

Б.В. Кауль, О.А. Краснов, А.Л. Кузнецов, И.Ш. Бикмухаметов

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОСЛАБЛЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Излагается вариант обработки лидарного сигнала, основанный на решении уравнения лазерного зондирования, полученном без предположения о неизменности лидарного отношения. В алгоритме реализуется преимущество калибровки по удаленному слою и используется более соответствующая случаю вертикального зондирования модель лидарного отношения, чем простое предположение его неизменности. Решение ведется в итерационном цикле с использованием содержащейся в сигнале информации о стратификации аэрозольных слоев. Учет апостериорной информации приводит к автоматической коррекции, в рамках принятой модели, профиля лидарного отношения.

Использование лидара для исследования вертикальной стратификации аэрозолей предполагает наличие того или иного алгоритма расчета оптических характеристик аэрозольных слоев из величин лидарных откликов. Широко распространенная в настоящее время методика интерпретации результатов зондирования стратосферного слоя (см., например, [1]) основана на использовании специфических условий, существующих в стратосфере, а именно на определяющей роли молекулярного рассеяния, по крайней мере на некоторых высотах.

Результаты зондирования представляются в виде профилей $R(h)$ отношения общего коэффициента обратного рассеяния к молекулярному

$$R(h) = [\beta_a(h) + \beta_M(h)]/\beta_M(h), \quad (1)$$

где $\beta_a(h)$ и $\beta_M(h)$ — коэффициенты обратного рассеяния соответственно аэрозольного и молекулярного компонентов; h — высота слоя.

В соответствии с лидарным уравнением отношение обратного рассеяния выражается формулой:

$$R(h) = S(h)/[A \beta_M(h) T^2(h)], \quad (2)$$

где $S(h)$ — сигнал обратного рассеяния, умноженный на квадрат высоты; $T(h)$ — пропускание участка трассы от лидара до слоя, расположенного на высоте h ; A — постоянная, зависящая от параметров приемной и передающей аппаратур. Поскольку прямо определить постоянную A с достаточной точностью трудно, а $T(h)$ является неизвестной функцией, применяют процедуру калибровки по сигналу из слоя, расположенного на высоте h_k , где значение $R(h_k)$ можно задать априорно, опираясь на известные сведения о строении атмосферы. Такая калибровка приводит к следующему выражению для функции $R(h)$:

$$R(h) = R(h_k) S(h) \beta_M(h_k) T^2(0, h_k) [S(h_k) \beta_M(h) T^2(0, h)]^{-1}, \quad (3)$$

где $R(h_k)$ — отношение обратного рассеяния в слое калибровки. Профиль молекулярного рассеяния $\beta_M(h)$ задается в первом приближении существующими моделями и уточняется при наличии аэрологических сведений о профиле давления и температуры. Проблема выбора высоты слоя калибровки h_k и соответственно величины $R(h_k)$ дискутировалась в литературе [1, 2], где даны некоторые рекомендации. Но, вообще говоря, в каждом конкретном случае выбор h_k и $R(h_k)$ должен решаться особо, поскольку он зависит от географического положения пункта наблюдений, сезонных вариаций свойств атмосферы и длины волны лазерного излучения. Анализ полученных данных показал, что рекомендуемые в работе [1] высоты h_k вблизи тропопаузы не всегда пригодны, так как рассеивающие свойства атмосферы на этих высотах могут быть возмущены присутствующим в районе тропопаузы слоем повышенной замутненности. Рис. 1 иллюстрирует типичное проявление этих слоев. Кроме того, рекомендации [1] не вполне согласуются с оптико-локационной моделью континентального аэрозоля, изложенной в [3]. И наконец, совокупность имеющихся сведений об изменчивости аэрозольного компонента атмосферы наводит на мысль о выборе опорного слоя выше слоя Юнге. Одним из возможных приемов выбора опорного слоя является нахождение относительных минимумов функции $f(h) = S(h)/S_M(h)$ или ее логарифма, где $S_M(h)$ — функция, рассчитанная для модельной молекулярной атмосферы и некоторой произвольной аппаратурной постоянной A_M . Для логарифма этой функции имеем:

$$\ln f(h) = [\ln A - \ln A_M] - 2[\tau(h) - \tau_M(h)] - [\ln \beta(h) - \ln \beta_M(h)]. \quad (4)$$

