

УДК 551.501:535.361:551.501.816

МЕТОДИКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЛИДАРНЫХ СИГНАЛОВ УПРУГОГО ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

Л.Г. Сverdlik, П.В. Козлов

Представлена методика обработки лидарных сигналов упругого обратного рассеяния с нахождением точки калибровки в автоматическом режиме, которая позволяет снизить ошибки восстановления профилей оптических параметров атмосферного аэрозоля, зависимость результатов лидарного зондирования от субъективного фактора и время вычисления.

Ключевые слова: многочастотные лидарные измерения; сглаживание сигнала; калибровка; коэффициент аэрозольного обратного рассеяния.

METHOD OF AUTO-CALIBRATION IN PROCESSING OF ELASTIC-BACKSCATTERING LIDAR SIGNALS

L.G. Sverdlik, P.V. Kozlov

The article considers the technique of elastic-backscattering lidar signals processing with finding of calibration point in automatic mode, which reduces uncertainties in recovery of atmospheric aerosol optical parameters profiles, dependence of lidar sensing results on subjective factor and calculation time.

Keywords: multi-wavelength lidar measurements; smoothing signals; calibration; aerosol backscatter coefficient.

Введение. Потребность в измерениях вертикального распределения параметров атмосферы обусловлена необходимостью решения многих задач в области исследования оптических свойств, источников регионального и дальнего переноса аэрозоля [1, 2], определения радиационного воздействия взвешенных в воздухе абсорбирующих частиц [3, 4] а также изучения аномалий температуры [5] и протекающих в атмосфере волновых процессов [6]. Наиболее перспективным способом профилирования параметров атмосферы является лидарное зондирование, которое может обеспечить не только высокое разрешение в пространстве и времени, но и разнообразие количественных данных, полученных различными методами.

Многочастотные лидарные системы, имеющие в качестве источника излучения высокотехнологические лазеры, такие как *Nd:YAG* с удвоением и утроением частоты и значительной выходной энергией импульса, широко используются в настоящее время для изучения вертикальной структуры и дисперсного состава тропосферного аэрозоля [7]. Такие системы позволяют регистрировать сигналы, обусловленные упругим рассеянием (*UP*), для трех длин волн (355, 532, 1064 нм)

и комбинационным рассеянием (*KP*) на 387 нм (или 608 нм). Первичные данные обычно ограничены одиночными зондированиями, обеспечивающими высотный диапазон регистрации сигналов *UP* до уровня тропопаузы (12,0–15,0 км).

Поскольку методы восстановления оптических параметров по данным лидарных измерений сигналов *UP* основаны на точных решениях соответствующих уравнений, погрешности определяются точностью задания априорной информации. В таблице 1 представлены возможные ошибки независимого восстановления коэффициентов обратного рассеяния $\beta_a(\lambda)$ [8, 9]: (а) физически обоснованных, *a priori* вводимых профилей, необходимых для коррекции молекулярного рассеяния; (б) калибровочных значений и (с) профилей лидарного отношения.

Как видно, ошибки велики, особенно для коротких длин волн и при выполнении процедуры калибровки. Более того, систематическая ошибка при калибровке профилей $\beta_a(\lambda)$ в диапазоне высот, где содержанием аэрозоля можно пренебречь, зависит от аэрозольной нагрузки и может достигать 60 % в свободной тропосфере [10]. Одним из путей снижения погрешностей при восстановлении про-

филей коэффициентов обратного аэрозольного рассеяния, а также исключения зависимости результатов от субъективного фактора, является использование процедуры калибровки и сглаживания лидарных сигналов в автоматическом режиме.

