

Н.Ф. Борисова, В.М. Осипов

ОСЛАБЛЕНИЕ УФ-РАДИАЦИИ НА АТМОСФЕРНЫХ ТРАССАХ

Предложена методика расчета функции пропускания атмосферных трасс с высоким спектральным разрешением в диапазоне 170–1200 нм, основанная на современной базе спектроскопических данных. Проведено сопоставление результатов расчетов с данными натурального эксперимента. Показано отсутствие аномальной спектральной зависимости аэрозольного ослабления в области 310–400 нм [1], уточнена роль вклада паров H₂O в ослабление УФ-радиации.

Проблемы экологии, газоанализа, лазерной локации обусловили возрастающий интерес к задаче определения прозрачности произвольно ориентированных атмосферных трасс в УФ-диапазоне спектра. В отличие от ИК-диапазона для этой спектральной области не разработано достаточно надежных методов расчета спектральной прозрачности, а интерпретация результатов немногочисленных натурных измерений сталкивается с принципиальными трудностями [1, 2]. В большинстве случаев полосы молекулярного поглощения в УФ-диапазоне имеют диффузную структуру, образованную наложением значительного числа неразрешенных, а зачастую и неидентифицированных переходов. Поэтому точные методы молекулярного поглощения, разработанные для ИК-области и основанные на базах данных о параметрах тонкой структуры спектра (HITRAN [3], GEISA [4]), в УФ-диапазоне, как правило, использовать не удастся. Кроме того, количественная интерпретация данных натурального эксперимента осложняется более значительным вкладом аэрозольного ослабления, сильной временной нестабильностью регистрируемых спектров [1].

Цель данной работы заключалась в разработке методики расчета УФ-прозрачности атмосферных трасс, пригодной для расчетов ослабления лазерного излучения и основанной на современной базе спектроскопических данных.

Сложная структура спектров молекулярного поглощения в диапазоне 0,17–1,2 мкм, обусловленная наличием как диффузных, так и структурированных полос поглощения, приводит к необходимости использовать комбинированную методику расчета, сочетающую приближенные выражения для расчета континуального поглощения с точной методикой line-by-line для расчета пропускания в структурированных полосах поглощения.

Запишем выражение для функции пропускания атмосферной трассы на пути *l*:

$$\tau(\Delta\lambda, l) = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\Delta\lambda} \exp\left(-\int_l K(\lambda, l) dl\right) d\lambda, \quad (1)$$

где $K = K_A^M + K_R^M + K_A^a + K_R^a$ – сумма коэффициентов молекулярного поглощения (K_A^M) и рассеяния (K_R^M) и

аэрозольного поглощения (K_A^a) и рассеяния (K_R^a). Поскольку лишь коэффициент молекулярного поглощения может иметь резко выраженный селективный характер, выражение (1) можно переписать в виде

$$\tau(\Delta\lambda, l) = \exp\left(-\int_l (K_R^M(\Delta\lambda, l) + K_A^a(\Delta\lambda, l) + K_R^a(\Delta\lambda, l)) dl\right) \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\Delta\lambda} \exp\left(-\int_l K_A^M(\lambda, l) dl\right) d\lambda. \quad (2)$$

При выводе (2) полагали, что интервал интегрирования $\Delta\lambda$ достаточно мал, так что для малоселективных компонент K^j выполняется условие

$$\frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\Delta\lambda} \exp\left(-\int_l K^j(\lambda, l) dl\right) \approx \exp\left(-\int_l K^j(\Delta\lambda, l) dl\right). \quad (3)$$

Поскольку коэффициент молекулярного поглощения в рассматриваемой области в общем случае является суммой селективно поглощающих молекулярных компонент с разрешенной вращательной структурой (K_A^{Mj}) и слабоселективных компонент с неразрешенной структурой (K_A^M), последний сомножитель в выражении (2) можно записать в виде

$$\tau_A^M = \exp\left(-\int_l \sum_j K_A^{Mj}(\Delta\lambda, l) dl\right) \frac{1}{\Delta\lambda} \times \int_{\Delta\lambda} \exp\left(-\int_l \sum_i K_A^{Mi}(\lambda, l) dl\right) d\lambda. \quad (4)$$