Первый член в квадратных скобках дает некоторый произвольный постоянный сдвиг, второй член, представляющий неизвестную разность оптических толщ реальной и модельной атмосферы, после выхода за пределы оптически активных аэрозольных слоев становится очень медленно меняющейся монотонной функцией и тогда особенности функции $f(h)$ определяются главным образом третьим членом, а наличие локального минимума говорит о присутствии слоя относительной очистки. По нашим данным, такой слой присутствует чаще всего на высотах 28÷29 км, которые и принимались нами в качестве опорных. Описанная ситуация не противоречит оптико-локационной модели и в соответствии с ней при длине волны $\lambda = 0,53$ мкм следует принять для величины $R(h_k)$ значение 1,015, а для коэффициента ослабления $\alpha(h_k) = 1,09 \alpha_m(h_k)$. Необходимость введения последней величины станет ясной из дальнейшего изложения.

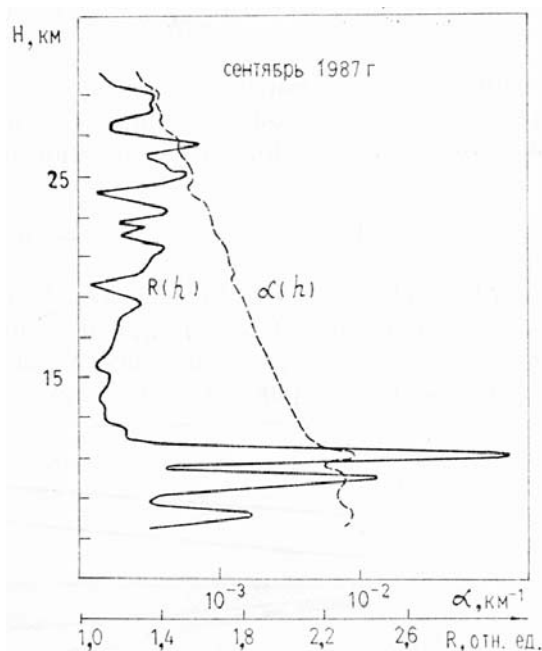


Рис. 1. Пример стратификации аэрозольных слоев вблизи тропопаузы по данным зондирования лидаром «Стратосфера-1М» в Томске

Возвращаясь к формуле (3), заметим, что ее слабым звеном является присутствие отношения $T^2(h_k)/T^2(h)$, величина и высотный ход которого определяются главным образом нижними оптически активными и наиболее изменчивыми слоями атмосферы. Поэтому алгоритм (3) достаточно корректен только для стратосферных слоев при низких уровнях замутненности, когда отношение $T(h_k)/T(h)$ можно принять равным единице или ввести на основе модельных представлений. При аномальной замутненности стратосферы или попытке продолжения решения на нижерасположенные тропосферные слои неопределенность в профиле $T(h_k)/T(h)$ вносит существенное и неконтролируемое смещение функции $R(h)$. В то же время в уравнении локации содержится возможность оценки профиля коэффициента ослабления $\alpha(h)$ и, как следствие, $T(h)$, а идея калибровки по слою, расположенному на удаленном участке трассы, с последующим продолжением решения на тропосферные слои представляется привлекательной вследствие известного [4÷6] свойства стабилизации решения в этом случае.

Решение уравнения локации относительно $\alpha(h)$ предполагает наличие информации о профиле лидарного отношения $b(h) = \beta(h)/\alpha(h)$. Обычно решение получают либо предполагая $b(h) = \text{const}$, либо нормируя на $b(h)$ экспериментально измеренную S-функцию. Решение в случае калибровки по слою на конце трассы дается формулой [5]:

$$\alpha(h) = \Psi(h) \left[\frac{\Psi(h_k)}{\alpha(h_k)} + 2 \int_h^{h_k} \Psi(h') dh' \right]^{-1}, \quad (5)$$

где $\Psi(h) = S(h)[b(h)A]^{-1}$. Нетрудно заметить, что при постоянных b и A они исключаются из (5) и формула трансформируется к следующему виду:

$$\alpha(h) = S(h) \left[\frac{S(h_k)}{\alpha(h_k)} + 2 \int_h^{h_k} S(h') dh' \right]^{-1}. \quad (6)$$