Таблица 1 – Ошибки восстановления коэффициентов обратного рассеяния $\beta_a(\lambda)$

A priori data		Errors %, Max (Mean)		
		$\beta_a(355)$	$\beta_a(532)$	$\beta_a(1064)$
a	Parameters of molecular scattering	10 (4)	8 (2)	5 (<1)
b	Calibration value	>20 (8)	16 (4)	7 (2)
c	Lidar ratio profile	>20 (10)	12 (6)	6 (2)

Методика обработки сигналов упругого обратного рассеяния

Решение лидарного уравнения. В практике применения лидарного зондирования для аэрозольных исследований наиболее широкое распространение получили методы, основанные на аналитическом решении уравнения, связывающего принимаемый сигнал с параметрами двухкомпонентной атмосферы. Для расчета коэффициента обратного рассеяния атмосферного аэрозоля $\beta_a(z)$ обычно используется известное решение Клетта-Фернальда [11, 12]:

$$\beta_a(z) = \frac{\Phi(z)}{\Phi(z_0)} \frac{\beta(z_0)}{(1 + 2S_a \frac{\beta(z_0)}{\Phi(z_0)} (\Psi(z_0) - \Psi(z)))} - \beta_m(z). \quad (1)$$

Вспомогательные функции в данном выражении определены, как

$$\Phi(z) = P(z)z^2 \exp(2(1 - S_a / S_m)\tau_m(z)),$$

$$\Psi(z) = \int_0^z \Phi(z) dz,$$

где $P(z)$ – лидарный сигнал; $\beta_m(z)$ и $\beta_a(z)$ – коэффициенты молекулярного (релеевского) и аэрозольного обратного рассеяния ($\beta(z) = \beta_a(z) + \beta_m(z)$); $\alpha_m(z)$ и $\alpha_a(z)$ – коэффициенты молекулярного и аэрозольного ослабления; S_m и S_a – молекулярное и аэрозольное лидарное отношение; z – расстояние вдоль лидарной трассы; z_0 – точка калибровки сигнала.

Оптические коэффициенты аэрозольного и молекулярного обратного рассеяния и ослабления связаны, так называемым лидарным отношением, следующими линейными зависимостями:

$$S_a(\lambda, z) = \alpha_a(\lambda, z) / \beta_a(\lambda, z),$$

$$S_m(\lambda, z) = \alpha_m(\lambda, z) / \beta_m(\lambda, z),$$

где λ – длина волны упругого обратного рассеяния. Профили коэффициентов молекулярного обратного рассеяния $\beta_m(z)$ и ослабления $\alpha_m(z)$ могут быть вычислены по известным для стандартной атмосферы модельным величинам плотности на различных высотных уровнях.

При проведении расчетов удобно использовать безразмерную характеристику – отношение обратного рассеяния $R(z) = I + \beta_a(z) / \beta_m(z)$, имеющую умеренный диапазон изменения:

$$R(z) = R(z_0) \frac{Q(z)}{Q(z_0)} (1 + 2S_a \frac{R(z_0)}{Q(z_0)} (\Psi(z_0) - \Psi(z)))^{-1}, \quad (2)$$

где $Q(z) = \Phi(z) / \beta_m(z)$.

В этом случае коэффициент обратного аэрозольного рассеяния находится по формуле:

$$\beta_a(z) = \beta_m(z)(R(z) - I). \quad (3)$$

Как видно из (2), для восстановления коэффициента аэрозольного рассеяния необходимо задать профиль лидарного отношения $S_a(z)$ и значение отношения рассеяния $R(z_0)$ (или $\beta_a(z_0)$) в точке калибровки, где сигнал обусловлен в основном молекулярным рассеянием (рисунок 1, а).

