

Обновление моделей молекулярного поглощения: влияние на результаты атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений

С.В. Афонин

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1
E-mail: afonin@iao.ru*

На основе результатов имитационного моделирования было исследовано влияние обновлений в моделях молекулярного поглощения на результаты атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений в окнах атмосферной прозрачности. Результаты численного моделирования показали, что влияние указанных изменений на результат восстановления температуры земной поверхности составляет менее 0,6 К (в спектральном диапазоне 3,5–4 мкм).

Ключевые слова: атмосферная коррекция, спутниковые ИК-измерения, модели континуума MT_CKD, база данных HITRAN.

Введение

Одним из аспектов атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений в «окнах атмосферной прозрачности» является учет искажений, вызванных поглощением теплового излучения земной поверхности атмосферными газами. В рамках физического подхода для этого необходимо задание параметров спектральных линий с целью учета селективного поглощения и выбор модели континуального поглощения, о природе которого уже многие годы идет дискуссия. В силу полуэмпирического характера разработанных моделей континуума выбор соответствующих гипотез и формализма носит для решения задачи атмосферной коррекции скорее академический, чем практический характер. В литературе приведены оценки влияния спектроскопических данных, их качества, а также различных моделей континуума на точность радиационных расчетов [1–5] Привести в соответствие со списком. Аналогичные оценки [6] были выполнены нами для задачи атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений в спектральных диапазонах 3,5–4 мкм и 8–13 мкм. Однако сделанные после 2007 г. обновления коэффициентов континуума MT_CKD.2.x, а также параметров спектральных линий в базе данных HITRAN требуют ответа на вопрос о том, насколько эти изменения моделей молекулярного поглощения значимы для задачи атмосферной коррекции и требуют ли они серьезной ревизии ранее полученных результатов.

1. Характеристика моделей континуума MT_CKD

Полуэмпирические модели континуума CKD (затем MT_CKD) – авторы Clough S.A., Kneizys F.X., Davies R.W., Mlawer M.J., Tobin D.C. – развиваются уже много лет и активно применяются в радиационных кодах и алгоритмах атмосферной коррекции спутниковых

измерений. Они включают параметры моделей континуума для молекул H_2O , CO_2 , N_2 , O_3 . Для водяного пара коэффициент континуального поглощения $k_{\text{cont}}(\nu)$ записывается в виде:

$$k_{\text{cont}}(\nu) = \rho_s \cdot \nu \tanh(hc\nu/2kT) \cdot \left[\left(\frac{\rho_s}{\rho_0} \right) C_S(\nu, T) + \left(\frac{\rho_f}{\rho_0} \right) C_F(\nu, T) \right],$$

где ν – волновое число, $hc/k=1,43879$, $\text{K}/\text{см}^{-1}$; T – температура, K ; ρ_s/ρ_0 и ρ_f/ρ_0 – относительные плотности водяного пара и уширяющего буферного газа, $\rho_s+\rho_f$ – суммарная плотность воздуха, ρ_0 – плотность воздуха для реперных условий ($T_0=296$ K и давление $P_0=1$ атм); $C_S(\nu, T)$ и $C_F(\nu, T)$ [$\text{см}^3/\text{мол}$] – табулированные коэффициенты континуума. Для учета температурной зависимости коэффициентов $C_S(\nu, T)$ обычно используются данные для двух реперных температур 296 K и 260 K , с помощью которых при расчете $C_S(\nu, T)$ производится линейная интерполяция (экстраполяция) для произвольной температуры. Температурная зависимость $C_F(\nu, T)$ обычно не учитывается, т.е. $C_F(\nu, T)=C_F(\nu, T_0)$. На *рис. 1* в качестве примера приведены коэффициенты $C_S(\nu, T)$ и $C_F(\nu, T)$ для моделей MT_CKD континуума водяного пара: $\nu 2.1$ (2007 г.), $\nu 2.4$ (2009 г.) и $\nu 2.5$ (2010 г.). Для сравнения там же приведены коэффициенты модели континуума $\text{CKD-}\nu 2.1$ (1996 г.).

