

## МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ. ОБРАБОТКА ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

УДК 551.593.5.531.521.3

**А.А. Мицель**

### СОВРЕМЕННЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ МОДЕЛИ ПРОПУСКАНИЯ И РАДИАЦИИ АТМОСФЕРЫ В ИК-ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА

Дан обзор современных пакетов программ для расчета пропускания и ИК-радиации в полосах поглощения атмосферных газов. Выполнен анализ алгоритмов прямого счета и приближенных методов. Для отдельных участков спектра дано сравнение рассчитанных различными алгоритмами значений пропускания с высоким и низким спектральным разрешением.

Численное моделирование как метод исследования широко используется в оптике газовой атмосферы. В настоящее время созданы различные компьютерные модели атмосферного пропускания и радиации, которые используются для интерпретации данных по зондированию атмосферы и подстилающей поверхности, при решении задач климатологии и др. В 1982 г. Международная комиссия по радиации создала группу для сравнения пакетов программ [1]. Основное внимание при этом было уделено алгоритмам для расчета молекулярного поглощения.

Существующие пакеты программ можно разделить на две группы: 1) основанные на алгоритмах полинейного счета (line-by-line) [1–13]; 2) на приближенных методах [14–21]. Первая группа пакетов используется для расчета пропускания с высоким спектральным разрешением и предназначена прежде всего для обеспечения информацией наземных и спутниковых систем зондирования газового состава атмосферы. Вторая группа используется для решения задач зондирования температуры подстилающей поверхности, агропочвенных ресурсов и др.

В данной статье приводится обзор современных пакетов программ для расчета пропускания и ИК-радиации в полосах поглощения атмосферных газов, дается анализ используемых алгоритмов прямого счета и приближенных методов. Для отдельных участков спектра представлено сравнение рассчитанных различными алгоритмами значений пропускания с высоким и низким спектральным разрешением.

#### 1. Алгоритмы на основе полинейного счета

Международное сравнение алгоритмов (ITRA), используемых в задачах надирного, лимбового и микроволнового зондирования атмосферы, проводилось тремя тематическими группами [1], которые для краткости будем называть надирной, лимбовой и микроволновой группами.

Анализ спектров пропускания в надирной и лимбовой группах проводился в 15-мкм полосе  $\text{CO}_2$  и 6,3-мкм полосе  $\text{H}_2\text{O}$ . Рассмотрим кратко результаты, полученные надирной группой, в которую вошли представители 6 лабораторий из 4-х научных центров Японии, США, Франции и ГДР.

Участники ITRA отметили, что метод line-by-line весьма трудоемок (в численной реализации), поэтому требует упрощения для экономии памяти и времени счета. Упрощения включают в себя: выбор приемлемой частотной сетки, адекватно отражающей особенности спектра поглощения и обеспечивающей требуемую точность вычисления интеграла по частоте; предварительный отбор линий поглощения с значимым вкладом в пропускание на частоте  $\nu$  и удаление слабых линий из расчетной схемы; обрезание контура линии поглощения на заданном расстоянии от центра линии, что эквивалентно заданию интервала отбора линий.

##### 1.1. Отличительные признаки алгоритмов

Алгоритмы, разработанные специалистами различных институтов, различаются по следующим признакам:

а) По используемым аппроксимациям контура линии поглощения. Аппроксимации контура классифицируются по давлению (переход от контура Лоренца к контуру Доплера); по моделям контура Фойгта; способу вычисления форм-фактора  $\chi(|v - v_0|)$ , характеризующего отклонение крыльев линий от лоренцевского контура (табл. 1); интервалу обрезания контура линии поглощения и по способу учета температурной зависимости лоренцевской полуширины.

б) По методам экономии времени счета, которые включают в себя предварительный отбор линий поглощения; выбор частотной сетки; изменение частотной сетки с ростом высоты; выбор способа интегрирования по частоте; другие берегающие время процедуры (разделение частотной и высотной зависимостей оптической толщи отдельной линии; использование аппроксимации Куртиса-Годсона и др.).

в) По учету вкладов различных физических эффектов (интерференция линий, индуцированные полосы поглощения, континуальное поглощение и др.).

Выводы и рекомендации, полученные в отчете ITRA, состоят в следующем. Разброс в пропусканиях с разрешением  $0,05 \text{ см}^{-1}$  для 15-мкм каналов аппаратуры HIRS составляет в основном  $0,02\text{--}0,04$  для первых трех каналов, применяемых для зондирования стратосферы ( $668, 679$  и  $691 \text{ см}^{-1}$ ); максимальное отклонение от пропускания, рассчитанного пакетом NASA, составило  $0,08$  для первого канала и  $0,07$  – для второго канала. Однако среднеквадратическая ошибка составила  $0,01$ . Эта величина, по-видимому, и определяет порог точности алгоритмов. Для более высокого спектрального разрешения расхождения в расчетных спектрах в среднем увеличиваются.

Т а б л и ц а 1

Способ вычисления форм-фактора  $\chi(|v - v_0|)$  в различных алгоритмах

Форм-фактор $\chi$	
1	2
Метеорологический институт (Япония)	<p>Экспоненциальный контур:  <math>\chi( v - v_0 ) = \exp[-a( v - v_0  - d)^b]</math>, для <math> v - v_0  &gt; d</math>;  <math>\chi( v - v_0 ) = 1</math>, для <math> v - v_0  &lt; d</math>,  где <math>v_0</math> – центр линии; <math>d</math> – расстояние от центра линии; <math>a = 1,4 \text{ см}</math>; <math>b = 0,25</math>; <math>d = 3,5 \text{ см}^{-1}</math>.</p>
Отдел оптической физики AFGL (США)	<p>FASCOD алгоритм [2–4]:  для <math>\text{CO}_2</math>  <math>\chi = 1 + (\chi' - 1)(F_4 / L)</math>, для <math> v - v_0  \leq 64\gamma_v</math>;  <math>\chi = \chi'</math>, для <math>64\gamma_v \leq  v - v_0  \leq 25 \text{ см}^{-1}</math>;  <math>\chi = 0</math>, для <math> v - v_0  \geq 25 \text{ см}^{-1}</math>,</p>
	<p>где  <math>F_4 = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{\gamma_L}{(v-v_0)^2 + \gamma_L^2} - \frac{\gamma_L}{25^2 + \gamma_L^2} \right\}</math>, для <math>64\gamma_v \leq  v - v_0  \leq 25 \text{ см}^{-1}</math>;  <math>F_4 = 0</math>, для <math> v - v_0  \geq 25 \text{ см}^{-1}</math>;  <math>L = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{\gamma_L}{(v-v_0)^2 + \gamma_L^2} - \frac{\gamma_L}{25^2 + \gamma_L^2} \right\} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4</math>;  <math>\chi' = 1 + C_2  v - v_0 ^2 + C_4  v - v_0 ^4 + C_6  v - v_0 ^6</math>, для <math> v - v_0  \leq 2 \text{ см}^{-1}</math>;  <math>\chi' = \exp(-a v - v_0 ^b)</math>, для <math> v - v_0  \geq 2 \text{ см}^{-1}</math>;  <math>a = 0,623</math>; <math>b = 0,410</math>; <math>C_2 = -0,3762</math>; <math>C_4 = 0,08718</math>; <math>C_6 = 0,007079</math>.  Две области контура сшиты при <math> v - v_0  = 2 \text{ см}^{-1}</math>; в точке сшивания непрерывны первая и вторая производные.  Для других молекул:  <math>\chi = 1 - \frac{(v-v_0)^2 + \gamma_L^2}{25^2 + \gamma_L^2}</math>, для <math> v - v_0  \leq 25 \text{ см}^{-1}</math>;  <math>\chi = 0</math>, для <math> v - v_0  \geq 25 \text{ см}^{-1}</math>.</p>

