

МЕТОД РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СЛАБОЗАМУТНЕННОЙ АТМОСФЕРЫ

И. А. ПОТАПОВА, А. П. БОБРОВСКИЙ, Н. В. ДЬЯЧЕНКО, Ю. Б. РЖОНСНИЦКАЯ,
Н. А. САНОЦКАЯ, Е. Ю. МИХТЕЕВА, П. П. ХЛЯБИЧ, В. В. КОСЦОВ

*Российский государственный гидрометеорологический университет,
192007, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: potapovaira@yandex.ru*

Рассматривается проблема достоверности определения параметров аэрозоля методами лидарного зондирования. Представлены линеаризованные алгоритмы обработки сигналов лидарного зондирования слабозамутненной атмосферы. Для повышения точности результатов предлагается использовать метод наименьших квадратов с предварительно заданным значением фоновой засветки. Наряду с микроструктурными характеристиками аэрозольных частиц по экспериментальным данным трассометрических измерений определен приближенный коэффициент ослабления. С использованием результатов расчета фоновой засветки получено выражение для определения величины отклонения коэффициента ослабления от его приближенного значения. Точность определения коэффициента ослабления при решении системы из двух уравнений получается выше, чем при решении системы из трех уравнений, но недостаточна в случае посылки одного импульса. В целях повышения точности проанализировано большое количество значений эхо-сигнала на трассе зондирования. Исследование выполнено для типичных параметров аэрозоля слабозамутненной атмосферы и типичных характеристик лидаров.

Ключевые слова: *однородная атмосфера, коэффициент ослабления, коэффициент обратного рассеяния, лидарное уравнение, фоновая засветка*

Введение. Проблема контроля и сохранения высокого качества атмосферного воздуха является одной из основных задач, стоящих перед человечеством. Атмосферный воздух — жизненно важный компонент окружающей среды, его качество непосредственно влияет на здоровье человека и продолжительность его жизни. Атмосферный воздух, представляющий собой аэрозоль, изучается по рассеянию света его дисперсной фазой, т.е. взвешенными в воздухе инородными частицами (загрязнителями), что играет в оптике атмосферы немаловажную роль [1—4]. Мощность радиационного излучения, которая принимается из атмосферы, существенно зависит от концентрации загрязняющих ее частиц. Таким образом, зная значение мощности радиационного излучения в определенной точке зондируемого слоя, можно определить концентрацию аэрозоля и загрязняющих веществ. Для решения данной задачи используются различные способы и методы [5—24].

В настоящей статье рассматриваются методы анализа слабозамутненной атмосферы, позволяющие повысить достоверность определения параметров аэрозоля с помощью лидарного зондирования [25].

Методы и результаты. В случае оптически однородной атмосферы, когда коэффициенты ослабления и обратного рассеяния постоянны вдоль трассы зондирования, лидарное уравнение имеет вид

$$P_i = P_* \frac{B}{R_i^2} e^{-2\sigma R_i},$$

где $B = A\beta$, P_i — мощность сигнала обратного рассеяния; P_* — мощность солнечного излучения, рассеянного атмосферой в направлении на приемное устройство лидара; R_i — вели-

чина отрезка трассы зондирования; A — постоянная лидара; β — коэффициент обратного рассеяния; σ — коэффициент ослабления.

Решение лидарного уравнения заключается в определении неизвестных постоянных P_* , B , σ . Для того чтобы найти их величины с минимальной погрешностью, можно использовать метод наименьших квадратов. В этом случае следует минимизировать сумму [26, 27]:

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

С этой целью линеаризуем задачу

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

дифференцируем функцию (2) по переменным P_* , B , σ и приравниваем производные нулю:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (\Delta P_i) &= 0; \quad \sum_{i=1}^n (\Delta P_i) \frac{1}{R_i^2} e^{-2\sigma R_i} = 0; \quad \sum_{i=1}^n (\Delta P_i) \frac{1}{R_i} e^{-2\sigma R_i} = 0; \\ \Delta P_i &= P_* + \frac{B}{R_i^2} e^{-2\tilde{\sigma} R_i} + \frac{G}{R_i} e^{-2\tilde{\sigma} R_i} - P_i, \end{aligned}$$

где $G = -2\Delta\sigma B$, $\tilde{\sigma}$ — предварительно вычисленное значение коэффициента ослабления.

