

А.Д. Егоров, И.А. Потапова, Ю.Б. Ржонсницкая, А.А. Ошуркова

**МЕТОДЫ ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
АЭРОЗОЛЬНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ АТМОСФЕРЫ
ИМПУЛЬСАМИ КОНЕЧНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ**

A.D. Yegorov, I.A. Potapova, Y.B. Rzhonsnitskaya, A.A. Oshurkova

**LIDAR PROBING OF ATMOSPHERIC AEROSOL POLLUTIONS
BY METHODS USING FINITE DURATION PULSES**

Рассматриваются методы лидарного зондирования аэрозольных загрязнений атмосферы импульсами конечной длительности. Разработан новый лидарный метод для измерений коэффициента обратного рассеяния и коэффициента ослабления и оценки точности результатов интерпретации лидарных сигналов в условиях неоднородной атмосферы.

Ключевые слова: атмосферный аэрозоль, многопозиционные измерения, импульсы конечной длительности, лидарное уравнение, интегральное решение.

There are considered lidar probing methods for atmospheric aerosol pollutions measurements using finite duration pulses. New lidar multiposition technique was developed to measure the backscattering coefficient and the extinction coefficient and to assess the accuracy of the results of lidar signals interpreting in inhomogeneous atmosphere conditions.

Keywords: atmospheric aerosols, multiposition lidar measurements, finite duration pulses, lidar equation, integral solution.

Загрязнение атмосферы дымами и смогом характеризуется низкой прозрачностью воздуха и специфическими оптическими свойствами аэрозольных частиц. Применяемый фотоэлектрический метод аэрозольных исследований может привести к недостоверным результатам. Они существенно зависят от рассеивающих свойств частиц. Кроме того, этот метод не дает возможности выполнять дистанционные измерения. Для обеспечения дистанционных измерений перспективным является метод лидарного зондирования. Однако при традиционном подходе однопозиционного зондирования решается неопределенная задача. Кроме того, в условиях низкой прозрачности воздуха в дымах и смоге необходим учет конечной длительности лазерных импульсов.

В работе рассматривается многопозиционное лидарное зондирование атмосферы с учетом конечной длительности лазерных импульсов.

**1. Методы лидарного зондирования атмосферы
импульсами конечной длительности**

Применение методов лидарного зондирования предполагает измерение мощности эхо-сигнала, связанной лидарным уравнением с показателем ослабления и показателем обратного рассеяния. Лидарное уравнение обычно записывается для коротких зондирующих импульсов. Это уравнение связывает сигнал обратного рассеяния с оптическими характеристиками атмосферного аэрозоля

следующим образом:

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

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

где 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, причем рассматривается как однопозиционное зондирование с фиксированным радиусом-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 которому вычисляется интеграл в уравнении (1); $d\vec{r}$ – элемент длины отрезка.

Для проверки допущения малости длительности зондирующих импульсов лидарное уравнение однопозиционного зондирования записывается в виде:

$$P(r) = \frac{2A}{c\tau} \int_r^{r+\frac{c\tau}{2}} f(r')\beta(r') \exp\left(-2 \int_0^{r'} \sigma(r'') dr''\right) dr', \quad (2)$$

где r – расстояние между лидаром и рассеивающим объемом; c – скорость света; τ – длительность зондирующего импульса.

С учетом малости длительности зондирующего импульса с точностью до членов первого порядка малости лидарное уравнение (2) можно заменить разложением в ряд:

$$P(r) = Af(r)\beta(r) \exp\left(-2 \int_0^r \sigma(r') dr'\right) \left[1 + \left(\frac{d \ln f}{dr} + \frac{d \ln \beta}{dr} - 2\sigma\right) \frac{c\tau}{4} + \dots\right]. \quad (3)$$

Если ввести скорректированный на геометрический фактор эхо-сигнал

$$S_*(r) = \frac{P(r)}{f(r)} \left(1 - \frac{d \ln f}{dr} \frac{c\tau}{4}\right), \quad (4)$$

