

## ПРОЗРАЧНОМЕТРИЯ АТМОСФЕРЫ СЛАБОЙ МУТНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ ЛИДАРОВ

А.П. Бобровский<sup>1</sup>, Н.В. Дьяченко<sup>1</sup>, Е.Ю. Михтеева<sup>1</sup>, В.Р. Потапова<sup>2</sup>,  
И.А. Потапова<sup>1</sup>, А.Л. Скобликова<sup>1</sup>, П.П. Хлябич<sup>1</sup>, Т.Ю. Яковлева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»,  
г. Санкт-Петербург, potapovair@yandex.ru

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»  
им. Д.Ф. Устинова», Санкт-Петербург

**Аннотация.** В данной работе рассматривается применение лидаров для интерпретации получаемой информации, что представляет собой сложную задачу, особенно в условиях слабо замутненной атмосферы. При анализе сигналов обратного рассеяния с низкой мощностью значительно возрастает влияние фонового освещения, что усложняет процесс обработки данных. Работа направлена на улучшение методов обработки лидарных данных, что позволит более точно интерпретировать информацию, получаемую в условиях слабо замутненной атмосферы. Результаты исследования могут быть полезны для дальнейших разработок в области оптического зондирования атмосферы и повышения эффективности обработки данных, что, в свою очередь, может способствовать более точным измерениям и анализу атмосферных условий.

**Ключевые слова:** системы лидаров, интерпретация лидарной информации, атмосфера, обратное рассеяние, эхо-сигналы, коэффициент ослабления, коэффициент рассеяния, метод наименьших квадратов

## TRANSPARENT MEASUREMENT OF LOW TURBIDITY ATMOSPHERE USING LIDAR SYSTEMS

A.P. Bobrovsky, N.V. Dyachenko, E.Y. Mikhteeva, V.R. Potapova, I.A. Potapova,  
A.L. Skoblikova, P.P. Khlyabich, T.Yu. Yakovleva

**Abstract.** This paper examines the use of lidars to interpret the information received, which is a difficult task, especially in conditions of a slightly cloudy atmosphere. When analyzing backscattering signals with low power, the influence of background lighting increases significantly, which complicates the data processing process. The work is aimed at improving lidar data processing methods, which will make it possible to more accurately interpret information obtained in a slightly cloudy atmosphere. The results of the study may be useful for further developments in the field of optical sensing of the atmosphere and improving the efficiency of data processing, which, in turn, may contribute to more accurate measurements and analysis of atmospheric conditions.

**Keywords:** lidar systems, lidar information interpretation, atmosphere, backscattering, echo signals, attenuation coefficient, scattering coefficient, least squares method

### Введение

Применение лидаров связано с необходимостью решения задачи интерпретации получаемой лидарной информации, что становится более сложным при исследовании слабо замутненной атмосферы. В частности, при измерении и анализе сигналов обратного рассеяния с низкой мощностью значительно увеличивается влияние фонового освещения.

Цель данной работы заключается в разработке методов, описанных в [1–4], которые необходимы для обработки эхо-сигналов при зондировании атмосферы в условиях высокой прозрачности воздуха.

Известно, что в [1–4] обработка лидарных данных осуществляется с помощью метода последовательных приближений, что негативно сказывается на скорости обработки. В данной работе предлагается метод, который устраняет этот недостаток.

### Итерационная обработка эхо-сигналов

Обработка данных лидарного зондирования осуществляется на основе решения оптико-локационного уравнения, которое устанавливает связь между сигналом обратного рассеяния и коэффициентами ослабления и обратного рассеяния [5–11].

В ситуации, когда атмосфера слабо замутнена и оптически однородна, и коэффициенты ослабления и обратного рассеяния остаются постоянными вдоль зондируемого пути, лидарное уравнение можно представить в следующем виде:

$$P_i = P_* + \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i), \quad (1)$$

где

$$B = A\beta. \quad (2)$$

$A$  – постоянная лидара,  $\beta$  – коэффициент обратного рассеяния,  $\sigma$  – коэффициент ослабления.

$P$  – мощность сигнала обратного рассеяния,  $P_*$  – мощность солнечного излучения, рассеянного атмосферой в направлении на приемное устройство лидара,  $R$  – расстояние между лидаром и  $i$  – м рассеивающим элементом.