Наши дополнительные исследования свойств этого решения показали, что относительная ошибка определения $\alpha(h)$ зависит от относительной ошибки задания опорного значения $\alpha(h_k)$ следующим образом:

$$\delta[\alpha(h)] = \delta[\alpha(h_k)] \left[1 + 2\alpha(h_k) \int_h^{h_k} S_n(h') dh' \right]^{-1}, \quad (7)$$

где $\delta[\alpha(h)] = \Delta\alpha(h)/\alpha(h)$; $S_n(h) = S(h)/S(h_k)$. Формула получена при условии, что $S(h)$ и $S(h_k)$, как и h , измерены точно. Поскольку интеграл по физическому смыслу всегда положителен, коэффициент переноса ошибки калибровки меньше единицы и уменьшается по мере увеличения оптической толщины τ интервала $[h, h_k]$. Это обстоятельство иллюстрируется рис. 2, где приведены результаты расчетов относительной ошибки восстановления $\alpha(h)$. Мы еще раз подчеркнули это известное свойство решения (6), поскольку, как станет ясно из дальнейшего изложения, оно используется в качестве нулевого приближения в предлагаемом ниже алгоритме расчета профиля $\alpha(h)$.

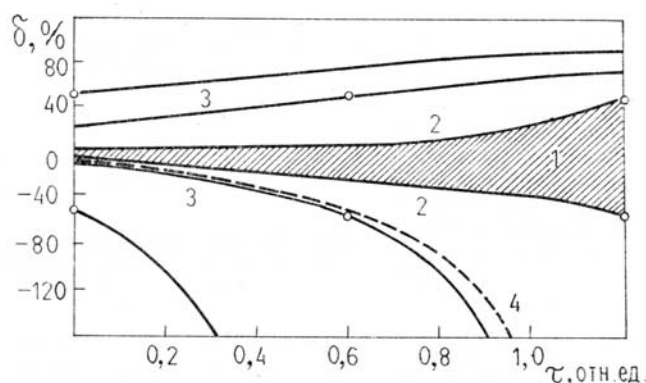


Рис. 2. Результаты расчетов относительной ошибки восстановления профиля коэффициента ослабления в зависимости от оптической толщины при заданной погрешности оценки $\delta(\alpha_k) = \Delta\alpha_k/\alpha_k = \pm 50\%$ и местоположении «опорной точки» h_k : 1 – в конце трассы; 2 – в середине трассы; 3 – в начале трассы; 4 – расчет по методу «асимптотического функционала» [8]

При попытке восстановления вертикального профиля коэффициента ослабления в широком интервале высот, включающем тропосферу, оказывается непригодным предположение о неизменности лидарного отношения. Априорное введение $b(h)$ также малоэффективно из-за большой изменчивости аэрозольного компонента, вследствие чего оказывается неконтролируемым процесс перераспределения относительных вкладов аэрозольного и молекулярного компонентов в суммарный коэффициент ослабления. По указанным причинам представляется целесообразным применение алгоритма, позволяющего каким-то образом учесть изменчивость лидарного отношения. Такой алгоритм оказывается возможным построить на основе общего решения уравнения локации, полученного без каких-либо предположений о виде функции $b(h)$ [7]. Из соотношений, приведенных в [8], нетрудно получить формулу для расчета профиля коэффициента ослабления в случае калибровки по удаленному слою:

$$\alpha(h) = S(h) \left[\frac{S(h_k)}{\alpha(h_k)} + 2 \int_h^{h_k} S(x) dx - \frac{S(h_k)}{b(h_k)\alpha(h_k)} \int_h^{h_k} b'_x(x) \exp \left\{ 2 \int_h^{h_k} \alpha(x') dx' \right\} dx \right]^{-1}, \quad (8)$$

где $b'_x(h)$ – производная лидарного отношения; x – переменная интегрирования. Если $b(h) = \text{const}$, то выражение (8) переходит в формулу (6).

Формула (8) определяет $\alpha(h)$ в неявном виде, поскольку искомая функция входит во второй интегральный член, но зато, как станет ясно из дальнейшего, позволяет ввести априорные предположения относительно $b(h)$, более соответствующие физическому содержанию задачи, и организовать итерационный цикл, в котором происходит коррекция $b(h)$ на основе использования апостериорной информации, содержащейся в лидарном сигнале.