Таким образом, получается система из трех уравнений относительно трех неизвестных величин P_* , B , σ .

Решение задачи определения коэффициента ослабления можно записать в виде

$$\sigma = \Delta\sigma + \tilde{\sigma}, \quad \Delta\sigma = -\Delta_2/2\Delta_1, \quad (3)$$

где

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n P_i & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \tau_i \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^2} \tau_i & \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{R_i^2} \tau_i & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^3} \tau_i^2 \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \tau_i & \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{R_i} \tau_i & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^2} \tau_i \end{vmatrix}, \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^2} \tau_i & \sum_{i=1}^n P_i \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^2} \tau_i & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^4} \tau_i^2 & \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{R_i^2} \tau_i \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \tau_i & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^3} \tau_i^2 & \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{R_i} \tau_i \end{vmatrix},$$

$$\tau_i = e^{-2\sigma R_i}.$$

Фоновая засветка и величина B определяются соотношениями

$$P_* = \Delta_3/\Delta_0, \quad B = \Delta_1/\Delta_0,$$

где

$$\Delta_0 = \begin{vmatrix} n & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^2} \tau_i & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \tau_i \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^2} \tau_i & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^4} \tau_i^2 & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^3} \tau_i^2 \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \tau_i & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^3} \tau_i^2 & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^2} \tau_i \end{vmatrix}, \quad \Delta_3 = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n P_i & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^2} \tau_i & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \tau_i \\ \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{R_i^2} \tau_i & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^4} \tau_i^2 & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^3} \tau_i^2 \\ \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{R_i} \tau_i & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^3} \tau_i^2 & \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^2} \tau_i \end{vmatrix}.$$

На рис. 1, а представлены результаты определения коэффициента ослабления σ по формуле (3) при осреднении по 51 посылке импульсов [26, 27] (здесь по оси абсцисс n — номер шага, равного 225). Рассматривался отрезок трассы зондирования, начинающийся с точки $R_{i=1} = 2500$ м. Коэффициент ослабления составил $0,03 \text{ км}^{-1}$. Для сравнения на рис. 1, б представлены результаты определения коэффициента σ также по формуле (3) при посылке одного импульса. В данном случае алгоритм (3) не обеспечивает достаточную точность [28—35].

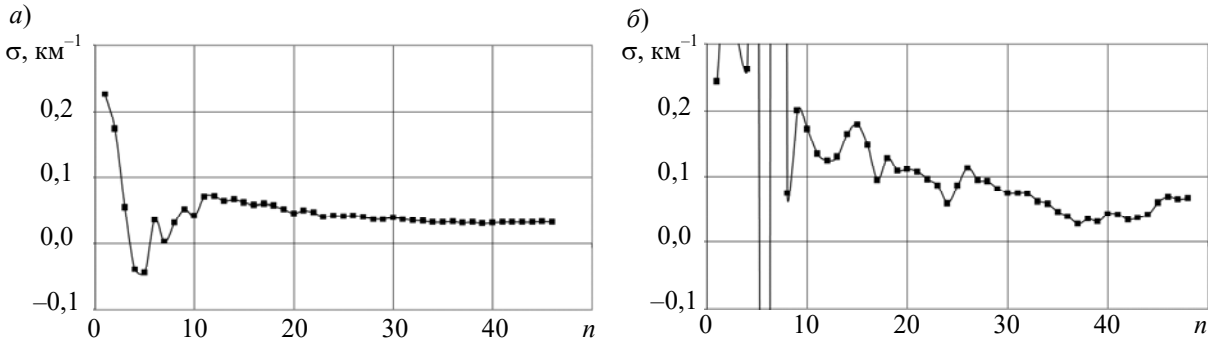


Рис. 1

Для повышения точности определения коэффициента ослабления предлагается использовать метод наименьших квадратов (2) с предварительно заданным значением фоновой засветки. С учетом известного коэффициента $\sigma=0,03 \text{ км}^{-1}$ ее можно определить путем минимизации суммы (1):

$$P_* = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^4} \tau_i^2 - \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{R_i^2} \tau_i \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^2} \tau_i}{n \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^4} \tau_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^2} \tau_i \right)^2}. \tag{4}$$

Результаты определения фоновой засветки по формуле (4) представлены на рис. 2 при осреднении по 51 посылке импульсов.

