

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ОПТИКИ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА

УДК 528.8.044.6+528.813

А. А. Мицель, И. В. Пташник

**МНГОВОЛНОВОЙ МЕТОД ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ
СПЕКТРАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ НЕБА В ЗЕНИТЕ**

Описана новая многоволновая методика определения ОС озона и аэрозольной оптической толщи из спектров рассеянного в зените излучения. Приведены результаты численного моделирования и обработки реальных сигналов, подтверждающие эффективность предложенной методики.

В работе [1] рассмотрены и апробированы две методики (дифференциальная двухволновая и четырехволновая) определения общего содержания (ОС) озона (ОСО) и диоксида азота по результатам измерений спектральной яркости неба в зените в УФ-области спектра на основе модели однократного рассеяния света в атмосфере. Благодаря практически непрерывным спектрам сигналов (шаг по длине волны составлял 0,1 нм), удалось реализовать статистическую обработку сигналов по обеим методикам, что, несомненно, повысило достоверность полученной информации об общем содержании газов. Не обсуждая здесь достоинства и недостатки каждой из этих методик, отметим лишь, что все они позволяют определять только содержание исследуемого газа. В данной работе предлагается многоволновая методика обработки данных, позволяющая помимо общего содержания газа определять также аэрозольную оптическую толщину.

Многоволновые методики уже давно разрабатываются и используются в пассивном зондировании по прямому солнечному излучению [2–7]. Однако нам неизвестно о работах подобного рода в применении к зондированию по рассеянному излучению.

Так же как и в работе [1], за основу возьмем решение уравнения переноса в приближении однократного рассеяния для безоблачной атмосферы. Тогда для наземного прибора с линией визирования в направлении в зенит и для не слишком больших зенитных углов Солнца ($\theta \leq 75^\circ$) измеряемые сигналы $J(\lambda)$ связаны с атмосферными параметрами следующим выражением:

$$J(\lambda) = S_0(\lambda) C(\lambda) \int_0^H d(\lambda, \theta, z) \exp \left[- \int_0^z \alpha_{\Sigma}(\lambda, z') dz' - \frac{1}{\mu} \int_z^H \alpha_{\Sigma}(\lambda, z') dz' \right] dz; \tag{1}$$

$$\alpha_{\Sigma}(\lambda, z) = k_g(\lambda, z) \rho_g(z) + \alpha_{am}(\lambda, z); \quad \alpha_{am}(\lambda, z) = \alpha_a(\lambda, z) + \alpha_m(\lambda, z);$$

$$d(\lambda, \theta, z) = \alpha'_a(\lambda, z) g_a(\theta) + \alpha_m(\lambda, z) g_m(\theta); \quad \mu = \cos \theta,$$

где $S_0(\lambda)$ – солнечная постоянная; $C(\lambda)$ – аппаратурная константа, которая в дальнейшем будет представляться в виде произведения $C(\lambda) = C_0 \times C_{\lambda}$ постоянного и спектрально зависящего множителя; $d(\lambda, \theta, z)$ – суммарный коэффициент аэрозольного и молекулярного рассеяния под углом θ от первоначального направления на высоте z от уровня моря; $k_g(\lambda, z)$ и $\rho_g(z)$ – соответственно высотные профили коэффициента поглощения и плотности исследуемого газа; H – верхняя граница модели атмосферы; $\alpha'_a(\lambda, z)$ и $\alpha_m(\lambda, z)$ – профили коэффициентов аэрозольного и молекулярного светорассеяния; $g_a(\theta)$ и $g_m(\theta)$ – соответствующие индикатрисы рассеяния; $\alpha_a(\lambda, z)$ – коэффициент аэрозольного ослабления (в области спектра 300 – 400 нм аэрозольное поглощение мало по сравнению с рассеянием, поэтому $\alpha_a \approx \alpha'_a$). Заметим также, что (1) записано в пренебрежении поглощением мешающих газов.