Профиль $S_a(z)$ может быть определен с использованием техники КР [2], позволяющей независимо определять вертикальные профили аэрозольного ослабления и обратного рассеяния. При отсутствии данных о вертикальной изменчивости лидарного отношения обычно принимается упрощающее предположение, что $S_a = const$ во всем диапазоне высот или используются независимые измерения аэрозольной оптической толщины солнечным фотометром, которые вместе с лидарным профилем коэффициента обратного рассеяния, интегрированным в выбранном слое атмосферы, служат определению средней величины S_a . При этом данные фотометрических измерений AOD , используемые в качестве ограничения при решении лидарного уравнения, в процессе обработки пересчитываются путем сплайновой интерполяции на соответствующие длины волн лазера. Дополнительно для нахождения связи между $\beta_a(\lambda, z)$ и $\alpha_a(\lambda, z)$ в оптически плотных аэрозольных слоях свободной тропосферы ($z > 4.0$ км, $AOD > 0.3$) применяется метод, основанный на определении эффективного лидарного отношения, которое приводит к нулевому коэффициенту обратного рассеяния выше и ниже слоя [13].

Процедура автоматической калибровки профилей коэффициентов упругого обратного

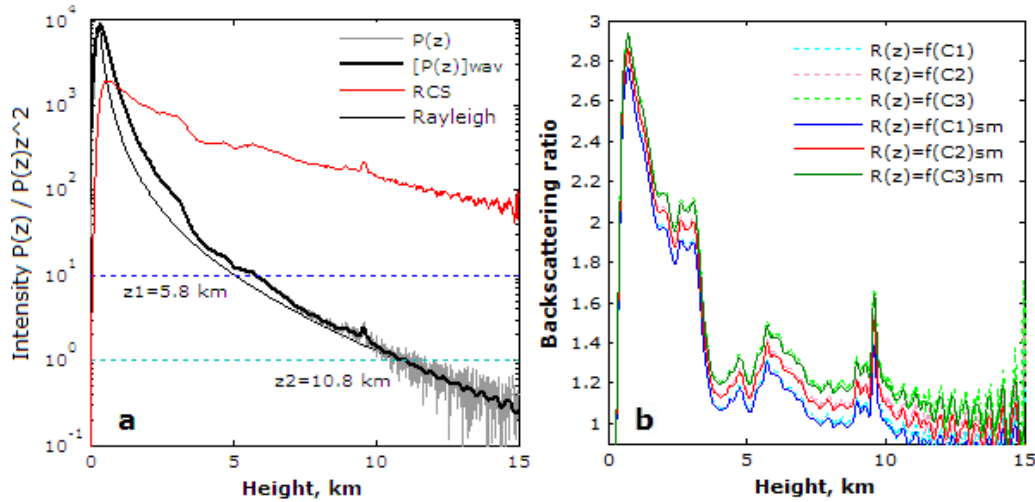


Рисунок 1 – Лидарные сигналы упругого обратного рассеяния на длине волны 532 нм до и после сглаживания и модельный сигнал молекулярного рассеяния (а); зависимость высотного распределения отношения рассеяния $R(z)$ от константы C (б)

рассеяния и сглаживание сигналов. Точность калибровки профилей отношения обратного рассеяния напрямую зависит от выбора интервала калибровки, способа сглаживания лидарного сигнала и априорного задания значений $R(\lambda, z_0)$ [7]. Чтобы минимизировать влияние задаваемых значений $R(\lambda, z_0)$ или $\beta_a(\lambda, z_0)$, для калибровки выбираются такие участки лидарной трассы, где наблюдается минимальное содержание аэрозоля и вклад аэрозольного рассеяния в сигнал пренебрежимо мал по сравнению с релеевским рассеянием:

$$(\beta_m(z_0) + \beta_a(z_0)) / \beta_m(z_0) \cong 1.$$

В основе общепринятой методики выбора точки калибровки лежит поиск точек минимума в пространственном распределении отношения обратного рассеяния, т. е. критерием выбора можно использовать условие:

$$\frac{dR(z)}{dz} = 0. \quad (4)$$

Распределению отношения обратного рассеяния $R(z)$ (2) можно придать следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{Q(z)}{R(z)} + 2S_a\Psi(z) &= const = \\ = C &= \frac{Q(z_0)}{R(z_0)} + 2S_a\Psi(z_0). \end{aligned} \quad (5)$$

Тогда для $R(z)$ можно записать:

$$R(z) = \frac{Q(z)}{C - 2S_a\Psi(z)}. \quad (6)$$

Характер зависимости R от параметра C (или от $R(z_0)$) представлен на рисунок 1, б. Видно, что положение точек минимума практически не зависит от значений C или $R(z_0)$.

