

УДК 551.508

М.М. КУТЕЙКО, С.А. ЛЫСЕНКО

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ОЦЕНОК ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СЛАБОЗАМУТНЕННОЙ АТМОСФЕРЫ

A technique for retrieval of vertical extinction coefficient's profiles from backscatter returns is proposed, including a high-accuracy, an easy automated algorithm of lidar constant determination based on iterative procedure using a reference value obtained with a nephelometr at the lidar measurement site and simulated backscatter-to-extinction ratio profiles. The examples, demonstrating the efficiency of extinction coefficient profile retrieval under different atmospheric condition with used of a backscatter-to-extinction profile, corresponding to a background model of atmospheric aerosol are given.

Как было показано в [1-3], диапазон применимости существующих методов интерпретации сигналов одночастотного лазерного зондирования ограничен отсутствием однозначной зависимости между общим  $b_a$  и обратным  $b_{p,a}$  коэффициентами аэрозольного рассеяния, их изменчивостью по трассе зондирования. Данные коэффициенты связаны известным уравнением лазерной локации, которое для случая двухкомпонентной среды (включающей аэрозольную и молекулярную составляющие) в приближении однократного рассеяния можно записать в следующем виде:

Здесь  $P(r)$  - сигнал обратного рассеяния,  $r$  - минимальное (d) лидара расстояние, на котором достигается полное перекрытие поля зрения приемника и посылаемого импульса,  $A$  - аппаратурная постоянная системы, и

$\beta_{p,a}(r)$  - аэрозольный и молекулярный коэффициенты обратного рассеяния;  
 $\beta_{p,m}(r)$  - аэрозольный и молекулярный коэффициенты ослабления;  
 $k_a(r)$  - аэрозольный и молекулярный коэффициенты поглощения соответственно.

Решение уравнения локации относительно указанных переменных невозможно без упрощающих допущений или априорной информации об их связи. Так, в видимом диапазоне длин волн оправдано допущение [1]. При одночастотном зондировании предполагается известным из стандартной модели профиль молекулярного коэффициента ослабления, хотя его величина подвержена заметным сезонным и широтным колебаниям [4]. Кроме того, методики, проанализированные в [1-3], предполагают постоянство аэрозольной

индикатрисы рассеяния в направлении назад  $g_{\pi,a}(r) = \beta_{\pi,a}(r)/\beta_a(r)$ . При этих допущениях решение уравнения (1) выглядит следующим образом [5]:

$$\varepsilon_a(r) = \frac{P(r)Y(r)r^2}{\varepsilon_a(r_k) + \frac{3}{8\pi g_{\pi,a}} \varepsilon_m(r_k)} - 2 \int_{r_0}^r \frac{P(x)Y(x)x^2 dx}{8\pi g_{\pi,a}} \varepsilon_m(r), \quad (2)$$

где  $r_k$  – калибровочная точка на трассе зондирования, в которой известно значение аэрозольного коэффициента ослабления  $\varepsilon_a(r_k)$ ; выражение для функции  $Y(r)$  имеет вид

$$Y(r) = \exp \left\{ -2 \left( \frac{3}{8\pi g_{\pi,a}} - 1 \right) \int_{r_0}^r \varepsilon_m(x) dx \right\}. \quad (3)$$