Домножая подынтегральное выражение в (1) на величину

$$\exp \left[\frac{1}{\mu} \int_0^z \alpha_{\Sigma}(\lambda, z') dz' - \frac{1}{\mu} \int_0^z \alpha_{\Sigma}(\lambda, z') dz' \right],$$

группируя члены и вынося за знак интеграла постоянный множитель $\exp \left[-\frac{1}{\mu} \int_0^H \alpha_{\Sigma}(\lambda, z') dz' \right]$, получим выражение, подобное выведенному в [1]:

$$J(\lambda) = S_0(\lambda) C(\lambda) \exp \left[-\frac{1}{\mu} \int_0^H \alpha_{\Sigma}(\lambda, z) dz \right] \int_0^H d(\lambda, \theta, z) \exp \left\{ \left(\frac{1}{\mu} - 1 \right) \int_0^z \alpha_{\Sigma}(\lambda, z') dz' \right\} dz. \quad (2)$$

Далее, вынося в (2) из под второго интеграла множитель

$$\exp \left[\left(\frac{1}{\mu} - 1 \right) \int_0^{z_{ef}} \alpha_g(\lambda, z') dz' \right]$$

с неким верхним пределом $z_{ef} < H$ (по теореме о среднем), пренебрегая высотной зависимостью коэффициента поглощения исследуемого газа ($k_g(\lambda, z) = k_\lambda$) и логарифмируя полученное уравнение, придем к следующему выражению:

$$\ln I_\lambda = k_\lambda \left\{ \left[\left(\frac{1}{\mu} - 1 \right) X_{ef} - \left(\frac{1}{\mu} \right) X \right] + \ln C_0 + \ln \left\{ \int_0^H d \exp \left[\left(\frac{1}{\mu} - 1 \right) \int_0^z \alpha_{am} dz' \right] dz \right\} - \frac{1}{\mu} \tau_{am}(\lambda) \right\}; \quad (3)$$

$$\tau_{am}(\lambda) = \tau_a(\lambda) + \tau_m(\lambda); \quad \tau_a(\lambda) = \int_0^H \alpha_a(\lambda, z) dz; \quad \tau_m(\lambda) = \int_0^H \alpha_m(\lambda, z) dz; \quad I_\lambda = J(\lambda) / [C_\lambda S_0(\lambda)],$$

где τ_a и τ_m – это вертикальные оптические толщи, обусловленные соответственно аэрозольным ослаблением и молекулярным рассеянием; $X = \int_0^H \rho(z) dz$ – ОС исследуемого газа в вертикаль-

ном столбе атмосферы; $X_{ef} = \int_0^{z_{ef}} \rho(z) dz$ – некое эффективное ОС, вообще говоря, зависящее от

λ , поскольку от λ зависит z_{ef} . Используя приближение $d(\lambda, \theta, z) = \alpha_m(\lambda, z) g(\theta)$, где $g(\theta)$ – средняя в слое 0–H индикатриса рассеяния, преобразуем третье слагаемое в (3) к виду

$$\ln \left\{ g(\theta) \int_0^H \frac{d}{dz} \left(\frac{\mu}{1-\mu} \exp \left[\left(\frac{1}{\mu} - 1 \right) \int_0^z \alpha_{am}(\lambda, z') dz' \right] \right) dz \right\} = \ln \left\{ g(\theta) \frac{\mu}{1-\mu} \left(\exp \left[\left(\frac{1}{\mu} - 1 \right) \tau_{am}(\lambda) \right] - 1 \right) \right\}.$$

Объединяя его со вторым и четвертым слагаемым, получим окончательное выражение:

$$\ln I_\lambda = k_\lambda \left[\left(\frac{1}{\mu} - 1 \right) X_{ef} - \frac{1}{\mu} X \right] + \ln \left\{ C_0 g(\theta) \frac{\mu}{1-\mu} \left(e^{-\tau_{am}} - e^{-\tau_{am}/\mu} \right) \right\}. \quad (4)$$

Предположение о независимости $g(\theta)$ от λ оправдано только в том случае, если интервал длин волн, участвующих в обработке, достаточно мал. В используемой нами области спектра (~ 300 нм) это соответствует нескольким десяткам нанометров. Функцию C_λ [см. (3)] мы считаем известной (как правило, аппаратурная константа определена с точностью до постоянного