1	2
<p>Лаборатория динамической метеорологии (Франция)</p>	<p>Аппроксимация Саскинда и Села [22]:</p> $\chi( v - v_0 ) = \begin{cases} 1 & \text{для }  v - v_0  < 0,5 \text{ см}^{-1} \\ 1,069 \exp[-0,133  v - v_0 ] & \text{для }  v - v_0  < 23 \text{ см}^{-1} \\ 0,05 & \text{для }  v - v_0  < 50 \text{ см}^{-1} \\ 0,133 \exp[-0,0196  v - v_0 ] & \text{для }  v - v_0  < 250 \text{ см}^{-1} \\ 0 & \text{для }  v - v_0  \geq 250 \text{ см}^{-1}. \end{cases}$ <p>Аппроксимация, используемая в NOAA [23, 24]:</p> $\chi( v - v_0 ) = [1 + A  v - v_0 ] \exp[-A  v - v_0 ] \quad \text{для }  v - v_0  < 4 \text{ см}^{-1};$ $\chi( v - v_0 ) = 0, \quad \text{для }  v - v_0  \geq 11 \text{ см}^{-1};$ $A = 2 / 11 \text{ см}^{-1}$
<p>ИОА СО РАН [10, 11] (Томск)</p>	<p>LARA алгоритм [10, 11]:</p> <p><math>\chi = 1</math> для всех частот и всех газов, кроме <math>\text{H}_2\text{O}</math> в диапазоне спектра <math>5 \div 6,5</math> мкм.</p> <p>Для <math>\text{CO}_2</math> континуум рассчитывается заранее с <math>\Delta\nu = 10 \text{ см}^{-1}</math> в области 1,4; 2,7 и 4,3 мкм; для <math>\text{H}_2\text{O}</math> в диапазоне <math>5 \div 6,5</math> мкм:</p> <p>для <math> v - v_0  \leq 4 \text{ см}^{-1}</math> <math>\chi = 1</math>,</p> <p>для области <math>10 \geq  v - v_0  \geq 4 \text{ см}^{-1}</math> используется контур С.Д. Творогова [25]:</p> $\chi( v - v_0 ) = 1 / F_L  v - v_0 ^{-(1+3/a)} [\kappa_f + \kappa_s]; \kappa_{f,s} = d_{f,s} \Phi(R_{f,s});$ $\Phi(R_{f,s}) = \frac{1}{R_{f,s}} \int_0^{R_{f,s}} \frac{R \exp(-V(R) / kT) dR}{\sqrt{R_{f,s}^2 - R^2}};$
	$R_{f,s} = \frac{C_{f,s}}{ v - v_0 ^{1/a}}; V(R) = 4\varepsilon \left[ \left(\frac{G}{R}\right)^{12} - \left(\frac{G}{R}\right)^6 \right]; \varepsilon/k = 217 \text{ К}; G = 3,24 \text{ \AA};$ <p><math>d_{f,s}, C_{f,s}, a</math> – параметры подгонки.</p> <p>Для <math>\text{H}_2\text{O}</math> в области спектра <math>8 \div 12</math> мкм используется модель континуума В.Н. Арефьева [28].</p>
<p>ИОА СО РАН [8, 9]</p>	<p>Обобщенный контур В.В Фомина [26]:</p> $\chi( v - v_0 ) = \frac{\nu}{\nu_0} \frac{[1 - \exp(-hc\nu/kT)]}{[1 - \exp(-hc\nu_0/kT)]} \frac{\pi(\nu - \nu_0)^2}{\gamma} [\kappa_f + \kappa_s] \frac{1}{N};$ $\kappa_{f,s} = \frac{4\pi R_{f,s}^3 N_{f,s}}{\sum_l C_l^{(f,s)} / R_{f,s}^l} \Phi(R_{f,s});$ $R_{f,s} = \left\{ C_3^{f,s} + \sqrt{(C_3^{f,s})^2 + 4\Delta\nu^{2(m-3)/m} (C_m^{(f,s)}(\Delta\nu))^{6/m} / 2\Delta\nu} \right\};$ $C_m^{f,s}(\Delta\nu) = \left( C_m^{(f,s)} + \sqrt{(C_m^{(f,s)})^2 + 4\Delta\nu^{2(k-m)/k} (C_k^{(f,s)})^{2m/k} \Delta\nu / 2} \right);$ $C_3^{(f,s)} = 3 \gamma_{f,s} / 3\pi^2 N_{f,s},$ <p>где <math>N_i</math> – концентрация частиц буферного (<math>i=f</math>) и поглощающего газов (<math>i=s</math>); <math>C_m^{(f,s)}</math>, <math>C_k^{(f,s)}</math> – параметры подгонки.</p>

1	2			
	<p>Контур Томаса и Нордстрема для H<sub>2</sub>O [27]:</p> $\chi( v - v_0 ) = [J_1(\Delta v) \varphi(\Delta v) + J_2(\Delta v) (1 - \varphi(\Delta v))] \frac{1}{F_L};$ $J_1(\Delta v) = \frac{1}{\pi} \frac{\gamma}{\Delta v^2 + \gamma_L^2} \frac{v}{v_0} \frac{1 - \exp(-hc v/kT)}{1 - \exp(-hc v_0/kT)}.$ $J_2(\Delta v) = \frac{1}{\pi} \frac{1 - \exp(-hc v/kT)}{1 - \exp(-hc v_0/kT)} \left[ \frac{0,3198 \lambda_{a6} \exp(-G_{a6} \sqrt{ \Delta v })}{ \Delta v ^{1,5} + \lambda_{a6}^3} + \frac{0,4334 \lambda_{b4} \exp(-G_{b4} \sqrt{ \Delta v })}{ \Delta v ^{1,75} + \lambda_{b4}^{7/3}} \right];$ $\gamma_L = \gamma_{L_0} \left( \frac{296}{T} \right)^{0,83} \left[ B \left( \frac{296}{T} \right)^{0,17} P_{H_2O} + P_{N_2} \right];$ $\lambda_{a6} = A1(v) \left( \frac{296}{T} \right)^{1,5} P_{H_2O};$ $\lambda_{b4} = A2(v) (\gamma_{L_0}/0,07)^{1,125} \left( \frac{296}{T} \right) P_{N_2};$ $G_{a6} = g_a(v) \left( \frac{296}{T} \right)^{\gamma_a(v)};$ $G_{b4} = g_b(v) \left( \frac{296}{T} \right)^{\gamma_b(v)};$ $\varphi(\Delta v) = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi}{5} \Delta v\right), &  \Delta v  < 5 \text{ см}^{-1}, \\ 0, &  \Delta v  \geq 5 \text{ см}^{-1}; \end{cases}$ $\Delta v = v - v_0;$ <p><math>B = 5</math> для H<sub>2</sub>O вблизи центра линии.</p>			
	Параметры	Вращательная полоса	$v_1$	$v_2$
	$A2$	2,35	2,20	2,65
	$A1$	0,18	0,18	0,23
	$g_a$	0,06	0,13	0,10
	$g_b$	0,115	0,11	0,075
	$\gamma_a$	-1,2	0,67	0,67
	$\gamma_b$	0,50	0,67	0,67

