

Н.Н. Щелканов

Методы коррекции аэрозольной оптической толщи атмосферы на горизонтальных и наклонных трассах

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 1.09.2005 г.

Представлены три усовершенствованных метода коррекции аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы. Первый метод предполагает получение абсолютных значений АОТ или их относительного спектрального хода в нескольких участках спектра. Этот метод позволяет находить и исключать систематические погрешности в АОТ. Вторым методом предполагается наличие абсолютного значения АОТ только в одном участке спектра. В остальных участках спектра значения АОТ корректируются. Третий метод используется при полном отсутствии абсолютных значений или относительного спектрального хода АОТ. Он называется методом «нулевой точки». Этот метод предполагает приравнивание нулю минимального значения АОТ в одном участке спектра. Для установления связи между разными участками спектра АОТ в новых методах используется обобщенная формула линейной регрессии, полученная с учетом случайных погрешностей используемых данных.

Введение

При экспериментальных исследованиях аэрозольного ослабления в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра главной задачей является корректное выделение этой величины из общего ослабления. Обычно для нахождения аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы $\tau(\lambda)$ большинство исследователей используют «остаточный принцип», когда $\tau(\lambda)$ определяется как разность между общей толщиной атмосферы $\epsilon(\lambda)$ и молекулярными компонентами ослабления. Применение разных методик учета молекулярных компонент ослабления приводит к получению различных величин аэрозольного ослабления. Так, например, использование различных версий программы HITRAN [1, 2] дает разные величины ослабления. Кроме того, использование «остаточного принципа» приводит к переходу систематической погрешности из $\epsilon(\lambda)$ в $\tau(\lambda)$. Все это может существенно исказить как величины, так и спектральный ход $\tau(\lambda)$. Отсюда вытекает потребность в разработке методов, которые позволили бы устранить недостатки «остаточного принципа» выделения аэрозольной компоненты ослабления как на горизонтальных, так и на наклонных трассах.

В [3] предложены методы коррекции спектрального хода аэрозольной оптической толщи атмосферы. В этих методах для нахождения связи между аэрозольными оптическими толщинами атмосферы на соседних длинах волн используются коэффициенты уравнения линейной ортогональной среднеквадратической регрессии [4]. В [5] показано, что эти коэффициенты получаются из обобщенной формулы линейной регрессии при выполнении двух условий: первое — разброс точек в корреляционной связи этих величин на соседних длинах волн

обусловлен только случайными погрешностями измерений, второе — эти погрешности равны между собой в исследуемой области спектра. Заметим, что первое условие выполняется только приближенно, а второе — не всегда выполняется во всей исследуемой области спектра. Так, например, согласно [6] случайная среднеквадратическая погрешность измерения коэффициента аэрозольного ослабления на трассе длиной 4,63 км в области спектра 0,44–1,06 мкм составляет $\sim 0,007 \text{ км}^{-1}$, а в области спектра 1,6–12 мкм — больше $0,011 \text{ км}^{-1}$. Поэтому использование методов [3] в области спектра 1,6–12 мкм приведет к завышению значений коэффициентов аэрозольного ослабления. Учитывая эти обстоятельства, ниже излагаются усовершенствованные методы коррекции АОТ.

1. Физические основы методов

Пусть имеется массив аэрозольных оптических толщ атмосферы, полученный путем вычитания молекулярных компонент из общего ослабления. Для проведения коррекции из общего массива $\tau(\lambda)$ формируется корректировочный массив, включающий в себя либо все экспериментальные данные, либо их часть и удовлетворяющий следующим требованиям:

1. Наличие линейной связи и значимой корреляции между аэрозольными оптическими толщинами атмосферы во всей исследуемой области спектра. Проверка связи на линейность осуществляется методом наименьших квадратов [4]. Если при больших значениях $\tau(\lambda)$ будет появляться нелинейность, то эти точки необходимо исключить из рассматриваемого массива. Как правило, в корректировочный массив включаются спектры со значениями $\tau(\lambda) < 0,2$.

