

С.Л. Бондаренко, А.В. Ельников, В.В. Зуев, В.Н. Маричев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ОЗОНА ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ЛИДАРНЫМ МЕТОДОМ НА ДЛИНАХ ВОЛН 308 И 532 НМ

Дано краткое описание методики зондирования концентрации озона на разнесенных длинах волн $\lambda_1 = 308$ и $\lambda_2 = 532$ нм, требующей корректного пересчета влияния аэрозоля с λ_1 на λ_2 . На основе математической обработки эмпирических данных с использованием различных аэрозольных моделей обсуждаются вопросы точности восстановления O_3 .

Метод лазерного зондирования атмосферного озона на длинах волн 308 и 532 нм используется в настоящее время для регулярных измерений озонного слоя [1, 2]. Методика обработки данных лидарных измерений для определения концентрации озона таким методом [4] требует большого объема вычислений. Кроме того, необходим анализ возможности использования для расчета различных оптических моделей аэрозольного и молекулярного рассеяния, а также анализ точностных характеристик такой оценки.

Рассчитаем концентрацию озона $\rho(h)$, используя данные лидарных измерений. Известно, что $\rho(h)$ согласно лидарному уравнению можно определить как сумму трех составляющих:

$$\rho(h) = \rho_1(h) + \rho_2(h) + \rho_3(h),$$

где

$$\rho_1(h) = \frac{1}{2\sigma\Delta h 10^{-5}} \ln \frac{\beta_{\pi}(h + \Delta h)}{\beta_{\pi}(h)} \quad (1)$$

$$\rho_2(h) = -\alpha \cdot 10^{-5}/\sigma \quad (2)$$

$$\rho_3(h) = \frac{1}{2\sigma\Delta h 10^{-5}} \ln \frac{N(h)h^2}{N(h + \Delta h)(h + \Delta h)^2}, \quad (3)$$

где $\rho(h)$ — определена в $1/\text{см}^3$; $\beta_{\pi}(h)$ — объемный коэффициент обратного рассеяния, км^{-1} ; σ — сечение поглощения молекулы озона на $\lambda = 308$ нм; $\sigma = 1,4 \cdot 10^{-19} \text{ см}^2$; h — высота, км; α — объемный коэффициент рассеяния, км^{-1} ; Δh — пространственное разрешение, км; $N(h)$ — величина отраженного сигнала для $\lambda = 308$ нм.

Объемный коэффициент обратного рассеяния β_{π} является суммой объемных коэффициентов аэрозольного и молекулярного рассеяния $\beta_{\pi a} + \beta_{\pi m}$.

$$\beta_{\pi}(h) = \beta_{\pi a}(h) + \beta_{\pi m}(h). \quad (4)$$

Последние связаны между собой отношением рассеяния:

$$R(h) = \frac{\beta_{\pi a}(h) + \beta_{\pi m}(h)}{\beta_{\pi m}(h)}. \quad (5)$$

Пересчет данных молекулярного рассеяния для тех длин волн λ_x , для которых отсутствуют модельные значения коэффициентов молекулярного рассеяния, осуществляется по значениям $\beta_{\pi m}$, известным для длины волны λ_0 , при помощи коэффициента K_m , который выражает связь между молекулярным рассеянием на различных длинах волн и равен $(\lambda_x/\lambda_0)^{-4}$

$$\beta_{\pi m}(\lambda_x) = K_m \beta_{\pi m}(\lambda_0). \quad (6)$$

Объемный коэффициент рассеяния в (2) представляет собой сумму объемных коэффициентов молекулярного α_m и аэрозольного α_a рассеяния, связанных с $\beta_{\pi a} + \beta_{\pi m}$ соотношениями:

$$\alpha_M(h) = \frac{8\pi}{3} \beta_{\text{LM}} \cdot \beta_{\text{LM}}(h); \quad (7)$$

$$\alpha_A(h) = \beta_{\text{LA}}(h)/q, \quad (8)$$

где q – лидарное отношение (в [5] принимается $q = 0,03$).