который отличается от обычно вводимого

$$S(r) = \frac{P(r)}{f(r)} \quad (5)$$

дополнительным множителем, то уравнение (3) переписывается следующим образом:

$$S_*(r) = A\beta(r) \exp\left(-2\int_0^r \sigma(r')dr'\right) \left[1 + \left(\frac{d\ln\beta}{dr} - 2\sigma\right)\frac{c\tau}{4} + \dots\right] \quad (6)$$

В предельном случае короткого зондирующего импульса, т.е. в нулевом приближении

$$S(r) = A\beta_0(r) \exp\left(-2\int_0^r \sigma_0(r')dr'\right) \quad (7)$$

В первом приближении

$$S_*(r) = A\beta_1(r) \exp\left(-2\int_0^r \sigma_1(r')dr'\right) \quad (8)$$

По разности решений уравнений (7), (8) можно оценить систематическую погрешность определения коэффициента обратного рассеяния β и коэффициента ослабления σ при использовании соотношения (5):

$$\delta_\beta = \beta_0 - \beta_1, \quad \sigma = \sigma_0 - \sigma_1 \quad (9)$$

Величина S_* связана с коэффициентами β , σ уравнением (6), которое можно записать в виде:

$$\ln S_*(r) = \ln A + \ln \beta(r) - 2\int_0^r \sigma(r')dr' + \left(\frac{d\ln\beta}{dr} - 2\sigma\right)\frac{c\tau}{4} \quad (10)$$

Уравнение (10) целесообразно продифференцировать по расстоянию r , тогда получается уравнение

$$\left[\ln S_*(r)\right] = \frac{d}{dr} \left(\ln \beta(r) - \sigma \frac{c\tau}{2}\right) - 2\sigma(r) + \frac{d^2 \ln \beta}{dr^2} \frac{c\tau}{4} \quad (11)$$

Задавая угол α_i , определяющий i -е направление многопозиционного зондирования, и рассматривая производные в правой части равенства (11) как производные по направлению, можно записать уравнение (11) следующим образом:

$$\begin{aligned} \left[\ln S_*(r) \right]_i &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\ln \beta(r) - \sigma \frac{c\tau}{2} \right) \cos \alpha_i + \frac{\partial}{\partial y} \left(\ln \beta(r) - \sigma \frac{c\tau}{2} \right) \sin \alpha_i - 2\sigma(r) + \\ &+ \left(\frac{\partial^2 \ln \beta}{\partial x^2} \cos^2 \alpha_i + 2 \frac{\partial^2 \ln \beta}{\partial x \partial y} \sin \alpha_i \cos \alpha_i + \frac{\partial^2 \ln \beta}{\partial y^2} \sin^2 \alpha_i \right) \frac{c\tau}{4}. \end{aligned} \quad (12)$$

Уравнение (12) целесообразно записать в виде:

$$\begin{aligned} \left[\ln S_*(r) \right]_i &= \frac{\partial}{\partial x} \left[\ln \beta(r) - \sigma \frac{c\tau}{2} \right] \cos \alpha_i + \frac{\partial}{\partial y} \left[\ln \beta(r) - \sigma \frac{c\tau}{2} \right] \sin \alpha_i - \\ &- 2\sigma(r) + \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \ln \beta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \ln \beta}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \ln \beta}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \ln \beta}{\partial y^2} \right) \cos 2\alpha_i + 2 \frac{\partial^2 \ln \beta}{\partial x \partial y} \sin 2\alpha_i \right] \frac{c\tau}{4}. \end{aligned} \quad (13)$$

Если обозначить

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{1}{8} \left(\frac{\partial^2 \ln \beta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \ln \beta}{\partial y^2} \right) c\tau - 2\sigma(r), \\ V_2 &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\ln \beta(r) - \sigma \frac{c\tau}{2} \right), \\ V_3 &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\ln \beta(r) - \sigma \frac{c\tau}{2} \right), \\ V_4 &= \frac{1}{8} \left(\frac{\partial^2 \ln \beta}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \ln \beta}{\partial y^2} \right) c\tau, \\ V_5 &= \frac{\partial^2 \ln \beta}{\partial x \partial y} \frac{c\tau}{2}, \end{aligned} \quad (14)$$

