

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.42

С.Л. Бондаренко, В.В. Зуев, Б.С. Костин

МЕТОД АЭРОЗОЛЬНОЙ КОРРЕКЦИИ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ТРОПОСФЕРНОГО
ОЗОНА С ПОМОЩЬЮ МНОГОЧАСТОТНОГО ЛИДАРА

Предлагается метод аэрозольной коррекции, основанный на использовании многочастотного лидара с рабочими длинами волн 0,277; 0,313; 0,532 и 1,064 мкм. На длине волны 0,532 мкм измеряется также сигнал вращательного комбинационного рассеяния. Численные эксперименты показали практическую применимость предлагаемого метода.

В данной статье рассматривается метод аэрозольной коррекции при зондировании тропосферного озона. В методе предполагается использование лидара с рабочими длинами волн $\lambda_i = 0,277; 0,313; 0,532$ и $1,064$ мкм, причем на длине волны $0,532$ мкм используется также сигнал чисто вращательного комбинационного рассеяния света на молекулах азота и кислорода.

Уравнения лазерного зондирования, записанные для двух длин волн $\lambda_i = 0,277$ и $0,313$ мкм, служат для определения искомой концентрации озона по методу дифференциального поглощения. Обозначим $\lambda_{on} = 0,277$ мкм, $\lambda_{of} = 0,313$ мкм и запишем выражение для искомой концентрации озона в виде [1]:

$$\rho(h'_l) = \frac{1}{2 [k(\lambda_{on}, h'_l) - k(\lambda_{of}, h'_l)] \Delta h} \left\{ \ln \frac{P(\lambda_{on}, h_l) P(\lambda_{of}, h_{l+1})}{P(\lambda_{on}, h_{l+1}) P(\lambda_{of}, h_l)} + B(h'_l) + T(h'_l) \right\}. \quad (1)$$

В выражении (1) $k(\lambda_{on}, h_l)$ и $k(\lambda_{of}, h_l)$ – коэффициенты поглощения соответственно для λ_{on} и λ_{of} ; $P(\lambda_{on}, h_l)$ и $P(\lambda_{of}, h_l)$ – лидарные сигналы, зарегистрированные на тех же длинах волн с высоты h_l , ($h_l = h_{l-1} + \Delta h$, $l = 1, 2, \dots$), $B(h'_l)$ и $T(h'_l)$ – корректировочные коэффициенты, которые определяются по формулам (2) и (3).

$$B(h'_l) = - \ln \frac{\beta_{\pi}(\lambda_{on}, h_l) \beta_{\pi}(\lambda_{of}, h_{l+1})}{\beta_{\pi}(\lambda_{on}, h_{l+1}) \beta_{\pi}(\lambda_{of}, h_l)} \quad (2)$$

и

$$T(h'_l) = - \{ [\beta_{ex}(\lambda_{on}, h_l) + \beta_{ex}(\lambda_{on}, h_{l+1})] - [\beta_{ex}(\lambda_{of}, h_l) + \beta_{ex}(\lambda_{of}, h_{l+1})] \} \Delta h. \quad (3)$$

В выражениях (2) и (3) $\beta_{\pi}(\lambda_i, h_l) = \beta_{\pi}^a(\lambda_i, h_l) + \beta_{\pi}^m(\lambda_i, h_l)$ – суммарные коэффициенты (аэрозольные и молекулярные) обратного рассеяния, взятые соответственно на длинах волн λ_{on} или λ_{of} ; $\beta_{ex}(\lambda_i, h_l) = \beta_{ex}^a(\lambda_i, h_l) + \beta_{sc}^m(\lambda_i, h_l)$ – суммарные коэффициенты ослабления, взятые на тех же длинах волн. Из выражений (1) – (3) видно, что они содержат шесть неизвестных величин. Помимо искомого профиля концентрации и профиля коэффициента обратного молекулярного рассеяния, который описывает поведение молекулярной компоненты, в указанные уравнения входят два профиля коэффициента обратного рассеяния и два профиля коэффициента ослабления, описывающие аэрозольную компоненту. Поскольку из двух уравнений можно определить две неизвестные величины, то используем уравнение зондирования для определения молекулярной компоненты, записанное для длины волны $0,313$ мкм. Три уравнения зондирования для длин волн $\lambda = 0,532$ и $1,064$ мкм, включая уравнение для чисто вращательного комбинационного рассеяния света на молекулах азота и кислорода для длины волны $0,532$ мкм, используются для определения аэрозольной компоненты.