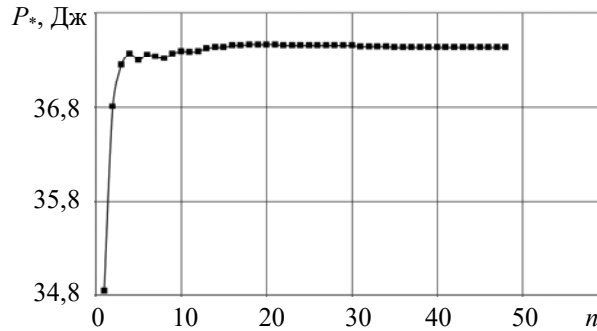


Рис. 2

Для определения величины $\Delta\sigma$ можно использовать выражение:

$$\Delta\sigma = \frac{1}{2} \frac{g}{b}, \tag{5}$$

где

$$g = \sum_{i=1}^n \frac{P_i - P_*}{R_i^2} \tau_i \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^3} \tau_i^2 - \sum_{i=1}^n \frac{P_i - P_*}{R_i} \tau_i \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^4} \tau_i^2,$$

$$b = \sum_{i=1}^n \frac{P_i - P_*}{R_i^2} \tau_i \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^2} \tau_i^2 - \sum_{i=1}^n \frac{P_i - P_*}{R_i} \tau_i \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i^3} \tau_i^2.$$

Результаты определения коэффициента ослабления по формуле (5) представлены на рис. 3 при осреднении по 51 посылке импульсов. Точность определения коэффициента σ

рассматриваемым методом получается выше, чем при расчете по формуле (3) (см. рис. 1), но недостаточна в случае посылки одного импульса. В целях повышения точности следует анализировать большее количество значений эхо-сигнала на трассе зондирования.

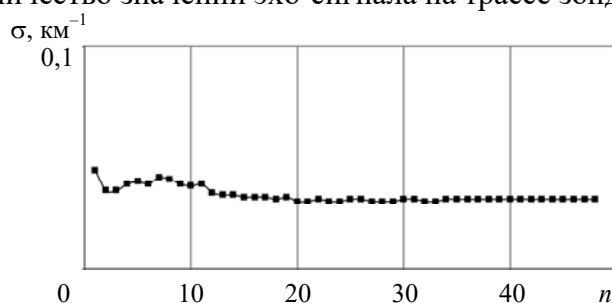


Рис. 3

Заключение. Представлены методы интерпретации аэрозольной информации, основанные на решении лидарного уравнения, учитывающего фоновую засветку. Разработан метод решения обратной задачи лидарного зондирования слабозамутненной атмосферы, включающий линеаризацию задачи.

