

ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННОГО РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АТМОСФЕРЫ НА ЭХО-СИГНАЛ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СЛАБО ЗАМУТНЕННОЙ АТМОСФЕРЫ

*И.А. Потапова А.П. Бобровский, Н.В. Дьяченко, Е.Ю. Михеева,
А.Л. Скобликова, П.П. Хлябич, Т.Ю. Яковлева*

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский государственный гидрометеорологи-
ческий университет», г. Санкт-Петербург, Россия,
potapovaira@yandex.ru*

В статье рассматривается влияние естественного рассеянного излучения атмосферы на эхо-сигнал, получаемый из атмосферы, и возможность измерения мощности с помощью ЛИДАРа при исследовании слабо замутненной атмосферы. Также описывается принцип работы ЛИДАРа и методы обработки данных. В работе предлагается метод определения коэффициента ослабления на всём пути зондирования без итерационного процесса. Отмечается важность усовершенствования методов обработки данных ЛИДАРа для быстрого и точного анализа результатов зондирования. Эта работа имеет практическое значение для изучения атмосферных загрязнений и климатических условий на планете.

Ключевые слова: эхо-сигнал; атмосфера; грубодисперсная аэрозольная фракция; лидар; зондирование; коэффициент ослабления; коэффициент обратного рассеяния.

INTERPRETATION OF LIDAR INFORMATION WHEN PROBING A COARSE AEROSOL FRACTION.

*I. A. Potapova, A. P. Bobrovsky, N.V. Dyachenko, E.Y. Mikheeva,
A. L. Skoblikova, P. P. Khlyabich, T.Y. Yakovleva*

*Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia, pota-
povaira@yandex.ru*

The article considers the influence of natural scattered atmospheric radiation on the echo signal received from the atmosphere and the possibility of measuring power using LIDAR in the study of a weakly clouded atmosphere. The principle of LIDAR operation and data processing methods are also described. The paper proposes a method for determining the attenuation coefficient⁵⁰³ along the entire probing path without an iterative process. The importance of improving LIDAR data processing methods for fast and accurate analysis of probing results is noted. This work is of practical importance for the study of atmospheric pollution and climatic conditions on the planet.

Keywords: echo signal; atmosphere; coarse aerosol fraction; lidar; sounding; attenuation coefficient; backscattering coefficient.

Атмосфера – это газовая оболочка, которая поддерживает жизнь на Земле, включая животных и растения. Она состоит в основном из воздуха, 78 %, и азота, 21 %, но также содержит аэрозольные частицы, которые влияют на яркость освещения планеты и климатические условия. Системы аэрозолей, например облака, вулканическая пыль, туман существенно влияют на состояние атмосферы.

Для изучения атмосферных загрязнений можно использовать технологию ЛИДАР (от англ. Light Detection and Ranging), которая позволяет измерять концентрацию аэрозольных частиц или газов. ЛИДАР основан на активных оптических системах, которые используют явления отражения и рассеивания света в прозрачных и полупрозрачных средах для получения информации об объектах на расстоянии [1-5]. Для обработки данных ЛИДАРа используется эхолокационное уравнение [6-11], которое связывает сигнал обратного рассеяния с коэффициентами ослабления и обратного рассеяния.

$$P_r(R) = P_0 * \left(\frac{c\tau}{2}\right) * \beta(R) * A_r * R - \exp(-2 \int \alpha(r)dr) \quad (1)$$

где $P_r(R)$ – мгновенное значение принимаемой мощности в момент времени t , P_0 – посылаемая мощность в момент времени t_0 , c – скорость света, τ – длительность импульса, β – объемный коэффициент рассеяния, R – расстояние до объекта, A_r – эффективная площадь приемника, α – объемный коэффициент ослабления.