Об определении аэрозольной компоненты следует сказать особо. Известно [2], что между спектральным поведением двух оптических характеристик, входящих в уравнения лазерного зондирования, существует определенная связь. Запишем аэрозольные коэффициенты обратного рассеяния и ослабления в виде:

$$\beta_{\pi}^a(\lambda_i, h_i) = \int_{R_1}^{R_2} K_{\pi}(r, m(\lambda_i, h_i), \lambda_i) \pi r^2 n(r, h_i) dr; \quad (4)$$

$$\beta_{ex}^a(\lambda_i, h_i) = \int_{R_1}^{R_2} K_{ex}(r, m(\lambda_i, h_i), \lambda_i) \pi r^2 n(r, h_i) dr. \quad (5)$$

Напомним, что приведенные уравнения для оптических характеристик записаны в приближении сферических однородных частиц. В выражениях (4) и (5) $s(r, h_i) = \pi r^2 n(r, h_i)$ – спектр размеров частиц; $m(\lambda_i, h_i) = \bar{m}(\lambda_i, h_i) - i\kappa(\lambda_i, h_i)$ – комплексный показатель преломления аэрозоля, который относится ко всему спектру и характеризует спектральную зависимость $m(\lambda) = \bar{m}(\lambda) - i\kappa(\lambda)$. Допустим, что на высоте h_i существуют частицы, имеющие распределение (спектр) по размерам $s(r, h_i)$. Этому распределению соответствует спектральная зависимость показателя преломления $m(\lambda)$, относящаяся ко всем частицам. Очевидно, что эти два микрофизических параметра аэрозоля определяют и величину, и спектральное поведение оптических характеристик и тем самым обеспечивают указанное соответствие между ними. Следует обратить внимание на то, что уравнения (4) и (5) являются линейными интегральными уравнениями относительно спектра размеров частиц $s(r)$. Показатель преломления аэрозольных частиц входит в выражения для факторов эффективности, причем нелинейно. О нелинейной зависимости говорит анализ поведения оптических характеристик, рассчитанных для различных показателей преломления.

Специфика рассматриваемой задачи состоит в том, что по аэрозольному коэффициенту обратного рассеяния определяется спектр размеров частиц, с помощью которого рассчитывается коэффициент ослабления. То есть строится оператор W , подробно рассмотренный в [2], который не зависит от спектра размеров. Для построения оператора W необходимо предположение о сферичности рассеивающих частиц, а также знание показателя преломления и граничных размеров, в которых локализован спектр. Поскольку спектр играет вспомогательную роль и необходим для оценки граничных размеров, то при решении рассматриваемой задачи можно обойтись алгоритмами, которые требуют минимального количества длин волн. В частности, таковыми являются алгоритмы оптимальной параметризации (метод модельных оценок), при практическом использовании которых можно обойтись двумя длинами волн [2]. Это $\lambda_i = 0,532$ и $1,064$ мкм, которые служат для оценки спектра размеров частиц.

Очевидно, что полученный таким образом спектр размеров частиц будет зависеть от величины показателя преломления частиц, поэтому необходима его оценка. Для решения этой задачи в предлагаемом методе используется сигнал вращательного комбинационного рассеяния света на длине волны $0,532$ мкм. Особенность измерений на этой длине волны состоит в том, что коэффициент обратного чисто вращательного комбинационного рассеяния с большой степенью точности равен коэффициенту молекулярного обратного рассеяния [3]. Опуская аргумент λ , запишем уравнение для сигналов чисто вращательного комбинационного рассеяния:

$$P^R(h_i) = P_0^R h_i^{-2} b \Delta h \beta_{\pi}^m(h_i) T_a^2(h_i) T_m^2(h_i);$$

$$T_a^2(h_i) = \exp \left\{ -2 \int_0^{h_i} \beta_{ex}^a(z) dz \right\}; \quad T_m^2(h_i) = \exp \left\{ -2 \int_0^{h_i} \beta_{sc}^m(z) dz \right\}, \quad (6)$$

где $P^R(h_i)$ – принимаемые сигналы чисто вращательного комбинационного рассеяния; b – калибровочная константа; $\beta_{\pi}^m(h_i)$ – коэффициент обратного молекулярного рассеяния; $T_a^2(h_i)$ и $T_m^2(h_i)$ – соответственно квадраты аэрозольной и молекулярной прозрачности.