Как следует из (8), для расчета $\alpha(h)$ необходимо задать модель производной лидарного отношения. Применительно к зондированию стратосферы и верхней тропосферы простейшая модель может быть построена на основе анализа приведенных в [3] средних профилей лидарного отношения и коэффициента ослабления. На рис. 3 показаны профили этих величин для длины волны 0,53 мкм. Даже при качественном анализе высотного хода $b(h)$ и $\alpha(h)$ нетрудно заметить антикорреляцию этих функций, численная

оценка которой в интервале высот 4÷30 км составляет 0,83. Это означает, что главный механизм изменчивости лидарного отношения для указанных длины волны и интервала высот состоит в перераспределении относительных вкладов аэрозольного и молекулярного рассеяния. Изменчивость рассеивающих свойств аэрозоля играет второстепенную роль. Это дает основание рассмотреть модель, в которой для аэрозольного компонента вводится предположение $b_a(h) = \text{const}$. Тогда, имея в виду, что

$$b(h) = \frac{b_a \alpha_a(h) + b_M \alpha_M(h)}{\alpha(h)},$$

можно получить следующее выражение для производной лидарного отношения:

$$b'_\eta(h) = (b_M - b_a) \frac{d}{dh} \left(\frac{\alpha_M(h)}{\alpha(h)} \right), \quad (9)$$

где индексы м и а определяют соответственно молекулярный и аэрозольный компоненты.

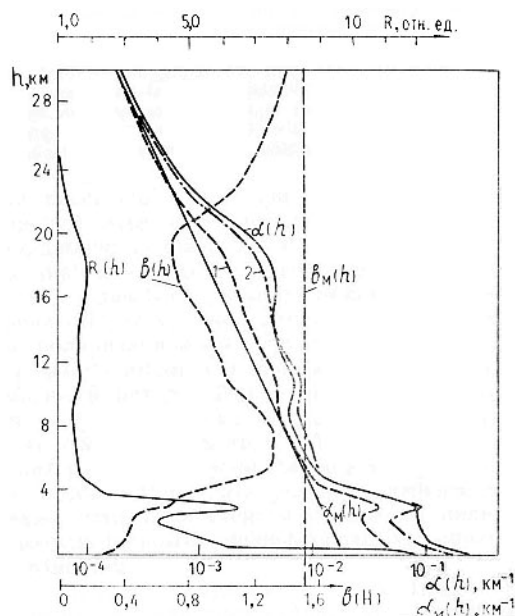


Рис. 3. Численный эксперимент по оценке эффективности итерационной схемы (10): кривые $R(h)$, $b(h)$, b_M , $\alpha_M(h)$ и $\alpha(h)$ – соответствующие профили по данным работы [3]; кривые 1 и 2 – восстановленные профили $\alpha(h)$ в «нулевом» и восьмом цикле итераций

Расчет профиля коэффициента ослабления с использованием этой модели ведется в соответствии с (8) по следующей итерационной схеме:

$$\left\{ \begin{aligned} \alpha^{(n)}(h) &= S(h) \left[\frac{S(h_k)}{\alpha(h_k)} + 2 \int_h^{h_k} S(x) dx - C \int_h^{h_k} \frac{d}{dx} \left(\frac{\alpha_M(x)}{\alpha^{(n-1)}(x)} \right) \exp \left\{ 2 \int_x^{h_k} \alpha^{(n-1)}(x') dx' \right\} dx \right]^{-1} \\ \alpha^{(n)}(h) &= S(h) \left[\frac{S(h_k)}{\alpha(h_k)} + 2 \int_h^{h_k} S(x) dx \right]^{-1}, \end{aligned} \right. \quad (10)$$

где $(n) = 1, 2, \dots, n$ – номер итераций, а

$$C = \frac{S(h_k)(b_M - b_a)}{\alpha(h_k)b(h_k)}.$$

Для проверки сходимости и эффективности итерационной схемы проведен численный эксперимент. В качестве исходной модели использовалась оптико-локационная модель континентального аэрозоля [3], по которой рассчитывался профиль лидарного сигнала. Этот сигнал вводился в схему (10) и получался профиль коэффициента ослабления. При этом предполагалось $4\pi b_a = 0,5$, $4\pi b_M = 1,5$ и вводилось точное значение $\alpha(h_k)$. На рис. 3 штриховыми линиями изображены результаты нулевой и 8-й итераций. Разброс значений между 8-й и 9-й итерациями не превышает 2%. Расхождение между мо-

дельным и восстановленным профилем $\alpha(h)$ обусловлено тем, что предположение $b_a(h) = \text{const}$ не адекватно поведению $b_a(h)$, предусмотренному оптико-локационной моделью.