Используя соотношения (5) и (6), критерий выбора точки калибровки (4) можно записать в следующем виде:

$$z = z_0 : G(z) = 0, \quad G'(z) > 0, \quad (7)$$

$$\text{где } G(z) = (\ln Q(z))' + 2S_aR_0\beta_m(z). \quad (8)$$

Численный анализ выражения (8) в широком диапазоне изменения параметров R_0 и S_a показал, что

$$(\ln Q(z))' \gg 2S_aR_0\beta_m(z),$$

чем и объясняется слабая зависимость положения точек минимума от калибровочного значения R_0 .

С другой стороны, как видно из формулы для функции Q :

$$Q(z) = P(z)z^2 \exp(2(1 - S_a / S_m)\tau_m(z)) / \beta_m(z),$$

аэрозольное лидарное отношение входит в экспоненциальный множитель, слабо изменяющийся на участках локализации минимумов $R(z)$. Следовательно, положение точек минимумов также слабо зависит от значений S_a и для их нахождения достаточно исследовать поведение нулей функции $(\ln Q(z))'$ при фиксированном значении лидарного отношения.

Таким образом, условие выбора точки калибровки (7) можно записать следующим образом:

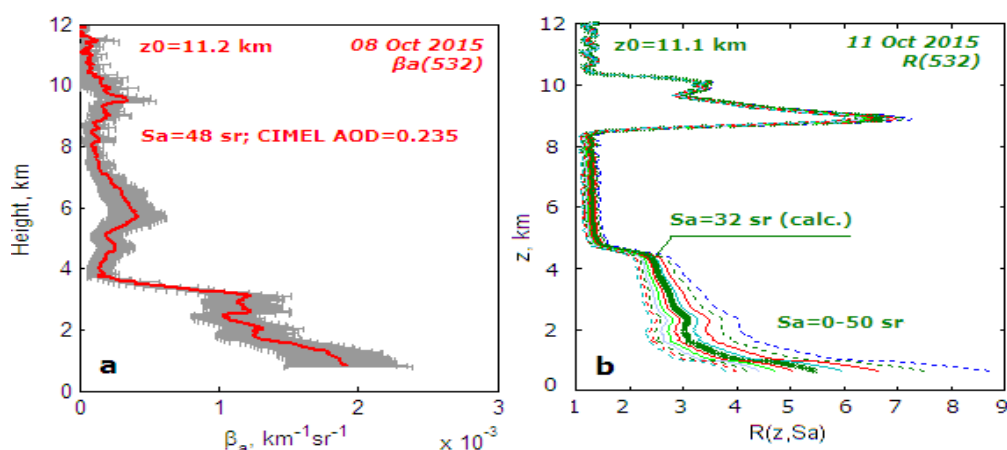


Рисунок 2 – Вертикальные профили коэффициента обратного аэрозольного рассеяния 08 октября 2015 г. (а) и отношения рассеяния 11 октября 2015 г. (б), полученные в результате проведения автоматической калибровки

$$z = z_0 : G_0(z) = 0, \quad G_0'(z) > 0, \quad (9)$$

где $G_0(z) = (\ln Q(z))'$.

Условие (9) положено в основу алгоритма автоматизированного поиска точки калибровки. Как правило, число локальных экстремумов (минимумов) в пространственном распределении $R(z)$ довольно велико и в существенной степени зависит от значений параметров сглаживания сигнала. Численный анализ показывает, что при варьировании этих параметров положение трех главных минимумов локализовано достаточно устойчиво (рисунок 1, б). По наименьшему из них на выбранной длине волны проводится калибровка в автоматическом режиме.