Переходя, как обычно, от интегрирования по пути *l* к суммированию по слоям и выражая K_A^{Mj} через сечение поглощения σ^j , для полной функции пропускания имеем

$$\tau(\Delta\lambda, l) = \exp\left(-\sum_n \Delta l_n [K_R^M(\Delta\lambda, l_n) + K_A^a(\Delta\lambda, l_n) + K_R^a(\Delta\lambda, l_n)]\right) \exp\left(-\sum_n \sum_j \Delta l_{nj} N_L \sigma_n^j(\Delta\lambda, l_n)\right) \times \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\Delta\lambda} \exp\left(-\sum_n \sum_i \Delta l_{ni} K_A^{Mi}(\lambda, l_n)\right) d\lambda. \quad (5)$$

Здесь $N_L = 2,69 \cdot 10^{19} \text{ (см}^{-3}\text{)}$ – число Лошмидта; $\Delta l_{nj} = C_{nj} l_n P_n$ – приведенная толщина j -компоненты в слое длиной l_n при объемной концентрации C_{nj} и давлении P_n ; $K(\Delta\lambda, l_n)$ – коэффициент поглощения или рассеяния в слое l_n , усредненный по интервалу $\Delta\lambda$.

Выражение (5) позволяет построить алгоритм вычисления функции пропускания произвольно ориентированной атмосферной трассы со сколько угодно высоким спектральным разрешением $\Delta\lambda$. Для широких интервалов $\Delta\lambda$ точность выражения (5) ограничена условием (3).

Отметим некоторые детали разработанной процедуры вычислений. Вычисление коэффициента молекулярного рассеяния $K_R^M(\Delta\lambda, l)$, как известно, трудностей не представляет. Для расчета величины аэрозольного поглощения и рассеяния K_A^a и K_R^a в данной программе используется широко распространенная численная процедура LOWTRAN-7 [5], описание которой для краткости изложения здесь опускаем. Наиболее сложную задачу представляет расчет молекулярного поглощения. Трудности в оценке континуальной составляющей K_A^M , выраженной в (5) через сечения поглощения σ_n^j , обусловлены ограниченностью имею-

щейся информации о сечениях поглощения. Прежде всего следует отметить недостаточную точность и невысокое спектральное разрешение значительной части имеющихся данных [6], ограниченность информации о зависимости σ_n^j от температуры и давления.

Для преодоления этой трудности была проведена работа по созданию банка данных о сечениях поглощения основных и загрязняющих компонентов атмосферы. Первая версия такого банка данных (банк UVACS – Ultraviolet Absorption Cross Section) представлена в работе [7]. В настоящее время банк содержит данные о сечениях поглощения 69 газовых компонентов в области 160–720 нм. Структура банка аналогична структуре известных банков данных по параметрам спектральных линий (HITRAN, GEISA) в ИК-области, т.е. сечения поглощения упорядочены по длинам волн, а не по типу молекулы, что значительно удобнее для организации расчетов атмосферного пропускания. Для ряда молекул (O_3 , NO , SO_2 , N_2O) банк включает экспериментальные и теоретические данные о температурной зависимости сечения поглощения. Перечень газов, представленных в банке UVACS, спектральные диапазоны и спектральное разрешение данных по сечениям поглощения приведены в таблице.

