

*А.Д. Егоров, И.А. Потапова, Д.В. Привалов, Ю.Б. Ржонсницкая*

## **ПОГРЕШНОСТИ ОБРАЩЕНИЯ ЛИДАРНЫХ СИГНАЛОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

*A.D. Yegorov, I.A. Potapova, D.V. Privalov, Yu.B. Rjonsnitskaya*

## **WEAK LIDAR SIGNALS INVERTING RELIABILITY**

*Рассматривается проблема установления достоверности, с которой аэрозольные характеристики определяются по результатам лидарных измерений сигналов обратного рассеяния. Алгоритмы, которые должны быть использованы для успешного анализа лидарных данных, базируются на новом строгом решении лидарного уравнения, включающего неизвестную мощность фоновой засветки атмосферы. Это решение было использовано для определения коэффициента ослабления однородной атмосферы. В результате был найден критерий для определения степени качества функционирования лидарных систем.*

*Ключевые слова: атмосферный аэрозоль, лидарное зондирование, обратное рассеяние.*

*The problem of the reliability control is considered for aerosol characteristics determined by the results of lidar measurements of weak backscattering signals. The appropriate choice of algorithms to be used for the lidar data analysis is based on the new rigorous solution of the lidar equation including the unknown power of the background light. This solution is used to determine the extinction coefficient of a homogeneous atmosphere. As a result, the criterion has been found for testing lidar systems.*

*Key words: atmospheric aerosol, lidar sounding, back-scattering.*

### **Введение**

Рассматривается проблема достоверности, с которой оптические характеристики атмосферы определяются по результатам измерений сигналов обратного рассеяния малой мощности, например, при зондировании, выполняемом на значительных расстояниях от лидара. Сложность этой проблемы – обратной задачи лазерного дистанционного зондирования слабо рассеивающей атмосферы, обусловлена существенной ролью систематической и случайной погрешностей измерений, включая погрешности из-за фоновой засветки, сдвига нуля эхосигнала, неточности его коррекции на геометрический фактор и т.д. Случайные погрешности определения искомым характеристик существенно 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.

### **1. Метод интерпретации сигналов обратного рассеяния**

Для анализа погрешностей рассматривается лидарное уравнение в виде

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

$$T_{i,j} = \exp\left(-\int_{c_{i,j}} \sigma(\vec{r}) dr\right), \quad (1)$$

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 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;  $\beta$  – коэффициент обратного рассеяния,  $\sigma$  – 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);  $dr$  – 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 объект.

В случае однопозиционного зондирования однородной атмосферы коэффициент ослабления может быть найден с помощью интегрального решения. В работе [Егоров, 2005] проанализирована случайная погрешность  $\delta\sigma/\sigma$ , найденная путем решения прямой и обратной задачи с введением возмущения в сигнал обратного рассеяния для лидара на основе ЛИВО [Иоффе, 1977].

Анализ результатов показал, что погрешность коэффициента ослабления может быть существенно снижена путем осреднения этой величины по отрезку трассы зондирования. Можно отметить рост относительной ошибки определения коэффициента ослабления с увеличением расстояния зондирования. Это связано с уменьшением мощности эхо-сигнала с расстоянием и соответствующим увеличением относительной ошибки сигнала. Большая относительная погрешность имеет место для более высокой прозрачности атмосферы, что связано с меньшим затуханием излучения в среде в этом случае.

Для оценки влияния погрешности определения фоновой засветки на значение коэффициента ослабления вводится характеристика

$$\frac{\delta \ln \sigma}{\delta \ln P_*} = \frac{P_*}{\sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial P_*}. \quad (2)$$

Эта величина пропорциональна параметру  $E = \frac{P_*}{A\beta}$ .

На рис. 1 представлена относительная погрешность  $\frac{\delta \ln \sigma}{\delta \ln P_*}$  для  $E = 0,5 \text{ км}^{-2}$  как функция переменных  $\Delta r$ ,  $r$ ,  $\sigma$ , где  $\Delta r$  – шаг ( $1 - r = 1,0 \text{ км}$ ,  $\sigma = 0,06 \text{ км}^{-1}$ ;  $2 - r = 1,0 \text{ км}$ ,  $\sigma = 0,3 \text{ км}^{-1}$ ;  $3 - r = 2,0 \text{ км}$ ,  $\sigma = 0,06 \text{ км}^{-1}$ ).