Предположение постоянства  $g_{\pi,a}$  аряду с помехой многократного рассеяния приводит к значительной неконтролируемой ошибке в определении оптических характеристик рассеивающих сред [2,6]. Однако, как следует из результатов моделирования итерационного метода Фернальда [7], а также из [2, 8], использующих функциональную зависимость между  $g_{\pi,a}$  и  $\varepsilon_a$ , наличие даже весьма приближенной информации о  $g_{\pi,a}(r)$  может существенно улучшать качество восстановления профиля  $\varepsilon_a(r)$ . В [9] также отмечено, что использование априорных оптических моделей  $g_{\pi,a}(r)$  или их эмпирических аналогов с ошибкой  $\delta g_{\pi,a}$ , не выходящей за порядок величины, может обеспечить оперативное измерение вертикальной прозрачности всей толщи безоблачной атмосферы ( $\tau(0, r) \approx 0,2 \div 0,4$ ) с ошибкой не более 10÷20 %, что удовлетворяет многие практические потребности. Таким образом, одним из путей расширения границ применимости решения уравнения локации является использование в алгоритмах обработки сигналов модельных значений  $g_{\pi,a}(r)$ . Далее рассматривается методика восстановления из сигналов обратного рассеяния высотных профилей  $\varepsilon_a(r)$  с использованием  $g_{\pi,a}(r)$ , рассчитанных для типовых условий слабозамутненной атмосферы.

На рис. 1 а, б изображены модельные профили аэрозольного коэффициента ослабления (фоновая модель континентального аэрозоля [10]) и молекулярного коэффициента рассеяния, полученных с использованием расчетных формул теории Рэля и стандартной модели газовой атмосферы [4] для длин волн  $\lambda = 0,55; 1,064$  мкм (рис. 1 а и б соответственно). Для заданных атмосферных ситуаций с учетом влияния многократного рассеяния и высокочастотного «шума» рассчитывался сигнал обратного рассеяния  $P(z)$  по трассе зондирования (вклад многократного рассеяния моделировался экспоненциальной функцией от оптической толщины аэрозоля, как и в [11]). Максимальная дальность зондирования соответствовала расстоянию от лидара, на котором мощность сигнала с вычетом фона становится меньше трех дисперсий «шума».

Методика интерпретации сигнала обратного рассеяния относительно профиля коэффициента ослабления аэрозолем помимо информации о  $g_{\pi,a}(r)$  требует также знания опорного значения рассчитываемой величины в какой-либо точке трассы. При отсутствии на ней однородных участков (где опорное значение  $\varepsilon_a(r_k)$  может быть определено методом логарифмической производной или с использованием системы перекрывающихся функционалов [12]) восстановление профиля  $\varepsilon_a(r)$  требует использования дополнительных измерений (например, нефелометром).