2. Существование в корректировочном массиве, наряду с другими, значений $\tau(\lambda)$, равных нулю или отличающихся от нуля не более чем на величину погрешности единичного измерения во всей исследуемой области спектра. Следует заметить, что проверка выполнимости этого требования осуществляется после проведения коррекции $\tau(\lambda)$. Его необходимо соблюдать для того, чтобы удостовериться в линейности связи между аэрозольными оптическими толщами атмосферы при значениях последних, близких к нулю.

Для нахождения связи между АОТ атмосферы на разных длинах волн используется уравнение линейной среднеквадратической регрессии

$$\tau_j = K_{0ij} + K_{ij}\tau_i, \quad (1)$$

где $i, j = 1, 2, \dots, n$; n – число исследуемых участков спектра; τ_i и τ_j – аэрозольные оптические толщи атмосферы на длинах волн λ_i и λ_j . А коэффициенты регрессии K_{ij} определяются по обобщенной формуле [5]:

$$K_{ij} = \frac{\sigma_j B}{\sigma_i A} \frac{1}{2\rho_{ij}} \left\{ \left(\frac{A}{B} - \frac{B}{A} \right) + \sqrt{\left(\frac{A}{B} - \frac{B}{A} \right)^2 + 4\rho_{ij}^2} \right\}, \quad (2)$$

где

$$A = \sqrt{1 - |\rho_{ij}|} \sqrt{\frac{1 - \delta_{ij}^2 / \sigma_i^2}{1 - \delta_{ji}^2 / \sigma_j^2}}; \quad (3)$$

$$B = \sqrt{1 - |\rho_{ij}|} \sqrt{\frac{1 - \delta_{ji}^2 / \sigma_j^2}{1 - \delta_{ij}^2 / \sigma_i^2}};$$

ρ_{ij} – нормированные коэффициенты корреляции между τ_i и τ_j ; σ_i и σ_j – их среднеквадратические отклонения; δ_{ij} и δ_{ji} – случайные среднеквадратические погрешности измерения τ_i и τ_j для рассматриваемого массива данных относительно τ_j и τ_i .

Физический смысл равенства нулю коэффициентов K_{0ij} заключается в том, что при равенстве нулю концентрации оптически активного субмикронного и грубодисперсного аэрозоля аэрозольные оптические толщи атмосферы должны быть равны нулю во всей исследуемой области спектра. Таким образом, если коэффициенты регрессии K_{0ij} в выражении (1) для корректировочного массива не равны нулю, то необходимо проводить коррекцию величины и спектрального хода АОТ.

Очевидно, что средние скорректированные значения аэрозольных оптических толщ атмосферы $\bar{\tau}'$ для калибровочного массива будут связаны между собой соотношением

$$\bar{\tau}' = K_{12}\bar{\tau}'_2 = K_{12}K_{23}\bar{\tau}'_3 = \dots = K_{12}K_{23}\dots K_{n-1,n}\bar{\tau}'_n, \quad (4)$$

а скорректированные и не скорректированные значения τ соотношением

$$\bar{\tau}'_i = \bar{\tau}_i - \Delta_{0i}, \quad (5)$$

где Δ_{0i} – систематическая погрешность на i -й длине волны ($i = 1, \dots, n$). Систематическую погрешность Δ_{0i} можно условно разделить на две:

$$\Delta_{0i} = \Delta_0 + \Delta_i. \quad (6)$$

Первая – Δ_0 – является постоянной для всех участков спектра и обусловлена общим фактором. Таким фактором при измерении аэрозольного ослабления на горизонтальных трассах может быть неточное определение длин измерительной (длинной) и калибровочной (короткой) атмосферных трасс. Вторая – Δ_i – имеет разные абсолютные значения, может быть знакопеременной и обусловлена наличием случайной погрешности при измерениях сигналов на калибровочной трассе.

При рассмотрении вопроса о коррекции величины АОТ можно выделить три метода.

2. Метод нахождения систематических погрешностей в АОТ

Первый метод предполагает получение абсолютных значений «нулевых сигналов» или их относительного спектрального хода в нескольких участках спектра. Здесь под термином «нулевой сигнал» понимается интенсивность излучения I_0 до прохождения измерительной трассы, которая входит в закон Бугера $I = I_0 \exp(-\tau)$. Для проведения коррекции значений τ целесообразно использовать те участки спектра, где ослабление определяется только аэрозолем (за вычетом рэлеевского рассеяния) или где молекулярную компоненту ослабления можно учесть с приемлемой точностью. В остальных участках спектра «нулевые сигналы» на первом этапе можно брать произвольными, а методика нахождения поправок на этих длинах волн будет изложена в п. 3.