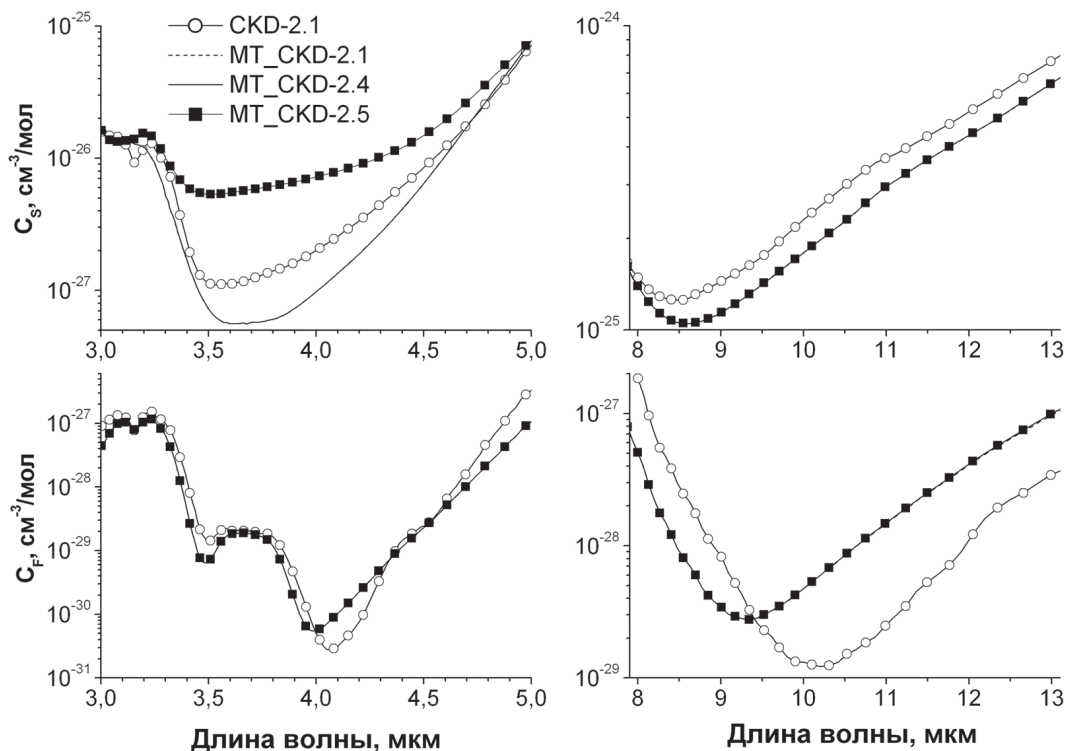


Рис. 1. Коэффициенты континуума водяного пара для различных моделей

Анализ данных *рис. 1* говорит о том, что для моделей MT_CKD версий 2,1–2,4 коэффициенты фактически совпадают. Так, в модели $\text{MT_CKD-}\nu 2.4$ коэффициенты $C_F(\nu, T)$ увеличены в диапазоне $820\text{--}960$ см^{-1} ($10,4\text{--}12,2$ мкм) в среднем всего на 2% (*рис. 2*).

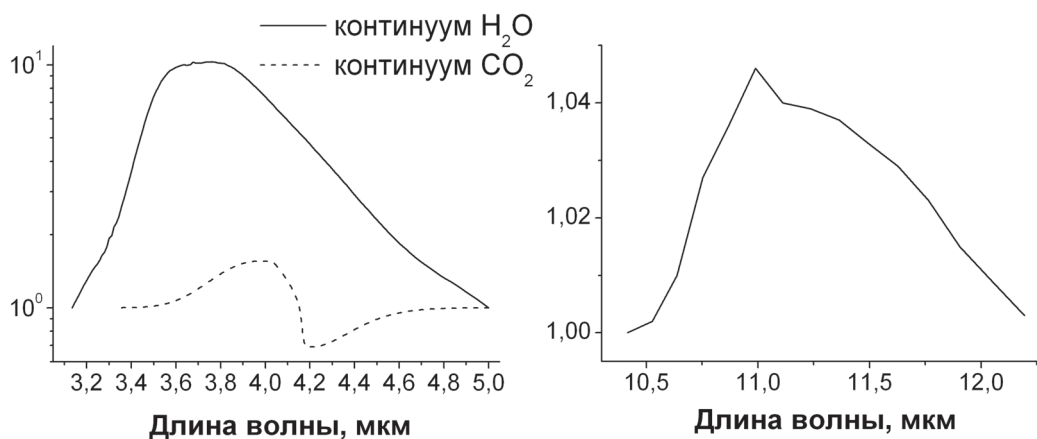


Рис. 2. Изменения в коэффициентах моделей континуума MT_CKD-v2.5 (H_2O и CO_2)