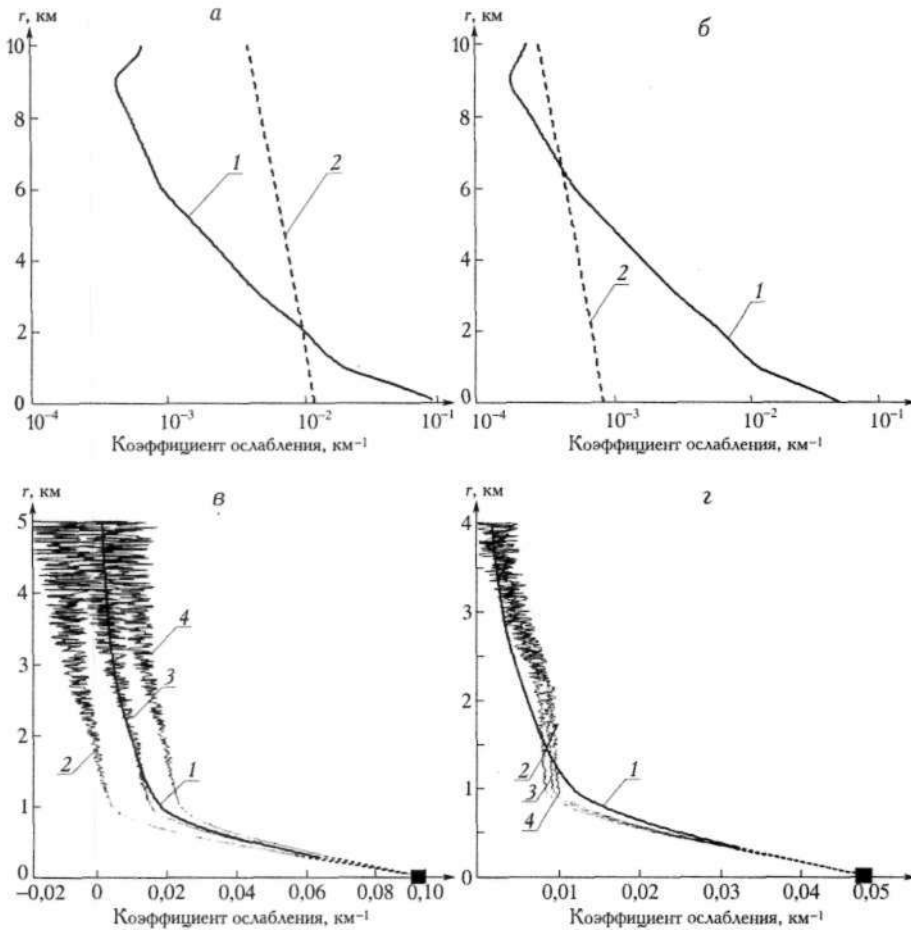


Рис. 1. Результаты восстановления модельных профилей аэрозольного коэффициента ослабления на длинах волн лазерного зондирования:  $\lambda = 0,55$  мкм (а, в) и  $\lambda = 1,064$  мкм (б, г). Для а, б: 1 и 2 – модельные профили  $\epsilon_a(r)$  и  $\epsilon_m(r)$  соответственно. Для в, г: 1 – модельный профиль  $\epsilon_a(r)$ ; 2, 3, 4 – восстановленные профили  $\epsilon_a(r)$  при трех априорно задаваемых значениях аэрозольной индикатрисы обратного рассеяния  $g_{\pi,a} = 0,03; 0,05; 0,1$  ср<sup>-1</sup> соответственно. Здесь и на рис. 2 пунктирная прямая соответствует участку, на котором осуществляется интерполяция, а ■ – значению  $\epsilon_a(0)$ , измеренному нефелометром

Как уже отмечалось [13], в чистых и слабозамутненных средах при наличии ошибок в сигнале обратного рассеяния опорную точку предпочтительнее помещать в начале трассы зондирования. Сравнением получаемого с помощью нефелометра значения  $\epsilon_{a,k}(r)$  с рассчитываемым по итерационному методу  $\epsilon_a(r)$  при  $g_{\pi,a}(r) = \text{const}$  устанавливается опорное значение прозрачности  $T$ , которое затем используется для вычисления профиля  $\epsilon_a(r)$  всей исследуемой трассы. Определение константы калибровки через  $T$  позволяет избежать нефизичных значений  $\epsilon_a(r)$ . Однако в двухкомпонентных средах, как показывают результаты моделирования, при неудачном выборе  $g_{\pi,a}$  могут появляться отрицательные значения  $\epsilon_a(r)$ . Кроме того, данный алгоритм сложно автоматизировать, поскольку на итерациях отсутствует однозначная связь между  $T$  и  $\epsilon_{a,k}$ . Более того, из-за наличия зоны неполного перекрытия поля зрения приемника и посылаемого импульса  $[0, n]$  восстановление профиля  $\epsilon_a(r)$  невозможно начать из точки  $r = 0$ , где легче всего расположить нефелометр (на поверхности Земли). Измеренное с его помощью значение  $\epsilon_a(0)$  также нельзя распространить и на высоту  $n$ , поскольку вследствие быстрого убывания  $\epsilon_a(r)$  в приземном слое ат-

мосферы значение  $\varepsilon_a(r_0)$  может существенно отличаться от  $\varepsilon_a(0)$ . В этом случае для определения константы калибровки лидара предлагается применять процедуру интерполяции, базирующуюся на предположении о монотонном изменении  $\varepsilon_a(r)$  в пределах ближней зоны лидара, что позволяет однозначно связать  $\varepsilon_a^{j+1}$ ,  $\varepsilon_a^j$  и  $\varepsilon_{a,k}$  на итерациях, где  $j$  - номер итерации. Таким образом, выбор опорного значения  $\varepsilon_a(r_0)$  сводится к следующему легко автоматизируемому итерационному алгоритму:

