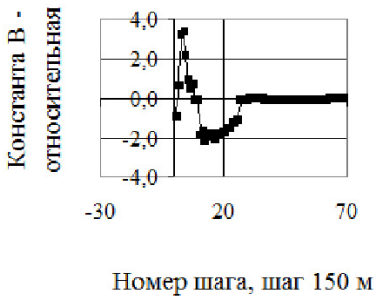


Рис.3. Результаты определения величины  $B$

Рис.4. Результаты определения связи шума с мощностью эхо сигнала

**В пятой главе** рассматривается эффективность методов интерпретации данных лидарной трансмиссометрии слабо замутненной атмосферы

В случае однородной атмосферы систему лидарных уравнений для трех зондируемых элементов ( $i$ -го,  $j$ -го,  $k$ -го) можно записать в прежних обозначениях  $B = A\beta$ ,  $G = B\sigma$  в виде:

$$P_i = P_e + \frac{B}{R_i^2} + \frac{G}{R_i}, \quad (4)$$

$$P_j = P_* + \frac{B}{R_j^2} + \frac{G}{R_j}, \quad (5)$$

$$P_k = P_* + \frac{B}{R_k^2} + \frac{G}{R_k}. \quad (6)$$

Решение задачи для определения фоновой засветки можно записать в виде:

$$P_* = \frac{1}{D_0} \left( \Delta_1 \sum_1^n P_i - \Delta_2 \sum_1^n \frac{P_i}{R_i^2} + \Delta_3 \sum_1^n \frac{P_i}{R_i} \right). \quad (7)$$

где

$$D_0 = n\Delta_1 - \Delta_2 \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} + \Delta_3 \sum_1^n \frac{1}{R_i},$$

$$\Delta_1 = \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} \sum_1^n \frac{1}{R_i^4} - \left( \sum_1^n \frac{1}{R_i^3} \right)^2,$$

$$\Delta_2 = \left( \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} \right)^2 - \sum_1^n \frac{1}{R_i} \sum_1^n \frac{1}{R_i^3},$$

$$\Delta_3 = \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} \sum_1^n \frac{1}{R_i^3} - \sum_1^n \frac{1}{R_i} \sum_1^n \frac{1}{R_i^4}.$$

Случайная погрешность, с которой определяется фоновая засветка, может быть найдена в линейном приближении

$$\delta = C_* \left\{ \sum_1^n \left( \frac{\partial P_*}{\partial P_i} \right)^2 P_i \right\}^{1/2}, \quad (8)$$

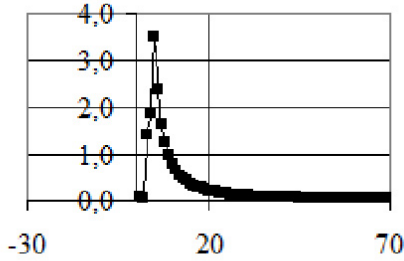
Для ее вычисления с учетом (7) получается выражение

$$\delta = \frac{C_*}{D_0} \left\{ \sum_1^n \left( \Delta_1 - \frac{\Delta_2}{R_i^2} + \frac{\Delta_3}{R_i} \right)^2 P_i \right\}^{1/2}, \quad (9)$$

На рисунке б представлены результаты расчета погрешности фоновой засветки по формуле (9).

$$\delta P_* / P_*$$





Номер шага, шаг 150 м

Рис.5. Результаты расчетов погрешности величины  $P$ .

Решение задачи определения коэффициента ослабления можно записать в виде:

$$\sigma = -d_5 / 2d_4, \quad (10)$$

где

$$D_4 = \begin{vmatrix} n & \sum_1^n P_i & \sum_1^n \frac{1}{R_i} \\ \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} & \sum_1^n \frac{P_i}{R_i^2} & \sum_1^n \frac{1}{R_i^3} \\ \sum_1^n \frac{1}{R_i} & \sum_1^n \frac{P_i}{R_i} & \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} \end{vmatrix}, \quad (11)$$

$$D_5 = \begin{vmatrix} n & \sum_1^n P_i & \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} \\ \sum_1^n \frac{1}{R_i^2} & \sum_1^n \frac{P_i}{R_i^2} & \sum_1^n \frac{1}{R_i^4} \\ \sum_1^n \frac{1}{R_i} & \sum_1^n \frac{P_i}{R_i} & \sum_1^n \frac{1}{R_i^3} \end{vmatrix}, \quad (12)$$

На рисунке 6 представлены результаты расчета коэффициента ослабления по формуле (10). Здесь  $i$  – номер шага, шаг 150 м.