множителя C_0). Солнечную постоянную $S_0(\lambda)$ мы также считаем известной. В расчетах в качестве начального приближения X_{ef} принималась равной

$$X_{ef} = \left\langle \ln \left(\frac{IC_1}{ICS_1} \right) / \left(\frac{1}{\mu} - \mu \right) k_\lambda \right\rangle_\lambda, \quad (5)$$

где

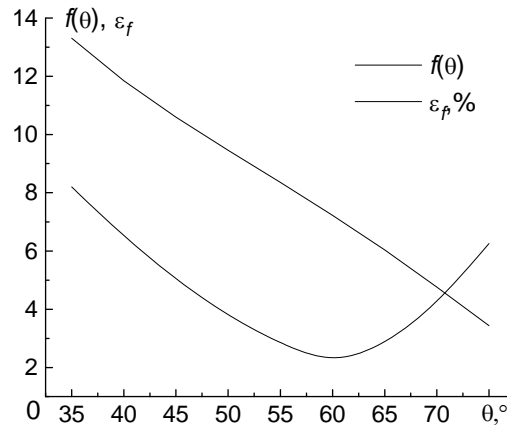
$$IC_\lambda = \int_0^H d \exp \left[\left(\frac{1}{\mu} - 1 \right) \int_0^z \alpha_\Sigma dz' \right] dz; \quad ICS_\lambda = \int_0^H d \exp \left[\left(\frac{1}{\mu} - 1 \right) \int_0^z \alpha_{am} dz' \right] dz.$$

Здесь $\langle \rangle_\lambda$ означает усреднение по всем длинам волн.

При численном анализе было обнаружено также, что отношение X/X_{ef} является квазилинейной функцией от θ и слабо зависит от X и τ_a . На рисунке приведена зависимость $X/X_{ef} = f(\theta)$ при $X = 330$ Д.е. (Добсона единицы) для модели атмосферы «лето средних широт» [10] и аэрозольной модели на основе [9]. При этом X_{ef} рассчитывалась по формуле (5). Видно, что $f(\theta)$ линейно убывает с ростом θ . На этом же рисунке пунктиром показано отклонение ($\varepsilon_f, \%$) $f(\theta)$ от исходной прямой при вариации X на 25% и оптической толщи аэрозоля на 50% (влиянием вариаций τ_m можно пренебречь). Левее минимума отклонение обусловлено в основном изменением аэрозольной составляющей, правее – вариацией X . Видно, что в интервале углов $40 \div 75^\circ$ это отклонение не превышает 6%. Таким образом, мы можем использовать полученную зависимость

$$X/X_{ef} \equiv f(\theta) = \frac{X}{\left\langle \ln \left(\frac{IC_\lambda}{ICS_\lambda} \right) / \left(\frac{1}{\mu} - \mu \right) k_\lambda \right\rangle_\lambda}, \quad (6)$$

полагая это отношение не зависящим от X и τ_a , при условии, что найденные при этом значения X и τ_a будут отличаться от исходных не более чем на 25 и 50% соответственно. Если отличие больше, то $f(\theta)$ пересчитывается, исходя из новых значений X и τ_a , и процесс восстановления повторяется.



Зависимость $f(\theta)$ и $\varepsilon_f(\%)$ при $X = 330$ Д.е. для модели атмосферы «лето средних широт» [10] и аэрозольной модели на основе [9]

Вводя далее аппроксимацию для аэрозольной оптической толщи в виде

$$\tau_a(\lambda) = \tilde{\tau}_a(\lambda_0/\lambda)^q \quad (7)$$

(где $\tilde{\tau}_a$ – аэрозольная толщина на длине волны λ_0 , а q - параметр) и подставляя (6) и (7) в (4), получим систему нелинейных уравнений

$$y_i = p_1 R_i + p_2 + b_i(p_3, p_4); \quad i = 1, \dots, N \quad (8)$$

относительно четырех неизвестных параметров –

$$p_1 = X; p_2 = \ln \{C_0 g(\theta) [\mu/(1 - \mu)]\}; \quad p_3 = \tilde{\tau}_a; \quad p_4 = q,$$

