

Т.Б. Журавлева, К.М. Фирсов

## Алгоритмы расчетов спектральных потоков солнечной радиации в облачной и безоблачной атмосфере

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 8.09.2004 г.

Описаны статистические алгоритмы расчетов спектральных потоков солнечной радиации в атмосфере в условиях ясного неба, а также сплошной и разорванной облачности, основанные на использовании представления функции пропускания атмосферными газами в виде ряда экспонент (метод  $k$ -распределения). Коэффициенты молекулярного поглощения рассчитываются на основе базы данных HITRAN-2000 с учетом инструментальных функций действующих приборов и реальных метеорологических параметров атмосферы и профилей концентрации газов. Для тестирования этих алгоритмов проведено сравнение наших результатов с эталонными расчетами восходящих и нисходящих потоков методом line-by-line для безоблачной атмосферы и данными натурных измерений в условиях сплошной облачности. Показано, что предложенные алгоритмы обладают высокой точностью и просты при компьютерной реализации.

### Введение

В ходе большинства радиационных экспериментов проводятся измерения интегральных (по спектру) потоков солнечной радиации. В то же время для лучшего понимания механизмов взаимодействия солнечного излучения с облачной, аэрозольной и газовой компонентами атмосферы необходимо иметь информацию о *спектральном* распределении радиационных характеристик. Сравнение экспериментальных данных с результатами вычислений в узких спектральных интервалах позволяет оценить возможности различных радиационных кодов адекватно моделировать процессы переноса солнечного излучения в системе «атмосфера – подстилающая поверхность». Эти коды различаются между собой способами учета молекулярного поглощения и методами решения уравнения переноса излучения.

В течение последнего десятилетия в Atmospheric and Environmental Research, Inc. (AER), США, был разработан ряд широко известных моделей, позволяющих рассчитывать монохроматические и широкополосные потоки излучения в диапазонах от ультрафиолетового до микроволнового. В основе этих моделей лежит line-by-line Radiative Transfer Model (LBLRTM) [1]. Возможности LBLRTM были расширены в Code for High Resolution Accelerated Radiative Transfer (CHARTS) за счет учета взаимодействия оптического излучения с облачностью и аэрозолем в предположении о *горизонтальной однородности* атмосферы [2].

В работе [3] предложен алгоритм расчета спектральных потоков солнечной радиации методом Монте-Карло, с помощью которого можно учесть влияние 3D-эффектов облаков. Последняя моди-

фикация этой модели [4] позволяет рассчитывать спектральные потоки и скорости нагревания/выхлаживания на основе метода  $k$ -распределения для 550 полос в интервале 0,2–5,0 мкм.

Эффективный метод расчета *средних* (по множеству реализаций облачных полей) спектральных потоков солнечной радиации в видимой и ближней ИК-областях спектра представлен в [5]. Данный алгоритм основан на решении методом Монте-Карло системы замкнутых уравнений для средней интенсивности в статистически однородной пуассоновской модели разорванной облачности. Для того чтобы продемонстрировать возможности метода, в [5] использованы функции пропускания атмосферными газами, предложенные в [6, 7]. Эти параметризации были разработаны в конце 60-х – начале 70-х гг. XX в. для основных полос поглощения атмосферными газами ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ ,  $N_2$ ) и соответствовали спектральному разрешению  $\Delta\nu = 10\text{--}20\text{ см}^{-1}$ . Накопленная к настоящему времени спектроскопическая информация позволяет получить более точные параметризации функций пропускания и, следовательно, более адекватно описывать процесс переноса оптического излучения в атмосфере.

Цель настоящей работы состоит в улучшении предложенного в [5] алгоритма расчета средних радиационных характеристик солнечной радиации в разорванной облачности с помощью представления функции пропускания атмосферными газами в виде ряда экспонент (метод  $k$ -распределения). Коэффициенты молекулярного поглощения рассчитываются на основе базы данных HITRAN-2000 с учетом инструментальных функций действующих приборов и реальных метеорологических параметров атмосферы и профилей концентрации газов.

В работе представлены также развитые нами алгоритмы расчета спектральных потоков солнечной радиации в условиях ясного неба и сплошной горизонтально однородной облачности.

## 1. Метод $k$ -распределения

Для учета молекулярного поглощения мы использовали модификацию метода рядов экспонент, описанную в [8]. Функция пропускания, обусловленная молекулярным поглощением солнечного излучения в спектральном интервале  $\Delta\lambda = (\lambda_1, \lambda_2)$ , может быть представлена в виде

$$T_{\Delta\lambda}(m) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F^*(\lambda) I_0(\lambda) T(m, \lambda) d\lambda / I_{0, \Delta\lambda},$$

$$I_{0, \Delta\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F^*(\lambda) I_0(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

где  $F^*(\lambda)$  – аппаратная функция регистрирующего прибора;  $I_0(\lambda)$  – спектральная солнечная постоянная;

$$T(m, \lambda) = \exp\left(-m \int_0^{H_{atm}} \kappa_{mol}(\lambda, z) dz\right)$$

– монохроматическая функция пропускания атмосферы Земли,  $\kappa_{mol}(\lambda, z)$  – коэффициент молекулярного поглощения на длине волны  $\lambda$  и высоте  $z$  над поверхностью Земли,  $m$  – оптическая масса атмосферы (в направлении на Солнце),  $H_{atm}$  – верхняя граница атмосферы. В предположении о том, что атмосфера Земли является плоско-параллельной,  $m = 1/\cos\xi_\odot$ ;  $\xi_\odot$  – зенитный угол Солнца.