Калибровка профилей коэффициентов обратного рассеяния производилась на высотах 10,0–12,0 км, полагая: $\beta_a(355, z_0) \approx 0.02 \times \beta_m(355, z_0)$; и $\beta_a(532, z_0) \approx 0.08 \times \beta_m(532, z_0)$. Поскольку на длинах волн $\lambda \geq 1,0$ мкм релеевские сигналы обратного рассеяния с высот без аэрозоля очень слабы ($\beta_m(\lambda) \equiv \lambda^{-4}$), калибровка сигнала на длине волн 1064 нм производилось путем сравнения коэффициентов $\beta_a(1064, z)$ и $\beta_a(532, z)$ ниже тропопаузы:

$$\beta_a(1064, z) = \beta_a(532, z) \cdot R_m, \quad (10)$$

где R_m – априорное отношение коэффициентов $\beta_a(1064, z)$ и $\beta_a(532, z)$, определенное по оптико-локационной модели и скорректированное с учетом полученных ранее многолетних экспериментальных данных ($R_m^{-1} = 1,9 \pm 0,2$).

В случаях, когда в верхней тропосфере присутствовали облака типа Ci и данные солнечного фотометра были недоступны, принималось усло-

вие независимости обратного рассеяния от длины волны $\beta_a(\lambda) = \beta_a(532)$.

Процедура сглаживания высокочастотных шумовых составляющих лидарного сигнала применялась двумя различными методами в двух интервалах высот, исключая ближнюю зону трассы зондирования (0,0–2,0 км), где амплитуда регистрируемого сигнала достаточно велика. В интервале высот 2,0–6,0 км сигнал относительно слабый и сглаживание осцилляций производится методом скользящего среднего с регулируемой шириной окна $2 * h_w + 1$. В диапазоне высот 6,0–15,0 км уровень шумов сопоставим с уровнем сигнала, поэтому для уменьшения ошибки при проведении автоматической калибровки применялась фильтрация с помощью дискретного вейвлет-преобразования (вейвлеты Дебеш с регулируемым уровнем детализации сигнала) (рисунок 1, а).

Эффективность описанной процедуры обработки лидарных сигналов была подтверждена результатами восстановления оптических параметров атмосферы по данным регулярных измерений. В качестве иллюстрации на рисунке 2 представлены вертикальные профили коэффициента обратного аэрозольного рассеяния и отношения рассеяния, полученные в результате проведения автоматической калибровки с привлечением данных фотометрических измерений 08 октября 2015 г. (CIMEL, AERONET, Issyk-Kul) и с использованием модели ступенчатого распределения лидарного отношения [13] применительно к данным 11 октября 2015 г.

На рисунке 2, а приведено среднее вертикальное распределение $\beta_a(532, z)$ и вариации, обу-

словленные неоднородностью атмосферы в период проведения ночных наблюдений. На высотах $z > 11,0$ км лидарный сигнал обусловлен в основном молекулярным рассеянием. С уменьшением высоты, в пограничном слое ($z < 4,0$ км), аэрозольный коэффициент обратного рассеяния возрастает быстрее молекулярного коэффициента. Сравнение результатов автоматической калибровки при фиксированном значении лидарного отношения ($S_a = 50$ sr) и данных совместной обработки показало уменьшение погрешности восстановления $\beta_a(\lambda, z)$. Относительная ошибка определения коэффициента обратного аэрозольного рассеяния составляла 1–2 % в свободной тропосфере и 5–8 % в пограничном слое.

Заключение. Предложена методика обработки сигналов обратного рассеяния при многоволновом лидарном зондировании тропосферного аэрозоля, содержащая новый подход к выбору точек калибровки. Процедура нахождения точки калибровки в автоматическом режиме, дополненная предварительной фильтрацией высокочастотных флуктуаций сигналов с использованием дискретного Вейвлет-преобразования, показала хорошие результаты при оперативном восстановлении оптических параметров атмосферы.