Разброс в результатах может быть в значительной степени связан с различием в учете вклада крыльев линии. Поэтому первоочередная задача состоит в разработке численной модели контура крыла линии. В табл. 1 приведены используемые различными группами аппроксимации форм-фактора  $\chi$ , а в табл. 2 даны модели континуального поглощения H<sub>2</sub>O. Модели контуров крыльев линий являются параметрическими. Параметры моделей определяются из экспериментальных данных по коэффициентам поглощения. Модели Робертса [29] и Клауфа [17] получены на основе экспериментальных данных Берча [30].

Модели непрерывного поглощения H<sub>2</sub>O

<p>Эмпирическая модель В.Н. Арефьева [28] для области 8–12 мкм:</p> $\alpha(\nu) = f(\nu) [K_1 \rho T^n (1 + 1,95 P) + K_2 \rho^2 \exp(2066/T)], \text{ км}^{-1};$ $K_1 = 0,22 \cdot 10^{-6}; \rho - \text{влажность, г/м}^3; K_2 = 0,82 \cdot 10^{-6}; P - \text{давление воздуха, атм.}$ $f(\nu) = 0,297 \exp \{ (10^{-4} \nu)^3 / [800 + 0,15 (10^{-4} \nu)^3] \}.$
<p>Эмпирическая формула Роберта, Селби и Бибермана [29].</p> <p>а) <math>\lambda = 8\text{--}11</math> мкм:</p> $\alpha(\nu) = 0,1 c(\nu) \rho_{\text{H}_2\text{O}} [P_{\text{H}_2\text{O}} + 0,002 (P_T - P_{\text{H}_2\text{O}}) \tilde{c}(T)], \text{ км}^{-1};$ $c(\nu) = 4,18 + 5578 \exp(-7,87 \cdot 10^{-3} \nu); \tilde{c}(T) = \exp[6,08 ((296 - T) / T)];$ <p>б) <math>\lambda = 3,5\text{--}4,2</math> мкм:</p> $\alpha(\nu) = 0,1 c(\nu) \rho_{\text{H}_2\text{O}} [P_{\text{H}_2\text{O}} + 0,12 (P_T - P_{\text{H}_2\text{O}})] \tilde{c}_1(T), \text{ км}^{-1};$ $c_1(\tilde{T}) = \exp[4,56 ((296 - T) / T)];$ $\rho_{\text{H}_2\text{O}} - \text{влажность, г/м}^3; P_{\text{H}_2\text{O}}, P_T - \text{парциальное (H}_2\text{O) и общее давление, атм.}$
<p>Модель Клауфа и др. (см. [17])</p> $\alpha(\nu) = c_s(\nu) \left( \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_0} \right) n_{\text{H}_2\text{O}} + c_f(\nu) \left( \frac{n_f}{n_0} \right) n_{\text{H}_2\text{O}}, \text{ см}^{-1};$ $c_s(\nu) = \nu \tanh(h c \nu / 2 k T) \tilde{c}_s, \text{ см}^2/\text{мол}; c_f(\nu) = \nu \tanh(h c \nu / 2 k T) \tilde{c}_f, \text{ см}^2/\text{мол};$ $n_{\text{H}_2\text{O}} - \text{число молекул H}_2\text{O}; n_0, n_f - \text{число молекул воздуха при нормальных условиях и уширяющего газа.}$

## 1.2. Краткое описание функциональных возможностей пакетов программ

## FASCOD (Fast Atmosphere Signature Code)

Наиболее широкое распространение получил пакет программ FASCOD. Первая версия пакета описана в [2]. Этот пакет разработан в лаборатории AFGl (США). Пакет позволяет рассчитывать коэффициенты пропускания и собственное излучение для произвольных атмосферных трасс в слое 0–120 км. Описание последней версии FASCOD 3 было представлено на 14-й Конференции по моделям атмосферного пропускания (1991 г.) [4].

Приведем основные отличительные особенности пакета FASCOD: спектральный диапазон – от среднего УФ до микроволновой области; высокая разрешающая способность (до 1/4 полуширины линии поглощения); используется атлас спектральных данных на внешнем носителе; предусмотрена возможность проводить расчеты пропускания и энергетической яркости при выполнении локального термодинамического равновесия (ЛТР) для 6 метеомоделей, заложенных в пакет, а также для произвольной метеомодели; предусмотрен учет аэрозольного ослабления и молекулярного рассеяния.

Новые возможности пакета FASCOD 3 включают в себя: учет многократного рассеяния тепловой радиации; учет температурной зависимости интерференции линии CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> для отдельных полос; учет диффузного УФ-поглощения O<sub>3</sub> и O<sub>2</sub>; совместимость с версией атласа HITRAN 91, включающей базу данных по сечениям ряда молекул с неразрешенной структурой; учет нарушения ЛТР в верхних слоях атмосферы.

## SHARC (Strategic High-Altitude Radiance Code)

Пакет SHARC разработан объединенным авторским коллективом из трех фирм США (Spectral Sciences Ins, Phillips Laboratory, Yarp Analitics). Последняя версия этого пакета приведена в [5]. Этот пакет предназначен для расчета радиации при нарушении ЛТР, а также излучения северного сияния. Отличительные особенности пакета: область высот 50–300 км; спектральный

диапазон 2–40 мкм с разрешением  $0,5 \text{ см}^{-1}$ ; произвольная геометрия трассы; интерактивный режим работы с диагностикой ошибок; учитываются механизмы химической кинетики; учитываются газы:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{CO}_2$  и их изотопы; модель полярного сияния включает в себя газы:  $\text{NO}^+$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{CO}_2$ ; учитываются дневные и ночные условия состояния атмосферы.

В пакете SHARC используется формализм эквивалентной ширины для расчета общего пропускания для каждой линии, что позволяет избежать обычного численного интегрирования по контуру линии.

#### GENLN 2 ( General line-by-line )

Первая версия пакета GENLN 2 разработана в Институте им. Роберта Хука (Великобритания, Оксфорд) [6, 7]. Пакет предназначен для расчета пропускания и радиации методом полинейного счета. Отличительные особенности пакета: используются различные контуры линий Фойгта, Доплера, Лоренца, Ван–Флека–Хьюбера; крылья линий  $\text{CO}_2$  описываются сублоренцевским контуром; учитывается эффект смещения линий; континуальное поглощение  $\text{H}_2\text{O}$  рассчитывается на основе модели Клауфа и др. (см. [17]); для тяжелых молекул с неразрешенной структурой используются сечения поглощения; учитываются индуцированные давлением полосы поглощения  $\text{O}_2$  и  $\text{N}_2$ ; применяется модель нарушения ЛТР Лопеца–Пуэтаса; используется приближение Куртиса–Годсона при вычислении среднего значения температуры, давления и содержания поглощающего газа.