Из уравнения (6) следует, что в принимаемом сигнале от величины показателя преломления аэрозольных частиц зависит только коэффициент аэрозольного ослабления, входящий в

выражение для квадрата аэрозольной прозрачности. Необходимо заметить, что зависимость факторов эффективности в выражениях (4) [или (5)] от показателя преломления аэрозольных частиц неизвестна. Также неизвестна и $m(\lambda)$, отнесенная ко всему спектру. Поэтому для определения показателя преломления воспользуемся следующей процедурой. Зададим априори некоторую область изменения действительной $[\bar{m}_1, \bar{m}_2]$ и мнимой $[\kappa_1, \kappa_2]$ частей показателя преломления аэрозольных частиц. Для каждого комплексного числа $m = \bar{m} - i\kappa$, образованного произвольно выбранными значениями действительной части из заданной области ($\bar{m} \in [\bar{m}_1, \bar{m}_2]$) и мнимой части ($\kappa \in [\kappa_1, \kappa_2]$), разделяются компоненты рассеяния, то есть определяются коэффициенты аэрозольного и молекулярного рассеяния [4]. В соответствии с (6) рассчитываются сигналы чисто вращательного комбинационного рассеяния для длины волны 0,532 мкм.

Рассчитанные сигналы, вследствие специфики алгоритма разделения компонент рассеяния [4], должны зависеть от показателя преломления аэрозольных частиц. Следовательно, разность между измеренным сигналом P_u^R чисто вращательного комбинационного рассеяния на длине волны 0,532 мкм, который практически слабо зависит от показателя преломления аэрозольных частиц, и такими же сигналами P^R , но рассчитанными при различных значениях ($\bar{m} \in [\bar{m}_1, \bar{m}_2]$) и ($\kappa \in [\kappa_1, \kappa_2]$), будет характеризовать величину показателя преломления при каждом значении h_i . Искомое значение показателя преломления находится из условия минимума отношения:

$$(|P^R - P_u^R|)/P_u^R = \min_{m,k}$$

Отметим некоторые принципиальные особенности алгоритма, не останавливаясь более на его описании. Первая особенность связана с тем, что длина волны 0,313 мкм, предназначенная для определения молекулярной компоненты, лежит в полосе поглощения озона. Поэтому алгоритм строится по методу итераций, причем в качестве первого приближения принимается $\rho_1(h_i) \equiv 0$. Алгоритм сходится достаточно быстро, так как число итераций не превосходило пяти. Вторая особенность связана с калибровкой лидара. Многочастотный лидар, предназначенный для зондирования тропосферы, калибруется по горизонтальной трассе с помощью экрана с известным коэффициентом отражения. Одновременно с калибровочными константами определяются и аэрозольные коэффициенты обратного рассеяния и ослабления. По этим значениям аэрозольных коэффициентов с помощью специальной программы определяются показатели преломления, которые принимаются в качестве начальных условий при интерпретации сигналов.

Предлагаемый метод исследовался путем проведения численных экспериментов для различных моделей молекулярной атмосферы [5]. Оптические характеристики аэрозоля в этих экспериментах рассчитывались для континентальной модели L Джейрменджана [6]. В расчетах использовались различные модели показателя преломления аэрозольных частиц [7]. На рассчитанные профили сигналов наносилась ошибка, распределенная по закону Пуассона и равная 5% от значения рассчитанных сигналов.