Газовые компоненты, представленные в банке UVACS

| Молекула | Спектральное разрешение, нм | Спектральный диапазон, нм | Молекула | Спектральное разрешение, нм | Спектральный диапазон, нм |
|----------------------------------|-----------------------------|---------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| H ₂ O | 0,1–1 | 150–205, 260–330 | OCIO | 3–5 | 242–476 |
| CO ₂ | 0,04–0,4 | 169–300 | COCl ₂ | 1–5 | 185–280 |
| O ₃ | 0,003–0,07 | 240–724 | COFCl | 0,2–3,0 | 186–226 |
| N ₂ O | 0,3 | 160–250 | CH ₃ Br | 5 | 190–260 |
| CO | 0,006 | 120–261 | CF ₂ Br ₂ | 2 | 190–308 |
| O ₂ | 0,04 | 60–102, 141–245 | CF ₃ Br | 5 | 190–286 |
| NO | 0,2–0,5 | 186–227 | CHF ₂ Br | 5 | 210–255 |
| SO ₂ | 0,003 | 290–320 | HClO ₄ | 5 | 190–280 |
| NO ₂ | 0,04 | 200–725 | N ₂ O ₄ | 0,1 | 185–410 |
| NH ₃ | 0,5 | 185–230 | HO ₂ NO ₂ | 1 | 190–330 |
| HNO ₃ | 0,3–0,7 | 190–330 | CS ₂ | 0,4 | 295–355 |
| OH | | 282 | CH ₃ OOH | 5 | 210–365 |
| HCl | 0,03 | 140–220 | ClO ₃ | 5 | 200–350 |
| HBr | 1 | 170–221 | NO ₃ | 1 | 400–695 |
| HI | 1 | 170–228 | CCl ₃ F | 2 | 174–260 |
| ClO | 0,03–0,3 | 240–310 | CCl ₂ F ₂ | 2 | 160–240 |
| OCS | 0,01 | 185–300 | CClF ₃ | 0,3 | 160–220 |
| H ₂ CO | 0,01 | 224–376 | CHCl ₂ F | 5 | 160–235 |
| HOCl | 0,3–1,0 | 215–375 | CHClF ₂ | 2 | 160–220 |
| CH ₃ Cl | 2 | 174–216 | CCl ₂ F–CClF ₂ | 2 | 160–250 |
| H ₂ O ₂ | 0,3–0,5 | 190–350 | CClF ₂ –CClF ₂ | 0,3 | 160–235 |
| ClONO ₂ | 0,2 | 190–450 | CF ₃ –CClF ₂ | 2 | 160–230 |
| COF ₂ | 2 | 186–224 | CF ₃ –CH ₂ Cl | 5 | 160–245 |
| CH ₂ Cl ₂ | 0,3 | 160–190 | CH ₃ –CClF ₂ | 2 | 160–230 |
| CHCl ₃ | 0,3 | 160–255 | BrO | 0,2–0,4 | 300–388 |
| CCl ₄ | 5 | 174–275 | BrCl | 10 | 220–540 |
| C ₂ H ₅ Cl | 0,03 | 160–240 | Br ₂ | 10 | 220–510 |
| CH ₃ CCl ₃ | 5 | 160–240 | Cl ₂ | 10 | 240–450 |
| ClONO | 5 | 235–400 | Cl ₂ O ₂ | 2 | 200–410 |
| BrONO ₂ | 5 | 186–390 | JBr | 10 | 220–540 |
| HONO | 0,9 | 190–399 | JCl | 10 | 220–540 |
| ClNO ₂ | 5 | 190–400 | CH ₃ CHO | 10 | 200–345 |
| CINO | 2 | 190–400 | Cl ₂ O | 10 | 200–500 |
| N ₂ O ₅ | 5 | 200–380 | – | – | – |

Трудности расчета селективной составляющей молекулярного поглощения связаны как с ограниченностью имеющейся информации о параметрах тонкой структуры поглощения, так и с чисто вычислительными проблемами расчета интегралов от быстро осциллирующих функций. Последняя из указанных проблем успешно решена для ИК-области спектра. В данной работе банк данных о параметрах спектральных линий газов (O_2 , H_2O) в диапазоне 0,6–1,2 мкм сформирован на базе последних версий банка HITRAN [3], а для расчета функций пропускания используется разработанная ранее для ИК-диапазона версия метода line-by-line [8].

