

А.А. Мицель, К.М. Фирсов

**О ТОЧНОСТИ РАСЧЕТА СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ И ДИСПЕРСИИ  
ХАРАКТЕРИСТИК ПОГЛОЩЕНИЯ НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 10.6 МКМ**

В работе обсуждается приближенный метод расчета средних значений коэффициента молекулярного поглощения, оптической толщи, функции пропускания и их среднеквадратических отклонений. Показано, что метод статистической экстраполяции позволяет уточнить прозрачность вертикального столба атмосферы на основе измеренных в приземном слое температуры и влажности.

Вариации оптических характеристик молекулярного поглощения (коэффициент поглощения, оптическая толщина, пропускание) в атмосфере земли обусловлены изменчивостью метеопараметров, таких как давление, температура, концентрация водяного пара, которые случайным образом меняются во времени и пространстве. Поэтому для описания характеристик молекулярного поглощения можно использовать статистический подход, который широко используется в метеорологии, и получить первые и вторые моменты оптических характеристик на основе статистической информации о метеопараметрах.

В [1–3] был описан приближенный метод расчета средних значений и среднеквадратических отклонений характеристик молекулярного поглощения на основе метеомодели атмосферы, которая содержит средние значения температуры воздуха, концентрации поглощающих газов, их среднеквадратические отклонения, а также высотные корреляционные матрицы температуры и влажности воздуха и озона. В связи с ограниченностью статистической информации о метеопараметрах в [1–3] были использованы следующие приближения: 1) линеаризованный относительно температуры коэффициент молекулярного поглощения; 2) единичные высотные матрицы корреляций концентраций малых газовых составляющих (за исключением  $H_2O$  и  $O_3$ ); 3) нормальное и логарифмически-нормальное распределение вероятностей метеопараметров.

Цель данной статьи — выяснить, насколько полученные приближенным методом оценки средних профилей коэффициента поглощения, оптической толщи и их ковариационных матриц соответствуют реальным.

Для того чтобы ответить на этот вопрос, желательно было бы провести статистическую обработку экспериментальных измерений соответствующих оптических характеристик. Однако в литературе имеются экспериментальные данные только об интегральных характеристиках ослабления земной атмосферы. Но даже этой информацией сложно воспользоваться, так как в реальной атмосфере всегда присутствует аэрозоль, а разделение молекулярного и аэрозольного факторов ослабления излучения весьма проблематично. Поэтому мы поступили следующим образом: по заданной выборке высотного распределения давления, температуры и влажности рассчитали коэффициенты поглощения и оптические толщи, затем полученные профили подвергли статобработке.

Численное моделирование было проведено для  $\lambda = 10,591$  мкм. Основными поглощающими газами здесь являются  $H_2O$  и  $CO_2$ . Расчеты оптических характеристик проводились на основе атласа данных GEISA [4]. Сопоставление параметров спектральных линий  $CO_2$  из [4] с экспериментальными данными [5] показало их хорошее согласие. Так, для переходов  $P(16)–P(24)$  полуширины линий совпадают в пределах 1–3%, а расхождение в интенсивностях не превосходит 10%. Для расчета континуального поглощения парами  $H_2O$  использовалась эмпирическая формула [6].

В качестве выборки высотного распределения метеопараметров был использован десятилетний ряд (1960–1970 гг., июль) данных аэрологического зондирования атмосферы на метеостанции «Лондон». Всего было отобрано 65 профилей, это число превышает минимально необходимое число реализаций для получения вполне надежных первых и вторых моментов исследуемой величины [7].

На основе этих метеоданных были проведены расчеты прямым методом 65 высотных профилей коэффициента поглощения и оптической толщи, на основе которых была получена точная оценка среднего высотного профиля коэффициента поглощения  $\bar{\alpha}^T(H)$ , оптической толщи  $\bar{\tau}^T(H)$ , среднеквадратических отклонений  $\sigma_{\alpha}^T(H)$ ,  $\sigma_{\tau}^T(H)$ , а также ковариационных матриц  $V_{\alpha\alpha}^T(H, H')$ ,  $V_{\tau\tau}^T(H, H')$ .

Затем для вышеупомянутой выборки метеопараметров были рассчитаны средние значения давления и температуры для высот от 0 до 30 км, их среднеквадратические отклонения и коэффициенты корреляции между температурами на различных высотах. Средние значения, среднеквадратические отклонения и автокорреляционная матрица влажности были рассчитаны для диапазона высот от 0 до 7 км, поскольку влажность измерялась до 7 км. Для высот более 7 км высотный профиль влажности дополнялся среднезональной моделью [7] (лето, средние широты).