1) с использованием модельных профилей  $\varepsilon_m(r)$  и  $g_{\pi a}(r)$  по (3) вычисляется  $Y(r)$ ;

2) калибровочное значение аэрозольного коэффициента ослабления для первой итерации полагается равным измеренному нефелометром  $\varepsilon_{ak}^{(1)}(r_0) = \varepsilon_a(0)$ ;

3) при выбранном опорном значении рассчитывается профиль  $\varepsilon_a(r)$  для начального участка трассы  $[r_0, r_0 + \Delta r]$ , содержащий достаточно каналов для уверенной интерполяции полученного профиля в  $r = 0$  - точку расположения нефелометра. При компьютерном моделировании участок  $\Delta r$  содержал 10 каналов;

4) участок  $\Delta r$  профиля  $\varepsilon_a(r)$  аппроксимируется линейной ( $f(r) = ar + b$ ) или экспоненциальной ( $f(r) = b \exp(ar)$ ) функцией, коэффициенты которой можно найти методом наименьших квадратов;

5) вычисляется опорное значение  $\varepsilon_{ak}^{(j+1)}(r_0)$  для  $(j+1)$ -итерации:

$\varepsilon_{ak}^{(j+1)}(r_0) = \varepsilon_{ak}^{(j)}(r_0) + \varepsilon_a(0)\delta^{(j)}$  - при линейной и  $\varepsilon_{ak}^{(j+1)}(r_0) = \frac{\varepsilon_{ak}^{(j)}(r_0)}{1 - \delta^{(j)}}$  - при экспоненциальной интерполяции;

6) найденный в 5) коэффициент  $B$  сравнивается с показаниями нефелометра:

$$\delta^{(j)} = \frac{\varepsilon_a(0) - b}{\varepsilon_a(0)}.$$

Если  $|\delta^{(j)}| \leq 10^{-4}$ , то  $\varepsilon_{ak}(r_0) = \varepsilon_a^{(j)}(r_0)$  и осуществляется выход из цикла, иначе осуществляется переход к 3).

Полученное согласно приведенной итерационной процедуре опорное значение  $\varepsilon_{a,k}(r_0) = \varepsilon_{ak}^{(j+1)}(r_0)$  используется для восстановления по (2) всего профиля аэрозольного коэффициента ослабления.

На рис. 1 в, г показаны модельные профили  $\varepsilon_a(r)$  и профили  $\varepsilon_a(r)$ , в остановленные с помощью данной методики при трех постоянных априорно задаваемых значениях  $g_{\pi a}$ . Рассмотрены два случая зондирования: 1) на  $\lambda_1 = 0,55$  мкм (вклад в обратное рассеяние газовой составляющей атмосферы сравним по величине с вкладом аэрозоля) и 2)  $\lambda_2 = 1,064$  мкм (аэрозольное рассеяние существенно превышает молекулярное). В первом случае восстановленный профиль  $\varepsilon_a(r)$  оказывается весьма чувствительным к величине  $g_{\pi a}$ , причем, как видно из рис. 1 в, в зависимости от значения  $g_{\pi a}$  возможно получение как вполне приемлемых результатов восстановления (при  $g_{\pi a} = 0,05$  ср.), так и физически абсурдных - отрицательных значений  $\varepsilon_a(r)$  (при  $g_{\pi a} = 0,03$  ср.). Во втором случае выбор величины  $g_{\pi a}$  практически не сказывается на восстанавливаемом профиле (см. рис. 1 г), что можно аналитически объяснить с использованием (2), положив  $\varepsilon_m(r) \approx 0$ . При этом для повышения точности восстановления профиля  $\varepsilon_a(r)$  необходимо знание относительного хода функции  $g_{\pi a}(r)$ , а не ее значений [2].