Алгоритм (10) применялся для обработки реальных сигналов. Профили, представленные на рис. 1, — пример такой обработки. Алгоритм достаточно прост и легко реализуется на входящей в экспериментальный комплекс ЭВМ типа «Электроника-60» и требует небольшого (порядка 30 с) времени счета. Дальнейшее представление результатов зондирования может заключаться в построении профиля фактора мутности $M(h) = \alpha(h)/\alpha_m(h)$, либо более корректно вычисленного фактора $R(h)$, поскольку появляется возможность оценки функции $T(h, h_r) = T(0, h_r)/T(0, h)$, входящей в формулу (3).

Вообще говоря, значение формулы (8) выходит за пределы возможности построения конкретной схемы (10), которая является наиболее простой вследствие простоты принятой модели (9). Особенностью формулы является отказ, при ее выводе, от каких-либо априорных предположений о виде функций $b(h)$ или $\alpha(h)$. Необходимые предположения могут быть введены, исходя из конкретной реализации экспериментальной S -функции, либо на основе статистической модели интерпретации [5], если для этого имеется достаточное количество статистической информации, либо на основе модельных представлений. Отметим также, что задание модели производной лидарного отношения является менее жестким допущением, чем введение детерминированного профиля $b(h)$, как того требует (5), так как производная представляет семейство функций $b(h)+C$ при произвольной C .

Возвращаясь к конкретной схеме (10) заметим, что принятая в ней модель (9) отражает доминирующую черту поведения лидарного отношения в верхних слоях атмосферы. Поэтому можно надеяться, что описанная методика позволит существенно увеличить точность интерпретации результатов зондирования. В численном эксперименте относительная ошибка восстановленных значений α на высотах от 4 до 30 км не превышала 20%, в то время как решение (6) давало ошибку до 70%. Еще больший выигрыш получается в оценке оптической толщи. Относительная ошибка восстановленного значения τ указанного интервала высот составила 6%, это позволяет в формуле (3) достаточно корректно учесть высотный ход прозрачности.

1. Russel Ph., Swisler T., McCormick M.P. — Appl. Opt., 1979, т. 18, № 22, р. 3783–3793.
2. Костко О.К., Крученицкий Г.М., Тулинов К.В. — VIII Всес. симп. по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. (Тезисы докладов, ч. I). Томск, 1984, с. 74–76.
3. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982, с. 200.
4. Зуев В.Е., Задде Г.О., Кавкьянов С.И., Кауль Б.В. — В кн.: Дистанционное зондирование атмосферы. — Новосибирск: Наука, 1978, с. 180.
5. Зуев В.Е., Кавкьянов С.И., Креков Г.М. — Изв. АН СССР. ФАО, 1983, т. 19, № 3, с. 255–266.
6. Klett J. D. — Appl. Opt., 1985, v. 24, № 11, р. 1638–1643.
7. Кауль Б.В. Лазерное зондирование аэрозольных загрязнений атмосферы. Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Томск: ИОА СО АН СССР, 1976.
8. Зуев В.Е., Кауль Б.В., Самохвалов И.В. и др. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей. — Новосибирск: Наука, 1986, с. 185.

Институт оптики атмосферы
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию
11 декабря 1987 г.

B.V. Kaul, O.A. Krasnov, A.L. Kuznetsov, I.Sh. Bickmukhametov. A Computational Procedure for the Retrieval of the Altitude Profile of the Extinction Coefficient from Laser Sounding Data.

An iteration procedure for lidar data processing is described. The proposed algorithm is stable due to the use of calibration against the atmospheric layer lying at the end of the lidar path. An account is taken of a posteriori information about the aerosol stratification, which allows the backscattering ratio profile to be revised improving the accuracy of the calculated extinction coefficient as a function of altitude.