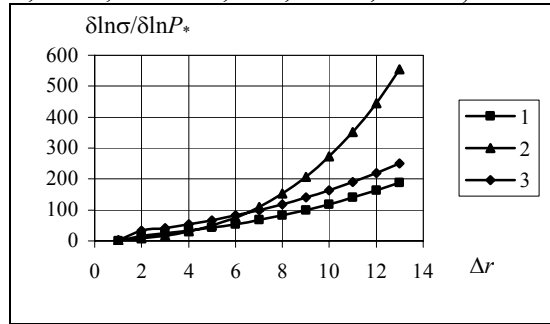


Рис. 1. Зависимость величины относительной погрешности  $\delta \ln \sigma / \delta \ln P_*$  от  $\Delta r$ ,  $r$ ,  $\sigma$ ,  $1 - r = 1,0 \text{ км}$ ,  $\sigma = 0,06 \text{ км}^{-1}$ ;  $2 - r = 1,0 \text{ км}$ ,  $\sigma = 0,3 \text{ км}^{-1}$ ;  $3 - r = 2,0 \text{ км}$ ,  $\sigma = 0,06 \text{ км}^{-1}$

Анализ представленных результатов показывает, что погрешность  $\delta \ln \sigma$  многократно превышает погрешность  $\delta \ln P_*$ . Это делает необходимым, в общем случае, поиск строгого решения задачи, содержащего процедуры определения и исключения постоянной составляющей мощности, принимаемой лидаром. Решение, в котором эта постоянная исключается, было найдено в работе [Егоров, 2002]. В ней коэффициент ослабления, его производные и производные коэффициента обратного рассеяния определяются на основании решения системы нелинейных уравнений. В результате ее решения оказалось, что соотношение

$$\left( \ln P_i' \right)' = -\frac{1}{r_i} \left\{ 2(1 + \sigma_* r_i) + \frac{1}{1 + \sigma_* r_i} \right\}, \quad (3)$$

( $P_i$  – мощность эхо-сигнала, поступающего в приемное устройство от рассеивающего объема, находящегося на расстоянии  $r_i$  от лидара,  $\sigma_* = \text{const}$ ) можно рассматривать как уравнение, определяющее коэффициент ослабления однородной атмосферы  $\sigma = \sigma_*$ .

С учетом найденного решения для определения величины  $P_*$  можно получить выражение:

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

Случайная погрешность, с которой эта характеристика определяется формулой (4), найдена в линейном приближении.

## 2. Результаты анализа случайной погрешности коэффициента ослабления

Случайная погрешность определения коэффициента ослабления представлена на рис. 2 ( $1 - r = 1,0$  км,  $\sigma = 0,06$  км<sup>-1</sup>;  $2 - r = 1,0$  км,  $\sigma = 0,3$  км<sup>-1</sup>;  $3 - r = 2,0$  км,  $\sigma = 0,06$  км<sup>-1</sup>) для  $E = 0,5$  км<sup>-2</sup>.

С ростом шага дифференцирования (рассматривается схема обработки с равноотстоящими узлами – симметричная схема) относительная погрешность фоновой засветки уменьшается, т.к. сигнал на больших расстояниях приближается к величине  $P_*$ . Величина  $\delta/P_*$  не превышает 10 %. Вместе с тем, величина  $\delta/\sigma$  оказывается значительно большей.

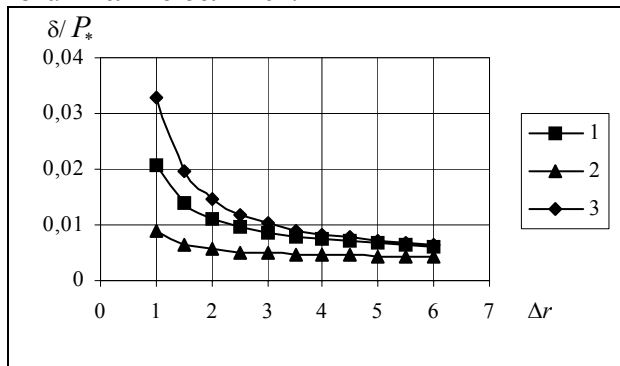


Рис. 2. Зависимость величины относительной погрешности  $\delta/P_*$  от переменных  $\Delta r, r, \sigma$ ,  $1 - r = 1,0$  км,  $\sigma = 0,06$  км<sup>-1</sup>;  $2 - r = 1,0$  км,  $\sigma = 0,3$  км<sup>-1</sup>;  $3 - r = 2,0$  км,  $\sigma = 0,06$  км<sup>-1</sup>,  $E = 0,5$  км<sup>-2</sup>