Рассмотрим теперь примеры восстановления профилей  $\varepsilon_a(r)$  с помощью модельных оценок  $g_{\pi a}(r)$  из [10]. Сравнение расчетного профиля коэффициента

ослабления с результатами эксперимента приводит к выводу, что данная модель достаточно адекватно описывает спектрально-высотные характеристики слабозамутненной атмосферы, а значит, ее можно уверенно использовать для обработки лидарных сигналов по описанной методике.

На рис. 2 приведены примеры восстановления профиля  $\varepsilon_a(r)$  для различных атмосферных ситуаций, отличающихся высотными профилями  $g_{\pi,a}(r)$  (по которым рассчитывались сигналы), с применением априорного профиля  $g_{\pi,a}(r)$ , соответствующего фоновой модели атмосферного аэрозоля [10]. Даже при таком существенном различии между реальными и модельными значениями  $g_{\pi,a}(r)$  качество восстановления высотного профиля  $\varepsilon_a(r)$  удовлетворяет многим практическим требованиям (средняя по трассе зондирования погрешность не превышает 10 %).

Отметим, что использование при лидарном зондировании дополнительных измерений нефелометром сопряжено с определенными трудностями, основной из которых является то, что нефелометр дает значения аэрозольного коэффициента рассеяния, а не общего ослабления. Другая проблема возникает в том случае, когда лидар и нефелометр работают на разных длинах волн.

Однако, как уже говорилось, в видимой и ближней инфракрасной области спектра длин волн поглощение атмосферными аэрозолями пренебрежимо мало по сравнению с их рассеянием, поэтому аэрозольные коэффициенты ослабле-