Пакет программ для расчета собственного длинноволнового излучения атмосферы [8, 9] разработан в ИОА СО РАН и ориентирован главным образом на решение задачи определения температуры поверхности земли и океана по спутниковым измерениям уходящей тепловой радиации в «окнах прозрачности» атмосферы. Контур линии описывается формулой Фойгта. Крылья линии  $\text{H}_2\text{O}$  в окне 8–12 мкм рассчитываются по обобщенному контуру В.В. Фомина [26] (см. табл. 1) с параметрами, найденными путем подгонки к экспериментальным данным лабораторных измерений коэффициентов поглощения. Интегрирование по частоте проводится адаптивной процедурой с автоматическим выбором шага. В пакете предусмотрены следующие архивы: архив параметров линий поглощения; архив метеорологических моделей; архив аэрозольных моделей; архив коэффициентов континуального поглощения.

#### LARA ( Light Attenuation in Real Atmosphere )

Пакет LARA разработан в Институте оптики атмосферы СО РАН и ориентирован на проведение расчетов энергетических потерь оптического ( и прежде всего лазерного ) излучения в атмосфере. Описание последней версии пакета приведено в [10, 11]. Пакет позволяет рассчитывать коэффициенты поглощения, оптические толщи и пропускание атмосферных трасс для монохроматических, узкополосных и широкополосных излучений в диапазоне длин волн от ближнего УФ до микроволнового. Отличительные особенности пакета: используется атлас параметров линий на внешнем носителе; предусмотрен учет аэрозольного ослабления и молекулярного рассеяния света (аэрозольная модель разработана в ИОА СО РАН [31]); предполагается выполнение условий ЛТР в верхних слоях атмосферы; для лазерного излучения предусмотрен учет турбулентного уширения пучка в тропосфере; в пакет заложено 5 метеомоделей ИОА (см. [32]), 6 моделей AFGL [33]; и, кроме того, предусмотрена возможность ввода произвольной метеомодели.

Отметим здесь также пакет программ, разработанный в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова [12]. Первая версия пакета позволяет рассчитывать поглощение и ИК-радиацию атмосферы. Во второй версии предусмотрен расчет рассеянной солнечной радиации в участках спектра, занятых полосами поглощения атмосферных газов [13]. Из-за отсутствия информации о структуре пакета и его функциональных возможностях мы не приводим здесь его описание.

Аналогичные пакеты программ имеются и в других исследовательских группах, связанных с проблемой переноса ИК-радиации в атмосфере. В качестве примера можно привести пакет для расчета коэффициентов поглощения на основе полинейного метода, созданный в Институте экспериментальной метеорологии НПО «Тайфун». В 1987 г. было проведено сравнение этого пакета программ с пакетом LARA в диапазоне спектра 8–12 мкм по рассчитанным

коэффициентам поглощения на переходах лазера на изотопах  $\text{CO}_2$ . Расхождение в расчетных данных составило не более 1%.

### 1.3. Сравнение расчетных значений пропускания

Приведем сравнение результатов моделирования с помощью пакета LARA с данными других авторов, полученными как расчетным путем, так и в эксперименте.

Сравнение в области спектра 15 мкм. Детальное сравнение различных алгоритмов проводилось в рамках рабочей группы по международному сравнению компьютерных кодов для вычисления атмосферного пропускания и радиации. Результаты сравнения приведены в отчете ITRA [1]. Из 6 пакетов надирной группы в качестве эталона в [1] был взят пакет NASA. Мы также будем сравнивать пропускания  $T_L$ , рассчитанные пакетом LARA, с данными  $T_N$ , полученными пакетом NASA.

Для моделирования пропускания задавались следующие исходные данные: трасса – вертикальная от уровня 500 гПа до 0; метеомодель – стандартная среднегодовая модель США; спектральное разрешение  $\Delta\nu = 0,05 \text{ см}^{-1}$ . В табл. 3 представлены результаты расчета  $T_L$  в сравнении с  $T_N$  для отдельных частот, соответствующих максимумам и минимумам пропускания.

Таблица 3

Сравнение пропускания  $T_L$  (LARA) и  $T_N$  (NASA) [61]

$\nu, \text{см}^{-1}$	721,85	721,92	722,10	722,36	722,57	722,90	723,04	723,25
$T_N$	0,48	0,46	0,63	0,40	0,60	0,81	0,49	0,82
$T_L$	0,49	0,47	0,64	0,30	0,60	0,81	0,48	0,82
$\nu, \text{см}^{-1}$	723,30	723,35	723,42	723,55	723,60	723,64	723,75	723,80
$T_N$	0,78	0,80	0,80	0,59	0,70	0,70	0,57	0,35
$T_L$	0,78	0,81	0,80	0,58	0,70	0,71	0,58	0,37

Из табл. 3 видно, что расхождение между  $T_N$  и  $T_L$  не превосходит 0,01. В выводах отчета ITRA за пороговую погрешность принято значение 0,01. Таким образом, методика LARA дает значения пропускания в пределах пороговой погрешности, принятой международной группой.

Сравнение в области спектра 4,2 мкм. Приведем теперь результаты сравнения с экспериментальными данными. Для сравнения взяты данные натурального эксперимента [34]. Авторы измерили спектр Солнца в области частот 2385–2430  $\text{см}^{-1}$  с помощью интерферометра с разрешением 0,059  $\text{см}^{-1}$ . Данный диапазон спектра интересен тем, что кроме селективного поглощения заметное влияние оказывает континуум полосы 4,3 мкм углекислого газа. Расчет пропускания проводился для наклонной трассы с зенитным углом 59°. В табл. 4 приведены расчетные и экспериментальные значения пропускания. Распределение давления и температуры по высоте взято из той же работы [32], в которой авторы привели данные синхронных радиозондовых измерений температуры.

Таблица 4

Сравнение экспериментальных значений пропускания  $T_s$  [34] и  $T_L$  (LARA)

$\nu, \text{см}^{-1}$	2389,0	2389,6	2390,3	2390,8	2391,4	2392,0	2393,0	2394,0
$T_s$	0,12	0,15	0,20	0,28	0,32	0,36	0,43	0,46
$T_L$	0,08	0,15	0,23	0,29	0,35	0,39	0,45	0,47
$\nu, \text{см}^{-1}$	2395,0	2397,5	2400,0	2402,5	2405,0	2407,5	2410,0	2412,5
$T_s$	0,51	0,62	0,70	0,74	0,77	0,83	0,88	0,89
$T_L$	0,53	0,65	0,77	0,78	0,78	0,84	0,86	0,82

В табл. 4 сравнение дано для частот, на которых пропускание определяется и селективным, и континуальным поглощением. Из табл. 4 видно, что расхождение на отдельных частотах достигает 0,02–0,04 величины пропускания, а на частоте  $2400 \text{ см}^{-1}$   $\Delta T$  составило 0,07. Причиной такого разногласия между расчетными и экспериментальными значениями пропускания может быть недостаточная точность в исходных спектроскопических данных.