А вот в модели MT_CKD-v2.5 коэффициенты $C_F(\nu, T)$ кратно возросли в спектральном диапазоне 3–5 мкм (рис. 2). Это объясняется следующим. Рядом исследователей был проведен анализ данных высокого спектрального разрешения, полученных с помощью спутниковых приборов IASI (*Infrared Atmospheric Sounding Interferometer*) и AIRS (*Atmospheric Infrared Sounder*), а также прибора наземного базирования AERI (*Atmospheric Emitted Radiance Interferometer*). В результате в модель континуума MT_CKD были внесены следующие изменения:

- для молекулы H_2O коэффициенты C_F значительно увеличены в диапазоне $2000–3200\text{ см}^{-1}$ (3,1–5 мкм), а максимальные изменения (достигающие 10 раз) приходится на спектральную область 3,5–4 мкм;
- для молекулы CO_2 на величину 0,7–1,6 изменены коэффициенты в диапазоне $2000–3000\text{ см}^{-1}$, введена их температурная зависимость в диапазоне $2386–2434\text{ см}^{-1}$.

2. Анализ полученных результатов

Для оценки влияния обновлений в моделях молекулярного поглощения на результаты атмосферной коррекции спутниковых измерений в диапазонах 3,5–4,1 мкм и 10,3–12,6 мкм были выполнены имитационные расчеты для приборов NOAA19/AVHRR (каналы 3b, 4, 5) и Terra/MODIS (каналы 20, 22, 23, 31, 32). Спектральные границы ИК-каналов двух приборов приведены ниже в табл. 1.

Таблица 1. Спектральные границы (мкм) ИК-каналов MODIS и AVHRR

Спектральные каналы диапазона 3,5–4,1 мкм				Спектральные каналы диапазона 10,3–12,6 мкм			
M20	M22	M23	A3b	M31	M32	A04	A05
3,69–3,88	3,95–4,03	4,01–4,10	3,56–3,94	10,76–11,28	11,78–12,30	10,32–11,30	11,56–12,55

Номера ИК-каналов для MODIS и AVHRR обозначены символами М и А, соответственно.

Расчеты интенсивности I_λ восходящего инфракрасного излучения на верхней границе атмосферы проводились с использованием новой версии программы LBLRTM-v12.1 (*Line-By-Line Radiative Transfer Model*) [7], разработанной в октябре 2011 г. сотрудниками компании AER Inc. В основе программы – база данных параметров спектральных линий HITRAN-2008 [8] и модель молекулярного континуума MT_CKD-v2.5 (2010 г.). С ее помощью имитировались спутниковые измерения для условий прозрачной атмосферы при заданных значениях температуры земной поверхности (T_s) и излучательной способности $\epsilon_\lambda=1$. Предыдущие версии программы LBLRTM, разработанные в период 2007–2010 гг., применялись для вычисления необходимых при атмосферной коррекции искажающих характеристик атмосферы – функции пропускания t_λ , а также интенсивности $I_{\text{АТМ}}$ собственного теплового излучения атмосферы. С помощью этих величин имитировалось восстановление из космоса ТЗП, т.е. определение значения $T_{s,\lambda}$ из I_λ путем решения уравнения переноса относительно величины T_s . Разница δT_s между восстановленным значением $T_{s,\lambda}$ и заданным значением T_s отражает влияние изменений в коэффициентах молекулярного поглощения на результаты атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений. Такие оценки проводились на основе четырех среднеклиматических моделей атмосферы для различных углов наклона оси прибора в диапазоне $\Theta=0-45^\circ$. Ниже в *табл. 2* представлены результаты оценок δT_s , полученные на основе различных версий программы LBLRTM для «экстремальных» метеоусловий тропиков с высоким уровнем влагосодержания атмосферы $W=4,2$ г/см² и значением $T_s=299,7$ К.