уравнение (13) можно записать следующим образом:

$$\left[\ln S_*(r) \right]_i = V_1 + V_2 \cos \alpha_i + V_3 \sin \alpha_i + V_4 \cos 2\alpha_i + V_5 \sin 2\alpha_i. \quad (15)$$

Зондирование в плоскости вдоль 5 направлений дает возможность составить систему из 5 уравнений (16) и найти 5 неизвестных величин V_i . По найденным величинам можно найти искомые коэффициенты.

В частности, с учетом равенств

$$\begin{aligned}
 V_1 + V_4 &= \frac{\partial^2 \ln \beta}{\partial x^2} \frac{c\tau}{4} - 2\sigma(r), \\
 V_1 - V_4 &= \frac{\partial^2 \ln \beta}{\partial y^2} \frac{c\tau}{4} - 2\sigma(r), \\
 \frac{\partial^2}{\partial y^2} (V_1 + V_4) &= \frac{\partial^4 \ln \beta}{\partial x^2 \partial y^2} \frac{c\tau}{4} - 2 \frac{\partial^2 \sigma(r)}{\partial y^2}, \\
 \frac{\partial^2}{\partial x^2} (V_1 - V_4) &= \frac{\partial^4 \ln \beta}{\partial x^2 \partial y^2} \frac{c\tau}{4} - 2 \frac{\partial^2 \sigma(r)}{\partial x^2}, \\
 \frac{\partial V_2}{\partial x} &= \frac{\partial^2 \ln \beta}{\partial x^2} \frac{c\tau}{2} - \frac{\partial^2 \sigma(r)}{\partial x^2}, \\
 \frac{\partial V_3}{\partial y} &= \frac{\partial^2 \ln \beta}{\partial y^2} \frac{c\tau}{2} - \frac{\partial^2 \sigma(r)}{\partial y^2},
 \end{aligned} \tag{16}$$

следующих из соотношений (14), для коэффициента ослабления получается выражение:

$$\sigma = \frac{1}{2} \left\{ \frac{c\tau}{8} \left[\frac{\partial V_2}{\partial x} + \frac{\partial V_3}{\partial y} - \frac{c\tau}{4} \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} (V_1 - V_4) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} (V_1 + V_4) - \frac{\partial^2 V_5}{\partial x \partial y} \right] \right] - V \right\}_1. \tag{17}$$

В предельном случае короткого зондирующего импульса

$$V_4 = V_5 = 0, \tag{18}$$

причем решается известная система из трех уравнений. Сравнение этих двух решений дает возможность оценить систематическую погрешность использования упрощенного подхода. Аналогичным образом можно рассмотреть следующие приближения. Необходимо отметить, однако, математическую некорректность решаемых при этом задач. Целесообразно поэтому указать другой путь оценки систематической погрешности, когда дважды решается система уравнений нулевого приближения. При этом используется скорректированный эхо сигнал в виде (4) и в виде:

$$S^*(r) = \frac{P(r)}{f(r)} \left[1 - \left(\frac{d \ln f}{dr} + \frac{d \ln \beta_0}{dr} - 2\sigma_0 \right) \frac{c\tau}{4} \right]. \quad (19)$$

Сравнение двух решений дает возможность оценить систематическую погрешность [1].