Результаты экспериментов показали, что во всех случаях, когда отсутствует значительное изменение показателя преломления частиц по трассе зондирования, искомый профиль концентрации озона вычисляется достаточно точно. В тех же случаях, когда изменение показателя преломления аэрозольных частиц велико, отклонение восстановленных значений концентрации озона от точных также весьма существенно. Остановимся на этих численных экспериментах подробнее. Пример значительного изменения показателя преломления аэрозольных частиц представлен на рис. 1 и 2. На рис. 1 показан профиль коэффициента обратного рассеяния для длины волны 0,313 мкм. На рис. 2 приведен профиль величины, обратной к лидарному отношению. Чтобы удовлетворить приведенным на рисунках требованиям, для высот меньше 0,9 и больше 2,2 км оптические характеристики аэрозоля рассчитывались по модели L для показателя преломления $m = 1,470 - i0,001$. Это значение показателя преломления ближе всего соответствует частицам морских солей. Спектральная зависимость показателя преломления для частиц морских солей, в соответствии с данными работы [7], выбрана постоянной. Для высот между 0,9 и 2,2 км оптические характеристики аэрозоля рассчитывались для модели L и показателя преломления $m = 1,470 - i0,022$. Ввиду отсутствия спектральной модели для данного показателя преломления он также выбран постоянным для всех длин волн.

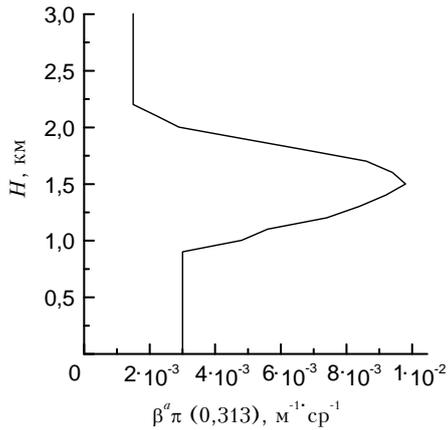


Рис. 1. Профиль коэффициента обратного рассеяния для длины волны 0,313 мкм

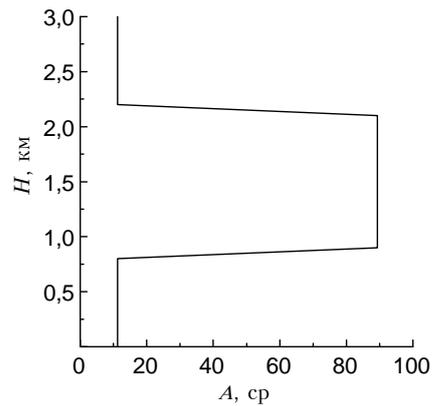


Рис. 2. Профиль величины A , обратной к лидарному отношению, для длины волны 0,532 мкм

На рис. 3 приведены профили отношения $|P^R - P_u^R|/P_u^R$, рассчитанные для длины волны 0,532 мкм в зависимости от действительной и мнимой частей показателя преломления аэрозольных частиц для двух точек трассы зондирования. Представленный результат на рис. 3, *a* относится к точке трассы зондирования, равной 0,9 км. Из рисунка видно, что существует минимум при $m = 1,470 - i0,020$. Это значение показателя преломления достаточно близко к точному значению. На рис. 3, *б* представлен результат, относящийся к точке трассы зондирования, равной 2,2 км. Из рисунка видно, что существует минимум при $m = 1,470 - i0,0$. Это значение показателя преломления также достаточно близко к своему точному значению. Из рис. 3, *б* также видно, что области изменения действительной и мнимой частей показателя преломления соответственно равны $\bar{m} \in [1,540; 1,460]$ и $\kappa \in [0; 0,006]$. Если взять показатель преломления $m = 1,450 - i0,0$, то отношение становится чрезмерно большим, что свидетельствует о расходимости решения. Аналогичная ситуация возникает и при показателе преломления $m = 1,470 - i0,007$.

