ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА СПЕКТРАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ПРОПУСКАНИЯ АТМОСФЕРЫ В ДИАПАЗОНЕ ОТ 0,3 ДО 14 МКМ ДЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ И НАКЛОННЫХ ТРАСС

К. Ю. Романов, А. Н. Старченко, В. Г. Филиппов, Н.И. Щербакова НИИ комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, г. Сосновый Бор, Ленинградская область e-mail: <u>rabnon@yandex.ru</u>

Для операционных систем Windows разработаны программы для вычисления спектральных функций пропускания атмосферы в области спектра 0,3...14 мкм с шагом по спектру 0,002 мкм.

При разработке оптико-электронных приборов (ОЭП) необходимо иметь данные об ослаблении атмосферой электромагнитных воли оптического диапазона. Существующие программы расчета, использующие большие подробные базы данных, не всегда позволяют поместить их в персональный компьютер каждого разработчика ОЭП для проведения оперативных оценочных расчетов. Представляемые в данном сообщении компактные и быстродействующие программы расчета спектральной прозрачности атмосферы CulcFlux2.2 и CulcFlux3.0 разработаны на основе упрощенных формул для операционных систем Windows (98,2000,XP) и имеют размер 900 кБ и 6 МБ, соответственно.

Программа **CulcFlux2.2** предназначена для инженерных расчетов спектральных функций пропускания атмосферы в области спектра 0,3...14 мкм на горизонтальных трассах, расположенных на уровне моря.

Программа **CulcFlux3.0** предназначена для инженерных расчётов спектральных функций пропускания атмосферы на наклонных трассах длиной до 20 километров с углом наклона к горизонту от 0 до 90 градусов. Трасса может находиться на высотах до 10 км над уровнем моря.

Интерфейс программы CulcFlux2.2 показан на рис. 1, а программы CulcFlux3.0 – на рис. 2.

Входными параметрами для программ CulcFlux2.2 и CulcFlux3.0 являются влажность, температура, метеорологическая дальность видимости на уровне моря, длина трассы. В программе CulcFlux3.0 вводятся еще угол наклона к уровню горизонта и начальная высота, а высота конечной точки трассы вычисляется автоматически и не может превышать 10000 метров.

Выходные данные могут быть представлены как в виде графиков спектральной зависимости функций пропускания трассы, так и в виде таблиц.

В программе CulcFlux2.2 для просмотра могут быть одновременно выведены спектральные зависимости результирующего ослабления, поглощения газами, поглощения парами воды и ослабления аэрозолями в любой комбинации, а в программе CulcFlux3.0 - спектральные зависимости результирующего ослабления, молекулярного поглощения, аэрозольного ослабления и молекулярного рассеяния. Кроме спектральных функций пропускания атмосферы обе программы позволяют вычислять среднее пропускание атмосферы в задаваемом диапазоне длин волн, а также интегральное (или эффективное) пропускание излучения абсолютно черного тела заданной температуры в задаваемом диапазоне длин волн.

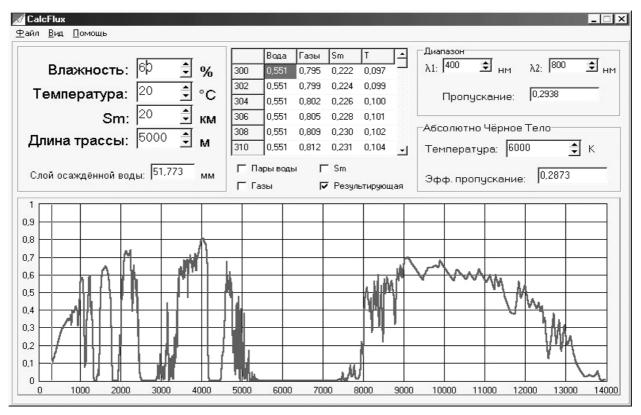


Рис. 1. Интерфейс программы CulcFlux2.2.