где

$$b_i(p_3, p_4) = \ln \left\{ \exp \left[- \left(p_3 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_i} \right)^{p_4} + \tau_m(\lambda_i) \right) \right] - \exp \left[- \frac{1}{\mu} \left(p_3 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_i} \right)^{p_4} + \tau_m(\lambda_i) \right) \right] \right\};$$

$$y_i = \ln \{J(\lambda_i)/[C_{\lambda_i} S_0(\lambda_i)]\}; \quad R_i = k_{\lambda_i} \{[1 - \mu - f(\theta)]/[\mu f(\theta)]\}.$$

Здесь N – число длин волн. Если N больше четырех, то для решения (8) можно воспользоваться методом наименьших квадратов, т.е. искомое решение находить из минимума функционала

$$F = \sum_i [y_i - p_1 R_i - p_2 - b_i(p_3, p_4)]^2.$$

Предлагаемый метод обработки экспериментальных данных позволяет наряду с общим содержанием газа определять также аэрозольную оптическую толщину.

Модельная обратная задача решалась для следующих исходных данных. Солнечная постоянная заимствована из работы [8]. Аэрозольная оптическая толщина рассчитывалась на основе модели [9]; рэлеевская – на основе модели лета средних широт [10]. Исходное значение для обобщенной индикатрисы рассеяния $g(\mu)$ определялось численным образом на основе данных модели [9] из уравнения

$$\int_0^H d(\theta, \lambda, z) \exp \left[\left(\frac{1}{\mu} - 1 \right) \int_0^z \alpha_{am}(\lambda, z') dz' \right] dz = g(\theta) \frac{\mu}{1 - \mu} \left\{ \exp \left[\left(\frac{1}{\mu} - 1 \right) \tau_{am}(\lambda) \right] - 1 \right\}.$$

Аппаратурная постоянная C_0 , входящая в параметр p_2 , полагалась в модельном эксперименте равной единице. При обработке реальных сигналов начальное значение этого параметра – p_2^0 – определялось из уравнения (8) усреднением по всем длинам волн:

$$p_2^0 = \langle y_i - p_1^0 R_i - b_i(p_3^0, p_4^0) \rangle_i,$$

где p_j^0 ($j = 1, 3, 4$) – начальное значение остальных параметров, определяемое из соответствующих моделей.

Таблица 1

Результаты численного эксперимента по определению p_i при уровне «шума» 2%

j	p_j^0 , Д. е.	\bar{p}_j (σ_p/\bar{p}_j , %), Д. е.	p_j (точные), Д. е.
1	360,0	330,2 (0,8)	329,1
2	-2,52	-2,33 (2,2)	-2,30
3	0,520	0,385 (15,8)	0,402
4	0,85	0,78 (28,0)	0,77

Для имитации шума измерения рассчитанные сигналы искажались с помощью датчика случайных чисел. Дисперсия «шума» составляла 2%. Результаты решения обратной задачи для озона приведены в табл. 1. В обработке участвовало 200 длин волн с шагом 0,1 нм из области спектра 302–322 нм. В первой графе приведены начальные значения параметров (p_j^0), отличающиеся от точных на 10–30 %; во второй графе – средние восстановленные значения (\bar{p}_j). В скоб-

ках в процентах указаны среднеквадратические отклонения σ_p/\bar{p}_j параметров, найденных из решения обратной задачи по 100 реализациям. Здесь σ_{p_j} – дисперсия j -го параметра. В третьей графе приведены точные значения параметров. Значения параметра p_3 ($\tilde{\tau}_a$) соответствуют длине волны $\lambda_0 = 302$ нм. Моделирование проводилось для зенитного угла Солнца $\theta = 55^\circ$.

Видно, что наиболее устойчиво определяется ОС озона (p_1). Для этого параметра минимальны как дисперсия, так и систематический сдвиг среднего восстановленного значения. Менее стабильно восстанавливается параметр p_2 , связанный с аппаратурной константой и средней индикатрисой рассеяния, а также аэрозольная (p_3) оптическая толщина. Хуже всего определяется показатель частотной зависимости аэрозольного ослабления (p_4).

