

А.Г. Ишов, Т.В. Козина

РОЛЬ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СЕЧЕНИЙ ПОГЛОЩЕНИЯ ОЗОНА ПРИ ДИАГНОСТИКЕ ОЗОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА МЕТОДОМ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

На примере различных эталонных состояний озоносферы и атмосферы Земли показано, что пренебрежение температурной зависимостью сечений поглощения озона в спектральном интервале 270–340 нм может приводить к серьезной ошибке при расчете интенсивности обратнорассеянного УФ излучения Солнца. Предлагаются математически обоснованные методы приближенного учета температурной зависимости сечений поглощения озона.

Оптические методы диагностики озоносферы Земли относятся к косвенным методам. При этом на основе уравнения переноса излучения в атмосфере предполагается известной связь характеристик озонового слоя (общее содержание озона в столбе атмосферы и его вертикальное распределение) с потоками излучения, регистрируемыми оптическими приборами, а значения указанных характеристик определяются методом целенаправленного подбора. В качестве искомым значений берутся те, которые, будучи подставленными в уравнение переноса излучения в атмосфере Земли, дают расчетные потоки излучения, совпадающие в пределах инструментальных ошибок с экспериментально найденными.

В соответствии с законом Бера—Буге—Ламберта в уравнении переноса излучения фигурирует безразмерная величина

$$\tau_{\lambda}(z_1, z_2) = \int_{z_1}^{z_2} dz \alpha_{\lambda}(z) N_{O_3}(z) \quad (1)$$

— оптическая толщина слоя атмосферы, ограниченного высотами z_1 и z_2 на длине λ , где $\alpha_{\lambda}(z)$ — сечение поглощения молекулы озона на длине волны λ при температуре $T(z)$ воздуха на высоте z , $N_{O_3}(z)$ — концентрация молекул озона. Однако для решения ряда практических задач физики атмосферы (например, при оценке лучистых притоков тепла, равновесных концентраций фотохимически связанных с озоном газовых составляющих и др.) требуется знание значений величины

$$X(z_1, z_2) = \int_{z_1}^{z_2} dz N_{O_3}(z) \quad (2)$$

— интегрального содержания молекул озона в столбе слоя атмосферы, ограниченного высотами z_1 и z_2 . Значения именно этой величины приводятся и в геофизических справочниках, например, в «Ozone data for the world». Отметим, что $X(0, \infty)$ называется общим содержанием озона в столбе атмосферы, а набор величин $X(z_i, z_{i+1})$ для двенадцати слоев, на которые разбивается атмосфера в методе обращения, — его вертикальным распределением. Поэтому конечной целью интерпретации спектрометрических измерений по диагностике озоносферы Земли является определение значений $X(z_1, z_2)$ для различных слоев атмосферы. Формально это предполагает поиск эффективных процедур вынесения $\alpha_{\lambda}(z)$ из-под знака интеграла в (1) при переходе от $\tau_{\lambda}(z_1, z_2)$ к $X(z_1, z_2)$.

Далее, чтобы избежать на каждом шаге в методе целенаправленного подбора неприемлемо трудоемких расчетов потоков излучения, обычно задачу интерпретации эксперимента сводят к расчету интенсивности эффективного монохроматического излучения путем введения некоторых эффективных коэффициентов поглощения озона $\bar{\alpha}_{\lambda}^*$ с помощью соотношений

$$\tau_{\lambda}(z_1, z_2) = \bar{\alpha}_{\lambda}^* X(z_1, z_2). \quad (3)$$

Отметим, что по теореме о среднем для интегралов это возможно всегда. Однако введение эффективных коэффициентов поглощения $\bar{\alpha}_{\lambda}^*$ представляется целесообразным и будет эффективным, если они не будут зависеть от границ слоя и будут не критически чувствительными к характеристикам озоносферы, поскольку последние априори неизвестны. При таком подходе соотношения типа (3) будут выполняться приближенно. Это вполне допустимо, если не приводит к неприемлемо большим ошибкам в расчетных значениях величин, сравниваемых с экспериментально найденными, и если соотношения (3) не использовать безоговорочно для пересчета $\tau_{\lambda}(z_1, z_2)$ в $X(z_1, z_2)$ и наоборот.