Согласно [8]  $T_{\Delta\lambda}(m)$  может быть преобразована к виду

$$T_{\Delta\lambda}(m) = \int_0^1 \exp\left(-m \int_0^{H_{atm}} k(g, z) dz\right) dg =$$

$$= \sum_{i=1}^N C_i \exp\left(-m \int_0^{H_{atm}} k(g_i, z) dz\right), \quad (2)$$

где  $k(g, z)$  – эффективный коэффициент поглощения в пространстве кумулятивных частот, который является непрерывной, возрастающей функцией аргумента  $g$ . Последнее обстоятельство позволяет эффективно применять для численного интегрирования гауссовские квадратуры и представить  $T_{\Delta\lambda}(m)$  в виде короткого ряда экспонент (как правило,  $N \leq 7+10$ );  $g_i$  и  $C_i$  – узлы и коэффициенты гауссовских квадратур;  $\sum_{i=1}^N C_i = 1$ .

Для того чтобы исключить проблемы, связанные с учетом перекрывания полос поглощения различных атмосферных газов, применялась следующая технология расчетов:

– коэффициенты молекулярного поглощения рассчитывались методом line-by-line (LBL) сразу для смеси газов при заданных метеорологических условиях (давление, температура, концентрации поглощающих газов);

– на основе этих коэффициентов и спектральной зависимости солнечной постоянной  $I_0(\lambda)$  и аппаратной функции регистрирующего прибора  $F^*(\lambda)$  методом  $k$ -распределения рассчитывались эффективные коэффициенты поглощения и коэффициенты гауссовских квадратур.

## 2. Моделирование радиационных характеристик: горизонтально-однородная атмосфера

### 2.1. Модель атмосферы

Горизонтально-однородная модель атмосферы задавалась в виде совокупности  $N_{lay}$  слоев с постоянным давлением, температурой, влажностью и т.д. Каждый  $j$ -й слой,  $1 \leq j \leq N_{lay}$ , определялся постоянным коэффициентом ослабления аэрозоля  $\sigma_j^{aer}(\lambda)$ , альбедо однократного рассеяния  $\omega_j^{aer}(\lambda)$  и индикатрисой рассеяния излучения  $g_j^{aer}(\mu, \lambda)$ ,  $\mu$  – косинус угла рассеяния. Вертикальная стратификация аэрозольных оптических свойств соответствовала модели, рекомендованной World Climate Program (WCP) [9]. В этой модели представлены значения  $\sigma_j^{aer}(\lambda)$ ,  $\omega_j^{aer}(\lambda)$  и  $g_j^{aer}(\mu, \lambda)$  для фиксированных (опорных) длин волн; для остальных  $\lambda$  значения оптических характеристик получены на основе линейной интерполяции. В пределах каждого слоя задавался также коэффициент молекулярного (рэлеевского) рассеяния  $\sigma_j^r(\lambda)$  [10].

Облака выделялись в виде отдельного слоя (с номером  $N_{cl}$ ) с нижней  $H_b^{cl}$  и верхней  $H_t^{cl}$  границами. Оптическая модель облаков задавалась коэффициентом ослабления  $\sigma^{cl}(\lambda)$ , альбедо однократного рассеяния  $\omega^{cl}(\lambda)$  и индикатрисой рассеяния излучения  $g^{cl}(\mu, \lambda)$ . Эти характеристики были рассчитаны для фиксированных длин волн на основе теории Ми [11] в предположении, что распределение облачных капель по размерам удовлетворяет Г-распределению с параметрами, соответствующими «широкому» распределению частиц [12]. Для учета спектральной зависимости оптических характеристик облаков для промежуточных значений  $\lambda$  также была использована линейная интерполяция.

Предполагалось, что подстилающая поверхность отражает падающее излучение по закону Ламберта с альбедо  $A_s$ .

### 2.2. Алгоритмы расчета

Для расчета спектральных радиационных характеристик  $R_{\Delta\lambda}$  (поток, яркость) с учетом молекулярного поглощения мы использовали два различ-

ных алгоритма, основанных на решении уравнения переноса излучения методом Монте-Карло [13, 14].

*Первый алгоритм* основан на возможности – согласно формуле (2) – представления  $R_{\Delta\lambda}$  в виде суммы

$$R_{\Delta\lambda} = \sum_{i=1}^N C_i R_i, \quad (3)$$

где  $R_i$  – монохроматическая радиация на кумулятивной длине волны  $g_i$ , соответствующая  $i$ -у набору эффективных коэффициентов молекулярного поглощения

$$\left\{k^i(z)\right\}_{i=1}^N, \quad k^i(z) \equiv k(g_i, z).$$

В пределах спектрального интервала  $\Delta\lambda$  оптические характеристики облаков, аэрозоля, а также коэффициенты рэлеевского рассеяния полагаются постоянными. Для всех  $1 \leq i \leq N$  в каждом  $j$ -м слое коэффициенты рассеяния среды оставались неизменными и определялись соотношениями:

$$\begin{aligned} \sigma_{s,j}^{mix,1} &= \omega^{cl} \sigma^{cl} + \omega_j^{aer} \sigma_j^{aer} + \sigma_j^r, \quad j = N_{cl}, \\ \sigma_{s,j}^{mix,1} &= \omega_j^{aer} \sigma_j^{aer} + \sigma_j^r, \quad j \neq N_{cl}, \end{aligned} \quad (4)$$

тогда как коэффициент ослабления среды на каждом  $i$ -м шаге варьировался согласно формуле

$$\begin{aligned} \sigma_j^{mix,1} &= \sigma^{cl} + \sigma_j^{aer} + \sigma_j^r + k_j^i, \quad j = N_{cl}, \\ \sigma_j^{mix,1} &= \sigma_j^{aer} + \sigma_j^r + k_j^i, \quad j \neq N_{cl}. \end{aligned} \quad (5)$$

Поглощение атмосферными газами учитывалось при каждом столкновении фотона через вероятность выживания кванта:

$$\omega_j^{mix,1} = \sigma_{s,j}^{mix,1} / \sigma_j^{mix,1}.$$

*Второй алгоритм* основан на идее Van de Hulst and Irvine [12], что акты поглощения и рассеяния оптического излучения в атмосфере независимы друг от друга. Согласно этому подходу розыгрыш траектории фотонов моделируется в среде без учета молекулярного поглощения, т.е. коэффициент ослабления определяется в отличие от (5) соотношением

$$\begin{aligned} \sigma_j^{mix,2} &= \sigma^{cl} + \sigma_j^{aer} + \sigma_j^r, \quad j = N_{cl}; \\ \sigma_j^{mix,2} &= \sigma_j^{aer} + \sigma_j^r, \quad j \neq N_{cl}. \end{aligned} \quad (5a)$$

Учет молекулярного поглощения в каждой точке столкновения  $\mathbf{r}_n$  осуществляется введением дополнительного статистического веса фотона, который определяется функцией пропускания и убывает по мере увеличения пройденного пути  $L$  [13,14]:

$$L = \sum_{k=1}^n l_k, \quad l_k = |\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{k-1}|.$$

В обоих алгоритмах траектории фотона моделировались стандартным способом [13].