Таблица 2. Оценки погрешности атмосферной коррекции в каналах MODIS (МХХ) и AVHRR (АХХ) при тропических метеоусловиях

Версии LBLRTM	Спектральные каналы диапазона 3,5–4,1 мкм				Спектральные каналы диапазона 10,3–12,6 мкм			
	М20	М22	М23	А3b	М31	М32	А04	А05
<i>Угол наклона оси прибора $\Theta=0^\circ$</i>								
v11,3	-0,192	-0,241	-0,335	-0,193	-0,011	-0,021	-0,006	-0,027
v11,6	-0,192	-0,236	-0,328	-0,193	-0,001	-0,005	0,007	-0,011
v11,7	-0,001	0,000	-0,001	-0,002	-0,001	0,008	-0,001	0,007
<i>Угол наклона оси прибора $\Theta=45^\circ$</i>								
v11,3	-0,314	-0,391	-0,555	-0,316	-0,022	-0,045	-0,013	-0,060
v11,6	-0,314	-0,384	-0,544	-0,316	-0,002	-0,012	0,013	-0,024
v11,7	-0,002	0,000	-0,002	-0,004	-0,001	0,019	-0,002	0,015

Анализ данных *табл. 2* позволяет сделать следующие основные выводы.

1. Для спектрального диапазона 3,5–4,1 мкм и угла $\Theta=0^\circ$ максимальная величина δT_s составляет около 0,2–0,3 К в зависимости от спектрального канала. Для угла $\Theta=45^\circ$ она возрастает на величину порядка секанса зенитного угла трассы, достигая уровня 0,3–0,6 К.

2. Для спектрального диапазона 10,3–12,6 мкм величина δT_s во всех каналах лежит ниже уровня инструментальной ошибки радиометрических измерений в ИК-каналах приборов.

3. Заключение

Полученные в работе результаты позволяют говорить о следующем: несмотря на заметные изменения в коэффициентах континуума МТ_СКД-2.х, а также обновление параметров спектральных линий, их влияние на результаты атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений значимо только в диапазоне 3,5–4 мкм и составляет менее 0,6 К для спутниковых каналов ИК-мониторинга земной поверхности.

Литература

1. *Афонин С.В., Белов В.В., Соломатов Д.В.* Решение задач температурного мониторинга земной поверхности из космоса на основе RTM-метода // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 12. С. 1056–1063.
2. *Горчакова И.А., Членова Г.В., Вигасин А.А.* Об учете континуального поглощения водяного пара в расчетах потоков теплового излучения // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 6. С. 546–551.
3. *Пташник И.В., Шайн К.П.* Влияние обновления спектроскопической информации на расчет потоков солнечной радиации в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2003. Т. 16. № 3. С. 276–281.
4. *Фирсов К.М., Чеснокова Т.Ю.* Чувствительность нисходящих длинноволновых потоков радиации к континуальному поглощению паров воды // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 8. С. 650–655.
5. *Clough S.A., Shephard M.W., Mlawer E.J., et al.* Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes, Short Communication // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2005. V. 91. No. 2. P. 233–244.
6. *Firsov K.M., Chesnokova T.Yu.* Calculation errors of the longwave fluxes in the Earth atmosphere due to the uncertainties of initial spectroscopic information // Proc. SPIE. 2006. V. 6580. 65800Q, doi: 10.1117/ 12.724948. 9 p.
7. *Huang Yi., Ramaswamy V., Soden B.* An investigation of the sensitivity of the clear-sky outgoing longwave radiation to atmospheric temperature and water vapor // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. D05104, doi: 10.1029/ 2005JD006906. 13 p.
8. *Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., et al.* The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2009. V. 110. No. 9–10. P. 533–572.

Update models of molecular absorption: impact on the results of atmospheric correction of satellite IR measurements

S.V. Afonin

*V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS,
1, Academician Zuev square, Tomsk, 634021, Russia
E-mail: afonin@iao.ru*

Based on the results of simulations investigated the effects of updates in the coefficients of molecular absorption on the results of atmospheric correction of satellite measurements in the infrared windows of atmospheric transparency. The results of numerical simulations have shown that the effect of these changes on the result of restoring the earth's surface temperature is less than 0.6 K (in the 3.5–4 μm spectral range).

Keywords: atmospheric correction, the satellite IR measurements, MT_CKD-2.x continuum model, HITRAN-2008 database.