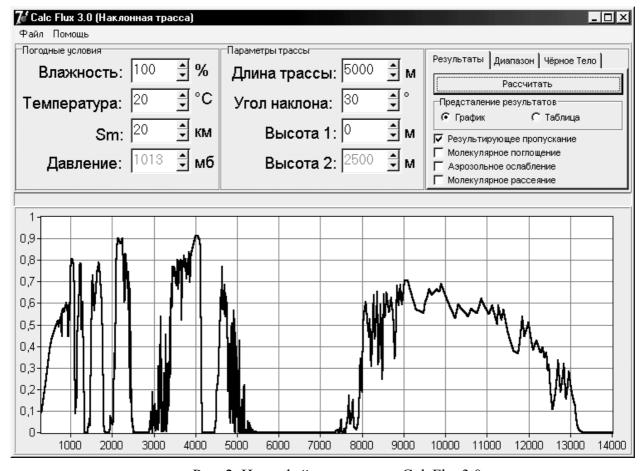


Рис. 2. Интерфейс программы CulcFlux3.0

Расчеты спектральных функций пропускания атмосферы проводятся по следующей методике.

Пропускание атмосферы на трассе вычисляется по формуле (1):

$$T = \exp(-\tau) \tag{1}$$

где τ - оптическая толща.

В рассматриваемой модели общая оптическая толща складывается из трёх составляющих:

$$\tau = \tau_{_{MR}} + \tau_{_{a}} + \tau_{_{R}} \quad , \tag{2}$$

где $au_{m.n.}$ – оптическая толща, обусловленная молекулярным поглощением;

 au_a – оптическая толща, обусловленная аэрозольным ослаблением;

 τ_R — оптическая толща, обусловленная молекулярным рассеянием.

Оптическая толща, обусловленная **молекулярным поглощением**, рассчитывается по формуле (3):

$$\tau_{M.n.} = \sum_{k} \beta_{k}(\lambda) \cdot \omega_{k}^{*m_{\lambda_{k}}}(h) , \qquad (3)$$

где $\beta_k(\lambda)$, $m_{\lambda k}$ – эмпирические спектральные параметры k-го поглощающего газа (для паров воды они берутся отдельно для селективного и континуального поглощения),

 ω_k^* – эффективная поглощающая масса k-го газа (измеренная в см. осаждённого слоя).

 $\beta_k(\lambda)$, $m_{\lambda k}$ – берутся из имеющейся базы данных.

Следует заметить, что имеющиеся в базе данных параметры $\beta_k(\lambda)$, $m_{\lambda k}$ имеют неравномерный шаг по длине волны. Поэтому их значения были пересчитаны методом интерполяции для равномерного шага 0.002 мкм.

В данной модели учитывались вклады следующих поглощающих газов: CO_2 , CO, N_2O , CH_4 , O_2 , O_3 , H_2O .

На **горизонтальной приземной трассе** расчёт ω_k^* производится по формуле (4):

$$\boldsymbol{\omega}_k^* = \boldsymbol{\omega}_{0k} L , \qquad (4)$$

где L — длина трассы в км, ω_{0k} — поглощающая масса k-го газа в приземном слое на трассе 1 км (см. ос. слоя/ км.).

Для **наклонных трасс** расчет эффективной поглощающей массы $\boldsymbol{\omega}_{k}^{*}$ рассчитывается по следующим формулам.

А) Для равномерно распределенных в атмосфере газов (CO_2 , CO, N_2O , CH_4 , O_2):

$$\boldsymbol{\varpi}_{k}^{*} = \int_{H_{1}}^{H_{2}} \boldsymbol{\varpi}_{0k} \cdot \left(\frac{P(h)}{P_{0}}\right)^{1,75} \cdot \frac{T_{0}}{T(h)} \cdot \frac{dh}{\sin \Theta}$$
 (5)

где $P_{\theta} = 1013$ мб = 1 атм; $T_{\theta} = 273$ K; Θ – угол наклона трассы, отсчитываемый от горизонта; высотный профиль температуры и давления вычисляется согласно ГОСТ 4401:

$$T(h) = T_0 - 0.0065 \cdot h, \tag{6}$$

$$P(h) = P_0 \left(1 - \frac{h}{44308} \right)^{5,255}, \tag{7}$$

где h – высота в метрах (h < 11000 м).

Б) Эффективная поглощающая масса для озона вычисляется по формуле:

$$\omega_{O_3}^* = \int_{H_1}^{H_2} 47 \cdot \rho(h) \cdot \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0.4} \frac{dh}{\sin \Theta}$$
 (8)

где $\rho(h)$ – высотный профиль распределения озона [1] для зимы и лета средних широт.