2. Результаты лидарного зондирования неоднородной атмосферы

Для описания оптических параметров на основе данных [2] была использована степенная связь между коэффициентом ослабления и коэффициентом обратного рассеяния

$$\square \square D \square^{1/m}. \quad (20)$$

Эффективность метода обеспечена применением приближенного решения. Учитывалось существование физических причин, способствующих образованию в атмосфере горизонтально однородных слоев. Критерием горизонтальной однородности слоя является выполнение равенств:

$$\left[\ln \left(\frac{P}{f} \right) \right]'_i = B_n \cos \alpha_i + B_{n+1} \quad (21)$$

При этом удалось определить постоянную величину m в степенной связи (20), которая привлекается при разработке методов зондирования неоднородной атмосферы. Величина m определяется из соотношения:

$$1/m = \frac{F_1}{F_2'} \cdot \frac{\left[\ln \left(\frac{P}{f} \right) \right]'_2 - \left[\ln \left(\frac{P}{f} \right) \right]'_1}{\operatorname{cosec} \varphi_1 - \operatorname{cosec} \varphi_2} \quad (22)$$

где $\varphi_i = \frac{\pi}{2} - \alpha_i$ – угол места,

$$F_1 = \left[\ln \left(\frac{P}{f} \right) \right]'_2 \sin \varphi_1 - \left[\ln \left(\frac{P}{f} \right) \right]'_1 \sin \varphi_2, \quad (23)$$

$$F_2 = \left[\ln \left(\frac{P}{f} \right) \right]'_2 \sin^2 \varphi_1 - \left[\ln \left(\frac{P}{f} \right) \right]'_1 \sin^2 \varphi_2. \quad (24)$$

Коэффициент ослабления неоднородной атмосферы вне области, где выполняется критерий (21), связывается с его значением внутри этой области интегральным соотношением:

$$\frac{S_*^m}{\sigma_*} - \frac{S^m}{\sigma} = 2m \int_{R_*}^R S^m dR, \quad (25)$$

в котором значение σ находится из равенства:

$$\sigma = -0,5 B_{n+1}. \quad (26)$$

В методе используется наличие участков горизонтально однородной атмосферы: различие найденных параметров для разных направлений φ_i на участках однородной атмосферы не превышало среднего квадратичного отклонения. Подстановка этих величин в интегральное решение делает возможным определение искомой связи, а также оптических свойств неоднородной атмосферы. Решение системы уравнений на трассах зондирования позволяет найти средний коэффициент обратного рассеяния и его погрешность. Для определения связи погрешность минимизируется. Повышение достоверности результатов достигается за счет установления области применимости используемого метода. Метод применим, если определяемые величины не различаются значительно для различных направлений. Таким образом, метод включает процедуру лидарного контроля точности результатов. Кроме этого, связь между коэффициентами обратного рассеяния и ослабления была найдена посредством решения лидарного уравнения лишь в терминах Клетта для различных направлений зондирования и зондируемых слоёв. Средние квадратичные отклонения были рассчитаны для слоёв с верхними границами 100 и 200 м [2]. Эти решения были использованы для определения константы c в замутненной атмосфере под слоем 200–600 м (углы зондирования 80, 40, 30, 20°) и в прозрачной атмосфере под слоем 300–600 м (углы зондирования 90, 40, 20°). Коэффициент ослабления (граничное значение) в диапазоне 2–4 км⁻¹ были найдены в горизонтально однородном слое (на высотах 200–400 м).

На рис. 1 представлены средние квадратичные отклонения δ (за вычетом минимального) для различных пар углов места и зондируемых слоёв с учетом и без учета длительности импульса (кривая и маркеры – данные эксперимента, заметных различий нет). Минимумы кривых, построенные с учетом и без учета длительности импульса, находятся в точках 0,6 и 0,4 соответственно. Кривая с маркерами соответствует гипотетической модели сигнала, скорректированно-го с первого шага на квадрат расстояния. Таким образом, погрешность величины c , связанная с конечностью длительности импульса, может составлять 30 %.

Аналогичная зависимость среднего квадратичного отклонения решений интегрального уравнения от коэффициента ослабления σ_k на верхней границе слоя представлена на рис. 2. Погрешность величины σ_k , связанная с конечностью длительности импульса, сравнительно невелика и составляет для гипотетической модели 10 %.