Сечения поглощения озона зависят от температуры. Поэтому представление (3) означает в том числе и пренебрежение их температурной зависимостью. При этом указанное обстоятельство заслуживает специального рассмотрения, поскольку определение значений эффективного коэффициента поглощения озона $\bar{\alpha}_\lambda^*$ можно провести в два этапа. Вначале, только пренебрегая температурной зависимостью α_λ или параметризуя ее тем или иным способом, заменяем α_λ на α_λ^* , не зависящее от z , z_1 и z_2 , и выносим его из-под знака интеграла, а затем уже ищем пути перехода от $\bar{\alpha}_\lambda^*$ к α_λ^* , позволяющего избавиться от неприемлемо трудоемких расчетов потока излучения. При таком подходе каждый упрощающий (огрубляющий) задачу фактор рассматривается по отдельности, а это может привести к более адекватному упрощенному их учету, что в конечном счете может повысить обоснованность и точность диагностики озоносферы Земли оптическими методами.

Введем в рассмотрение величины

$$Q_\lambda = \frac{1}{y_\lambda(0)} \int_0^\infty dz \beta_\lambda N(z) e^{-a[\tau_\lambda(z, \infty) + y_\lambda(z)]} \quad (4)$$

и Q_λ^* , получающуюся из Q_λ путем замены $\tau_\lambda(z, \infty)$ на $\alpha_\lambda^* X(z, \infty)$, где β_λ — сечение рэлеевского рассеяния; $N(z)$ — концентрация молекул воздуха; $y_\lambda(z) = \int_z^\infty dz' \beta_\lambda N(z')$; $a = \sec\theta + \sec\theta_0$ — геометрический фактор эксперимента; θ, θ_0 — зенитные углы визирования и Солнца соответственно. Они отличаются только тем, что зависимость в Q_λ от температуры учитывается точно, а в Q_λ^* приближенно с помощью эффективного коэффициента поглощения озона α_λ^* . Величина Q_λ с точностью до некоторых постоянных для конкретной реализации эксперимента величин определяет интенсивность обратнорассеянного атмосферой Земли УФ-излучения Солнца в полосах поглощения озона в спектральном интервале 250–340 нм в приближении однократного рассеяния. Величина Q_λ^* фигурирует в алгоритме восстановления вертикального распределения озона методом обратного рассеяния с помощью приборов типа BUV/SBUV [1]. При этом, очевидно, точность восстановления озона определяется в том числе и относительной погрешностью $\delta \neq (Q_\lambda - Q_\lambda^*)/Q_\lambda$, с которой величина Q_λ^* приближает Q_λ .

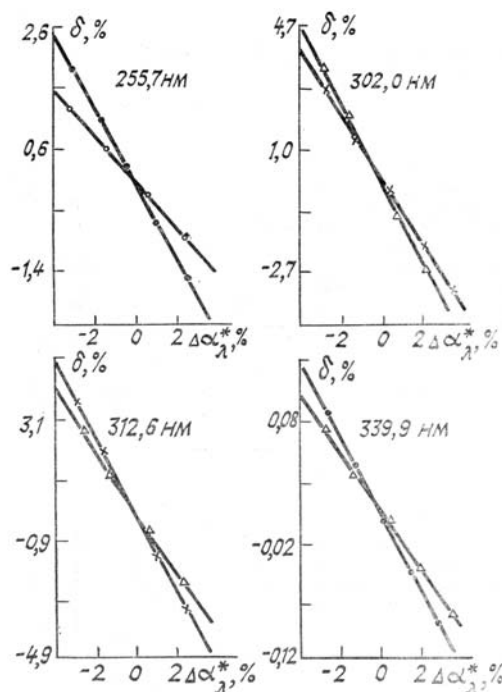


Рис. 1. Зависимость вариаций ΔQ_λ величины Q_λ (4) от вариаций $\Delta\alpha_\lambda$ сечения поглощения озона α_λ для четырех длин волн $\lambda = 255,7; 302,0; 312,6; 339,9$ нм, охватывающих все 11 спектральных каналов (см. таблицу) в SBUV/TOMS-эксперименте на Nimbus-7 [1], для четырех модельных состояний атмосферы и озоносферы [4]: — — лето полярной зоны, - - - зима умеренных широт, - x - лето умеренных широт, - Δ - тропики. $\Delta\alpha_\lambda = \epsilon\alpha_\lambda$, где $\epsilon \in [-0,04; 0,04]$.