## 2. Алгоритмы на основе приближенных методов

В настоящее время для расчета функций пропускания с средним и низким спектральным разрешением широко используются три группы методов: 1) эмпирические методы; 2) методы на основе моделей полос поглощения; 3) метод прямого счета. Первые две группы методов были развиты в <долазерную эпоху> и являются параметрическими; параметры определяются путем подгонки к лабораторным данным либо к данным, полученным методом прямого счета. Эти методы используются для расчета ослабления в атмосфере широкополосных излучений. На основе эмпирических методов разработаны соответствующие методики расчетов. Среди них можно отметить методику ГОИ [35–37], методику авторов [38–43], ГГО [44] и методику LOWTRAN [14–17]. На основе модельного представления создана комбинированная методика расчета функций пропускания [45]. Общим ограничением разработанных методик расчета функций пропускания является фиксированное спектральное разрешение.

Метод прямого счета (метод line-by-line) не имеет ограничений, связанных со спектральным разрешением и теоретически позволяет рассчитывать функции поглощения для любого спектрального интервала. Практически же с увеличением спектрального интервала возрастают затраты машинного времени вычисления характеристик прозрачности, обусловленные, с одной стороны, увеличением числа линий, с другой – увеличением интервала интегрирования. Поэтому использование методов прямого счета для больших спектральных интервалов нецелесообразно.

В связи с этим в последнее время начинают развиваться быстрые методы расчета функций поглощения для широкополосных излучений [46–49], основанные на использовании моделей полос поглощения с параметрами, найденными не путем подгонки к лабораторным данным, а расчетным путем.

### 2.1. Методы расчета функций пропускания

#### 2.1.1. Эмпирические методы расчета функций пропускания

Среди эмпирических методов широкое распространение получил метод вычисления атмосферного поглощения, разработанный в лаборатории AFCRL (США) [14–17]. Этот метод позволяет рассчитывать функцию пропускания с разрешением  $20 \text{ см}^{-1}$  в диапазоне 0,25–25 мкм. Пропускание представляется в виде некоторой функции

$$T = f(C(\nu) W^*),$$

где  $W^*$  – эквивалентная поглощающая масса:

$$W^* = \int \rho(z) \left[ \frac{P(z)}{P_0} \left( \frac{T_0}{T(z)} \right)^{0,5} \right]^n dz,$$

$C(\nu)$  – эмпирический коэффициент, зависящий от частоты  $\nu$ . Значения параметров  $n$ ,  $C(\nu)$  и вид функции  $f$  определялись путем подгонки к лабораторным данным. Первоначально этот метод был реализован в виде номограмм [14]. Дальнейшее его развитие связано с разработкой вычислительного комплекса программ. Одна из последних версий этого пакета – LOWTRAN-7 [18].

Метод ГОИ и метод, разработанный авторами [38–43], являются трехпараметрическими и близкими по своей идее. Пропускание по методу ГОИ [35–37] рассчитывается по следующим формулам:

$$T(\lambda) = \exp \{-\beta_\lambda (W^*)^{m_\lambda}\};$$



$$W^* = \int \rho(z) \left[ \frac{P(z)}{P_0} \right]^{n_\lambda} dz,$$

где  $\rho(z)$  – концентрация поглощающего газа, см·км<sup>-1</sup>;  $P(z)$  – давление воздуха, атм;  $\beta_\lambda, m_\lambda, n_\lambda$  – эмпирические параметры.

Метод [38–43] дает следующее выражение для расчета пропускания:

$$T(\lambda) = \exp \{-\beta_\lambda W^{m_\lambda} P^{n_\lambda}\}.$$

В [41, 43] приведены параметры  $\beta_k, m_k, n_k$  для спектрального диапазона 1–14 мкм с разрешением  $\Delta\lambda$ , равным 0,026–0,1 мкм.

В методе ГГО [44] для расчета пропускания приземных трасс используются следующие формулы:

– для равномерно перемешанных газов (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CO, CH<sub>4</sub>)

$$T(\lambda) = \exp \{-\beta_1(\lambda) L^{n_1^{(k)}}\},$$

$$T_{[N_2]_2}(\lambda) = \exp \{-\beta_2(\lambda) L^{n_2^{(k)}}\},$$

$$T_{O_2}(\lambda) = \exp \{-\beta_3(\lambda) L^{n_3^{(k)}}\};$$

– для водяного пара

$$T_{H_2O}(\lambda) = \exp \{-\beta_4(0,1 \rho_{H_2O} L)^{n_4^{(k)}}\}.$$

Здесь  $T_{[N_2]_2}(\lambda)$  – пропускание в участках спектра, занятых индуцированными полосами азота. Континуальное поглощение H<sub>2</sub>O описывается выражением:

$$T_{\text{кон}}(\lambda) = \exp \{-\beta_5 k(t) \rho_{H_2O}^2 L\}.$$

Здесь  $L$  – длина трассы, км;  $\rho_{H_2O}$  – абсолютная влажность воздуха, г/м<sup>3</sup>. Эмпирические параметры  $\beta_i(\lambda), n_j(\lambda), i = 1, \dots, 5; j = 1, \dots, 4$  определялись на основе номограмм [14];  $k(t)$  – температурный множитель.

### 2.1.2. Методы модельного представления спектров поглощения

Эти методы основаны на идеализированном представлении полос поглощения в виде различных моделей, допускающих их аналитическое описание. Методы эти – параметрические, они имеют от двух до четырех параметров, которые определяются на основе экспериментальных данных или рассчитанных прямым методом спектров поглощения для различных значений термодинамических параметров среды. Подробное описание модельных методов можно найти в ряде монографий [45, 50].

Широкое распространение на практике получили три модели: 1) регулярная модель для равноотстоящих линий с одинаковыми интенсивностями и полуширинами (модель Эльзассера); 2) статистическая модель Пласса (линии равной интенсивности) и 3) статистическая модель Гуди (экспоненциальное распределение интенсивностей). Для теоретических исследований используется модель отдельной (изолированной) линии. Формулы для расчета функций пропускания по этим моделям имеют вид

$$T_{sl} = \frac{1}{\pi} \int_0^p \exp \left[ -\frac{2x\beta^2}{t^2 + \beta^2} \right] dt; \quad (1)$$

$$T_{el} = \frac{1}{\pi} \int_0^p \exp \left[ -x\beta \frac{sh(\beta)}{ch(\beta) - \cos(t)} \right] dt; \quad (2)$$

$$T_{pl} = \exp [-\beta L(x)]; \quad (3)$$

$$T_G = \exp \left[ -\frac{\beta x}{(1+2x)^{1/2}} \right]. \quad (4)$$

Здесь формула (1) – модель отдельной линии; (2) – модель Эльзассера; (3) – модель Пласса; (4) – модель Гуди;  $L(x)$  – функция Ланденбурга–Райхе:

$$L(x) = x e^{-x} [J_0(x) + J_1(x)],$$

$J_0(x), J_1(x)$  – функции Бесселя нулевого и первого порядка от мнимого аргумента. Параметры  $x$  и  $\beta$  выражаются через параметры эффективной линии поглощения:

$$x = \frac{S W}{2\pi \gamma}; \quad \beta = \frac{2\pi \gamma}{d},$$

где  $S, \gamma$  – средняя интенсивность и полуширина линий поглощения;  $d$  – среднее расстояние между линиями;  $W$  – поглощающая масса, которая для горизонтальной трассы может быть представлена в виде  $W = \rho L$ ,  $\rho$  – концентрация поглощающего газа;  $L$  – длина трассы.