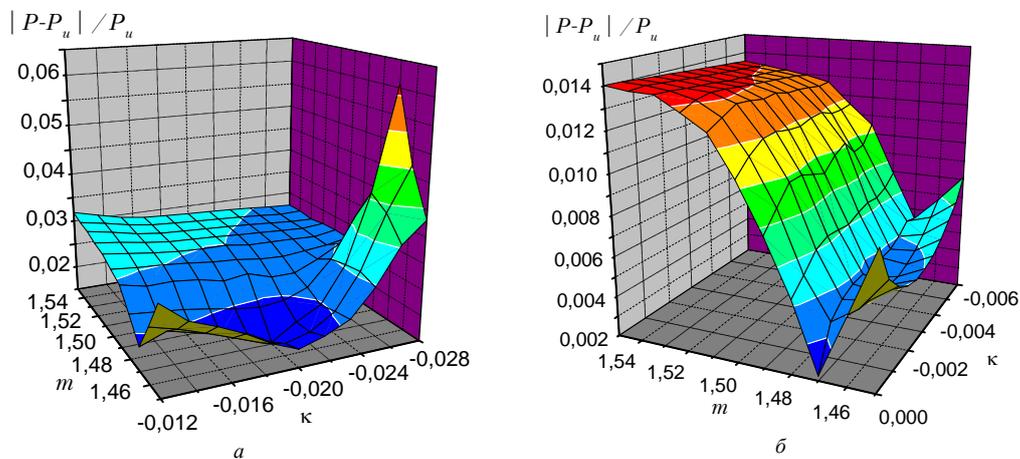


Рис. 3. Отношение сигналов комбинационного рассеяния для длины волны 0,532 мкм в зависимости от действительной и мнимой частей показателя преломления аэрозольных частиц для двух точек трассы зондирования. *a* – 0,9 км; *б* – 2,2 км

При увеличении действительной части показателя преломления отношение возрастает и стремится к некоторой величине, не зависящей от величины мнимой части. Это в равной степени касается и результатов, приведенных на рис. 3, *a*. При показателе преломления $m = 1,470 - i0,029$ отношение становится очень большим, то же при $m = 1,450 - i0,010$. Минимум в этом случае менее выражен. При увеличении действительной части отношение стремится к некоторой величине, слабо убывающей с ростом мнимой части.

Чтобы подвести итог, посмотрим как ведут себя восстановленные значения концентраций озона. На рис. 4 показано отклонение восстановленных значений концентрации от точных значений.

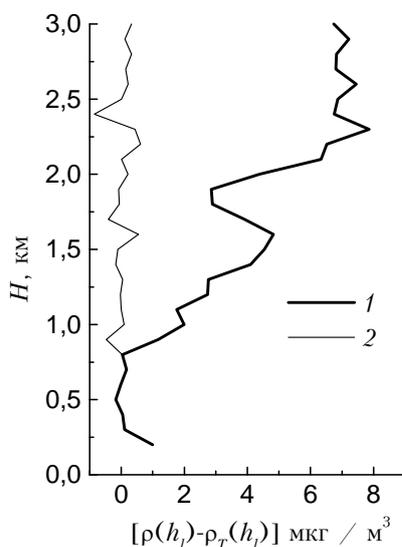


Рис. 4. Профили отклонения восстановленных концентраций озона от точных значений

Кривая 1 на рисунке показывает отклонение значений при показателе преломления, определенном при калибровке лидара и постоянном для всей трассы зондирования. Отклонение, удовлетворительное в начале трассы, начиная с высоты 0,9 км, увеличивается и достигает максимума на высоте 2,2 км. Кривая 2 получена при показателе преломления аэрозольных частиц, определенном по предлагаемой методике.

1. Л а з е р н ы й контроль атмосферы / Под ред. Э.Д. Хинкли. М.: Мир, 1979. 416 с.
2. Зуев В.Е., Нац И.Э. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1982. 241 с.
3. Волков С.Н., Кауль Б.В. // Оптика атмосферы и океана. 1984. Т. 7. N. 11–12. С. 1592–1602.
4. Зуев В.Е., Зуев В.В., Костин Б.С. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 6. N. 10. С. 1076–1080.
5. Ипполитов И.И., Комаров В.С., Мицель А.А. // Спектроскопические методы зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1985. С. 4–44.
6. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 165 с.
7. Nilsson B. // Appl. Opt. 1979. V. 18. N 20. P. 3457–3473.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
28 декабря 1995 г.

S.L. Bondarenko, V.V. Zuev, B.S. Kostin. **Aerosol Correction Method in Sounding Tropospheric Ozone by Multifrequency Lidar.**

The method of aerosol correction is proposed based on the use of multifrequency lidar at 0,277; 0,313; 0,532, and 1,064 μm working wavelengths. At 0,532 μm wavelength the signal of rotational Raman scattering was also measured. The numerical experiments have shown the practical applicability of the method proposed.