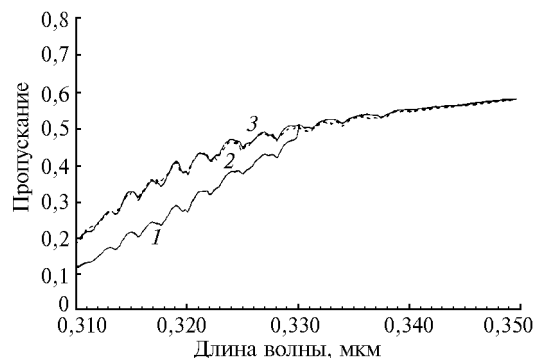
В качестве моделей атмосферы, задающих высотный ход концентрации поглощающих газов, температуры и давления, используются стандартные модели атмосферы AFGL [9, 10].

Разработанная программа была использована для количественной интерпретации результатов лабораторных и натурных измерений атмосферного пропускания в УФ-области спектра [11]. В качестве иллюстрации ниже приведены результаты количественной интерпретации результатов натурных измерений ослабления солнечной радиации, выполненных авторами работы [2] на высокогорной наблюдательной базе ГАО АН Украины «Пик Терскол». Эти данные представляют большой интерес, так как получены в условиях исключительно стабильной атмосферы на высоте 3100 м со среднеквадратической погрешностью $\Delta t \leq 1\%$ в области 310 нм и 0,2% в области 400 нм. Использование описанной выше программы с привлечением последних спектроскопических данных об УФ-поглощении O_3 и H_2O позволило при анализе этих измерений прояснить обсуждавшиеся в литературе вопросы о сильной спектральной зависимости аэрозольного ослабления в диапазоне $\lambda < 325$ нм [2, 11] и об относительной роли поглощения парами H_2O в области $\lambda < 330$ нм [12–14].

Спектр поглощения солнечного излучения в области 310–400 нм, исследованной в [2], сформирован, в основном, поглощением озона в полосе Хаггинса. Эта полоса, идентификация верхнего электронного состояния которой остается дискуссионной (см. [15]), представляет прогрессию (в основном по моде ν_1) колебательных переходов с неразрешенной из-за преддиссоциации вращательной структурой. Значительно более слабое молекулярное поглощение других атмосферных компонент (H_2O , NO_2) образует слабый континуум, налагающийся на континуальное ослабление аэрозолями. При расчете молекулярного поглощения были использованы представленные в банке UVACS сечения поглощения O_3 , измеренные авторами работы [16], и данные о сечениях поглощения H_2O , опубликованные в работах [12, 13]. Для учета температурной зависимости сечений поглощения O_3 использовалась линейная интерполяция экспериментальных данных о сечениях поглощения O_3 , т.е. $\sigma(\lambda, T) = k(\lambda) \sigma(\lambda, 300 \text{ К})$. Коэффициент темпера-

турной зависимости $k(\lambda)$ был определен по данным измерений [17, 18], полученным в диапазоне температур 195–300 К, с шагом по спектру $\Delta\lambda = 1$ нм. В промежутках между узлами сетки по длинам волн значения $k(\lambda)$ определялись также с помощью линейной интерполяции. Остальные составляющие коэффициента ослабления рассчитывались согласно описанной выше методике. Укажем, что высотный профиль озона задавался согласно модели [9], а приведенное общее содержание озона при этом в слое выше 3100 м составило 0,35 (см – атм_{СТР}), что близко к использованной в [2] толщине приведенного слоя $U_{O_3} = 0,343$ (см – атм_{СТР}). Модель аэрозоля, согласно методике LOWTRAN-7, задавалась в предположении, что влажность составляла 70%, дальность видимости 23 км, тип аэрозоля – фоновый.