Случайная погрешность  $\delta$  коэффициента ослабления найдена в работе [Егоров, 2004] для симметричной схемы обработки данных (одинаковые шаги дифференцирования  $\Delta r$ ) также в линейном приближении, когда она определяется случайной погрешностью мощности эхо-сигнала и производными  $\partial\sigma/\partial P_i$ . Случайная погрешность мощности  $\delta P$  аппроксимируется в работе величиной, пропорциональной квадратному корню из мощности  $P$ . Коэффициент пропорциональности  $C_*$  определяется по данным эксперимента для конкретной аппаратуры. Результаты теоретического анализа случайной погрешности показывают наличие минимального значения величины  $\delta = \delta_{\min}$ , зависящего от условий зондирования и равного, приблизительно,  $D = C_* (\Delta B)^{-1/2}$ . В работе показано, что погрешность  $\delta/\delta_{\min}$  может как уменьшаться, так и увеличиваться при увеличении шага зондирования  $\Delta r$ . Данный факт объясняется усилением при этом затухания эхо-сигнала, с одной стороны, и увеличением погрешности мощности сигнала, с другой стороны. Путем выбора шага зондирования  $\Delta r$  можно существ-

венно (в несколько раз) уменьшить погрешность определения коэффициента ослабления методом лидарного зондирования.

Случайная погрешность  $\delta$  коэффициента ослабления для несимметричной схемы обработки данных (два шага дифференцирования  $\Delta r$  – ближний к лидару шаг,  $\Delta R$  – дальний от лидара шаг) может быть существенно меньше соответствующей величины для симметричной схемы. Для сравнения на рис. 3, 4 представлены результаты расчетов относительной погрешности  $\delta/\sigma$  для этих двух типов схем обработки.

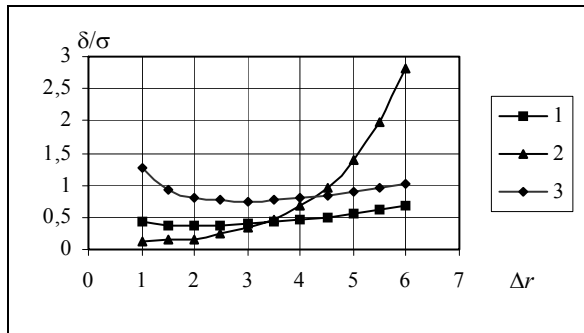


Рис. 3. Зависимость величины относительной погрешности  $\delta/\sigma$  от переменных  $\Delta r, r, \sigma$  для симметричной схемы обработки данных 1 –  $r = 1,0$  км,  $\sigma = 0,06$  км<sup>-1</sup>; 2 –  $r = 1,0$  км,  $\sigma = 0,3$  км<sup>-1</sup>; 3 –  $r = 2,0$  км,  $\sigma = 0,06$  км<sup>-1</sup>

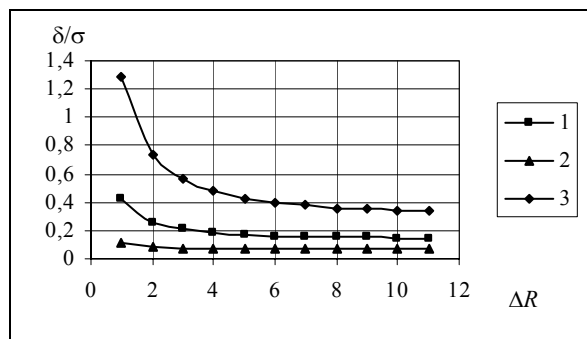


Рис. 4. Зависимость величины относительной погрешности  $\delta/\sigma$  от переменных  $\Delta r, \Delta R, r, \sigma$  для несимметричной схемы обработки данных 1 –  $r = 1,0$  км,  $\sigma = 0,06$  км<sup>-1</sup>; 2 –  $r = 1,0$  км,  $\sigma = 0,3$  км<sup>-1</sup>; 3 –  $r = 2,0$  км,  $\sigma = 0,06$  км<sup>-1</sup>,  $E = 0,5$  км<sup>-2</sup>

