

А.П. Чайковский, В.Н. Щербаков

УЧЕТ АЭРОЗОЛЬНОГО ОСЛАБЛЕНИЯ ПРИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ЗОНДИРОВАНИЯ СТРАТОСФЕРЫ

Предложена методика расчета отношения R показателей полного и молекулярного обратного рассеяния стратосферы по данным лидарного зондирования, учитывающая ослабление излучения аэрозолем. Алгоритм основан на априорном доопределении профиля лидарного отношения. На примере обработки экспериментальных данных зондирования стратосферы обсуждаются погрешности, возникающие из-за пренебрежения аэрозольным ослаблением.

В настоящее время лидарные измерения стали одним из основных и наиболее эффективных средств контроля за состоянием стратосферного аэрозоля. Получаемая в результате этих измерений качественная и количественная информация находит непосредственное применение в климатологии, метеорологии, при решении задач охраны окружающей среды. Поэтому совершенствование методик обработки регистрируемых эхосигналов и восстановления профилей оптических параметров имеет важное прикладное значение.

При интерпретации данных стратосферного зондирования часто применяется алгоритм, в котором пренебрегается аэрозольным ослаблением зондирующего излучения в исследуемом интервале высот (см., например, [1]). Подчеркнем, что такое упрощение может сильно сказываться на количественных результатах, особенно в периоды вулканической активности. Применительно к задаче лидарного зондирования стратосферы в работах [2, 3] были предложены методики, учитывающие ослабление излучения аэрозолем, основанные на построении итерационного алгоритма оценки показателя ослабления. Однако применение такого алгоритма вследствие значительных затрат машинного времени становится затруднительным, когда требуется оперативность при обработке данных, а расчеты проводятся на микроЭВМ, которыми обычно оснащаются лидарные станции. В настоящей работе описывается другой алгоритм, основанный на аналитической форме записи связи откорректированных значений отношения $R(z) = \beta(z)/\beta_m(z)$ (где $\beta(z)$ и $\beta_m(z)$ — соответственно показатели полного и молекулярного обратного рассеяния в точке с координатой z), характеризующего распределение аэрозоля в стратосфере, и его нулевым приближением $R_0(z)$, рассчитанным без учета ослабления излучения аэрозолем. Полученное выражение естественным образом дополняет общепринятую методику обработки данных лидарного зондирования стратосферы [1].

Предполагается справедливым приближение однократного рассеяния и известным профиль молекулярного рассеяния. Последний обычно рассчитывается по данным шарзондовых измерений метеослужбы. Взаимосвязь числа $N(z)$ зарегистрированных приемной системой лидара однофотонных импульсов с оптическими характеристиками среды описывается уравнением [1]

$$N(z) = Kz^{-2}\beta(z)Q^2(z), \quad (1)$$

где z — расстояние от лидара до зондируемого объема; K — аппаратная функция; $\beta(z) = \beta_a(z) + \beta_m(z)$, $\beta_a(z)$ — показатель аэрозольного обратного рассеяния;

$$Q^2(z) = \exp \left[-2 \int_0^z \sigma(z') dz' \right];$$

$\sigma(z) = \sigma_a(z) + \sigma_m(z)$, $\sigma_a(z)$ и $\sigma_m(z)$ — соответственно показатель аэрозольного и молекулярного рассеяния.

Согласно стандартной методике [1] выбирают некоторую точку z_0 , где концентрация аэрозоля априори предполагается минимальной и соответствующей $R(z_0) = R_{\min}$. Тогда из (1) следует

$$R(z) = \frac{z^2 N(z) Q^2(z_0) \beta_m(z_0)}{z_0^2 N(z_0) Q^2(z) \beta_m(z)} R_{\min}. \quad (2)$$

В (2) $Q^2(z) = Q_a^2(z) Q_m^2(z) \cdot Q_m^2(z)$ предполагается известным и рассчитывается по профилю молекулярного рассеяния. $Q_a^2(z)$, как правило, считают равным единице, т.е. пренебрегают аэрозольным ослаблением излучения на интервале $[z, z_0]$, и тогда результатом обработки экспериментальных данных будет профиль

$$R_0(z) = \frac{z^2 N(z) Q_M^2(z_0) \beta_M(z_0)}{z_0^2 N(z_0) Q_M^2(z) \beta_M(z)} R_{\min}. \quad (3)$$

Из (2)–(3) непосредственно следует соотношение

$$R_0(z) = R(z) \exp \left[2 \int_z^{z_0} \sigma_a(z') dz' \right]. \quad (4)$$

В (4) входят две неизвестные функции $\beta_a(z)$ и $\sigma_a(z)$. Поэтому при его решении возникает необходимость в привлечении дополнительной априорной информации. Следуя распространенному подходу, будем считать заданным профиль лидарного отношения $q(z) = \beta_a(z)/\sigma_a(z)$. Тогда, домножая обе части уравнения (4) на $2\beta_M(z) q^{-1}(z)M(z)$, где

$$M(z) = \exp \left[2 \int_z^{z_0} \beta_M(z') q^{-1}(z') dz' \right], \quad (5)$$

приходим к соотношению

$$2 R_0(z) \beta_M(z) q^{-1}(z) M(z) = 2 [\sigma_a(z) + \beta_M(z) q^{-1}(z)] \exp \left\{ 2 \int_z^{z_0} [\sigma_a(z') + \beta_M(z') q^{-1}(z')] dz' \right\}. \quad (6)$$