Выполненные исследования позволили установить высокую эффективность метода решения линеаризованной обратной задачи лидарного зондирования слабозамутненной атмосферы, осуществленного с осреднением по различным массивам данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Егоров А. Д., Косцов В. В., Калинин Д. В., Куклин О. А., Потапова И. А., Хлябич П. П. Модель расчета оптических характеристик кристаллов льда с использованием теории Ми, с применением языка программирования PYTHON // Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации: Сб. тезисов Всерос. науч.-практ. конф. 2019. С. 86—87.
- Дьяченко Н. В., Бобровский А. П., Никитенко А. А., Косцов В. В., Михтеева Е. Ю., Потапова И. А., Скобликова А. Л., Хлябич П. П., Яковлева Т. Ю. Анализ результатов дистанционных исследований содержания CO₂ в атмосфере // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2019. № 1 (33). С. 140—142.
- Дьяченко Н. В., Бобровский А. П., Крюковских Е. П., Косцов В. В., Михтеева Е. Ю., Потапова И. А., Скобликова А. Л., Хлябич П. П., Яковлева Т. Ю. Методы оценки содержания водяного пара в атмосфере // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2019. № 1 (33). С. 143—146.
- Бобровский А. П., Дьяченко Н. В., Косцов В. В., Куклин О. А., Михтеева Е. Ю., Потапова И. А., Скобликова А. Л., Хлябич П. П., Яковлева Т. Ю. Моделирование расчета оптических характеристик атмосферных аэрозолей с использованием теории Ми, с применением языка программирования PYTHON // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2019. № 1 (33). С. 76—79.
- Егоров А. Д., Потапова И. А., Ржонсницкая Ю. Б., Саноцкая Н. А., Драбенко В. А. Различные методы лидарных измерений прозрачности атмосферы // Естественные и технические науки. 2012. № 4 (60). С. 21—25.
- Егоров А. Д., Илев Л. С., Потапова И. А., Ржонсницкая Ю. Б., Саноцкая Н. А., Драбенко Д. В. Измерение характеристик атмосферного аэрозоля и проблема достоверности // Естественные и антропогенные аэрозоли: Сб. докл. XI Междунар. конф., Санкт-Петербург, 16—18 окт. 2018 г. СПб: Астерион, 2018. С. 47—52.
- Егоров А. Д., Потапова И. А. Прозрачнметрия слабозамутненной атмосферы с использованием лидарных систем // Естественные и антропогенные аэрозоли: Сб. докл. XI Междунар. конф., Санкт-Петербург, 16—18 окт. 2018 г. СПб: Астерион, 2018. С. 53—59.
- Пат. 2560142 С1 РФ. Способ аспирационной оптической спектрометрии дисперсной среды / А. Д. Егоров, И. А. Потапова, В. А. Драбенко. 20.08.2015.
- Пат. 2547474 С1 РФ. Способ дистанционного зондирования неоднородной атмосферы / А. Д. Егоров, И. А. Потапова, В. А. Драбенко. 10.04.2015.
- Пат. 2538028 С1 РФ. Способ многопозиционного определения оптических характеристик атмосферы / А. Д. Егоров, И. А. Потапова, Н. А. Саноцкая, В. А. Драбенко. 10.01.2015.