С помощью полученной метеомодели по методике, описанной в [1–3], были рассчитаны приближенные значения  $\bar{\alpha}^n(H)$ ,  $\sigma_{\alpha}^n(H)$ ,  $\bar{\tau}^n(H)$ ,  $\sigma_{\tau}^n(H)$  и соответствующие высотные матрицы ковариации  $V_{\alpha\alpha}^n(H, H')$ ,  $V_{\tau\tau}^n(H, H')$ . Результаты расчетов приведены в табл. 1. Из табл. 1 видно, что средние значения  $\bar{\alpha}(H)$  и  $\bar{\tau}(H)$ , рассчитанные точным и приближенным методом, совпадают в пределах 1–2% для высот 0–20 км и лишь на высоте 30 км расхождение между  $\bar{\alpha}^T(H)$  и  $\bar{\alpha}^n(H)$  составляет 6%. Среднеквадратические отклонения  $\sigma_{\alpha}^T(H)$  и  $\sigma_{\alpha}^n(H)$  различаются до 10–15%, тогда как различие между  $\sigma_{\tau}^T(H)$  и  $\sigma_{\tau}^n(H)$  составляет не более 10%. Следует отметить, что такая точность для оценочных оптических моделей атмосферы вполне приемлема.

Таблица 1

| H,<br>км | Характеристики молекулярного поглощения |  |   |   |                |                |                   |                   |
|----------|---|--|---|---|----------------|----------------|-------------------|-------------------|
|          | $\bar{\alpha}^T$ ,<br>км <sup>-1</sup>  | $\bar{\alpha}^n$ ,<br>км <sup>-1</sup> | $\sigma_{\alpha}^T$ ,<br>км <sup>-1</sup> | $\sigma_{\alpha}^n$ ,<br>км <sup>-1</sup> | $\bar{\tau}^T$ | $\bar{\tau}^n$ | $\sigma_{\tau}^T$ | $\sigma_{\tau}^n$ |
| 0        | 0,27                                    | 0,27                                   | 0,059                                     | 0,069                                     | 0              | 0              | 0                 | 0                 |
| 2        | 0,11                                    | 0,11                                   | 0,024                                     | 0,028                                     | 0,35           | 0,35           | 0,072             | 0,079             |
| 5        | 0,045                                   | 0,045                                  | 0,0073                                    | 0,008                                     | 0,56           | 0,55           | 0,11              | 0,12              |
| 7        | 0,027                                   | 0,027                                  | 0,0044                                    | 0,0039                                    | 0,62           | 0,62           | 0,12              | 0,12              |
| 10       | 0,013                                   | 0,013                                  | 0,0015                                    | 0,0016                                    | 0,68           | 0,68           | 0,12              | 0,12              |
| 20       | 0,010                                   | 0,010                                  | 0,0009                                    | 0,0011                                    | 0,79           | 0,78           | 0,11              | 0,12              |
| 30       | 0,015                                   | 0,014                                  | 0,0016                                    | 0,0019                                    | 0,91           | 0,90           | 0,11              | 0,12              |

Представляет также интерес сопоставление приближенных и точных статистических характеристик молекулярного поглощения в задаче прогноза. В работе [1] для уточнения оптической толщи  $\tau(H)$  слоя 0–H было предложено использовать метод линейной статистической экстраполяции

$$\hat{\tau}^{\wedge}(H) = \bar{\tau}(H) + \frac{R_{\alpha\tau}(0, H) \sigma_{\tau}(H)}{\sigma_{\alpha}(0)} [\hat{\alpha}^{\wedge}(0) - \bar{\alpha}(0)], \quad (1)$$

где  $R_{\alpha\tau}(0, H)$  – коэффициент корреляции между  $\alpha(0)$  и  $\tau(H)$  слоя 0–H;  $\sigma_{\tau}(H)$ ,  $\sigma_{\alpha}(0)$  – среднеквадратические отклонения оптической толщи слоя 0–H и коэффициента поглощения на высоте  $H = 0$  км; соразмеренный либо рассчитанный по измеренным значениям метеопараметров коэффициент поглощения на высоте  $H = 0$  км. При отсутствии информации о  $\hat{\alpha}^{\wedge}(0)$  в качестве оценки  $\hat{\tau}$  используется среднее значение  $\bar{\tau}$ . Наличие оперативной информации о метеопараметрах (температура, давление, концентрация поглощающих газов на уровне земли) позволяет уточнить значение оптической толщи, при этом погрешность восстановления определяется формулой

$$\delta_{\tau}^n(H) = \sigma_{\tau}^n(H) \sqrt{1 - R_{\alpha\tau}^2(0, H)}. \quad (2)$$

В формуле (2) значения  $\sigma_{\tau}^n$  и  $R_{\alpha\tau}(0, H)$  вычисляются приближенным методом, описанным выше, поэтому значение ошибки экстраполяции  $\delta_{\tau}^n(H)$  будет приближенным.