В методике [3] связь между аэрозольным и молекулярным рассеянием на длинах волн 308 и 532 нм определена при помощи корректирующего коэффициента $\mu = 1,8$. При этом

$$\beta_{\text{LA308}}(h) = \mu \cdot \beta_{\text{LM532}}(h) \cdot \{R(h) - 1\}. \quad (9)$$

Тогда формулы (2), (3) принимают вид

$$\rho_1(h) = \frac{1}{2 \cdot \sigma \cdot \Delta h \cdot 10^{-5}} \ln \frac{\beta_{\text{LM}}(h + \Delta h) \cdot \{1 + \mu \cdot (R(h + \Delta h) - 1)\}}{\beta_{\text{LM}}(h) \cdot \{1 + \mu \cdot (R(h) - 1)\}}; \quad (10)$$

$$\rho_2(h) = - \left(\frac{8\pi}{3} + \mu \{R(h) - 1\} / 0,03 \right) \cdot \frac{\beta_{\text{LM}}(h) \cdot 10^{-5}}{\sigma}. \quad (11)$$

Приведенные выше общие соотношения позволяют оценить концентрацию озона по данным лидарных измерений. Но остается открытым вопрос о том, насколько критично восстановление концентрации озона из лидарных данных к выбору оптической модели рассеяния, главным образом аэрозольного. Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим несколько вариантов.

В а р и а н т 1. Рассчитаем концентрацию озона по формулам (3), (10), (11). Коэффициент μ удобнее представить в виде $\mu(h) = K_M \cdot K_A$, где значение K_M известно из формулы (6), а коэффициент K_A задается постоянной величиной на всей вертикальной трассе зондирования и варьируется в диапазоне от 0 (что соответствует полному неучету аэрозольного рассеяния на длине волны 308 нм) до 1 (заведомо завышенной оценке аэрозольного рассеяния). Для расчета концентрации озона используется модель молекулярного рассеяния ([7] или [5]).

В а р и а н т 2. Метод расчета концентрации озона [4], основанный на использовании данных по аэрозольному рассеянию из среднециклической модели [6], позволяем для определения $\rho(h)$ применить формулы (3), (10), (11). Полагая, что корректирующий коэффициент μ изменяется с изменением высоты, и используя имеющиеся в [6] значения объемных коэффициентов обратного рассеяния для 248, 347 и 530 нм, рассчитаем коэффициент $\mu(h)$:

$$\mu(h) = \frac{\beta_{\text{LA248}}(h) + \beta_{\text{LA347}}(h)}{\beta_{\text{LA530}}(h)}, \quad (12)$$

где $\beta_{\text{LA248}}(h)$, $\beta_{\text{LA347}}(h)$, $\beta_{\text{LA530}}(h)$ – объемные коэффициенты обратного аэрозольного рассеяния на длинах волн 248, 347 и 530 нм ($\beta_{\text{LA532}} \approx \beta_{\text{LA530}}$).

В этом случае значения коэффициента $\mu(h)$ изменяются в пределах 0,8–1,9 [4]. Значения коэффициентов обратного молекулярного рассеяния на 532 нм можно взять из [7].

В а р и а н т 3. Для определения концентрации озона по формулам (1–3) можно использовать модель Мак-Клатчи, для которой известны значения объемных коэффициентов аэрозольного и молекулярного рассеяния [5] на длине волны 337 нм. Полагая, что

$$\alpha_{A308}(h) \simeq \alpha_{A337}(h),$$

из формулы (8) можно получить значения $\beta_{\text{LA308}}(h)$. Значения $\beta_{\text{LM337}}(h)$ определяют из формулы (7), пересчитывая их затем для длины волны 308 нм по формуле (6).

Приведенные на рис. 1–5 результаты вычислений позволяют сравнить вертикальные распределения концентрации озона, рассчитанные для трех вариантов по данным лидарных измерений [2] в диапазоне высот 8–17 км.