11. Пат. 2624834 РФ. Способ дистанционного оптического зондирования неоднородной атмосферы / А. Д. Егоров, А. В. Дикинис, И. А. Потапова. 07.07.2017.
12. Егоров А. Д., Потапова И. А. Определение характеристик аэрозоля лидарными системами // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2003. № 552. С. 14—18.
13. Пат. 2607050 С1 РФ. Способ определения дисперсного состава аэрозоля / А. Д. Егоров, В. М. Абрамов, И. А. Потапова, Н. А. Саноцкая. 10.01.2017.
14. Егоров А. Д., Драбенко В. А., Потапова И. А., Ржонсницкая Ю. Б., Саноцкая Н. А. Методы многопозиционного лидарного зондирования атмосферы // Естественные и антропогенные аэрозоли: Тез. докл. IX Междунар. науч. конф., посвященной 100-летию со дня рождения Г. В. Розенберга, 16—17 окт. 2014 г. СПб, 2014. С. 25—26.
15. Пат. 2473931 С1 РФ. Способ оптического зондирования неоднородной атмосферы / А. Д. Егоров, И. А. Потапова, Ю. Б. Ржонсницкая, Н. А. Саноцкая. 27.01.2013.
16. Пат. 2495452 С2 РФ. Способ дистанционного оптического зондирования слабо рассеивающей атмосферы / А. Д. Егоров, И. А. Потапова, Ю. Б. Ржонсницкая, Н. А. Саноцкая. 10.10.2013.
17. Пат. 2441261 С1 РФ. Способ оптического зондирования атмосферы / А. Д. Егоров, П. А. Блакитная, И. А. Потапова, Ю. Б. Ржонсницкая, Н. А. Саноцкая. 27.01.2012.
18. Пат. 2439626 С2 РФ. Способ определения прозрачности атмосферы / А. Д. Егоров, И. А. Потапова. 10.01.2012.
19. 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.
20. Егоров А. Д., Потапова И. А., Ржонсницкая Ю. Б., Ошуркова А. А. Методы лидарного зондирования аэрозольных загрязнений атмосферы импульсами конечной длительности // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 18. С. 48—56.
21. Егоров А. Д., Потапова И. А., Ржонсницкая Ю. Б., Драбенко В. А., Ошуркова А. А. Методы многопозиционного лидарного зондирования атмосферы // Ученые записки РГГМУ. 2010. № 16. С. 87—93.
22. Егоров А. Д., Ржонсницкая Ю. Б., Потапова И. А., Саноцкая Н. А. Определение характеристик атмосферного аэрозоля по данным оптических измерений // Естественные и технические науки. 2010. № 1 (45). С. 215—222.
23. Егоров А. Д., Потапова И. А. Лидарные исследования прозрачности атмосферы // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2004. № 553. С. 131—142.
24. Пат. 2017139 С1 РФ. Способ определения концентраций газовых компонентов слоя атмосферы / А. Д. Егоров, И. А. Егорова. 30.07.1994.
25. Yegorov A. D., Kopp I. Z., Perelman A. Y. Air aerosol pollution and lidar measurements // Progress in Biomedical Optics and Imaging, Proc. SPIE „Lidar and Atmospheric Sensing“. 1995. N 2505. P. 38—43.
26. Yegorov A. D., Potapova I. A., Rzhonsnitskaya Yu. B., Drabenko V. A., Sanotskaya N. A., Shchadin A. V. Atmospheric aerosols measurements and reliability problem: new results // Intern. Journal of Remote Sensing. 2014. Vol. 35. P. 5750—5765.
27. Yegorov A. D., Potapova I. A., Rzhonsnitskaya Yu. B. Atmospheric aerosols measurements and reliability problem // Intern. Journal of Remote Sensing. 2008. Vol. 29. P. 2449—2468.
28. Егоров А. Д., Потапова И. А., Ржонсницкая Ю. Б., Саноцкая Н. А., Драбенко В. А., Ошуркова А. А. Минимизация погрешностей обращения слабых сигналов обратного рассеяния // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 22. С. 123—127.
29. Егоров А. Д., Потапова И. А., Ржонсницкая Ю. Б. Обращение лидарных сигналов малой мощности // Оптич. журн. 2007. Т. 74, № 10. С. 25—28.
30. Потапова И. А. Оценка инструментальных погрешностей лидарных измерений атмосферных характеристик // Ученые записки РГГМУ. 2009. № 9. С. 86—91.
31. Егоров А. Д., Потапова И. А., Привалов Д. В. Систематические погрешности обращения лидарных сигналов малой мощности // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. 2006. № 555. С. 30—34.

32. Егоров А. Д., Потапова И. А., Привалов Д. В., Ржонсницкая Ю. Б. Систематические и случайные погрешности обращения лидарных сигналов малой мощности. СПб, 2005. Деп. в БГТУ „ВОЕНМЕХ“ им. Д. Ф. Устинова. 16.12.2005. № 1230-гм2005.
33. Yegorov A. D., Potapova I. A. Error analysis of weak lidar signals inverting // Proc. of the 31st Intern. Symp. on Remote Sensing of Environment, ISRSE 2005: Global Monitoring for Sustainability and Security. St. Petersburg, 2005.
34. Егоров А. Д., Потапова И. А., Ржонсницкая Ю. Б. Оценка случайных погрешностей лидарных измерений атмосферных характеристик // Ученые записки РГГМУ. 2011. № 17. С. 51—55.
35. Егоров А. Д., Потапова И. А., Ржонсницкая Ю. Б., Саноцкая Н. А. Оценка погрешностей результатов лидарного зондирования слабозамутненной атмосферы // Оптич. журн. 2013. Т. 80, № 3. С. 58—60.

Сведения об авторах

- Ирина Александровна Потапова** — д-р физ.-мат. наук, профессор; РГГМУ; E-mail: potapovaira@yandex.ru
- Анатолий Петрович Бобровский** — канд. физ.-мат. наук, доцент; РГГМУ; заведующий кафедрой; E-mail: kafedra_phys@rshu.ru
- Наталья Владимировна Дьяченко** — д-р физ.-мат. наук, профессор; РГГМУ; E-mail: nat230209@yandex.ru
- Юлия Борисовна Ржонсницкая** — д-р физ.-мат. наук, доцент; РГГМУ; E-mail: july.rzhony@gmail.com
- Надежда Александровна Саноцкая** — канд. физ.-мат. наук, доцент; РГГМУ; E-mail: na_san@mail.ru
- Елена Юрьевна Михтеева** — канд. хим. наук, доцент; РГГМУ; E-mail: mikhteeva.elena@mail.ru
- Петр Петрович Хлябич** — канд. физ.-мат. наук, доцент; РГГМУ; E-mail: khlyabich@mail.ru
- Владимир Владимирович Косцов** — РГГМУ; ст. преподаватель; E-mail: kostsov1@yandex.ru

Поступила в редакцию
23.01.2021 г.