Рассчитанные значения функций пропускания (кривая 1 на рисунке) существенно отличаются от результатов экспериментальных измерений (штриховая кривая 2). Анализ литературных данных и результатов собственных лабораторных и натурных измерений поглощения O_3 в данной спектральной области позволил установить, что причина рассогласования – существенное завышение вклада H_2O в величину молекулярного поглощения, заданного согласно данным [12, 13].



Рассчитанные значения пропускания атмосферы (непрерывные кривые 1, 3) и экспериментально измеренные (штриховая 2) в районе базы «Пик Терскол» [2]

Действительно, как показали расчеты, учет температурной зависимости сечений поглощения озона приводит к увеличению общего спектрального пропускания трассы не более чем на 3% в отдельных участках диапазона 310–330 нм. Поскольку данные работы [17] свидетельствуют о почти линейной зависимости сечений поглощения озона от температуры в диапазоне 200–300 К, возможные погрешности линейной интерполяции сечений поглощения не могут дать заметной (> 1%) ошибки при расчетах общего пропускания трассы, а тем более привести к его существенному уменьшению. Экспериментально установленный факт отсутствия зависимости сечений поглощения озона в полосе Хаггинса от давления позволяет пренебречь возможными ошибками расчетов пропускания неоднородной трассы приближенными методами (т.е. с

использованием выражения (2)). Вклад молекулы NO₂ не превышает 0,3% от величины пропускания.

С другой стороны, измерения коэффициента поглощения паров H₂O, выполненные в работе [4] с помощью оптико-акустического детектора с пространственно-временным разделением сигнала на частоте четвертой гармоники импульсного ИАГ-лазера ($\lambda = 266$ нм), дали значение $(1,3 \pm 0,2) \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1} \cdot \text{Торр}^{-1}$, что в 20 раз меньше, чем измеренное на этой же частоте в [13] значение $2,6 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-1} \cdot \text{Торр}^{-1}$. Мы использовали коэффициент $\bar{\kappa} = 1/20$ для перенормировки измеренной в работах [12, 13] спектральной зависимости $\sigma_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda)$. Поскольку в [13, 19] сделаны выводы об отсутствии тонкой структуры исследуемой полосы водяного пара и о пренебрежимом влиянии аппаратной функции на результаты измерений [13] (измерения [12, 14] выполнены с помощью лазеров в совпадающих спектральных интервалах), такая перенормировка представляется вполне обоснованной.

В этом случае вклад H₂O в ослабление УФ-радиации значительно меньше и составляет для наших условий на длине волны $\lambda = 310$ нм около 3% от общей величины коэффициента ослабления.

Расчитанные таким образом значения пропускания представлены на рисунке кривой 3. Ее отличие от средних значений спектрального пропускания, представленных в таблице работы [2], составляет

$$\overline{\Delta\tau} = \overline{\tau_{\text{изм}}(\lambda_i) - \tau_{\text{расч}}(\lambda_i)} = 0,006.$$

Хорошее согласие рассчитанных и измеренных значений спектрального пропускания в области 310–400 нм позволяет сделать следующие выводы:

1. Наличие сильной спектральной зависимости остаточного аэрозольного ослабления в области $\lambda < 325$ нм, обнаруженной в [2], обусловлено, в основном, ошибками в использованных исходных данных о величине молекулярного поглощения озона или погрешностями в расчете функции пропускания атмосферной трассы.

2. Представленные в [12, 13] значения коэффициента поглощения паров воды не согласуются с результатами натуральных измерений [2]. Эти значения, в соответствии с результатами [14], следует уменьшить примерно в 20 раз.

3. Показано, что применение предложенной методики расчета в сочетании с современной спектроскопической информацией позволяет достичь хорошего согласия с результатами натуральных измерений, выполненных в условиях стабильности атмосферной прозрачности. Таким образом, в рассмотренном спектральном диапазоне нет оснований привлекать гипотезу об «аномальной прозрачности атмосферы» [1] с целью интерпретации данных натурального эксперимента.