Первый алгоритм является более трудоемким по сравнению со вторым, поскольку для расчета  $R_{\Delta\lambda}$  требуется провести  $N$  расчетов в средах с различным значением коэффициента ослабления (5). Чем больше членов ряда  $N$  используется для аппроксимации функции пропускания рядом экспонент (2), тем больше времени требуется для расчета той или иной радиационной характеристики.

### 2.3. Тестовые расчеты

Для того чтобы протестировать эти алгоритмы, мы провели сравнение наших результатов с эталонными расчетами восходящих и нисходящих потоков для безоблачной атмосферы, представленными в [15].

Первоначально были сделаны оценки погрешностей, обусловленных применением рядов экспонент. В табл. 1 представлены значения пропущенного излучения для полосы 10000–10500  $\text{см}^{-1}$  (950–1000 нм) в чисто поглощающей атмосфере, рассчитанные методами LBL и  $k$ -распределением для различных значений членов ряда  $N$  в формуле (2). Расчеты методом LBL проводились на основе пакета программ, разработанного в ИОА СО РАН [16]; высокая скорость расчетов обеспечивалась использованием многосеточного алгоритма. Параметры спектральных линий были взяты из баз данных HITRAN-92 и HITRAN-2000 (<http://www.hitran.com>), а солнечная постоянная из LOWTRAN-7 [10]. Использование базы данных HITRAN-92 и солнечной постоянной из пакета LOWTRAN-7 обусловлено тем, что расчеты Б. Фомина [15] были выполнены именно для этих исходных данных. Континуальное поглощение рассчитывалось по модели Clough et al. CKD24 (<http://rtweb.aer.com>). Вертикальные профили температуры, давления воздуха и концентраций атмосферных газов ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CH}_4$  и др.) задавались согласно метеомодели AFGL для лета умеренных широт [17].

Наши расчеты, проведенные методом LBL на основе HITRAN-92, совпадают с результатами [15] в пределах 0,1%. Различия в нисходящих потоках, обусловленные переходом к HITRAN-2000, в рассматриваемой полосе 10000–10500  $\text{см}^{-1}$  возрастают на уровне подстилающей поверхности до ~2%. Относительная погрешность расчетов при использовании метода  $k$ -распределения в сравнении с методом LBL зависит от числа квадратур  $N$ : так, например, если при  $N = 4$  погрешность не превышала 1%, то при  $N = 10$  она уменьшалась до ~0,1%. Выбор числа квадратур зависит от рассматриваемого спектрального диапазона и требований, предъявляемых к точности радиационных расчетов в каждой конкретной задаче. Поскольку в данном исследовании предполагалось провести сопоставление расчетов с натурными измерениями, то для аппроксимации функции пропускания в дальнейших расчетах мы ограничились рядом из четырех экспонент: в этом случае погрешность при расчетах пропускания и потоков излучения в основном не превышала 1%.

Таблица 1

Тестовые расчеты нисходящих потоков ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) в спектральном интервале  $10000\text{--}10500\text{ см}^{-1}$ , выполненные в чисто поглощающей атмосфере с использованием спектральных баз данных HITRAN-92 и HITRAN-2000. Солнечная постоянная взята из [10]. Метеомодель – лето, средние широты (MLS) [17]. Зенитный угол Солнца  $\xi_0 = 30^\circ$ . Величина  $\Delta = F_{\Delta}^{\downarrow, \text{LBL}} - F_{\Delta}^{\downarrow, k(N)}$  обозначает разницу между расчетами методами LBL и  $k$ -распределения с различным числом квадратур  $N$

z, км	HITRAN-92					HITRAN-2000			
	[15]	Наши расчеты							
	LBL	LBL	$k$ -распр., $N = 4$	$\Delta$	$k$ -распр., $N = 10$	$\Delta$	LBL	$k$ -распр., $N = 4$	$\Delta$
100,0	31,448	31,449	31,451	-0,002	31,451	-0,002	31,449	31,451	-0,002
70,0	31,448	31,449	31,451	-0,002	31,451	-0,002	31,449	31,451	-0,002
50,0	31,448	31,449	31,451	-0,002	31,451	-0,002	31,449	31,451	-0,002
20,0	31,446	31,446	31,449	-0,003	31,449	-0,003	31,446	31,449	-0,003
15,0	31,443	31,444	31,448	-0,004	31,447	-0,003	31,444	31,448	-0,004
14,0	31,442	31,443	31,448	-0,005	31,447	-0,004	31,443	31,448	-0,005
13,0	31,441	31,442	31,447	-0,005	31,446	-0,004	31,442	31,447	-0,005
12,0	31,437	31,439	31,446	-0,007	31,443	-0,004	31,438	31,446	-0,008
11,0	31,424	31,425	31,442	-0,017	31,433	-0,008	31,424	31,441	-0,017
10,0	31,383	31,385	31,426	-0,041	31,400	-0,015	31,381	31,424	-0,043
9,0	31,303	31,304	31,389	-0,085	31,329	-0,025	31,295	31,385	-0,090
8,0	31,170	31,170	31,317	-0,147	31,202	-0,032	31,153	31,308	-0,155
7,0	30,956	30,956	31,181	-0,225	30,988	-0,032	30,927	31,163	-0,236
6,0	30,637	30,637	30,937	-0,300	30,655	-0,018	30,592	30,904	-0,312
5,0	30,183	30,182	30,523	-0,341	30,177	0,005	30,114	30,466	-0,352
4,0	29,492	29,489	29,788	-0,299	29,467	0,022	29,389	29,692	-0,303
3,0	28,456	28,477	28,597	-0,12	28,466	0,011	28,329	28,440	-0,111
2,0	27,039	27,066	26,911	0,155	27,074	-0,008	26,853	26,680	0,173
1,0	25,278	25,295	25,002	0,293	25,305	-0,010	25,001	24,709	0,292
0,0	23,260	23,274	23,132	0,142	23,298	-0,024	22,890	22,779	0,111