Ссылка для цитирования: Потапова И. А., Бобровский А. П., Дьяченко Н. В., Ржонсницкая Ю. Б., Саноцкая Н. А., Михтеева Е. Ю., Хлябич П. П., Косцов В. В. Метод решения обратной задачи лидарного зондирования слабозамутненной атмосферы // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 5. С. 384—391.

**METHOD FOR SOLVING THE INVERSE PROBLEM
OF LIDAR SOUNDING OF A WEAKLY TURBID ATMOSPHERE**

**I. A. Potapova, A. P. Bobrovsky, N. V. Dyachenko, Yu. B. Rzhonsnitskaya, N. A. Sanotskaya,
E. Yu. Mikhiteeva, P. P. Khlyabich, V. V. Kostsov**

*Russian State Hydrometeorological University,
192007, St. Petersburg, Russia
E-mail: potapovaira@yandex.ru*

The problem of reliability of aerosol parameters determination by lidar sensing methods is considered. Linearized algorithms for processing signals from lidar sounding of a weakly turbid atmosphere are presented. To improve the accuracy of the results, it is proposed to use the least squares method with a predetermined background illumination value. Along with the microstructural characteristics of aerosol particles, an approximate value of the attenuation coefficient is determined from the experimental trace-meter measurements data. Using results of background illumination calculation, an expression is obtained for magnitude of the attenuation coefficient deviation from its approximate value. The accuracy of determining the attenuation coefficient when solving a system of two equations is shown to be higher than when solving a system of three equations, but it is insufficient in the case of single sensing pulse. To improve the accuracy, a large number of echo signals along the sounding path are analyzed. The presented results relate to typical parameters of the aerosol of a slightly turbid atmosphere and typical characteristics of sounding lidars.

Keywords: homogeneous atmosphere, attenuation coefficient, backscattering coefficient, lidar equation, background illumination

REFERENCES

1. Egorov A.D., Kostsov V.V., Kalinichev D.V., Kuklin O.A., Potapova I.A., Khlyabich P.P. *Sovremennyye problemy gidrometeorologii i ustoychivogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii* (Modern Problems of Hydrometeorology and Sustainable Development of the Russian Federation), All-Russian Scientific and Practical Conference, Collection of abstracts, 2019, pp. 86–87. (in Russ.)