Таким образом, по данным лидарного зондирования удалось определить параметр c и коэффициент ослабления на верхней границе слоя и оценить их погрешность за счет конечности длительности импульса.

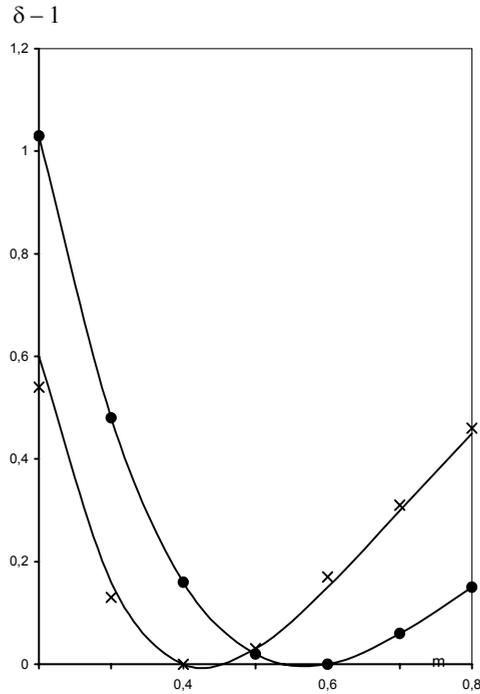


Рис. 1. Среднее квадратичное отклонение решений интегрального уравнения по совокупности направлений зондирования и зондируемых слоев с учетом и без учета длительности импульса (кривая и маркеры) и для гипотетической модели (кривая с маркерами)

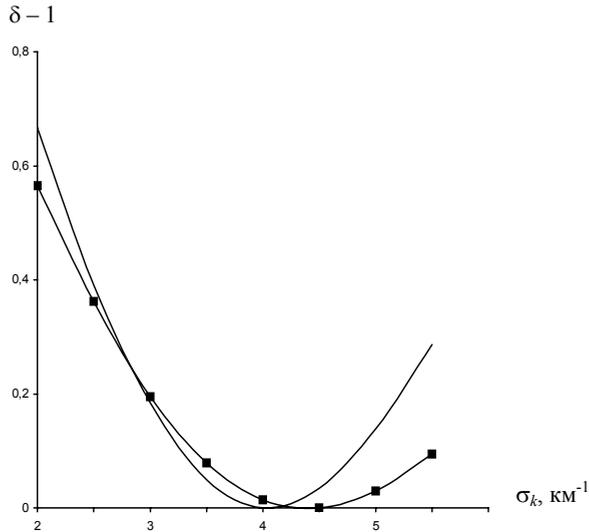


Рис. 2. Среднее квадратичное отклонение решений интегрального уравнения с учетом (гипотетическая кривая с маркерами) и без учета длительности импульса в зависимости от коэффициента ослабления для различных углов места и зондируемых слоев

Заключение

В работе проанализированы методы интерпретации данных многопозиционного лидарного зондирования неоднородной атмосферы и найдено новое решение задачи, учитывающее конечную длительность зондирующего импульса. Найденное решение позволяет оценить точность определения характеристик аэрозольных загрязнений неоднородной атмосферы лидарными системами.

Литература

1. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Суворов А.П. Зондирование атмосферы импульсами конечной длительности // Седьмая междунар. конф. «Естественные и антропогенные аэрозоли». Тез. док-дов. – СПб., 2010, с. 30.
2. Yegorov A.D. Atmospheric aerosols measurements and reliability problem [Text] / A.D. Yegorov, I.A. Potapova, Yu.B. Rzhonsnitskaya // Intern. J. of Remote Sensing, 2008, vol. 29, 2449–2468.

Работа выполнена в рамках проекта, поддержанного в соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации № 218 от 9 апреля 2010 г. «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства» по открытому публичному конкурсу по отбору организаций на право получения субсидий на реализацию комплексных проектов по созданию высокотехнологичного производства (шифр 2010-218-01).