Таблица 2

Потоки восходящей и нисходящей радиации  $F_{clr}^{\uparrow}(z)/F_{clr}^{\downarrow}(z)$  ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) в газовой-аэрозольной атмосфере в спектральном диапазоне  $10000\text{--}10500\text{ см}^{-1}$ , рассчитанные двумя различными методами (раздел 2.2). Число членов ряда  $N = 4$ . Метеомодель – MLS [17], аэрозольная модель – maritime I [9]. Зенитный угол Солнца  $\xi_0 = 30^\circ$

z, км	$A_s = 0$					$A_s = 0,8$				
	[15]	Наш расчет				[15]	Наш расчет			
	LBL	Метод 1	Метод 2	Метод 1	Метод 2	LBL	Метод 1	Метод 2	Метод 1	Метод 2
	HITRAN-92		HITRAN-2000			HITRAN-92		HITRAN-2000		
0	0	0	0	0	0	18,57	18,48	18,48	18,20	18,20
	22,87	22,74	22,74	22,40	22,39	23,22	23,10	23,10	22,74	22,73
1	0,0592	0,061	0,0616	0,0599	0,0603	16,84	16,90	16,90	16,55	16,54
	24,96	24,68	24,68	24,40	24,39	25,21	24,94	24,94	24,64	24,64
2	0,117	0,121	0,121	0,118	0,118	16,08	16,18	16,17	15,79	15,78
	26,79	26,66	26,67	26,43	26,45	26,94	26,82	26,83	26,59	26,60
3	0,128	0,132	0,132	0,129	0,130	15,74	15,84	15,84	15,44	15,43
	28,23	28,36	28,35	28,21	28,23	28,36	28,51	28,50	28,35	28,37
4	0,142	0,146	0,146	0,142	0,143	15,57	15,68	15,68	15,27	15,27
	29,28	29,57	29,56	29,48	29,47	29,41	29,71	29,69	29,61	29,60
5	0,154	0,16	0,16	0,157	0,157	15,48	15,60	15,59	15,18	15,18
	30,00	30,33	30,34	30,28	30,26	30,11	30,45	30,45	30,39	30,37
10	0,219	0,224	0,224	0,221	0,221	15,38	15,49	15,49	15,07	15,07
	31,31	31,35	31,34	31,35	31,34	31,36	31,40	31,39	31,40	31,39
12	0,239	0,245	0,245	0,242	0,232	15,36	15,47	15,47	15,06	15,06
	31,40	31,41	31,38	31,41	31,43	31,43	31,44	31,42	31,44	31,46
20	0,264	0,274	0,274	0,27	0,27	15,37	15,48	15,48	15,06	15,06
	31,44	31,44	31,46	31,44	31,46	31,44	31,45	31,47	31,45	31,47
50	0,274	0,286	0,286	0,282	0,283	15,37	15,48	15,48	15,07	15,06
	31,45	31,45	31,47	31,45	31,47	31,45	31,45	31,47	31,45	31,47
70	0,274	0,286	0,286	0,283	0,283	15,37	15,48	15,48	15,07	15,06
	31,45	31,45	31,47	31,45	31,47	31,45	31,45	31,47	31,45	31,47
100	0,274	0,286	0,286	0,283	0,283	15,37	15,48	15,48	15,07	15,06
	31,45	31,45	31,45	31,45	31,45	31,45	31,45	31,45	31,45	31,45

В табл. 2 приведены значения восходящих ( $F_{clr}^\uparrow$ ) и нисходящих ( $F_{clr}^\downarrow$ ) потоков солнечной радиации, рассчитанных методами 1 и 2 (см. раздел 2.2) в молекулярно-аэрозольной атмосфере. Расчеты выполнены в полосе 10000–10500  $\text{см}^{-1}$  при  $N = 4$  для аэрозольного профиля типа maritime I [9] и соответствуют 50-му и 51-му стандартным наборам ICRCSSM [18]. Различия в значениях потоков излучения, рассчитанных методами 1 и 2, не превышают 0,05–0,1%, что существенно меньше погрешности расчета за счет использования короткого ряда экспонент.

Результаты эталонных расчетов [15], приведенные в табл. 2, получены методом LBL. Их анализ показывает, что при использовании HITRAN-92 представление функции пропускания в виде суммы четырех экспонент приводит к завышению нисходящих потоков на высотах  $z \geq 3$  км и их занижению вблизи подстилающей поверхности ( $z \leq 2$  км) по сравнению с методом LBL. Аналогичная картина наблюдается и в табл. 1. Достаточно значимые ( $> 0,15 \text{ Вт/м}^2$ ) различия  $F_{clr}^\downarrow$  на высоте  $z \leq 3$  км (см. столбцы 3-й, 5-й и 4-й, 6-й соответственно в табл. 2) обусловлены переходом от HITRAN-92 к HITRAN-2000 (для сравнения см. табл. 1).

### 3. Сравнение модельных расчетов и экспериментальных данных

В этом разделе приводится сравнение результатов моделирования спектральных потоков солнечной радиации с данными наблюдений, полученными для случаев сплошной однослойной облачности нижнего яруса во время кампании 1997–1998 гг. на ARM (Atmospheric Radiation Measurement) SGP (Southern Great Plains) сайте, Оклахома, США [19,20].