На рис. 1 представлены кривые распределения по высоте трех гипотетических составляющих концентрации озона для различных значений коэффициента K_A . Очевидно, что при изменении K_A и первая, и вторая компоненты в равной мере влияют на ход кривой суммарного распределения (третья компонента не связана с коэффициентом K_A).

На рис. 2 изображены кривые распределения концентрации озона при изменении коэффициента K_A от 0 до 1. Максимальное изменение профиля концентрации при этом составляет 32% на высоте 12 км, а минимальное равно 0 на высоте 16 км.

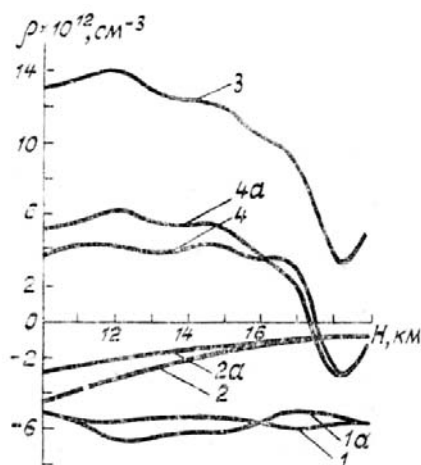


Рис. 1. Распределение концентрации озона (расчет по варианту 1): для $K_a = 1$: 1- ρ_3 , 2- ρ_2 , 4- ρ ; для $K_a = 0$: 1 $_a$ - ρ_3 , 2 $_a$ - ρ_2 , 4 $_a$ - ρ ; 3- ρ_3 (одинаковая для всех K)

Из рис. 3 видно, что распределения $\rho(h)$, рассчитанные по первому (для $K_a = 0,4$) и третьему варианту, практически совпадают, максимальная вариация значений при этом составляет 5,2%.

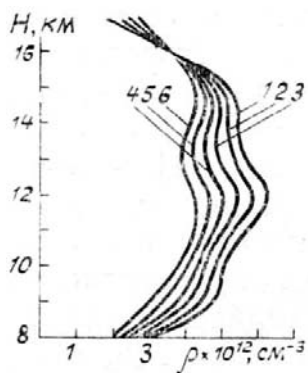


Рис. 2. Распределение концентрации озона (расчет по варианту 1): 1- $K_a = 0$; 2- $K_a = 0,2$; 3- $K_a = 0,4$; 4- $K_a = 0,6$; 5- $K_a = 0,8$; 6- $K_a = 1$

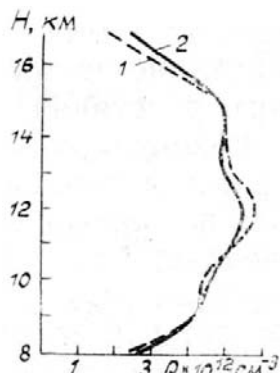


Рис. 3. Распределение концентрации озона: 1-расчет по варианту 3; 2-расчет по варианту 1 для $K_a = 0,4$

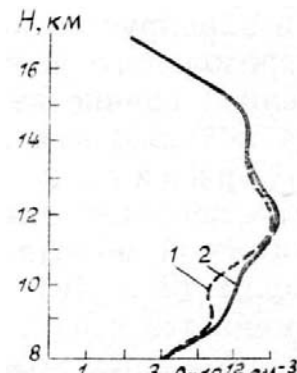


Рис. 4. Распределение концентрации озона: 1-расчет по варианту 2; 2-расчет по варианту 1 для $K_a = 0,1$

Расчитанные по первому и второму вариантам кривые распределений концентрации озона (рис. 4) также совпадают, за исключением области 9-11 км, где наблюдается отклонение (18%) в сторону уменьшения концентрации. Вместе с тем изменение профиля концентрации озона при расчете, основанном на использовании данных среднециклической модели, обусловлено вариациями коэффициентов обратного рассеяния, которые могут достигать сотен процентов в зависимости от правильного прогноза химического состава и соответственно оптических постоянных аэрозоля.