Расчеты выполнены для  $E = 0,5$  км<sup>-2</sup>,  $D = 0,003$  км<sup>-1</sup> для двух одинаковых шагов зондирования  $\Delta r$  (рис. 3) и для шагов зондирования  $\Delta r = 1$  км,  $\Delta R$  (рис. 4). Здесь, как и выше, 1 –  $r = 1,0$  км,  $\sigma = 0,06$  км<sup>-1</sup>; 2 –  $r = 1,0$  км,  $\sigma = 0,3$  км<sup>-1</sup>; 3 –  $r = 2,0$  км,  $\sigma = 0,06$  км<sup>-1</sup>. С увеличением шага  $\Delta R$  погрешность коэффициента ослабления уменьшается.

На рис. 5 представлена относительная погрешность  $\delta\sigma/\sigma$ , найденная путем решения прямой и обратной задачи с введением возмущения в сигнал обратно-

го рассеяния при вычислении коэффициента ослабления по формуле (8). Здесь  $i$  – число шагов зондирования (шаг  $-7,5$  м),  $r$  – расстояние зондирования ( $r = 1,0$  км,  $\sigma = 0,06$  км $^{-1}$ ). Погрешность становится пренебрежимо малой для больших значений  $i$ . Имеет место значительное уменьшение погрешности за счет осреднения искомой величины по отрезку трассы зондирования.

При вычислениях задавалось возмущение (величина  $c_i = \frac{\delta P_i}{\sqrt{P_i}}$ , отнесенная к ее среднему значению, рис. 6), характерное для лидара на основе ЛИВО.

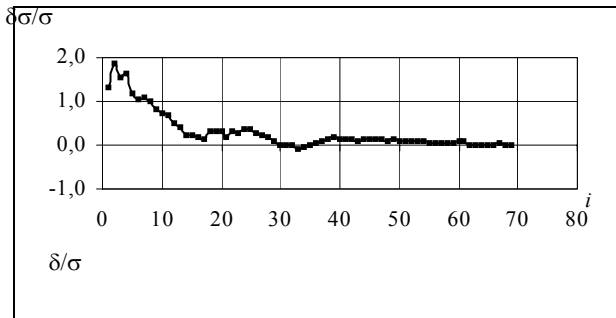


Рис. 5. Относительная погрешность  $\delta\sigma/\sigma$ , найденная путем решения прямой и обратной задачи с исключением засветки  $r = 1,0$  км,  $\sigma = 0,06$  км $^{-1}$

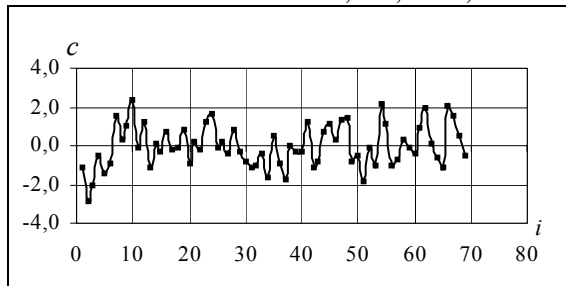


Рис. 6. Исходные данные для расчетов относительной погрешности  $\delta\sigma/\sigma$  – величина  $c_i = \frac{\delta P_i}{\sqrt{P_i}}$ , отнесенная к ее среднему значению

### Заключение

В работе показано, что небольшие систематические погрешности существенно влияют на результаты решения обратной задачи. 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. 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 искомых характеристик. Рассмотрены симметричные (два равных шага дифференцирования) и несимметричные схемы обработки данных (два разных шага дифференцирования). Случайная погрешность коэффициента ослабления для несимметричной схемы обработки данных может быть существенно меньше соответствующей величины для симметричной схемы. 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. Результаты анализа показали, что на основе нового строгого решения лидарного уравнения найдены эффективные алгоритмы обработки сигналов малой мощности.

### ***Литература***

1. *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.
2. *Иоффе М.М., Приходько М.Г.* Справочник авиационного метеоролога. – М.: Воениздат, 1977. – 304 с.
3. *Егоров А.Д., Потапова И.А.* Определение характеристик аэрозоля лидарными системами // Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), 2002, вып.4(552), с. 14–18.
4. *Егоров А.Д., Потапова И.А.* Анализ погрешностей обращения лидарных сигналов малой мощности // Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), 2004, вып. 6(554), с. 62–66.