Систематические погрешности Δ_0 и Δ_i находят из условий минимума суммы

$$\Psi = \sum_{i=1}^n \left(K_i - \frac{\bar{\tau}_i - \Delta_0}{\bar{\tau}_i - \Delta_0 - \Delta_1} \right)^2 \quad (7)$$

и равенства нулю суммы

$$\sum_{i=1}^n \left(K_i - \frac{\bar{\tau}_i - \Delta_0}{\bar{\tau}_i - \Delta_0 - \Delta_1} \right) = 0, \quad (8)$$

где коэффициенты

$$K_i = \bar{\tau}'_i / \bar{\tau}'_1 = 1 / \prod_{j=1}^{i-1} K_{j,j+1} \quad (9)$$

представляют собой относительный спектральный ход средних скорректированных значений коэффициентов АОТ атмосферы для корректировочного массива. Из выражения (8) получаем

$$\Delta_1 = \bar{\tau}_1 - \Delta_0 - \left[\left(\sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i - n\Delta_0 \right) / \sum_{i=1}^n K_i \right]. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (7) и приравняв первую производную по Δ_0 от суммы ψ нулю, получаем выражение для нахождения Δ_0 :

$$\Delta_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i \sum_{i=1}^n K_i \bar{\tau}_i - \sum_{i=1}^n K_i \sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i^2}{n \sum_{i=1}^n K_i \bar{\tau}_i - \sum_{i=1}^n K_i \sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i} \quad (11)$$

Остальные погрешности Δ_i ($i = 2, \dots, n$) находятся из выражения

$$\Delta_i = \bar{\tau}_i - \Delta_0 - K_i(\bar{\tau}_i - \Delta_0 - \Delta_1). \quad (12)$$

3. Метод коррекции спектрального хода АОТ

Второй метод основан на использовании в качестве исходной τ на одной (j -й) длине волны и позволяет находить «нулевой сигнал» только в этом участке спектра. В других участках спектра «нулевые сигналы» выбираются произвольными, а полученные значения τ корректируются.

Величины поправок в аэрозольные оптические толщи атмосферы на текущей длине волны находятся из выражения

$$\Delta\tau_i = \bar{\tau}_i - \frac{K_i}{K_j} \bar{\tau}_j. \quad (13)$$

Абсолютные значения систематических погрешностей, привносимых при таком подходе в аэрозольные оптические толщи атмосферы на i -й длине волны, будут равны

$$\Delta_{0i} = \frac{K_i}{K_j} (\Delta_0 + \Delta_j), \quad (14)$$

а относительные

$$\frac{\Delta_{0i}}{\bar{\tau}_i} = \frac{\Delta_0 + \Delta_j}{\bar{\tau}_i K_j}, \quad (15)$$

где $\Delta_0 + \Delta_j$ – систематическая погрешность на исходной длине волны. Очевидно, что в качестве исходного следует выбирать участок спектра, где относительная погрешность минимальна. Если систематические погрешности $\Delta_0 + \Delta_j$ ($j = 1, \dots, n$) близки между собой в различных участках спектра, что имеет место в реальных атмосферных условиях, то минимальные значения выражения (15) получаются при максимальном коэффициенте K_j или максимальной аэрозольной оптической толщине τ'_i . Тогда при измерениях τ в широкой области спектра в качестве исходного следует брать коротковолновый участок спектра.

4. Нахождение АОТ методом «нулевой точки»

Третий метод «нулевой точки» предполагает приравнивание нулю минимального значения АОТ

в одном участке исследуемой области спектра. Этим методом можно пользоваться при отсутствии «нулевых сигналов» во всей исследуемой области спектра или когда в экспериментальных массивах имеются отрицательные значения АОТ, выходящие за пределы случайной погрешности вычисления АОТ.