Для неоднородной трассы точный учет изменчивости метеопараметров вдоль трассы луча возможен лишь в прямом методе. В приближенных методах расчета широкое распространение получил однопараметрический метод приведенной массы, используемый обычно в эмпирических методах [14–17, 35–43, 45, 50], и двухпараметрический метод Куртиса–Годсона [45, 50], который более точен и используется в методах модельного представления спектров поглощения.

На основе моделей спектров поглощения созданы комбинированные методы расчета функций пропускания [45], которые основываются на трех моделях: регулярной модели Эльзассера, статистической модели Пласса и статистической модели Гуди. Кроме основных формул (2) – (4) в комбинированных методах используются также аппроксимации сильной линии Гуди ( $x \gg 1$ ), эмпирическая модель (для  $\text{CO}_2$  в некоторых участках спектра), приближение сильной линии Эльзассера и др. Параметры моделей определяются, как правило, на основе лабораторных измерений функций пропускания для различного содержания поглощающих газов и разных температур. В отдельных случаях параметры моделей определялись подгонкой к расчетным данным.

Все приведенные выше методы расчета атмосферного поглощения имеют общее ограничение их применимости, связанное со спектральным разрешением, – они могут быть использованы для вычисления функции пропускания с разрешением не выше чем то, для которого получены входящие в формулы параметры.

В связи с этим важное значение приобретают методы быстрого счета, в которых используются идеи модельного представления спектров поглощения, а параметры линий определяются на основе атласов спектральных линий.

### 2.1.3. Методы быстрого счета

Использование метода моделей полос поглощения с параметрами, определяемыми на основе данных о тонкой структуре, позволяет определять пропускание атмосферы в широких областях спектра при любом спектральном разрешении. Расчетный способ нахождения параметров моделей полос стал возможен благодаря, с одной стороны, успехам спектроскопии высокого и сверхвысокого разрешения, с другой – развитым средствам записи, хранения и считывания спектроскопической информации.

Метод определения параметров на основе атласов спектральных линий широко используется для статистической модели Пласса [46, 52–53]. Нами было предложено использовать модель отдельной линии [48, 49], которая в ряде случаев оказывается более предпочтительной. На рис. 1 приведено сравнение статистической модели Пласса, модели отдельной линии и регулярной модели. Из этого рисунка видно, что модель отдельной линии дает промежуточное значение функции пропускания по сравнению с регулярной и статистической моделями.

В области 2,7 мкм было проведено сравнение модели отдельной линии с данными лабораторных измерений [38] в полосах поглощения  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ . Из рис. 2 и 3 видно достаточно хорошее согласие.

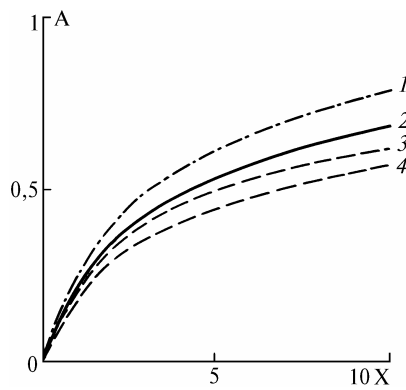


Рис. 1. Сравнение функций поглощения, рассчитанных по моделям полос при  $\beta = 0,4$ . Кривая 1 – модель Эль-зассера  $A_{Ez}$ ; 2 – модель отдельной линии  $A_{Sl}$ ; 3 – модель Пласса  $A_{Pl}$ ; 4 – модель Гуди  $A_G$

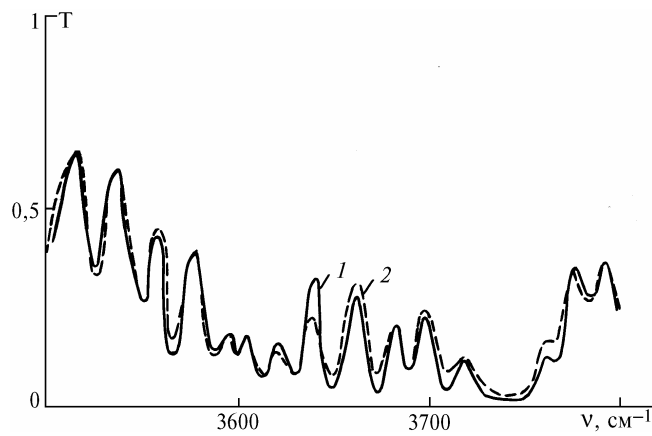


Рис. 2. Сравнение функций пропускания, рассчитанных по модели отдельной линии с экспериментальными данными [38] в полосе 2,7 мкм  $H_2O$ . Спектральное разрешение  $\Delta\nu = 10 \text{ cm}^{-1}$ ;  $W = 0,109 \text{ г/см}^2$ ;  $P = 148 \text{ мбар}$ ; кривая 1 – экспериментальные данные, 2 – расчет

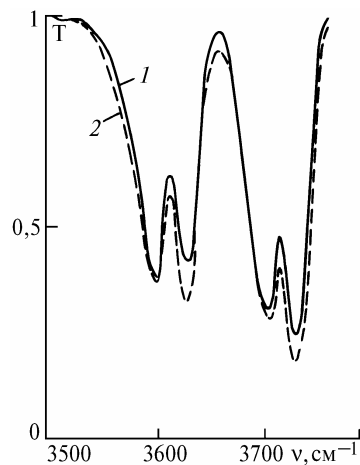


Рис. 3. Сравнение функций пропускания, рассчитанных по модели отдельной линии с экспериментальными данными [38] в полосе 2,7 мкм  $CO_2$ . Спектральное разрешение  $\Delta\nu = 8 \text{ cm}^{-1}$ ;  $W = 6,08 \text{ атм-см}$ ;  $P = 676 \text{ мбар}$ ; кривая 1 – экспериментальные данные, 2 – расчет

## 2.2. Пакеты программ для моделирования пропускания и радиации атмосферы с низким спектральным разрешением

## Пакет LOWTRAN

Пакет программ LOWTRAN разработан авторским коллективом в лаборатории AFCRL на основе методики, опубликованной в 1971 г. [14]. Последующие версии выпускались в 1975, 1976, 1978, 1980 [1–16], 1983 г. [17]. В [18] было сообщение о выпуске 7-й версии LOWTRAN-7.