Литература

1. *Kulkarni S.* Source sector and region contributions to BC and PM_{2.5} in Central Asia / S. Kulkarni, N. Sobhani, J.P. Miller-Schulze, M.M. Shafer, J.J. Schauer, P.A. Solomon, P.E. Saide, S.N. Spak, Y.F. Cheng, H.A.C Van Der Denier Gon, Z. Lu, D.G. Streets, G. Janssens-Maenhout, C. Wiedinmyer, J. Lantz, M. Artamonova, B. Chen, S. Imashev, L. Sverdlik, J.T. Deminter, B. Adhikary, A. Dallura, C. Wei // *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*. 2014. Т. 14. С. 11343.
2. *Сverdlik Л.Г.* Результаты сравнения экспериментальных (*AERONET*) и модельных (*NAAPS*) данных изменчивости оптических свойств аэрозоля над Северным Тянь-Шанем / Л.Г. Сverdlik // *Наука, новые технологии и инновации*. 2016. № 3. С. 3–9.
3. *Ferrare R.A.* Raman lidar measurements of the aerosol extinction-to-backscatter ratio over the southern great plains / R.A. Ferrare, D.D. Turner, L.H. Brasseur, W.F. Feltz, O. Dubovik, T.P. Tooman // *J. Geophys. Res.* 2001. 106. 20333–20344.
4. *Сverdlik Л.Г.* Особенности радиационных свойств абсорбирующего аэрозоля / Л.Г. Сverdlik // *Наука, новые технологии и инновации*. 2014. № 4. С. 26–31.
5. *Имашев С.А.* Вариации температуры атмосферы в период высокой сейсмической активности в Японии / С.А. Имашев, Л.Г. Сverdlik // *Наука, новые технологии и инновации*. 2015. № 1. С. 15–19.
6. *Сverdlik Л.Г.* Динамика температуры тропосферы в период сейсмической активности в Центральном Тянь-Шане / Л.Г. Сverdlik, С.А. Имашев // *Наука, новые технологии и инновации*. 2015. № 1. С. 23–27.
7. Plan for the implementation of the GAW Aerosol Lidar Observation Network GALION. GAW Report No. 178. Hamburg, Germany, 27–29 March 2007.
8. *Samoilova S.V.* Investigation of the Vertical Distribution of Tropospheric Aerosol Layers Using the Data of Multiwavelength Lidar Sensing. Part 3 / S.V. Samoilova, Yu.S. Balin, G.P. Kokhanenko, I.E. Penner // *Spectral Peculiarities of the Vertical Distribution of the Aerosol Optical Characteristics. Atmospheric and Oceanic Optics*. 2012. Vol. 25. No. 3. P. 208–215.
9. *Sverdlik L.G.* Comparative analysis of lidar investigations of aerosol in Central Asia and West Siberia / L.G. Sverdlik, B.B. Chen, Y.S. Balin, G.P. Kokhanenko, I.E. Penner, S.V. Samoilova // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering 20; Atmospheric Physics*. 2014. С. 92923J.
10. *Mona L.* Lidar Measurements for Desert Dust Characterization: An Overview / L. Mona, Z. Liu, D. Müller, A. Omar, A. Papayannis, G. Pappalardo, N. Sugimoto, M. Vaughan // *Advances in Meteorology*. 2012. Article ID 356265. 36 p. doi:10.1155/2012/356265.
11. *Fernald F.G.* Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments / F.G. Fernald // *Appl. Opt.* 1984. 23. 652–653.
12. *Klett J.D.* Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios / J.D. Klett // *Appl. Opt.* 1985. 24. 1638–1643.
13. *Имашев С.А.* Методы обработки лидарных сигналов обратного упругого рассеяния / С.А. Имашев, П.В. Козлов, Л.Г. Сverdlik, Б.Б. Чен // *Вестник КPCY*. 2011. Т. 11. № 7. С. 157–164.