Для обработки данных ЛИДАРа обычно используется метод последовательного приближения, который требует значительных временных затрат [12, 13]. Чтобы сделать этот процесс более эффективным, можно использовать метод с использованием итерационных процессов [14-18, 25, 26], однако из-за нелинейности задачи результаты могут быть неточными [19-21]. Для решения этой проблемы можно использовать метод без итерационного процесса [14, 15].

В случае, когда атмосфера достаточно однородна, т.е. коэффициенты ослабления и обратного рассеяния постоянны на всём пути зондирования, получим лидарное уравнение, которое можно записать в следующем виде:

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

$$B = A\beta. \quad (3)$$

где A – постоянная лидара, β – коэффициент обратного рассеяния, σ – 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.

Для решения задачи существует необходимость найти не известные постоянные, а именно P_* , B , σ . Для этого рассмотрим уравнения, записанные для соседних точек трассы исследования, вместе с уравнением (2)

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

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

Из данных уравнений (2), (4), (5) мы получаем:

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

где h - является шагом,

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

Из уравнения (7) можно получить сумму

$$\delta_*^2 = \sum_1^n a_i P_*^2 + b_i P_* + c_i, \quad (8)$$

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 полученных формулах можно составить уравнение для расчета фоновой засветки

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

где

$$a = \frac{3\sum_1^n a_i b_i}{2\sum_1^n a_i^2}, \quad b = \frac{\sum_1^n (2c_i + a_i) a_i}{2\sum_1^n a_i^2}, \quad c = \frac{\sum_1^n b_i c_i}{2\sum_1^n a_i^2}. \quad (13)$$

Решение уравнения Кардано (12):

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

где

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

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

Для определения концентрации загрязняющих веществ необходимо найти минимум погрешности коэффициента ослабления σ . Для этого следует минимизировать сумму:

$$\delta^2 = \sum_1^n (C - S_i - 2\sigma \int_{R_0}^{R_i} SdR)^2, \quad (17)$$

где $S = (P - P_*)R^2$.

Для вычисления σ (коэффициент ослабления) образуется равенство

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{\sum_1^n S_i \sum_1^n \int_{R_0}^{R_i} SdR - n \sum_1^n (S_i \int_{R_0}^{R_i} SdR)}{n \sum_1^n (\int_{R_0}^{R_i} SdR)^2 - (\sum_1^n \int_{R_0}^{R_i} SdR)^2}. \quad (18)$$

В уравнениях (17, 18) существует погрешность численного интегрирования, что является недостатком метода [22, 23, 26, 27].

Исследование показало, что обработка данных ЛИДАРа может быть затруднительной и требовать значительного времени при использовании метода последовательного приближения. Для ускорения процесса можно применять метод итерационных процессов, но это может привести к неточным результатам из-за нелинейности задачи. Чтобы решить эту проблему, можно использовать метод без итерационного процесса. Несмотря на трудности, методы обработки данных ЛИДАРа все же обеспечивают достаточно точные и быстрые результаты. Однако, дальнейшее совершенствование и разработка новых методов необходимы для обеспечения быстрой обработки данных не только для аэрозольной фракции и концентрации газовых компонентов при лидарном зондировании.

Библиографические ссылки

1. Бобровский А.П., Дьяченко Н.В., Косцов В.В., Михтеева Е.Ю., Потапова И.А., Скобликова А.Л., Хлябич П.П., Яковлева Т.Ю. Автоматизация спектрометрии грубодисперсной аэрозольной фракции/ Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2022. № S1. С. 57-60.
2. 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.
3. Егоров А.Д., Потапова И.А. Лидарные исследования прозрачности атмосферы/ Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2004. № 553. С. 131-142.
4. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая 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.
5. Потапова И.А., Бобровский А.П., Дьяченко Н.В., Ржонсницкая 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.

6. 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 прозрачметрия слабо замутненной атмосферы с учетом фоновой засветки/ Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2022. № S1. С. 47-50.

7. 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.

8. Потапова И.А., Тиханов А.В. Влияние солнечного излучения на определение коэффициента ослабления для слабо замутнённой атмосферы при лидарных измерениях/ В сборнике: Инновационное развитие информационных систем и технологий в гидрометеорологии. Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2022. С. 216-221.