Таблица 2

Результаты определения параметров при обработке реальных сигналов от 07.09.95

j	p_j^0 , Д.е.	Значения, Д. е.	
		восстановленные	точные (по М - 124)
1	329,0	302,5	307,0
2	2,0	1,94	–
3	0,40	0,37	–
4	0,77	0,62	–

Результаты обработки реальных сигналов яркости неба над Томском от 07.09.95 в области спектра 302–322 нм приведены в табл. 2. Видно хорошее совпадение полученного ОСО с результатом измерений М-124, приведенным в последней графе. К сожалению, у нас не было возможности проверить подобным образом корректность восстановления остальных параметров.

В заключение следует заметить, что хотя в основе предложенной методики лежит модель однократного рассеяния, есть основания ожидать приемлемых результатов при ее использовании в условиях замутненной или малооблачной атмосферы, когда роль многократного рассеяния становится более существенной. Последнее утверждение основано на том факте, что спектральная зависимость многократно рассеянного излучения вполне коррелирует с таковой для однократно рассеянной радиации. Это позволяет представить существенную долю многократно рассеянного излучения в сигнале (см. (1)) в виде постоянного множителя C_M , т.е. записать (1) в виде

$$J(\lambda) \sim S_0(\lambda) C(\lambda) C_M.$$

При этом C_M войдет в параметр p_2 вместе с C_0 и $g(\theta)$, из чего следует, что влияние многократного рассеяния отчасти учитывается в предложенной методике.

Таким образом, проведенное численное моделирование и предварительные результаты обработки реальных сигналов подтверждают эффективность предложенной многоволновой методики в определении ОС озона и аэрозольной оптической толщи из спектров рассеянного в зените излучения. Вопрос о погрешности данной методики подлежит более детальному исследованию. Представляются интересными также вопросы о выборе наиболее оптимальных спектральных интервалов и зенитных углов Солнца при определении разных составляющих атмосферы по описанной методике.

В заключение авторы выражают признательность С.И. Долгому, В.В. Зуеву, В.Н. Маричеву и С.В. Смирнову за любезно предоставленные результаты измерений на КСВУ-23 и М-124 от 07.09.95, а также С.М. Сакерину за ценные замечания и рекомендации.

Статья выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 94-01-01328).

1. Долгий С.И., Зуев В.В., Маричев В.Н., Мицель А.А., Пташник И.В., Со-рокин В.П. // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 5. С. 609–626.
2. Кузнецов Г.И. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1975. Т. 11. № 6. С. 647–651.
3. Garrison L.M., Doda D.D., Green A.E.S. // Appl. Opt. 1979. V. 18. N 6. P. 850–855.
4. Людчик А.М., Жучкевич В.В., Красовский А.Н., Турышев Л.Н. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1989. Т. 25. N 1. С. 45–52.
5. Красовский А.Н., Людчик А.М., Неверович Л.Ч., Турышев Л.Н. // Журн. прикл. спектр. 1991. Т. 55. N 3. С. 472–477.

6. Ашкинадзе С. Д., Балин А. А., Долгий С. В. и др. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 1. С. 101–105.
7. Красовский А. Н., Людчик А. М., Неверович Л. Ч., Турышев Л. Н., Долгий С. В., Климов Ю. А. // Оптика атмосферы и океана. 1992. Т. 5. N 5. С. 504–508.
8. Arvesen J. C., Griffin R. N., Pearson B. D. // Appl. Opt. 1969. V. 8. N 11. P. 2215–2232.
9. Креков Г. М., Рахимов Р. Ф. Оптическая модель атмосферного аэрозоля. Томск: Изд. ТФ СО РАН, 1986. 294 с.
10. Ипполитов И. И., Комаров В. С., Мицель А. А. // Спектроскопические методы зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1985. С. 4–44.

Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск

Поступила в редакцию
14 февраля 1996 г.

A. A. Mitsel, I. V. Ptashnik. Multiwave Method for Interpretation of Data on Sky Spectral Brightness in Zenith.

A new multiwave method of the ozone total content (TC) and optical thickness determination over the spectra of the radiance scattered in zenith is described. The results of numerical simulation and realistic signals processing are presented, which confirm the efficiency of the method proposed.