Следующая задача состояла в проверке точности вычисления величины  $\delta_{\tau}$ . Для этой цели для каждого из 65 значений  $\hat{\alpha}_i(0)$  на высоте 0 км по формуле (1) было рассчитано ожидаемое экстраполируемое значение  $\hat{\tau}_i(H)$  для слоя 0–7 км и погрешность

$$\delta_{\tau}^T = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{\tau}_i(H) - \tau_i(H))^2}, \quad (3)$$

где  $\tau_i(H)$  – значение оптической толщи для  $i$ -й реализации метеопараметров. В табл. 2 представлены результаты сравнения. Здесь же приведено максимальное отклонение реальных оптических толщин от их средних и экстраполируемых значений. Из табл. 2 следует, что значение  $\delta_{\tau}^n(H) > \delta_{\tau}^T(H)$ , т. е. рассчитанный по формуле (2) „коридор ошибок“ шире истинного. Принимая в качестве оценки зна-

чение  $\delta_i^n(H)$ , мы тем самым завышаем реальную ошибку, а значит увеличиваем вероятность попадания экстраполируемого значения  $\hat{\tau}_i(H)$  в интервал  $[\bar{\tau}(H) - \delta_i(H), \bar{\tau}(H) + \delta_i(H)]$ .

Таблица 2

| Модель               | Характеристики молекулярного поглощения (0—7 км) |                   |                   |                   |                              |                              |
|----------------------|--|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|
|                      | $\bar{\tau}^n$                                   | $\sigma_{\tau}^n$ | $\delta_{\tau}^T$ | $\delta_{\tau}^n$ | $\max  \bar{\tau} - \tau_i $ | $\max  \hat{\tau} - \tau_i $ |
| ст.<br>«Лондон»      | 0,62   | 0,12              | 0,071             | 0,087             | 0,29                         | 0,17                         |
| Средне-<br>зональная | 0,71   | 0,23              | 0,084             | 0,14              | 0,29                         | 0,22                         |

В заключение рассмотрим, насколько адекватна среднезональная модель для прогноза оптических характеристик молекулярного поглощения в районе Лондона. Для среднезональной модели (лето, средние широты) были вычислены приближенным методом  $\bar{\alpha}^n(0)$ ,  $\sigma_{\alpha}^n(0)$ ,  $\bar{\tau}^n(H)$  и  $\sigma_{\tau}^n(H)$ . Затем для района Лондона вычислялись  $\hat{\alpha}_i(0)$  и ожидаемые значения  $\hat{\tau}_i(H)$ , ошибка экстраполяции  $\delta_i^n(H)$  по формуле (2) и  $\delta_i^T(H)$  по формуле (3). Результаты приведены в табл. 2. Анализ этих результатов позволяет сделать следующие выводы:

- 1) средние значения оптической толщи отличаются на 20%;
- 2) почти в два раза увеличилась среднеквадратическая ошибка  $\sigma_{\tau}(H)$ , коэффициент вариации  $\sigma_{\tau}(H)/\bar{\tau}(H)$  составляет ~30%. Это объясняется увеличением географического района, охватывающего различные квазиоднородные районы, в том числе и район Лондона [7].
- 3) существенно возросла ошибка экстраполяции  $\delta_i^n(H)$  вычисленная по формуле (2), которая превосходит  $\delta_i^T(H)$  более чем в 1,5 раза.

Второй и третий выводы не являются неожиданными и наглядно демонстрируют уменьшение точности оптической модели с увеличением территории географического района, для которого она построена.

Авторы благодарны Ю.А. Пхалагову за искренний интерес к работе и полезные обсуждения.

1. Макушкин Ю.С., Мицель А.А., Фирсов К.М. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1983. Т. 19. № 8. С. 824—830.
2. Макушкин Ю.С., Мицель А.А., Фирсов К.М. //Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1986. Т. 22. № 6. С. 595—599.
3. Макушкин Ю.С., Мицель А.А., Руденко В.П., Фирсов К.М. //Оптико-метеорологические исследования земной атмосферы. Новосибирск: Наука, 1987. С. 63—78.
4. Husson N., Chedin A., Scott N.A., Cohen-Hallalen I. La banque tie donnees «GEISA» //Laboratoire de Meteorologie Dinamique du C. N. R. S. Note Interne L. M. D. n° \*116. Juillet 1982.
5. Буланин М.О., Булычев В.П., Ладвищенко Ю.М. //Колебательно- вращательные спектры молекул. АН СССР. Отделение общей физики и астрономии. Научный совет по спектроскопии. (Сб. статей). М., 1982. С. 46—89.
6. Арфьев В.Н. //Квантовая электроника. 1985. Т. 12. № 3. С. 631—634.
7. Зув В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы //Л.: Гидрометеоздат, 1986. 264 с.

Институт оптики атмосферы  
СО АН СССР, Томск

Поступила в редакцию  
14 июля 1989 г.

A. A. Mitsel, K. M. Firsov. Accuracy of Calculating Mean Values and Variances of the Atmospheric Absorption Characteristics at 10.6  $\mu\text{m}$ .

The paper presents the discussion of a technique for approximate calculations of the mean values and rms deviations of molecular absorption coefficient, atmospheric optical depth, and transmission function. It is shown that the method of statistical extrapolation enables one to obtain more correct values of the whole vertical atmospheric column based on the use of temperature and humidity values measured in the ground atmospheric layer.