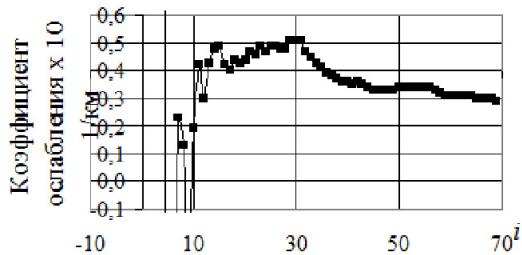


Рис.6. Результаты расчетов коэффициента ослабления

Расхождение с результатами, представленными на рисунке 3, не превышает 10%.

**В заключении** сделаны следующие основные выводы:

- разработана новая методика решения обратной задачи, позволившая повысить точность лидарных измерений коэффициента ослабления слабо замутненной атмосферы,
- раскрыты причины высокой точности решения линеаризованной обратной задачи лидарного зондирования слабо замутненной атмосферы,
- проведена модернизация алгоритмов лидарного определения коэффициента ослабления слабо замутненной атмосферы, обеспечивающих получение оценки погрешности осредненного коэффициента ослабления.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Публикации в журналах перечня ВАК*

1. *Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Драбенко В.А., Ощуркова А.А.* Методы многопозиционного лидарного зондирования атмосферы // Ученые записки РГГМУ, № 16, 2010.
2. *Гедзенко Д.В., Драбенко В.А., Кузнецов И.Е.* Методические аспекты учета особенностей применения схем лидарного зондирования атмосферы при повышении достоверности результатов измерений // Вестник военного авиационного инженерного университета (г. Воронеж). №1 (11), 2011.
3. *Егоров А.Д., Драбенко В.А.* Зондирование атмосферы импульсами конечной длительности с использованием лидаров // Сборник научных трудов СПб ВМИ № 1, 2009.
4. *Драбенко В.А.* Лидарное зондирование атмосферы с использованием многопозиционного размещения // Сборник научных трудов СПб ВМИ № 1, 2010.
5. *Драбенко В.А.* Лидарное зондирование атмосферного аэрозоля с использованием интегральных методик // Сборник научных трудов СПб ВМИ № 2, 2010.
6. *Драбенко В.А.* Зондирование атмосферы лидарами с использованием импульсов конечной длительности // Сборник научных трудов СПб ВМИ № 1, 2011.
7. *Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Драбенко В.А., Ощуркова А.А.* Интерпретация данных лидарного зондирования слабо рассеивающей атмосферы // Тезисы Международного симпозиума МСАРД-2012, СПб, 2012.

8. *Драбенко В.А.* Эффективность методов интерпретации данных лидарного зондирования слабо замутненной атмосферы // Тезисы Межвузовская научно-практическая конференция военно-научного общества курсантов и молодых ученых. Перспектива 2012, Воронеж 2012.
9. *Драбенко В.А.* Задача лидарного определения оптических параметров атмосферы // Тезисы Межвузовская научно-практическая конференция военно-научного общества курсантов и молодых ученых Перспектива 2012, Воронеж 2012.
10. *Драбенко В.А.* Возможность определения загрязненности атмосферы аэрозолями с использованием методов эластичного рассеяния // Тезисы II Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы военной геофизики и контроля состояния природной среды» СПб, 2012.
11. *Драбенко В.А.* Решение обратной задачи лидарного зондирования слабо замутненной однородной атмосферы в случае линеаризации задачи // Тезисы II Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы военной геофизики и контроля состояния природной среды» СПб, 2012.

Драбенко Валерия Алексеевна

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

**ЛИДАРНАЯ ТРАНСМИССОМЕТРИЯ  
СЛАБО ЗАМУТНЕННОЙ АТМОСФЕРЫ**

ЛР № 020309 от 30.12.96.

---

Подписано в печать 19.03.12. Формат 60x90 1/16. Гарнитура Newton.  
Печать цифровая. Усл. печ. л. 0,75. Тираж 100 экз. Зак. №70  
РГГМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр. 98.  
Отпечатано в ЦОП РГГМУ

---