#### 3.1. Данные натуральных экспериментов

Данные о спектральных потоках были получены с помощью радиометра с вращающимся теневым экраном RSS (Rotating Shadowband Spectroradiometer), который измеряет прямую, диффузную и полную радиацию в 512/1024 каналах оптического диапазона 350–1075 нм (см., например, [21]). Вертикальные профили давления, температуры и водяного пара восстановлены на основе данных радиозондов, а водозапас облаков LWP (Liquid Water Path) – по данным микроволнового зондирования. Информация о содержании озона в столбе атмосферы взята из архива TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer). Данные о верхней и нижней границе облачного слоя определялись с помощью наземных радаров. В расчетах учитывался спектральный ход альбедо подстилающей поверхности, полученный из измерений MFRSR (Multi-filter Rotating Shadow Band) [22]. Коэффициент ослабления облаков выбирался таким образом, чтобы рассчитанные и измеренные спектральные потоки совпадали в полосе 500–550 нм. Эффективный ра-

диус облачных капель  $r_{eff}$ , определенный из соотношения

$$r_{eff} = \frac{3LWP}{2\sigma^c(H_t^c - H_b^c)\rho}$$

( $\rho$  – плотность воды), варьировался в интервале от 6 до 11  $\mu\text{м}$  и соответствовал типичным значениям слоистых облаков в этом регионе [23].

#### 3.2. Влияние функции фильтра на результаты расчетов

В спектральных участках, где молекулярное поглощение мало, при расчетах функции пропускания часто используют приближенное описание спектральной зависимости аппаратной функции  $F^*(\lambda)$  в прямоугольной форме. Однако такая аппроксимация при наличии молекулярного поглощения может приводить к заметным погрешностям при радиационных расчетах [24].

Предполагается, что эталонный модельный контур RSS, максимально приближенный к реальному, в полосах с центром  $\lambda_0$  хорошо аппроксимируется усеченной гауссовской функцией (<ftp://oink.asrc.cestm.albany.edu/pub/RSS102>):

$$F(\lambda, \lambda_0) = \exp\left(-\left(\frac{\lambda - \lambda_0}{w(\lambda_0)}\right)^2\right) \quad \text{при } |\lambda - \lambda_0| \leq \lambda_{0,\max}, \quad (7)$$

где  $\lambda_{0,\max}$  определялось из условия

$$F(\lambda_{0,\max}, \lambda_0) = 0,02; \\ \text{для } |\lambda - \lambda_0| > \lambda_{0,\max} \quad F(\lambda_{0,\max}, \lambda) = 0.$$

Оценим погрешность функции пропускания  $T_{\Delta\lambda}(m)$ , которая возникает при замене эталонного контура на его аппроксимацию в виде прямоугольной формы (спектральная ширина прямоугольной аппаратной функции равнялась спектральной ширине гауссовской аппаратной функции на высоте  $\exp(-1)$ ):

$$\delta_T = 100\% \left( T_{\Delta\lambda}^n(m) - T_{\Delta\lambda}^{\text{Gaus}}(m) \right) / T_{\Delta\lambda}^{\text{Gaus}}(m).$$

Эффективные коэффициенты поглощения были рассчитаны с использованием спектральной базы данных HITRAN-2000; значения солнечной постоянной на верхней границе атмосферы взяты из [25, 26]. Количество членов ряда в представлении (2) было выбрано равным  $N = 4$ . На рис. 1 приведены значения спектральных потоков солнечной радиации на верхней границе атмосферы ( $z = H_{atm} = 100$  км и уровне подстилающей поверхности  $z = 0$ ), рассчитанные методом LBL в чисто поглощающей атмосфере.

Расчеты показали, что величина  $\delta_T$  возрастает по мере увеличения поглощения излучения атмосферными газами и при зенитном угле Солнца  $\xi_\odot = 75^\circ$  составляет  $\approx 2\%$  при  $\lambda = 591$  нм и  $\approx 8\%$  при  $\lambda = 761$  нм. В полосе поглощения водяным паром 940 нм значения  $\delta_T$  достигают  $\approx 25\%$ , а при

$\lambda = 947 \text{ нм}$   $\delta_T \approx 330\%$  (рис. 2). Это означает, что для повышения точности радиационных расчетов необходимо учитывать аппаратные функции реальных приборов даже в полосах относительно слабого поглощения атмосферными газами.

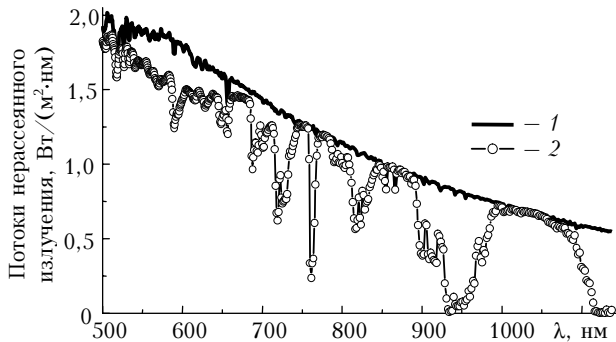


Рис. 1. Поток нерассеянного солнечного излучения на верхней границе атмосферы (кривая 1) и подстилающей поверхности (кривая 2), рассчитанные методом LBL в чисто поглощающей атмосфере. Расчеты кривых на рис. 1–4 выполнены с использованием базы данных HITRAN-2000; солнечная постоянная взята из [26]; метеомодель – лето, средние широты [17].  $\xi_0 = 75^\circ$

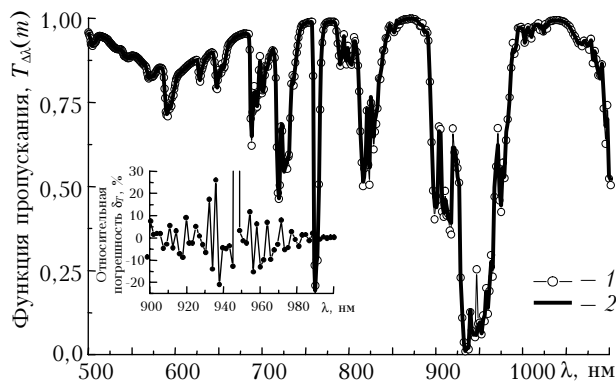


Рис. 2. Пропускание в чисто поглощающей атмосфере (метод LBL): аппаратная функция в виде усеченной гауссовской функции (кривая 1); прямоугольная аппаратная функция (кривая 2). На фрагменте показана относительная погрешность  $\delta_T$  (%) функции пропускания при использовании прямоугольной функции вместо усеченной гауссовской.  $\xi_0 = 75^\circ$