Задача заключается в определении неизвестных постоянных  $P_*$ ,  $B$ ,  $\sigma$ . Чтобы определить их значения с наименьшей погрешностью, можно применить метод наименьших квадратов. В этом случае необходимо минимизировать сумму:

$$\delta^2 = \sum_{i=1}^n \left( P_* + \frac{B}{R_i^2} \exp(-2\sigma R_i) - P_i \right)^2, \quad (3)$$

а это, из-за нелинейности задачи, подразумевает применение итерационного процесса. Использование данного метода требует достаточно большое количество времени [12–14] и результаты, получаемые при его использовании отягчены погрешностями, которые необходимо минимизировать [15–19]. Избавиться от данных особенностей метода можно, если обрабатывать эхо-сигналы без итерационного процесса.

### Обработка эхо-сигналов без итерационного процесса

В этом случае, вместе с уравнением (1) необходимо рассмотреть уравнения

$$P_{i+1} = P_* + \frac{B}{R_{i+1}^2} \exp(-2\sigma R_{i+1}), \quad (4)$$

$$P_{i+2} = P_* + \frac{B}{R_{i+2}^2} \exp(-2\sigma R_{i+2}). \quad (5)$$

С учетом уравнений (1), (4), (5) можно получить:

$$\frac{(P_i - P_*) R_i^2}{(P_{i+1} - P_*) R_{i+1}^2} = \frac{(P_{i+1} - P_*) R_{i+1}^2}{(P_{i+2} - P_*) R_{i+2}^2} = \exp(2\sigma h), \quad (6)$$

где  $h$  – шаг,

$$h = R_{i+1} - R_i. \quad (7)$$

С учетом уравнений (6), вместо суммы (1) можно минимизировать сумму

$$\delta_*^2 = \sum_{i=1}^n a_i P_*^2 + b_i P_* + c_i, \quad (8)$$

где

$$a_i = R_{i+1}^4 - R_i^2 R_{i+2}^2, \quad (9)$$

$$b_i = (P_i + P_{i+2}) R_i^2 R_{i+2}^2 - 2P_{i+1} R_{i+1}^4, \quad (10)$$

$$c_i = P_{i+1}^2 R_{i+1}^4 - P_i P_{i+2} R_i^2 R_{i+2}^2. \quad (11)$$

При этом для расчета фоновой засветки получается уравнение

$$P_*^3 + aP_*^2 + bP_* + c = 0, \quad (12)$$

где

$$a = \frac{3 \sum_{i=1}^n a_i b_i}{2 \sum_{i=1}^n a_i^2}, \quad b = \frac{\sum_{i=1}^n (2c_i + a_i) a_i}{2 \sum_{i=1}^n a_i^2}, \quad c = \frac{\sum_{i=1}^n b_i c_i}{2 \sum_{i=1}^n a_i^2}. \quad (13)$$

Решение Кардано уравнения (12):

$$P_* = a_* + b_* - \frac{a}{3}, \quad (14)$$

где

$$a_* = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}, \quad b_* = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}, \quad (15)$$

$$Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2, \quad p = -\frac{a^2}{3} + b, \quad q = 2\left(\frac{a}{3}\right)^3 - \frac{ab}{3} + c. \quad (16)$$

Результаты определения фоновой засветки в качестве примера для  $R_0 = 2,5 \text{ км}$  представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты определения фоновой засветки для  $R_0 = 2,5 \text{ км}$

$\Delta R, \text{км}$	1	4	6	8
$P_*/10 \text{ шум}$	38,06	37,65	37,15	37,12

Результаты определения фоновой засветки для  $R_0 = 10,5 \text{ км}$  представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты определения фоновой засветки для  $R_0 = 10,5 \text{ км}$

$\Delta R, \text{км}$	0,5	1	2	2,5
$P_*/10 \text{ шум}$	36,97	36,99	36,99	36,99

Следует отметить наличие систематической погрешности для  $R_0 = 2,5 \text{ км}$  и ее отсутствие для  $R_0 = 10,5 \text{ км}$ .

### Заключение

Обработка данных лидарного зондирования обычно осуществляется с применением метода последовательных приближений, что отрицательно влияет на скорость обработки. В данной работе представлен метод, который не имеет этого недостатка. Задача была решена для фонового освещения.