LOWTRAN-5 позволяет рассчитывать пропускание и собственное излучение с разрешением  $20 \text{ см}^{-1}$  в диапазоне спектра от  $350$  до  $40000 \text{ см}^{-1}$  ( $0,25$ – $28,5 \text{ мкм}$ ). В программе используется однопараметрическая модель для молекулярного поглощения и учитывается континуальное поглощение, молекулярное рассеяние и аэрозольное ослабление. Для наклонных трасс учитывается рефракция и кривизна Земли. В пакет встроены в виде модулей шесть моделей высотного распределения метеорологических параметров (давление, температура, влажность, концентрация озона) для субарктических (зима, лето), умеренных (зима, лето) и тропических широт (среднегодная) и стандартная модель США. Объемные концентрации газов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{O}_2$  приняты постоянными и неизменными по высоте (равномерно перемешанные газы). Для паров азотной кислоты ( $\text{HNO}_3$ ) используется одна модель.

В пакете предусмотрен учет аэрозольного ослабления и молекулярного рассеяния на основе модели AFGL. Кроме того, имеется возможность ввода произвольной метеомодели и профиля аэрозольного коэффициента ослабления. Для всех высотных уровней предполагается выполнение условий ЛТР.

В LOWTRAN-6 (1983) сохранены все опции LOWTRAN-5 и добавлен блок расчета солнечной или лунной радиации. При расчете радиации учитываются следующие источники: собственное излучение вдоль линии визирования; излучение от внешних источников (солнце, луна), а также отраженное (землей) и рассеянное аэрозолем в направлении линии визирования. Рассеянная аэрозолем радиация рассчитывается в приближении однократного рассеяния. В пакете предусмотрена возможность использования трех видов индикатрис: стандартной; индикатрисы Непуеу-Greenstein с параметром асимметрии; произвольной модели, задаваемой пользователем.

Аэрозольные модели в LOWTRAN-6 дополнены моделью, описывающей прибрежные районы; предусмотрен учет ветра, изменена вертикальная структура аэрозольных моделей, включены модели перистых облаков и модель дождя.

В пакете LOWTRAN-7 (1989) список учитываемых в расчетах пропускания газовых составляющих дополнен новыми молекулами:  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  и  $\text{SO}_2$ . Рассеянная солнечная радиация вычисляется в приближении многократного рассеяния. В 7-й версии LOWTRAN введено ограничение на высотную область от  $0$  до  $50 \text{ км}$ .

## Пакет MODTRAN

В трудах 14-й Конференции по моделям атмосферного пропускания опубликовано краткое описание пакета программ MODTRAN [18]. Отличительные особенности пакета: спектральное разрешение  $2 \text{ см}^{-1}$ ; в пакете используется 2-параметрическая модель полосы поглощения; область высот до  $60 \text{ км}$ ; используется приближение ЛТР; исходные спектральные данные преобразованы в спектральное разрешение  $1 \text{ см}^{-1}$ ; предусмотрена возможность моделирования для треугольной аппаратной функции с произвольным спектральным разрешением; учитываются следующие газы:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ; параметры модели зависят от давления и температуры.

## Пакет AIRA

Пакет прикладных программ AIRA (Absorption of Infrared Radiation in the Atmosphere) разработан в Институте оптики атмосферы СО РАН [19–21]. В пакете учитываются следующие факторы ослабления: поглощение молекулярными газами, аэрозольное ослабление и молекулярное рассеяние света.

Как и в системе LARA, в пакете AIRA основные ресурсы и затраты связаны с учетом молекулярного поглощения. Однако в отличие от предыдущего пакета в данном случае используются алгоритмы быстрого счета, основанные на модельном представлении полос поглоще-

ния. Параметры моделей полос рассчитываются на основе атласа спектральных линий. Для расчета пропускания используется одна из 4-х моделей (см. формулы (1)–(4)).

В пакете предусмотрена коррекция одного из параметров модели по имеющимся экспериментальным либо полученным методом прямого счета данным о функции пропускания, что позволяет повысить точность оценки атмосферного поглощения. Расчет функции поглощения проводится для любого спектрального разрешения ( $\Delta\nu \geq 1 \text{ см}^{-1}$ ). В своей работе пакет AIRA может использовать либо атлас спектральных данных на внешнем носителе, либо рассчитанные заранее и занесенные в архив параметры моделей полос поглощения для фиксированного спектрального разрешения.

Аэрозольное ослабление света учитывается по известным оптическим моделям атмосферного аэрозоля, разработанным в ИОА [31].

В пакете AIRA используются как среднесезонные (ИОА [32] и AFGL [33]), так и региональные метеорологические модели атмосферы ИОА, построенные для отдельных квазиоднородных районов земного шара, выявленных на основе объективной прикладной классификации и адекватно описывающих для каждого из них высотное распределение оптически активных компонент.