Процедура нахождения абсолютных значений τ заключается в следующем. Задаются произвольные «нулевые сигналы» для всех участков спектра, берется в качестве исходного τ на любой длине волны, и по методике, изложенной в п. 3, находятся скорректированные значения АОТ атмосферы. В полученном таким образом массиве находится участок спектра, где получились наименьшие значения τ , они проверяются на достоверность и из них выбирается минимальное значение, которое полагается равным нулю. Пусть минимальное значение τ оказалось равным τ_{0j} . Тогда скорректированное среднее значение τ на j -й длине волны

$$\bar{\tau}'_j = \bar{\tau}_j - \tau_{0j}. \quad (16)$$

Поправки в τ на других длинах волн находятся из выражения

$$\Delta\tau_i = \bar{\tau}_i - \frac{K_i}{K_j} (\bar{\tau}_j - \tau_{0j}), \quad (17)$$

а текущие скорректированные значения АОТ атмосферы

$$\tau'_i = \tau_i - \bar{\tau}_i + \frac{K_i}{K_j} (\bar{\tau}_j - \tau_{0j}). \quad (18)$$

Полученные таким образом значения представляют собой нижнюю оценку τ .

Следует заметить, что для использования этого подхода необходимо иметь достаточно длинные ряды наблюдений τ , так как при этом возрастает вероятность появления значений τ , близких к нулю в исследуемой области спектра. Подтверждением правомочности использования этого подхода может служить наличие в экспериментальных массивах значений τ , равных нулю или отличающихся от нуля не более чем на величину случайной погрешности единичного измерения ϵ .

Заключение

Таким образом, предложенные методы коррекции позволяют найти абсолютные значения аэрозольных оптических толщ атмосферы без проведения калибровки измерительного прибора во всей исследуемой области спектра, а также указать на возможные систематические погрешности при выделении аэрозольного ослабления классическими методами.

Работа выполнена в рамках программы научной школы члена-корреспондента РАН М.В.Кабанова (НШ-1008.2003.5).

1. Giver L.H., Chackerian C.Jr., Varanasi P. Visible and near-infrared H216O line intensity corrections for

- HITRAN-96 // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2000. V. 66. P. 101–105.
2. Rothman L.S., Barbe A., Chris Benner D., Brown L.R., Camy-Peyret C., Carleer M.R., Chance K., Clerbaux C., Dana V., Devi V.M., Fayt A., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Jacquemart D., Jucks K.W., Lafferty W.J., Mandin J.-Y., Massie S.T., Nemtchinov V., Newnham D.A., Perrin A., Rinsland C.P., Schroeder J., Smith K.M., Smith M.A.H., Tang K., Toth R.A., Vander Auwera J., Varanasi P., Yoshino K. The HITRAN molecular spectroscopic database: edition of 2000 including updates through 2001 // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2003. V. 82. P. 5–44.
 3. Щелканов Н.Н. Метод коррекции спектрального хода аэрозольной оптической толщи атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7. № 7. С. 880–885.
 4. Зайдель А.Н. Погрешности измерений физических величин. Л.: Наука, 1985. 112 с.
 5. Щелканов Н.Н. Обобщенный метод построения линейной регрессии и его применение для построения однопараметрических моделей аэрозольного ослабления // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 1–2. С. 86–90.
 6. Щелканов Н.Н. Исследование ослабления оптического излучения аэрозолями и водяным паром в атмосфере аридной зоны: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: ИОА СО РАН, 1997. 22 с.

N.N. Shchelkanov. Methods of atmospheric aerosol optical thickness correction along horizontal and slant paths.

Three improved methods of atmospheric aerosol optical thickness (AOT) correction are presented. The first method is intended for obtaining AOT absolute values or their relative spectral behavior in several spectral parts. The method allows finding and excluding systematic errors in AOT. The second one premises the presence of AOT absolute value only in one spectral part; in other parts of the spectra AOT values are corrected. The third method is used in the absence of AOT absolute values or their relative spectral behavior. It is called «zero point» method and premises an equating to zero of the AOT minimal value in one spectral part. To relate different AOT spectral parts, a generalized linear regression formula is used in the new methods derived based on taking into account random errors in the used data.