### 3.3. Сравнение модельных расчетов с экспериментальными данными

Расчеты спектральных потоков выполнены нами в полосе 550–650 нм для трех различных облачных ситуаций (табл. 3) с использованием второго алгоритма (см. раздел 2.2). Эффективные коэффициенты молекулярного поглощения рассчитаны с учетом функции фильтра радиометра RSS (512 каналов). Аэрозольные характеристики соответствовали модели континентального аэрозоля cont-I [9]. При моделировании рассеяния в облаках использована индикатриса рассеяния Хенни–Гринштейна со значением среднего косинуса  $\langle \mu \rangle = 0,86$ .

Результаты сравнения показали, что во всех рассмотренных случаях наши расчеты удовлетворительно совпадают как с данными эксперимента, так и с расчетами, выполненными в работе [19] с использованием пакета MODTRAN4. В ряде случаев полученные нами результаты находились в лучшем соответствии с измеренными спектральными потоками, нежели расчеты на основе радиационного кода MODTRAN4 (рис. 3). Таким образом, предлагаемые нами алгоритмы, в целом, правильно описывают процесс переноса солнечного излучения в горизонтально-однородной атмосфере.

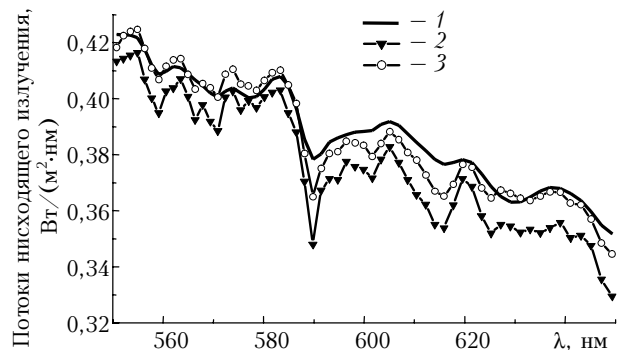


Рис. 3. Поток нисходящей солнечной радиации на уровне подстилающей поверхности для облачной ситуации 19 октября 1997 г. (табл. 3): кривая 1 – измерения RSS (512 каналов); кривая 2 – модельные расчеты [19], сельский аэрозоль, дальность видимости – 23 км; кривая 3 – наши расчеты, аэрозольный профиль – cont-I [9]

Таблица 3

Параметры атмосферы, используемые в качестве входных параметров при расчетах спектральных потоков солнечной радиации. Место проведения экспериментов – Atmospheric Radiation Measurement Southern Great Plains site (США)

Дата	Зенитный угол Солнца, град	Общее содержание, см			Положение облачного слоя, км	Оптическая толщина облаков, 550 нм	Эффективный радиус, мкм
		водяного пара	жидкой воды	озона			
19.10.1997	47,15	1,6	0,008	0,34	0,58–0,85	16,5	7,2
03.04.1998	31,17	1,4	0,034	0,38	1,0–1,5	55,1	9,3
05.08.1998	24,39	4,1	0,019	0,33	1,49–1,88	25,9	9,1

## 4. Моделирование радиационных характеристик: разорванная облачность

Оптическая модель разорванной облачности задавалась в пределах слоя  $H_b^{cl} \leq z \leq H_t^{cl}$  в виде случайных скалярных полей коэффициента ослабления  $\sigma^{cl}(\lambda)\kappa(\mathbf{r})$ , альbedo однократного рассеяния  $w^{cl}(\lambda)\kappa(\mathbf{r})$  и индикатрисы рассеяния излучения  $g^{cl}(\lambda, \mu)\kappa(\mathbf{r})$ . Математическая модель статистически однородного поля  $\kappa(\mathbf{r})$  строится на основе пуассоновских потоков точек на прямых и представлена, например, в [27].

Алгоритм расчета средних (по облачным реализациям) радиационных характеристик в разорванной облачности описан в [5]. Суть алгоритма состоит в том, чтобы, во-первых, разбить диапазон на  $N_{int}$  подынтервалов, полагая, что в пределах каждого из них оптические характеристики облаков и аэрозоля являются постоянными; во-вторых, выполнить расчеты спектральных потоков методом Монте-Карло, разработанным для решения системы замкнутых уравнений для средней интенсивности [5, 27]. Для учета молекулярного поглощения предлагается использовать ту или иную параметризацию функции пропускания (этот подход соответствует описанному в разделе 2.2 алгоритму 2 для горизонтально однородной атмосферы). В отличие от [5], где для аппроксимаций функций пропускания  $T_{\Delta\lambda}$  использовались результаты [6, 7], в настоящей работе  $T_{\Delta\lambda}$  представляется в виде ряда экспонент. Эффективные коэффициенты молекулярного поглощения рассчитываются на основе базы данных HITRAN-2000 для любых реальных профилей температуры, давления и концентраций атмосферных газов с учетом аппаратной функции реальных приборов.

На рис. 4 представлен пример расчетов средних спектральных потоков восходящего  $\langle F^\uparrow \rangle$  и нисходящего  $\langle F^\downarrow \rangle$  солнечного излучения в разорванной облачности, выполненных с учетом указанной выше модификации.