1. Report on the ITRA. International Radiation Commission. Working Group on Remote Sensing / Edited by A. Chedin, H. Fisher, K. Kunzi, D. Spankuch, N.A. Scott. University of Maryland, 1988.
2. Smith H.J.P., Dube D.J., Gardner M.E., Clough S.A., Kneizys F.X., Rothman L.S. FASCOD – Fast Atmosphere Signature Code (Spectral Transmittance and Radiance). AFGL–TR–78–0081, 1978.
3. Clough S.A., Kneizys F.X., Rothman L.S., Gallery W.O. Atmospheric spectral transmittance and radiance: FASCOD 1B // Proc. of SPIE. 1981. V. 227.
4. Anderson G.P., Kneizys F.X., Chetwynd L.W. et al. FASCOD 3: An Update // Proceedings of the 14th Annual Review Conference on Atmospheric Transmission Models. Hanscom AIR FORCE BASE. Mass. 01731–5000. 1991. P. 73–85.
5. Robertson D., Bernstein L., Duff J. et al. SHARC, an Atmospheric Radiation and Transmittance Code for Altitudes from 50 to 300 km // Ibid. P. 107–118.
6. Edwards D.P. Recent Developments of the GENLN2 Line-by-Line Model: Studies in Support of the UARS Project // Ibid. P. 119–128.
7. Edwards D.P. // SPIE. 1988. V. 928. P. 94–116.
8. Афонин С.В., Гендрин А.Г. // Информационно-программное обеспечение задач атмосферной оптики / Под ред. Г.М. Крекова. Новосибирск: Наука, 1988. С. 38–65.
9. Гендрин А.Г., Новикова Н.В., Поспелова Е.И. Информационно-диалоговая система атмосферной коррекции данных дистанционного зондирования параметров подстилающей поверхности. Томск: 1989. 74 с. (Препринт / ТФ СО АН СССР, N 22).
10. Зуев В.Е., Макушкин Ю.С., Мицель А.А. и др. // Доклады АН СССР. 1985. Т. 283. N 2. С. 345–348.
11. Мицель А.А., Руденко В.П. Пакет прикладных программ для расчета энергетических потерь оптического излучения в атмосфере LARA-1 (версия 1988) // Препринт N 57. Томск: Изд. ТФ СО АН СССР, 1988. 55 с.
12. Фомин Б.А., Кузьмин И.И., Троценко А.Н., Черноплеков А.Н. Быстрый полинейный метод расчета поглощения ИК-радиации в газах. М.: 1984. 6 с. (Препринт / Ин-т атомной энергии. N 4070/1).
13. Fomin B.A., Romanov S.V., Trotsenko A.N. // SPIE. 1991. V.1811. P.354–358.
14. McClatchey R.A., Fenn R.W., Selby J.E.A., Volz F.E., Garing J.S. Optical Properties of the Atmosphere // AFCRL-71-0279. ERP N 354. Bedford, Mass. 1971. 88 p.
15. Selby J.E.A., McClatchey R.A. Atmospheric Transmittance from 0,25 to 28,5  $\mu\text{m}$ : Computed Code LOWTRAN 2 // AFCRL-TR-72-0745. 1972. AD 763 721.
16. Kneizys F.X., Shettle E.P., Gallery W.O., Chetwynd J.H., Abreu L.W., Selby J.E.A., Fenn R.W., McClatchey R.A. Atmospheric Transmittance / Radiance. Computer Code LOWTRAN 5 // AFGL-TR-80-0067. Hanscom. AFB, Mass. 1980. 233 p.
17. Kneizys F.X., Shettle E.P., Gallery W.O., Chetwynd J.H., Abreu L.W., Selby J.E.A., Clough S.A., Fenn R.W. Atmospheric Transmittance / Radiance. Computer Code LOWTRAN 6 // AFGL-TR-83-0187. Hanscom. AFB, Mass. 1983. 200 p.
18. Abreu L.W., Kneizys F.X., Anderson G.P., Chetwynd J.H. Modtran/ Lowtran: Current Status. Future Plans // Proceedings of the 14th Annual Review Conference on Atmospheric Transmission Models. Hanscom AFB, Mass. 1991. P. 65–72.
19. Комаров В.С., Мицель А.А., Михайлов С.А. и др. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 5. С. 84–89.
20. Firsov K.M., Kataev M.Yu., Mitsel A.A. et al. // ASA Workshop / Edited by A. Barbe, Yu.N. Ponomarev, R. Zander. Moscow, 1990. 264 p.
21. Firsov K.M., Kataev M.Yu., Mitsel A.A. Atlas of atmospheric and trace gas absorption for gas analyses and radiative transfer // Pros. SPIE, 1991. V. 1811. P. 385–388.
22. Susskind J., Searl J.E. // J.Q.S.R.T. 1977. V. 19. P. 195–215.
23. Neuendorffer A.C. Opt. Soc. Am. 1977. N 67. P. 1376.

24. Weinreb M.P., Fleming H.E., McMillin L.M., Neuendorffer A.C. // NOAA Techn. rep. Ness, Washington D.C., 1981.
25. Несмелова Л.И., Родимова О.Б., Творогов С.Д. Контур спектральной линии и молекулярное взаимодействие. Новосибирск: Наука, 1986. 215 с.
26. Фомин В.В. Молекулярное поглощение в инфракрасных окнах прозрачности. Новосибирск: Наука, 1986. 230 с.
27. Thomas M.E., Nordstrom R.J. // Appl. Opt. 1985. V. 24. N 21. P. 3526–3530.
28. Арефьев В.Н. // Квантовая электроника. 1985. Т. 12. N 3. С. 631–634.
29. Roberts R.E., Selby J.E.A., Biberman L.M. // Appl. Opt. 1976. V. 14. P. 2085.
30. Burch D.E. Investigation of the Absorption of Infrared Radiation by Atmospheric Gases // Semiannual technical report. U-4784 under contract NF 19628-69-c-0263. 1970. 27 p.
31. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптические модели атмосферного аэрозоля. Томск: Изд. ТФ СО АН СССР, 1986. 293 с.
32. Ипполитов И.И., Комаров В.С., Мицель А.А. // Спектроскопические методы зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1985. С. 4–44.
33. Anderson G.P., Clough S.A., Kneizys F.X., Chetwynd J.H., Shettle E.P. AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0–120 km) // AFGL-TR-86-0110. Hanscom AFB, MA 01731. 1986. 43 p.
34. Susskind J., Searl J.E. // J.Q.S.R.T. 1977. V. 18. P. 581.
35. Киселева М.С., Непорент Б.С., Федорова Е.О. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1967. Т. 3. N 6. С. 640–649.
36. Киселева М.С. // Оптика и спектроскопия. 1968. Т. 24. N 3. С. 401–407.
37. Гасилевич Е.С., Федорова Е.О., Киселева М.С., Гальцев А.П., Осипов В.М. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1978. Т. 14. С. 222–225.
38. Голубицкий Б.М., Москаленко Н.И. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1968. Т. 4. N 3. С. 346–359.
39. Голубицкий Б.М., Москаленко Н.И. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1968. Т. 4. N 1. С. 85–89.
40. Филиппов В.Л., Макаров А.С. // Изв. АН СССР. 1970. Т. 15. N 5. С. 557–560.
41. Филиппов В.Л. // Журн. прикл. спектроскопии. 1983. Деп. в ВИНТИ, рег. N 1045–83.
42. Козлов С.Д., Макаров А.С., Филиппов В.Л. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1982. Т. 18. N 2. С. 161–165.
43. Филиппов В.Л., Козлов С.Д., Румянцева Н.А., Зиатдинова Н.М., Макаров А.С. // Изв. вузов, Физика, 1984. Деп. в ВИНТИ, рег. N 2483–84. 52 с.
44. Броунштейн А.М., Фролов А.Д. // Труды ГГО. 1985. Вып. 496. С. 70–79.
45. The Infrared Handbook // Editor Wolf W.L., Zissis G.L. Chapter 5. LA Rocca A.J. Atmospheric Absorption. Washington. 1987. P. 5-1–5-132.
46. Robertson D.S., Bernstein L.S., Haimes R. et al. // Appl. Opt. 1981. V. 20. N 18. P. 3218–3226.
47. Осипов В.М. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1987. Т. 23. N 2. С. 140–147.
48. Мицель А.А., Фирсов К.М. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1987. Т. 23. N 11. С. 1221–1227.
49. Мицель А.А., Руденко В.П., Фирсов К.М. // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. N 2. С. 45–50.
50. Гуди Р. Атмосферная радиация. М.: Мир, 1966. 417 с.
51. Goldman A. // Appl. Opt. 1970. V. 9. N 11. P. 2600–2604.
52. Goldman A., Kyle T.G., Vonotto F.S. // Appl. Opt. 1971. V. 10. N 1. P. 65–73.
53. Тимофеев Ю.М., Хойнингген-Хюне, Штенкух Д. // Проблемы физики атмосферы. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. С. 68–73.

Институт оптики атмосферы  
СО РАН, Томск

Поступила в редакцию  
1993 г.

**A. A. Mitsel. Up-to-date Computer Models of the Atmospheric Transmission and Radiation in the IR Region.**

This paper presents an overview of recent program packages which are used for calculating the atmospheric transmission and IR radiation within the absorption bands of atmospheric gases. Analysis of algorithms of direct computations and approximate techniques is given. A comparison of the atmospheric transmission computed using different algorithms, with high and low spectral resolution, is carried out for some spectral regions.