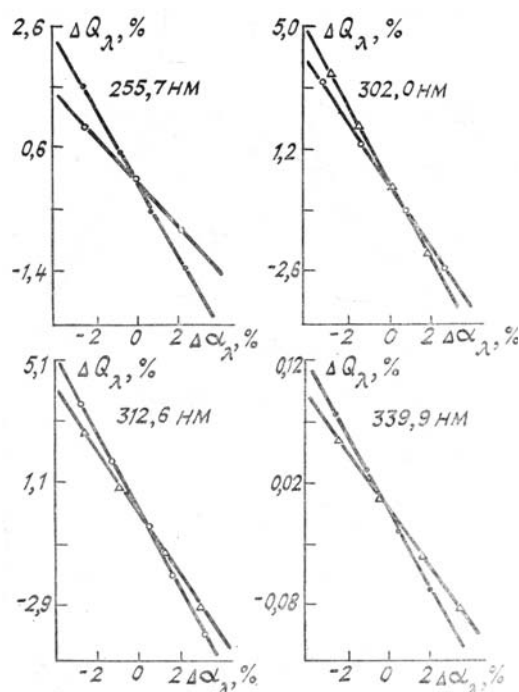


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, однако вариации сечений поглощения озона $\Delta\alpha_\lambda$ обусловлены вариациями ΔT температуры в атмосфере; $\Delta\alpha_\lambda(T) = \alpha_\lambda(T) - \alpha_\lambda(T + \Delta T)$, $\Delta T = \epsilon T$. На рисунках представлены только две кривые, две других заключены в пределах между ними

При восстановлении характеристик озоносферы используются найденные экспериментально с определенной погрешностью значения сечений поглощения озона и температуры в атмосфере. Поэтому вначале исследуется чувствительность величин Q_λ и Q_λ^* к вариациям в значениях α_λ (рис. 1 и 2), а затем предлагается процедура оценки эффективного параметра α_λ^* . В работе использованы экспериментальные данные для α_λ из [2], полуэмпирическая формула для β_λ из [3], модельные состояния атмосферы из [4].

На рис. 1 и 2 не наблюдается значительной изменчивости зависимости ΔQ_λ от $\Delta \alpha_\lambda$ при переходе от одной модели атмосферы к другой, однако это происходит при изменении длины волны от 255,7 до 339,9 нм. Наибольшая чувствительность Q_λ к возмущениям в сечениях поглощения озона наблюдается при промежуточных значениях длины волны, поэтому в этом спектральном интервале требуется знать (измерять) α_λ с повышенной точностью. Этому имеется разумное объяснение. В коротковолновых каналах чувствительность сечений поглощения озона к температуре пренебрежимо мала (например, факт независимости α_λ от температуры при 254 нм положен в основу определения всего ряда значений α_λ в [2]), она увеличивается при увеличении длины волны, однако при этом падает роль поглощения излучения озоном по сравнению с рэлеевским рассеянием в формировании значений интегральной величины Q_λ .

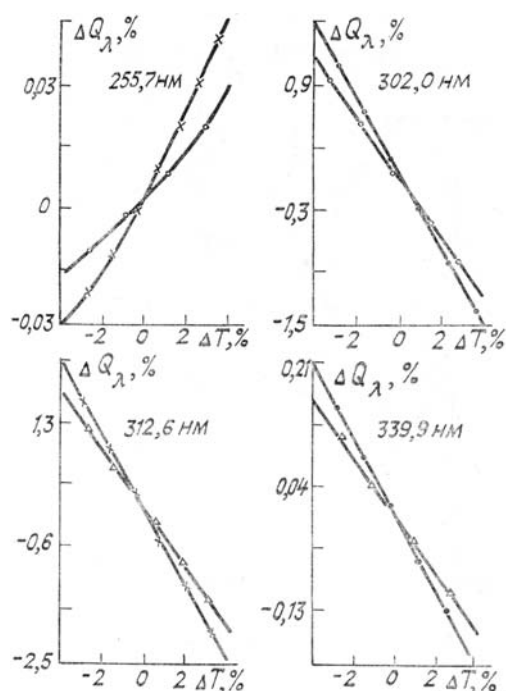


Рис. 3. Зависимость $\delta = 1 - Q_\lambda^* / Q_\lambda$ от вариаций $\Delta \alpha_\lambda^*$ эффективного коэффициента поглощения озона α_λ^* (5) для тех же четырех длин волн и моделей атмосферы, что и на рис. 1–2. При $\Delta \alpha_\lambda^* = 0$ получаем δ , вносимую в Q_λ (4) при приближенном учете температурной зависимости сечений поглощения озона с помощью эффективного параметра α_λ^* (5). Во всех рассмотренных случаях она не превосходит 0,2% (см. таблицу)

На рис. 3 представлена чувствительность относительной погрешности δ к вариациям $\Delta \alpha_\lambda^*$ эффективного параметра α_λ^* . Закономерность, носит тот же характер, что и на рис. 1 и 2. Расчет α_λ^* проводился по формуле

$$\alpha_\lambda^* = C_\lambda + \frac{\int_0^\infty dz \beta_\lambda N(z) e^{-a[y_\lambda(z) + C_\lambda X(z, \infty)]} \int_z^\infty dz' \delta_T \alpha_\lambda(z') N_{O_3}(z')}{\int_0^\infty dz \beta_\lambda N(z) e^{-a[y_\lambda(z) + C_\lambda X(z, \infty)]} X(z, \infty)}, \quad (5)$$