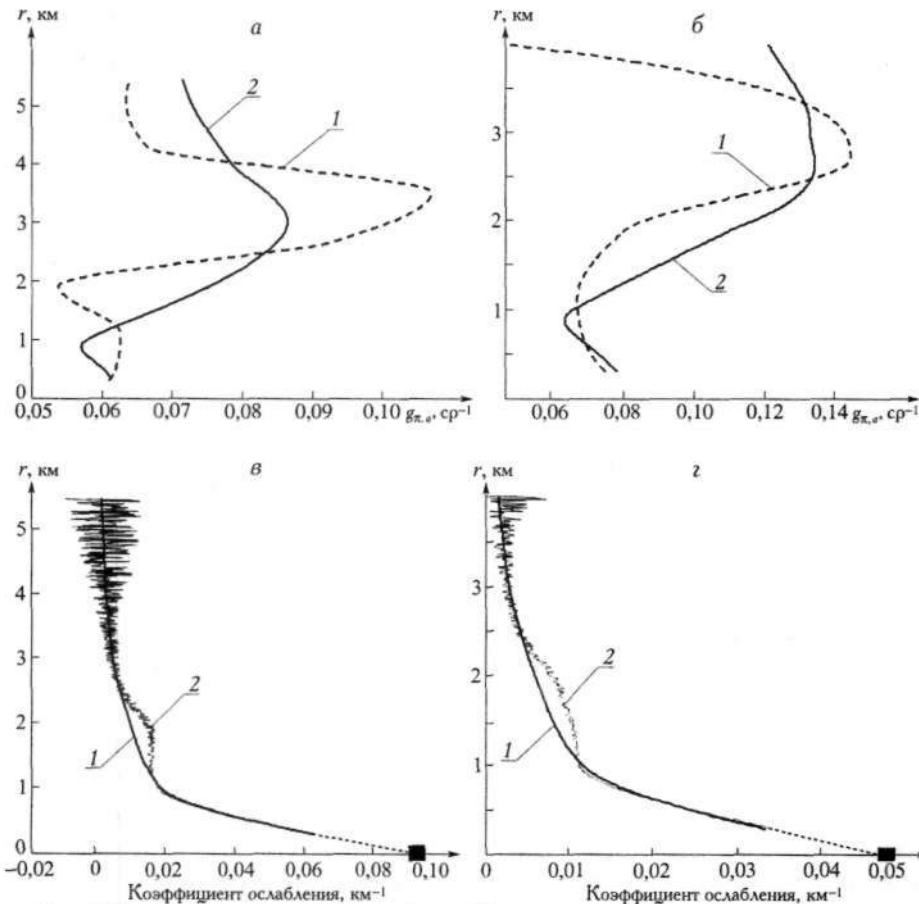


Рис. 2. Примеры восстановления профиля  $\varepsilon_a(r)$  на длинах волн лазерного зондирования:  $\lambda = 0,55$  мкм (а, в) и  $\lambda = 1,064$  мкм (б, г) с использованием априорного профиля  $g_{\pi,a}(r)$ , соответствующего фоновой модели атмосферного аэрозоля [10]. Для а, б: 1 – заданный профиль  $g_{\pi,a}(r)$  (по которому рассчитывались сигналы обратного рассеяния); 2 – используемый для решения (1) модельный профиль из [10]. Для в, г: 1 и 2 – заданный и восстановленный профили  $\varepsilon_a(r)$

ния и рассеяния практически равны. А для пересчета измеренного нефелометром коэффициента рассеяния на другую длину волны с успехом может быть использована широко известная степенная зависимость (справедливая для видимой и ближней инфракрасной области спектра длин волн):  $\varepsilon_a(\lambda) \sim \lambda^{-\nu}$  с показателем  $\nu = 1$ . Так, согласно фоновой модели аэрозоля [10] значение аэрозольного коэффициента рассеяния для приземного слоя на  $\lambda = 1,064$  мкм равно  $0,0451$  км<sup>-1</sup>, пересчет этого значения на  $\lambda = 0,55$  мкм дает величину  $0,0872$  км<sup>-1</sup>, тогда как точное значение  $\varepsilon_a = 0,0932$  км<sup>-1</sup> (отличается лишь на 6 %).

Таким образом, предлагаемая методика определения константы калибровки лидара, дополненная модельными значениями аэрозольной индикатрисы обратного рассеяния, позволяет с удовлетворяющей многим практическим требованиям точностью производить оперативные измерения вертикального профиля коэффициента аэрозольного ослабления слабозамутненной атмосферы

1. Креков Г.М., Кавкянов С.И., Крекова М.М. Интерпретация сигналов оптического зондирования атмосферы. Новосибирск, 1987.

2. Кугейко М.М., Лысенко С.А. // Вестн. БГУ. Сер. 1. 2005. №3. С. 26.

3. Кугейко М.М., Лысенко С.А. // Материалы 2-го международного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития МРФ-2005». Харьков, 2005. С. 78.

4. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент земной атмосферы. Л., 1986.

5. Kovalev V.A., Moosmuller R. // Appl. Opt. 1994. Vol. 33. №27. P. 6499.

6. Sasano Y., Browell E.V., Ismail S. // Appl. Opt. 1985. Vol. 24. № 22. P. 3929.

7. Fernald F.G. // Ibid. 1984. Vol. 23. № 5. P. 652.

8. Ершов А.Д., Балин Ю.С., Самойлова С.В. // Оптика атмосферы и океана. 2002. Т. 15. № 10. С. 534.

9. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск, 1982.

10. Креков Г.М., Звенигородский С.Г. Оптическая модель средней атмосферы. Новосибирск, 1990.

11. Kovalev V.A. // Appl. Opt. 2003. Vol. 42. № 36. P. 7215.

12. Кугейко М.М., Оношко Д.М. Теория и методы оптико-физической диагностики неоднородных рассеивающих сред. Мн., 2003.

13. Kovalev V. A. // Appl. Opt. 2004. Vol. 43. № 15. P. 3191.

Поступила в редакцию 28.12.05.

**Михаил Михайлович Кугейко** - доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой квантовой радиофизики и оптоэлектроники.

**Сергей Александрович Лысенко** - аспирант кафедры квантовой радиофизики и оптоэлектроники. Научный руководитель - М.М. Кугейко.