2. Dyachenko N.V., Bobrovsky A.P., Nikitenko A.A., Kostsov V.V., Mikhteeva E.Yu., Potapova I.A., Skoblikova A.L., Khlyabich P.P., Yakovleva T.Yu. *Informatsionnyye tekhnologii i sistemy: upravleniye, ekonomika, transport, pravo*, 2019, no. 1(33), pp. 140–142. (in Russ.)
3. Dyachenko N.V., Bobrovsky A.P., Kryukovskikh E.P., Kostsov V.V., Mikhteeva E.Yu., Potapova I.A., Skoblikova A.L., Khlyabich P.P., Yakovleva T.Yu. *Informatsionnyye tekhnologii i sistemy: upravleniye, ekonomika, transport, pravo*, 2019, no. 1(33), pp. 143–146. (in Russ.)
4. Bobrovsky A.P., Dyachenko N.V., Kostsov V.V., Kuklin O.A., Mikhteeva E.Yu., Potapova I.A., Skoblikova A.L., Khlyabich P.P., Yakovleva T.Yu. *Informatsionnyye tekhnologii i sistemy: upravleniye, ekonomika, transport, pravo*, 2019, no. 1(33), pp. 76–79. (in Russ.)
5. Egorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B., Sanotskaya N.A., Drabenko V.A. *Natural and Technical Sciences*, 2012, no. 4(60), pp. 21–25. (in Russ.)
6. Egorov A.D., Ivlev L.S., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B., Sanotskaya N.A., Drabenko D.V. *Estestvennyye i antropogennyye aerizoly* (Natural and anthropogenic aerosols), Collection of reports, 2018, pp. 47–52. (in Russ.)
7. Egorov A.D., Potapova I.A. *Estestvennyye i antropogennyye aerizoly* (Natural and anthropogenic aerosols), Collection of reports, 2018, pp. 53–59.
8. Patent RU 2560142 C1, *Sposob aspiratsionnoy opticheskoy spektrometrii dispersnoy sredy* (Method for Aspirational Optical Spectrometry of a Dispersed Medium), Egorov A.D., Potapova I.A., Drabenko V.A., Patent application no. 2014115935/28, Priority 21.04.2014, Published 20.08.2015. (in Russ.)
9. Patent RU2547474 C1, *Sposob distantsionnogo zondirovaniya neodnorodnoy atmosfery* (Method for Remote Sensing of an Inhomogeneous Atmosphere), Egorov A.D., Potapova I.A., Drabenko V.A., Patent application no. 2013147355/28, Priority 23.10.2013, Published 10.04.2015. (in Russ.)
10. Patent RU2538028 C1, *Sposob mnogopozitsionnogo opredeleniya opticheskikh kharakteristik atmosfery* (Method for Multi-Position Determination of the Optical Characteristics of the Atmosphere), Egorov A.D., Potapova I.A., Sanotskaya N.A., Drabenko V.A., Patent application no. 2013126894/28, Priority 11.06.2013, Published 10.01.2015. (in Russ.)
11. Patent RU 2624834, *Sposob distantsionnogo opticheskogo zondirovaniya neodnorodnoy atmosfery* (Method for Remote Optical Sensing of an Inhomogeneous Atmosphere), Egorov A.D., Dikinis A.V., Potapova I.A., Patent application no. 2015156982, Priority 29.12.2015, Published 07.07.2017. (in Russ.)
12. Egorov A.D., Potapova I.A. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voyeykova*, 2003, no. 552, pp. 14–18. (in Russ.)
13. Patent RU 2607050 C1, *Sposob opredeleniya dispersnogo sostava aerizolya* (Method for Determining the Dispersed Composition of Aerosol), Egorov A.D., Abramov V.M., Potapova I.A., Sanotskaya N.A., Patent application no. 2015132868, Priority 06.08.2015, Published 10.01.2017. (in Russ.)
14. Egorov A.D., Drabenko V.A., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B., Sanotskaya N.A. *Estestvennyye i antropogennyye aerizoly* (Natural and Anthropogenic Aerosols), Collection of reports, 2014, pp. 25–26. (in Russ.)
15. Patent RU 2473931 C1, *Sposob opticheskogo zondirovaniya neodnorodnoy atmosfery* (Method for Optical Sensing of an Inhomogeneous Atmosphere), Egorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B., Sanotskaya N.A., Patent application no. 2011129732/28, Priority 18.07.2011, Published 27.01.2013. (in Russ.)
16. Patent RU 2495452 C2, *Sposob distantsionnogo opticheskogo zondirovaniya slabo rasseivayushchey atmosfery* (Method for Remote Optical Sensing of a Weakly Scattering Atmosphere), Egorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B., Sanotskaya N.A., Patent application no. 2011143951/28, Priority 31.10.2011, Published 10.10.2013. (in Russ.)
17. Patent RU 2441261 C1, *Sposob opticheskogo zondirovaniya atmosfery* (Method for Optical Sensing of the Atmosphere), Egorov A.D., Blakitnaya P.A., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B., Sanotskaya N.A. Patent application no. 2010143286/28, Priority 22.10.2010, Published 27.01.2012. (in Russ.)
18. Patent RU 2439626 C2, *Sposob opredeleniya prozrachnosti atmosfery* (Method for Determining the Transparency of the Atmosphere), Egorov A.D., Potapova I.A., Patent application no. 2009144060/28, Priority 27.11.2009, Published 10.01.2012. (in Russ.)
19. Egorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B., Drabenko V.A. *Meteorologicheskij vestnik*, 2013, no. 2(5), pp. 42–51. (in Russ.)
20. Egorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B., Oshurkova A.A. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2011, no. 18, pp. 48–56. (in Russ.)
21. Egorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B., Drabenko V.A., Oshurkova A.A. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2010, no. 16, pp. 87–93. (in Russ.)
22. Egorov A.D., Rzhonsnitskaya Yu.B., Potapova I.A., Sanotskaya N.A. *Natural and Technical Sciences*, 2010, no. 1(45), pp. 215–222. (in Russ.)
23. Egorov A.D., Potapova I.A. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voyeykova*, 2004, no. 553, pp. 131–142. (in Russ.)
24. Patent RU 2017139 C1, *Sposob opredeleniya kontsentratsiy gazovykh komponentov sloya atmosfery* (Method for Determining the Concentration of Gaseous Components of the Atmospheric Layer), Egorov A.D., Egorova I.A., Patent application no. 4918909/25, Priority 27.03.1991, Published 30.07.1994. (in Russ.)
25. Egorov A.D., Kopp I.Z., Perelman A.Y. *Progress in Biomedical Optics and Imaging – Proc. SPIE "Lidar and Atmospheric Sensing"*, 1995, vol. 2505, pp. 38–43.

26. Yegorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B., Drabenko V.A., Sanotskaya N.A., Shchadin A.V. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, vol. 35, pp. 5750–5765.
27. Yegorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, vol. 29, pp. 2449–2468.
28. Egorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B., Sanotskaya N.A., Drabenko V.A., Oshurkova A.A. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2011, no. 22, pp. 123–127. (in Russ.)
29. Egorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B. *Journal of Optical Technology*, 2007, no. 10(74), pp. 665–668.
30. Potapova I.A. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2009, no. 9, pp. 86–91. (in Russ.)
31. Egorov A.D., Potapova I.A., Privalov D.V. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voyeykova*, 2006, no. 555, pp. 30–34. (in Russ.)
32. Egorov A.D., Potapova I.A., Privalov D.V., Rzhonsnitskaya Yu.B. *Sistematicheskiye i sluchaynyye pogreshnosti obrashcheniya lidarnykh signalov maloy moshchnosti* (Systematic and Random Errors in the Inversion of Low-Power Lidar Signals), Deposited manuscript no. 1230-gm2005, 16.12.2005. (in Russ.)
33. Yegorov A.D., Potapova I.A. *Proceedings, 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment, ISRSE 2005: Global Monitoring for Sustainability and Security*. 2005.
34. Egorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2011, no. 17, pp. 51–55. (in Russ.)
35. Egorov A.D., Potapova I.A., Rzhonsnitskaya Yu.B., Sanotskaya N.A. *Journal of Optical Technology*, 2013, no. 3(80), pp. 171–173.

Data on authors

Irina A. Potapova	— Dr. Sci., Professor; Russian State Hydrometeorological University; E-mail: potapovaira@yandex.ru
Anatoly P. Bobrovsky	— PhD, Associate Professor; Russian State Hydrometeorological University; Head of Department; E-mail: kafedra_phys@rshu.ru
Natalia A. Dyachenko	— Dr. Sci., Professor; Russian State Hydrometeorological University; E-mail: nat230209@yandex.ru
Yulia B. Rzhonsnitskaya	— Dr. Sci., Associate Professor; Russian State Hydrometeorological University; E-mail: july.rzhony@gmail.com
Nadezhda A. Sanotskaya	— PhD, Associate Professor; Russian State Hydrometeorological University; E-mail: na_san@mail.ru
Elena Yu. Mikhteeva	— PhD, Associate Professor; Russian State Hydrometeorological University; E-mail: mikhteeva.elena@mail.ru
Petr P. Khlyabich	— PhD, Associate Professor; Russian State Hydrometeorological University; E-mail: khlyabich@mail.ru
Vladimir V. Kostsov	— Russian State Hydrometeorological University; Senior Lecturer; E-mail: kostsov1@yandex.ru

For citation: 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. Vol. 64, N 5. P. 384–391 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-5-384-391