где согласно [2] использовано представление $\alpha_\lambda = C_\lambda + \delta_T \alpha_\lambda$; C_λ — постоянная для рассматриваемой длины волны; $\delta_T \alpha_\lambda$ — сравнительно меньшая величина, учитывающая зависимость сечений поглоще-

ния озона от температуры. Несмотря на свою громоздкость, формула (5) оказалась полезной, поскольку получаемые с ее помощью значения α_λ^* не критически чувствительны к выбору модели атмосферы и озоносферы (таблица) и расчет α_λ^* можно провести заранее для некоторых эталонных характеристик озоносферы.

Формула (5) получена в предположении малости величин $\int_z^\infty dz' \delta_T \alpha_\lambda(z') N_{O_3}(z')$ и $(\alpha_\lambda^* - C_\lambda) X(z, \infty)$, достаточной для того, чтобы экспоненту от них можно было заменить двумя первыми членами ряда Тейлора. Это не единственный путь получения расчетной формулы для α_λ^* . Можно, например, использовать предположение о достаточной малости $\tau_\lambda(z, \infty)$ или $\tau_\lambda(z, \infty) + y_\lambda(z)$, о разнесении по высоте влияния озона и рассеивающих центров на формирование Q_λ , однако, как показали расчеты, предложенная выше формула приемлема по точностным характеристикам.

Таблица

Значения эффективных коэффициентов поглощения озона α_λ^* по (5) и погрешность δ их использования при расчете Q_λ для четырех модельных состояний атмосферы [4]: 1 — лето полярной зоны, 2 — зима умеренных широт, 3 — лето умеренных широт, 4 — тропики

λ , нм	$\alpha_\lambda^* \cdot 10^{20}$, см ²				$\delta \cdot 10^3$, %			
	1	2	3	4	1	2	3	4
255,7	1157	1157	1157	1157	0,19	0,19	-0,19	0,28
273,6	628,1	627,8	628,8	627,5	0,30	-0,23	-0,23	-0,15
283,1	296,3	295,9	296,6	295,9	-0,09	-0,60	-0,24	-0,40
287,7	178,5	177,8	178,7	177,9	-1,6	83,5	-1,1	-2,7
292,3	102,1	101,4	102,3	101,6	-10,0	-13,0	-6,9	-10,0
297,6	50,29	49,81	50,43	50,01	-39,0	-43,0	-33,0	-42,0
302,0	27,91	27,55	27,94	27,60	-95,0	-130	-130	-200
312,6	5,950	5,786	5,901	5,831	-39,0	-52,0	-51,0	-25,0
317,6	3,674	3,640	3,665	3,653	-3,6	-2,8	-3,4	-1,2
331,3	0,606	0,587	0,600	0,593	-0,33	-0,34	-0,24	-0,29
339,9	0,122	0,110	0,118	0,114	-0,20	-0,27	-0,09	0,14

1. Klenk K.F., Bhartia P.K., Mateer C.L., Fleig A.J. //5th Conf. Atmos Radiat., Baltimore, 31 Oct.—4 Nov. 1983. P. 103—106.
2. Bass A.M., Paur R.J. Atmospheric ozone. — D.: D. Reidel Publ. Comp. 1985. P. 606—616.
3. Nicolet M. //Planet. and Space Sci. 1984. V. 32. № 11. P. 1467—1468.
4. Ипполитов И.И., Комаров В.С., Мицель А.А. Спектроскопические методы зондирования атмосферы. — Новосибирск: Наука. 1985. С. 4—44.

Институт экспериментальной метеорологии
НПО «Тайфун» Госкомгидромета СССР

Поступила в редакцию
31 мая 1988 г.

A.G. Ishov, T.V. Kozina. **The Role of the Temperature Dependence of the Ozone Absorption Cross-Section in the Spaceborne Diagnostics of the Earth's Ozonosphere by the Backscattering Method.**

The role of the temperature dependence of the ozone absorption cross-section in the spaceborne diagnostics of the Earth's ozonosphere by the backscattering method was studied. Examples of different reference states of the terrestrial ozonosphere and atmosphere are considered to show that the neglect of the temperature effect in the 270—340 nm spectral region can lead to dramatic errors in calculating the backscattered UV solar radiation, thereby precluding adequate retrieval of the O₃ total content and vertical distribution. Approximate mathematical procedures taking into account the variation of the ozone absorption cross-section with temperature are proposed.