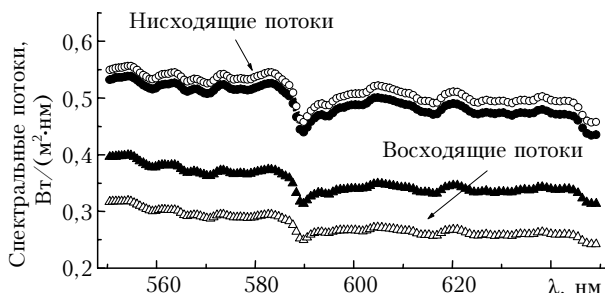


Рис. 4. Средние потоки диффузной радиации на уровне подстилающей поверхности  $\langle F^\downarrow(z=0) \rangle$  и верхней границы атмосферы  $\langle F^\uparrow(z=H_{atm}) \rangle$  (темные значки). Балл облачности  $p = 0,5$ ; средний размер облаков  $D = 0,5$  км; облачный слой 1–2 км;  $\xi_\odot = 60^\circ$ ,  $\sigma(\lambda = 550 \text{ нм}) = 10 \text{ км}^{-1}$ ;  $A_s = 0,2$ . Светлые значки — расчет в горизонтально однородной атмосфере (6)

При вычислении эффективных коэффициентов молекулярного поглощения использованы аппаратные функции упомянутого выше радиометра RSS (1024 каналов). Здесь же приведены результаты моделирования  $\hat{F}^{\uparrow(\downarrow)}$  в предположении о горизонтальной однородности облаков:

$$\hat{F}^{\uparrow(\downarrow)} = pF_{pp}^{\uparrow(\downarrow)} + (1-p)F_{clr}^{\uparrow(\downarrow)}, \quad (6)$$

где  $p$  — балл облачности, а индексы  $pp$  и  $clr$  соответствуют потокам в условиях сплошной облачности и ясном небе. Представленные на рис. 4 результаты хорошо согласуются с полученными нами ранее выводами о влиянии случайной геометрии облаков на перенос оптического излучения в атмосфере [27].

Отметим, что при высоком спектральном разрешении число  $N_{int}$  может быть достаточно большим. Для того чтобы уменьшить трудоемкость расчетов спектральных потоков (яркостей), как в горизонтально однородной атмосфере, так и в условиях разорванной облачности, может быть использован алгоритм, основанный на методе независимых испытаний [5,13]. В рамках настоящей работы этот подход не обсуждается, но при необходимости проведения массовых расчетов он будет реализован авторами с учетом тех модификаций, которые предложены в данном исследовании.

### Заключение

В настоящей статье представлены алгоритмы расчетов спектральных потоков (яркостей) солнечной радиации в атмосфере с учетом поглощения атмосферными газами. Интересующий нас спектральный интервал разбивается на  $N_{int}$  более мелких подынтервалов в соответствии с необходимым спектральным разрешением таким образом, чтобы в пределах каждого из них можно было пренебречь спектральной изменчивостью оптических характеристик аэрозоля и облаков. Радиационные характеристики рассчитываются методом Монте-Карло; молекулярное поглощение учитывается через вероятность выживания кванта либо через дополнительный вес фотона, определяемый функцией пропускания и убывающий по мере увеличения пройденного фотоном пути. Функция пропускания аппроксимируется рядом экспонент (метод  $k$ -распределения). Эффективные коэффициенты молекулярного поглощения рассчитываются на основе спектроскопической базы данных HITRAN-2000 с учетом реальных профилей метеопараметров и концентраций атмосферных газов, а также аппаратных функций реальных приборов. Количество членов ряда зависит от рассматриваемого спектрального интервала и требований к точности радиационных расчетов.

Сравнительный анализ показал хорошее совпадение полученных результатов с эталонными расчетами других авторов, выполненных методом LBL. Соответствие между нашими расчетами и измеренными с помощью радиометра Rotating

Shadowband Spectroradiometer на ARM SGP сайте (США) спектральными потоками в условиях сплошной горизонтально однородной облачности нижнего яруса подтверждает, что предлагаемые алгоритмы правильно описывают процесс переноса солнечного излучения в атмосфере.

В работе описана также модификация разработанного ранее [5] алгоритма расчета средних спектральных радиационных характеристик в разорванной облачности. Ценность предлагаемой модификации состоит в том, что помимо эффектов случайной геометрии облаков она также учитывает новейшие достижения атмосферной спектроскопии. Это позволяет более адекватно моделировать закономерности трансформации солнечной радиации в реальной атмосфере.

Экспериментальные данные о спектральных потоках и параметрах атмосферы, полученные на ARM SGP site (USA), а также расчеты на основе радиационного кода MODTRAN4 были любезно предоставлены нам А.П. Трищенко (Canada Centre for Remote Sensing, Ottawa, Canada) и М. Cribb (на тот момент – Intermap Technologies Ltd, Ottawa, Canada). Мы признательны также Lee Harrison и Peter Keirdron (Atmospheric Sciences Research Center, State University of New York, Albany, USA) за информацию о характеристиках Rotating Shadowband Spectroradiometer, необходимую при выполнении настоящего исследования.

Работа выполнена при частичной поддержке DOE's ARM Program (контракт N 5012) и РФФИ (гранты № 03-05-64655, 04-07-90123).

1. Clough S.A., Iacono M.J., Moncet J.L. Line-by-line calculations of atmospheric fluxes and cooling rates: Application to water vapor // J. Geophys. Res. D. 1992. V. 97. P. 16519–16535.
2. Moncet J.L., Clough S.A. Accelerated monochromatic radiative transfer for scattering atmospheres: Application of a new model to spectral radiance observations // J. Geophys. Res. D. 1997. V. 102. N 18. P. 21853–21866.
3. O'Hirok W., Gautier C. A three-dimensional radiative transfer model to investigate the solar radiation within a cloudy atmosphere. Part I: Spatial effects // J. Atmos. Sci. 1998. V. 55. P. 2162–2179.
4. O'Hirok W., Gautier C. High resolution heating and cooling rates in 3-D clouds // Proc. the Tenth Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Science Team Meeting. Available URL: [http://www.arm.gov/docs/documents/technical/conf\\_0003/ohirok-00.pdf](http://www.arm.gov/docs/documents/technical/conf_0003/ohirok-00.pdf)
5. Titov G.A., Zhuravleva T.B., Zuev V.E. Mean radiation fluxes in the near-IR spectral range: Algorithms for calculation // J. Geophys. Res. D. 1997. V. 102. N 2. P. 1819–1832.
6. Голубицкий Б.М., Москаленко Н.И. Функции спектрального пропускания в полосах паров H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> // Изв. АН СССР. Физика атмосф. и океана. 1968. Т. IV. № 3. С. 346–360.
7. Москаленко Н.И. Функции спектрального пропускания в полосах паров H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O и N<sub>2</sub> компонент в атмосфере // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1969. Т. V. № 11. С. 1180–1190.
8. Фирсов К.М., Чеснокова Т.Ю., Белов В.В., Серебрянников А.Б., Пономарев Ю.Н. Ряды экспонент в расчетах переноса излучения методом Монте-Карло