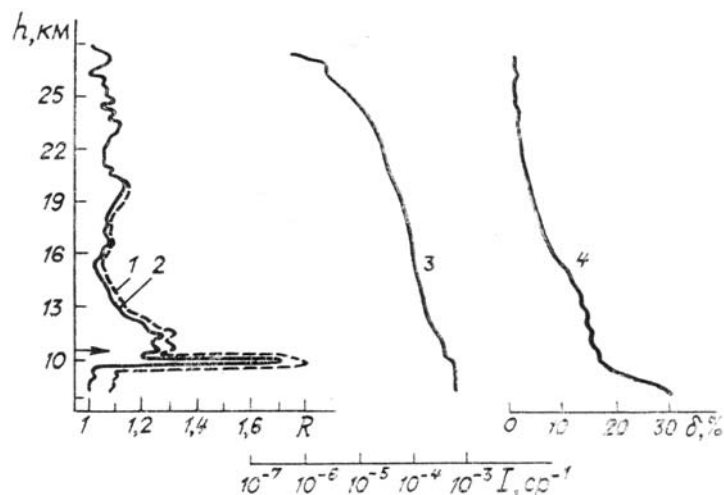
Производя замену переменных z на z' и интегрируя обе части (6) по z' в интервале $[z, z_0]$, получим

$$2 \int_z^{z_0} R_0(z') \beta_M(z') q^{-1}(z') M(z') dz' + 1 = \exp \left\{ 2 \int_z^{z_0} [\sigma_a(z') + \beta_M(z') q^{-1}(z')] dz' \right\}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (6), после преобразований приходим к итоговой формуле

$$R(z) = \frac{R_0(z) M(z)}{1 + 2 \int_z^{z_0} R_0(z') \beta_M(z') q^{-1}(z') M(z') dz'}. \quad (8)$$

Очевидно, что при $z = z_0$ $R(z_0) = R_0(z_0) = R_{\min}$, при $q^{-1}(z) \rightarrow 0$ $R(z) \rightarrow R_0(z)$. При обработке экспериментальных данных точку z_0 предпочтительно выбирать ближе к дальнему концу интервала, где рассчитывается $R(z)$, т.к. коэффициент усиления относительных ошибок измерений и априорной информации пропорционален величине $\gamma = Q^2(z_0/Q^2(z))$.



В качестве иллюстрации влияния учета аэрозольного ослабления может служить рисунок, где приведен пример обработки экспериментальных данных по зондированию стратосферы на длине волны $\lambda = 532$ нм, полученных при помощи лидарной системы «АНБ–314» [4] 5.06.87 г. Стрелкой отмечено положение тропопавзы. В качестве априорного использовалось предположение, что при $z_0 = 27,75$ км $R(z_0) = R_{\min} = 1,01$. Кривая 1 – профиль $R_0(z)$, т.е. отношение $\beta(z)/\beta_M(z)$, рассчитан-

ное при условии пренебрежения аэрозольным ослаблением. Кривая 2 — профиль $R(z)$, полученный согласно формулам (8), (5) при $q(z) = 0,015 = \text{const}$. Чем дальше от z_0 , тем больше отличие кривых 1 и 2. Относительное отклонение $\delta_R = [R_0(z) - R(z)]/R(z)$ в рассматриваемом случае достигает 7,8%. Еще в большей степени неучет аэрозольного ослабления проявляется при непосредственном пересчете в оптические характеристики рассеивателей. Относительное отклонение значений показателя обратного рассеяния аэрозоля в диапазоне высот 8–18 км превышает 10% и в среднем находится на уровне 20%.

Кривой 3 на рисунке представлена зависимость параметра

$$I(z) = \int_z^{z_0} \beta_a(z') dz',$$

а кривой 4 — относительное отклонение $\delta_I = [I_0(z) - I(z)]/I(z)$, где $I_0(z)$ рассчитано по $R_0(z)$, а $I(z)$ — по $R(z)$. В определенной степени $I(z)$ характеризует оптическую толщину τ стратосферного аэрозоля в интервале высот $[z, z_0]$. Видно, что неучет аэрозольного ослабления приводит к существенной погрешности в оценке τ .

В заключение отметим, что алгоритм (8), (5) был реализован на микроЭВМ «Электроника–60» на языке PASCAL. Обработка данных при его использовании проводится практически в режиме реального времени.

1. Russell P. B., Swisler J. J., McCormick M. P. // Appl. Opt. 1979. V. 18. №22. P. 3783–3797.
2. Зуев В. Е., Аршинов Ю. Ф., Ельников А. В. и др. // Труды IX Всес. симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск: ТФ СО АН СССР, 1987. Ч. 1. С. 147–149.
3. Кауль Б. В., Краснов О. А., Кузнецов А. Л., Самохвалов И. В. // Труды IX Всес. симпозиума по лазерному и акустическому зондированию атмосферы. Томск: ТФ СО АН СССР, 1987. Ч. 1. С. 75–79.
4. Бородавко А. Н., Воробей Н. П., Губский В. И. и др. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. №3. С. 109–114.

Институт физики АН БССР,
Минск

Поступило в редакцию
12 января 1989 г.

A. P. Chaikovskii, V. N. Shcherbakov. Taking Account of Aerosol Extinction while Interpreting Lidar Sensing Data of the Stratosphere.

A method is proposed for calculating the ratio R of indices of complete and molecular backscattering of the stratosphere according to the lidar sensing data. The algorithm allows for extinction of aerosol emission. It is based on a priori definition of the lidar ratio profile, does not need large expenditure of machine resources and is realized by a microcomputer. An example of processing of real experimental data is presented. The errors caused by the neglect of aerosol extinction are discussed.