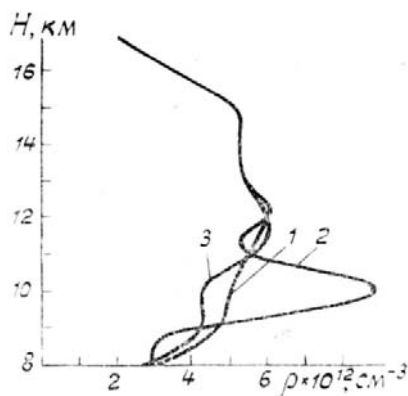


Рис. 5. Распределение концентрации озона (расчет по варианту 2): 1-для $+\delta\beta_a$; 2-для $-\delta\beta_a$; 3-для $\delta\beta_a = 0$

На рис. 5 приведены кривые высотного распределения концентрации озона, рассчитанные по второму варианту с учетом среднеквадратических отклонений ($+\delta\beta_a$) объемных коэффициентов обратного рассеяния на $\lambda = 532$ нм [6]. Наибольший разброс значений распределений $\rho(h)$ при учете ($\pm\delta\beta_a$) наблюдается в диапазоне высот 9–11 км, при этом максимальное отклонение на высоте 10 км для отрицательной поправки ($-\delta\beta_a$) равно 110%. Для положительной ($+\delta\beta_a$) — 16%. При выборе для расчета концентрации озона значений $\beta_a(h)$ с учетом $+\delta\beta_a(h)$ кривая распределения $\rho(h)$ полностью совпадает с кривой $\rho(h)$, рассчитанной по первому варианту для $K_a = 0,1$.

Приведенный анализ показывает, что расчет вертикального распределения концентрации озона, выполненный на основе лидарных измерений с использованием коррекции отношения рассеяния из области $\lambda = 532$ нм на область $\lambda = 308$ нм (вариант 1), хорошо согласуется с расчетом $\rho(h)$, выполненным для модельных значений коэффициентов рассеяния (варианты 2, 3), при условии, что коэффициент K_a выбран из интервала значений 0,1–0,4.

Как видно из рис. 2, изменение коэффициента K_a на 0,2 приводит к максимальному изменению расчетных значений $\rho(h)$ на 3%, что не превышает максимального расхождения значений $\rho(h)$, рассчитанных для варианта 1 с значениями $\rho(h)$, рассчитанными по другим вариантам. Таким образом, при расчете концентрации озона допустимо задать K_a равным среднему значению из вышеопределенного интервала, а именно $K_a = 0,25$ и использовать первый вариант расчета для восстановления концентрации озона по данным лидарных измерений.

1. Uchino S., Maeda M., Yamamura H., Hirono M. // J. Geophys. Res. 1983. V. 88. № C9. P. 5273–5280.
2. Ельников А. В., Зуев В. В., Маричев В. Н., Царегородцев С. И. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 9. С. 995–997.
3. Uchino O., Maeda M., Shibata T. // Appl. Optics. 1980. V. 19. № 24. P. 4175–4181.
4. Ельников А. В., Маричев В. Н. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 5. С. 77–83.
5. McClatchey R. A., Fenn R. W., Selbi E. A. J. E. A. Optical properties of the atmosphere. Environment res. paper. AFGL-0279. 1979. № 354.
6. Зуев В. Е., Креков Г. М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1986. С. 156–166.
7. Ипполитов И. И., Комаров В. С., Мицель А. А. // Спектроскопические методы зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1985. С. 4–44.

Институт оптики атмосферы СО АН СССР,
Томск

Поступила в редакцию
20 ноября 1989 г.

S. L. Bondarenko, A. V. El'nikov, V. V. Zuev, V. N. Marichev. Determination of the Ozone Number Density from the Data of Lidar Sensing at the Wavelengths 308 and 532 nm.

The paper presents a description of the technique for sensing the ozone at two wavelengths (308 and 532 nm). This technique requires a correct recalculation of the aerosol scattering at λ_1 to λ_2 .

The paper also discusses the question on the ozone number density restitution based on the mathematical processing of the experimental data using different models of the atmospheric aerosol.