в пространственно неоднородных аэрозольно-газовых средах // Вычисл. технол. 2002. Т. 7. № 5. С. 77–87.

9. A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation. World Climate Research Programme. WCP-112, WMO/TD № 24. 1986. 60 p.
10. Kneizys F.X., Robertson D.S., Abreu L.W., Acharya P., Anderson G.P., Rothman L.S., Chetwynd J.H., Selby J.E.A., Shettle E.P., Gallery W.O., Berk A., Clough S.A., Bernstein L.S. The MODTRAN 2/3 report and LOWTRAN 7 model. Phillips Laboratory, Geophysics Directorate. Hanscom AFB, MA 01731–3010. 1996. 260 p.
11. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. М.: Мир, 1971. 298 с.
12. Радиация в облачной атмосфере. Л.: Гидрометеониздат, 1981. 280 с.
13. Марчук Г.И., Михайлов Г.А., Назаралиев М.А., Дарбинян Р.А., Каргин Б.А., Еленов Б.С. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике. Новосибирск: Наука, 1976. 280 с.
14. Каргин Б.А. Статистическое моделирование поля солнечной радиации в атмосфере. Новосибирск: ВЦ СОАН СССР, 1984. 206 с.
15. Fomin B.A., Gershonov Yu.V. Tables of the benchmark calculations of atmospheric fluxes for ICRCCM test cases. Part II: Shortwave results. Preprint IAE 5990/1. Moscow. 1996.
16. Мицель А.А., Пташник И.В., Фирсов К.М., Фомин Б.А. Эффективный метод полинейного счета пропускания поглощающей атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8. № 10. С. 1547–1548.
17. Anderson G., Clough S., Kneizys F., Chetwynd J., Shettle E. AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0–120 km). Air Force Geophysics Laboratory. AFGL-TR-86-0110. Environm. Res. Paper. No. 954. 1986.
18. Fouquart Y., Bonnel B. Intercomparing Shortwave Radiation Codes for Climate Studies // J. Geophys. Res. D. 1991. V. 96. N 5. P. 8955–8968.
19. Li Z., Trishchenko A., Cribb M. Analysis of cloud spectral radiance/irradiance at the surface and top of the atmosphere from modeling and observations // Proc. the Tenth Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Science Team Meeting. Available URL: <http://www.arm.gov/publications/proceedings/conf10/abstracts/li-z.pdf>
20. Li Z., Cribb M., Trishchenko A., A new method and results of estimating areal-mean spectral surface albedo from downwelling irradiance measurements // Proc. the Eleventh Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Science Team Meeting. Available URL: <http://www.arm.gov/publications/proceedings/conf11/abstracts/li-z.pdf>
21. Harrison L., Berndt J., Kiedron P., Michalsky J., Min Q. and Schlemmer J. Rotating Shadowband Spectroradiometers (RSS) in the ARM Program // Proc. the Ninth Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Science Team Meeting. Available URL: [http://www.arm.gov/docs/documents/technical/conf\\_9903/harrison-99.pdf](http://www.arm.gov/docs/documents/technical/conf_9903/harrison-99.pdf)
22. Harrison L., Michalsky J. Automated multifilter rotating shadow-band radiometer: an instrument for optical depth and radiation measurements // Appl. Opt. 1994. V. 33. N 22. P. 5118–5125.
23. Dong X. A 25-month database of stratus cloud properties generated from ground-based measurements at the Atmospheric Radiation Measurement Southern Great Plains Site // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105. P. 4529–4537.



24. Журавлева Т.Б., Насретдинов И.М., Сакерин С.М., Фирсов К.М., Чеснокова Т.Ю. Численное моделирование угловой структуры яркости неба вблизи горизонта при наблюдении с Земли. Часть 2: Аэрозольно-газовая атмосфера // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. N 12. С. 1065–1074.
25. Fontenla J., White O. R., Fox P.A., Avertt E.H., Kurucz R.L. Calculation of solar irradiances. I. Synthesis of the solar spectrum // *Astrophys. J.* 1999. N 518. P. 480–500.
26. Kurucz T.L. Synthetic infrared spectra, *Infrared Solar Physics* // IAU Symp. 154, edited by D.M. Rabin and J.T. Jefferies. Kluwer, Acad. Norwell Massachusetts. 1992.
27. Зуев В.Е., Тумов Г.А. Оптика атмосферы и климат. Томск: Изд-во «Спектр» ИОА СО РАН, 1996. 271 с.

*T.B. Zhuravleva, K.M. Firsov. Algorithms for calculation of sunlight fluxes in the cloudy and cloudless atmosphere.*

This paper describes the algorithms for calculation of solar spectral fluxes in the atmosphere under clear-sky and overcast conditions, as well as in the case of broken clouds. These algorithms are based on the representation of the transmission function of atmospheric gases in the form of the exponential series (*k*-distribution method). Molecular absorption coefficients are calculated using the HITRAN-2000 database with allowance for the instrumental functions of the used facilities, real meteorological parameters of the atmosphere, and gas concentration profiles. To test these algorithms, our results are compared to the reference line-by-line calculations of upward and downward fluxes for the clear sky and to the data of field measurements under overcast conditions. It is shown that the algorithms proposed are highly accurate and easy in computer realization.