### Список литературы

1. Yegorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B., Sanotskaya N.A., Shchadin A.V. Atmospheric aerosol measurements and reliability problem: new results // International Journal of Remote Sensing. – 2014, 35. – P. 5750–5765.
2. Егоров А.Д., Потапова И.А. Лидарные исследования прозрачности атмосферы // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Войкова. – 2004. – № 553. – С. 131–142.
3. Егоров А.Д., Потапова И.А. Способ определения прозрачности атмосферы // Патент на изобретение RU 2439626. 2012. С2, 10.01.2012. Заявка № 2009144060/28 от 27.11.2009.
4. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Драбенко В.А. Лидарное зондирование атмосферного аэрозоля // Метеорологический вестник. – 2013. – Т. 5. – № 2. – С. 42–51.
5. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б. Обращение лидарных сигналов малой мощности // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74. – № 10. С. 25–28.

6. Egorov A.D., Potapova I.A., Shchukin G.G. Lidar methods for probing an atmospheric aerosol // Journal of Optical Technology. – 2001. – Т. 68. – № 11. – С. 801–804.
7. Дьяченко Н.В., Егоров А.Д., Потапова И.А., Скобликова А.Л., Саноцкая Н.А., Яковлева Т.Ю. Интерпретация слабого радиационного излучения при лидарном зондировании атмосферы // Сборник тезисов международного симпозиума «Атмосферная радиация и динамика» (МСАРД-2019). – СПб., 2019. – С. 189–190.
8. Бобровский А.П., Дьяченко Н.В., Егоров А.Д., Косцов В.В., Калиничев Д.В., Кукин О.А., Михтеева Е.Ю., Потапова И.А., Скобликова А.Л., Хлябич П.П., Яковлева Т.Ю. Алгоритм лидарного определения фоновой засветки и коэффициента ослабления слабо замутненной атмосферы без итерационного процесса // Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации: сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции, 2019. – С. 58–60.
9. Бобровский А.П., Дьяченко Н.В., Егоров А.Д., Косцов В.В., Калиничев Д.В., Михтеева Е.Ю., Потапова И.А., Скобликова А.Л., Хлябич П.П., Яковлева Т.Ю. Влияние фоновой засветки на точность определения прозрачности слабо замутненной атмосферы // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. – 2019. – № 4 (36). – С. 49–52.
10. Бобровский А.П., Дьяченко Н.В., Косцов В.В., Михтеева Е.Ю., Потапова И.А., Скобликова А.Л., Хлябич П.П., Яковлева Т.Ю. Лидарная прозрачнометрия слабо замутненной атмосферы с учетом фоновой засветки // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. – 2022. – № 81. – С. 47–50.
11. Потапова И.А., Бобровский А.П., Дьяченко Н.В., Ржонсицкая Ю.Б., Саноцкая Н.А., Скобликова А.Л., Яковлева Т.Ю. Модель процесса экстремального рассеяния света частицей атмосферного аэрозоля // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2021. – Т. 64. – № 5. – С. 376–383.
12. Бобровский А.П., Дьяченко Н.В., Михтеева Е.Ю., Потапова И.А., Скобликова А.Л., Хлябич П.П., Яковлева Т.Ю. Определение фоновой засветки слабо замутненной атмосферы и ее влияние на точность определения прозрачности // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России». – 2022. – С. 372–376.
13. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсицкая Ю.Б., Ошуркова А.А. Методы лидарного зондирования аэрозольных загрязнений атмосферы импульсами конечной длительности // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2011. – № 18. – С. 48–56.
14. Potapova I.A., Bobrovsky A.P., Dyachenko N.V., Rzhonsnitskaya Yu.B., Sanotskaya N.A., Mikhteeva E.Yu., Khlyabich P.P., Kostsov V.V. Method for solving the inverse problem of lidar sounding of a weakly turbid atmosphere // Journal of Instrument Engineering. – 2021. – Т. 64. – № 5. – С. 384–391.
15. Егоров А.Д., Потапова И.А., Привалов Д.В. Систематические погрешности обращения лидарных сигналов малой мощности // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Войкова. – 2006. – № 555. – С. 30–34.
16. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсицкая Ю.Б., Саноцкая Н.А. Оценка погрешностей результатов лидарного зондирования слабо замутненной атмосферы // Оптический журнал. – 2013. – Т. 80. – № 3. – С. 58–60.
17. Потапова И.А. Оценка инструментальных погрешностей лидарных измерений атмосферных характеристик // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2009. – № 9. – С. 86–91.
18. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсицкая Ю.Б. Оценка случайных погрешностей лидарных измерений атмосферных характеристик // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2011. – № 17. – С. 51–55.
19. Егоров А.Д., Потапова И.А., Привалов Д.В., Ржоненицкая Ю.Б. Систематические и случайные погрешности обращения лидарных сигналов малой мощности // Депонированная рукопись № 1230-гм2005 16.12.2005.