1. Лукин В.В., Исаков А.А., Свириденков М.А., Горчаков Г.И., Смирнова А.С. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1990. Т. 26. N 2. С. 135–140.
2. Бурлов-Васильев К.А., Васильева И.Э. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1992. Т. 28. N 12. С. 1170–1175.
3. Rothman L.S., Gamache R.R., Tipping R.H. et al. // J. Quant. Spectr. Rad. Trans. 1992. V. 48. N 516. P. 469–507.
4. Husson N., Bonnet B., Scott N.A., Chedin A. // J. Quant. Spectr. Rad. Trans. 1992. V. 48. N 516. P. 509–518.
5. Kneizys F.X., Shettle E.P., Abren L.W., et al. // AFGL-TR-88-0177. Environ. Res. Pap. 1988. N 1010. P. 137.
6. Chance K.V., Burrows J.P., Meller R. et al. // Atmospheric Spectroscopy Applications Workshop, 6–8 June, 1990, Moscow, USSR. Workshop Proceedings. Tomsk, 1990. P. 186–194.
7. Осипов В.М., Бабичева Н.А., Борисова Н.Ф. // II Межреспубликанский симпозиум «Оптика атмосферы и океана». Томск, 1995. (Тезисы докл.). Часть 1. С. 70–71.
8. Борисова Н.Ф., Осипов В.М., Павлов Н.И. // Квантовая электроника. 1985. Т. 12. N 12. С. 2505–2507.
9. McClatchey R.A., Fenn R.W., Selby I.E.A. et al. // AFGL-70-0527. 1970. N 331.
10. Anderson G.P., Clough S.A., Kneizys F.X. et al. // Environ. Res. Pap. 1986. N 954. P. 44.
11. Осипов В.М., Рублев А.В., Сакия А.С. и др. // Оптика в экологии: Тез. докл. С.-Петербург, 1997. С. 147.
12. Лукьяненко С.Ф., Новаковская Т.И., Потапкин И.Н. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. N 7. С. 706–709.
13. Лукьяненко С.Ф., Новаковская Т.И., Потапкин И.Н. // Оптика атмосферы. 1990. Т. 3. N 11. С. 1190–1192.
14. Kapitanov V.A., Tikhomirov B.A., Troizkii V.O., Tyryshkin I.S. // 12th Symposium and School on High resolution Molecular Spectroscopy. Proc. SPIE. N 3090. 1997. P. 204–207.
15. Сизова И.М. // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6. N 8, 9. С. 927–949.
16. Bass A.M., Paur R.J. // «Atmospheric Ozone. Proc. of Quad. Ozone Symp. (Halkidiki, Greece, 3–7 Sept. 1984)». D. Reider, Dordrecht, Holland, 1985. P. 606–616.
17. Molina L.T., Molina M.J. // J. Geophys. Res. 1986. V. 91. P. 14501.
18. Yoshino K., Freeman D.E., Esmond J.R., Parkinson W.N. // Planet Space Sci. 1988. V. 36. N 4. P. 395–398.
19. Климкин В.М., Лукьяненко С.Ф., Потапкин И.Н., Федоричев В.Н. // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. N 3. С. 322–323.

Федеральный научно-производственный центр,
г. Сосновый Бор Ленинградской обл.
Всероссийского научного центра «ГОИ им. С.М. Вавилова»
Научно-исследовательский институт комплексных испытаний
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
2 ноября 1997 г.

N.F. Borisova, V.M. Osipov. Attenuation of UV-Radiation Along Atmospheric Paths.

The function of the transmission of atmospheric paths in the range of 170–1200 nm is considered. The method of calculation of the transmission is developed, based on the modern spectra data base. The comparison of the results with the data of the natural experiment is made. The absence of anomalies in the spectral dependence of the aerosol attenuation in the range 310–400 nm [1] is shown, the contribution of the component of H₂O in attenuation UV-radiation is verified.