9. Потапова И.А., Бобровский А.П., Дьяченко Н.В., Ржонсницкая 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.

10. 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 атмосферы //Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России: материалы V Всероссийской научно-практической конференции. Иркутск, 23–25 ноября 2022 г. / ФГБОУ ВО «ИГУ»; отв. ред. Е. Н. Сутырина. – Иркутск: Издательство ИГУ, 2023. С. 372-376.

11. 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 прозрачметрия слабо замутненной атмосферы/ В сборнике: Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России. Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, приуроченной к Году науки и технологий. Иркутск, 2021. С. 495-500.

12. Драбенко В.А., Егоров А.Д., Галкин И.А., Потапова И.А., Драбенко Д.В., Игнатенко В.М., Потапова В.Р. Способ аспирационной оптической спектрометрии аэрозольных частиц/ Патент на изобретение RU 2681256 С2, 05.03.2019. Заявка № 2016120373 от 25.05.2016.

13. Потапова И.А., Егоров А.Д., Дьяченко Н.В., Саноцкая Н.А., Скобликова А.Л., Яковлева Т.Ю. Интерпретация слабого радиационного излучения при лидарном зондировании атмосферы/ В книге: АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ и ДИНАМИКА (МСАРД – 2019). Международный симпозиум. Тезисы. 2019. С. 189-190.

14. Бобровский А.П., Дьяченко Н.В., Егоров А.Д., Косцов В.В., Калиничев Д.В., Куклин 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/ В книге: Современные проблемы гидрометеорологии и устойчивого развития Российской Федерации. Сборник тезисов Всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 58-60.

15. Дьяченко Н.В., Потапова И.А., Саватнеев А.Н., Хлябич П.П., Яковлева Т.Ю. Интерпретация Лидарной Информации При Зондировании Грубодисперсной Аэрозольной Фракции/ В сборнике: Инновационные методы математики и физики в экологических и гидрометеорологических исследованиях. Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции. Под редакцией И.В. Зайцевой. Санкт-Петербург. 2023. С. 105-110.
16. 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.
17. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б. Обращение слабых сигналов обратного рассеяния/ Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. № 22. С. 144-148.
18. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Саноцкая Н.А. Способ дистанционного оптического зондирования слабо рассеивающей атмосферы/ Патент на изобретение RU 2495452 С2, 10.10.2013. Заявка № 2011143951/28 от 31.10.2011.
19. Егоров А.Д., Потапова И.А. Способ определения прозрачности атмосферы/ Патент на изобретение RU 2439626 С2, 10.01.2012. Заявка № 2009144060/28 от 27.11.2009.
20. Егоров А.Д., Блаkitная П.А., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Саноцкая Н.А. Способ оптического зондирования атмосферы/ Патент на изобретение RU 2441261 С1, 27.01.2012. Заявка № 2010143286/28 от 22.10.2010.
21. Потапова И.А. Оценка инструментальных погрешностей лидарных измерений атмосферных характеристик/ Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2009. № 9. С. 86-91.
22. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б., Саноцкая Н.А. Оценка погрешностей результатов лидарного зондирования слабо замутненной атмосферы/ Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 3. С. 58-60.
23. Егоров А.Д., Потапова И.А., Ржонсницкая Ю.Б. Оценка случайных погрешностей лидарных измерений атмосферных характеристик/ Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. № 17. С. 51-55.
24. Егоров А.Д., Потапова И.А., Привалов Д.В., Ржонсницкая Ю.Б. Систематические и случайные погрешности обращения лидарных сигналов малой мощности/ Депонированная рукопись № 1230-гм2005 16.12.2005
25. Егоров А.Д., Потапова И.А., Привалов Д.В. Систематические погрешности обращения лидарных сигналов малой мощности/ Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2006. № 555. С. 30-34.
26. 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, 5750-5765.
27. 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.