В) Для нахождения эффективной поглощающей массы паров воды необходимо знать вертикальный профиль распределения влажности. Часто этот профиль задают таблицей значений, соответствующих определенной модели. Однако модели представляют собой средние значения влажности, полученные на основе многолетних измерений. Отклонения от среднего значения могут быть весьма значительны. В наших расчетах в качестве входного параметра задается относительная влажность воздуха вблизи поверхности земли, а вертикальный профиль – экспоненциальной зависимостью абсолютной влажности от высоты. Показатель этой зависимости выбран на основе анализа ряда моделей [1,2], в частности, были подобраны аппроксимации для 5 моделей [1]. Был сделан вывод, что до высот 10 км изменение абсолютной влажности a(h) (г/м³) с высотой с достаточной для инженерных расчетов точностью можно задать функцией:

$$a(h) = a(0) \cdot \exp(-0.5h)$$
 (9)

Вычисляя упругость паров воды по формуле [3]

$$e(0) = 6,107 \cdot 10^{\frac{7,665 \cdot t}{243,33 + t}} \cdot \frac{f}{100},\tag{10}$$

где f - относительная влажность воздуха в %, t - температура в °C, находим эффективную поглощающую массу паров воды:

$$\omega_{H_2O}^* = \int_{H_1}^{H_2} \frac{21.7}{T_0} \cdot 6.107 \cdot 10^{\frac{7.665t}{243.33+t}} \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{P(h)}{P_0}\right)^{0.9} \cdot \exp(-0.5h) \frac{dh}{\sin\Theta}$$
(11)

Оптическая толща, обусловленная **аэрозольным ослаблением**, рассчитывается по формуле

$$\tau_a = \int_{H_1}^{H_2} \alpha_a(\lambda, h) \frac{dh}{\sin \Theta},\tag{12}$$

где

$$\alpha_a(\lambda, h) = \frac{3.9}{Sm} \cdot \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^m \cdot \exp\left(-\frac{h}{h_a}\right),\tag{13}$$

 $m = 0.585 \cdot \sqrt[3]{Sm}$ для Sm < 6 км, m = 1.3 для Sm = 6 - 20 км, m = 1.5 для Sm > 20 км,

 h_a — эмпирическая постоянная, зависящая от Sm таким образом, чтобы для h = 5 км - $\alpha_a(0.55) = 5.0 \cdot 10^{-3}$ км⁻¹, т.е. $h_a = 5/(6.65 - \ln S_m)$.

Оптическая толща, обусловленная **молекулярным рассеянием**, рассчитывается по формуле

$$\tau_R = \int_{H_1}^{H_2} \beta_M(\lambda, h) \cdot \frac{dh}{\sin \Theta} \quad , \tag{14}$$

где

$$\beta_{M}(\lambda, h) = \beta_{M}(0,55M\kappa M, h) \cdot \left(\frac{0,55}{\lambda}\right)^{4}.$$
 (15)

Сопоставление рассчитанных по программе спектров пропускания с результатами натурных измерений для приземных атмосферных трасс дает удовлетворительное соответствие. Однако следует отметить, что для узкополосных лазерных источников результаты расчета функций пропускания атмосферы весьма чувствительны к точности определения частот линий атмосферного поглощения и линий лазерной генерации. Поэтому для лазерных источников излучения программа дает оценочные значения, причем только в тех участках спектра, где нет ярко выраженных полос поглощения.

- 1. McClachey R.A., Fenn R.W., Selby J.E.A., J.S. Garing, F.E. Volz F.E. Optical Properties of the Atmosphere. Air Force Cambridge Res. Lab, Bedford, 1970.
- 2. Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. –М.: Сов.радио, 1970 496 с.
- 3. Атмосфера. Справочник.- Л.: Гидрометеоиздат, 1991-508с

PROGRAMS FOR COMPUTATION OF ATMOSPHERIC TRANSMISSION SPECTRAL FUNCTIONS IN THE RANGE BETWEEN 0,3 AND 14 µm FOR HORIZONTAL AND INCLINED TRACKS

K.Ju.Romanov, A.N. Starchenko, V.G.Filippov, N.I. Shcherbakova Research Institute for Complex Testing of Optoelectronic Devices and Systems The town of Sosnovy Bor Leningrad region 188540, RUSSIA phone/fax 8 (81369) 2-25-15, e-mail: <u>rabnon@yandex.ru</u>

The programs for computation of the function of the spectral transmission for atmospheric tracks in the range of wavelengths from 0,3 to 14 μ m with spectral resolution of 0,002 μ m are developed. The programs are operating in the Windows operational system.