

Значение обновлений 2007–2011 гг. в моделях молекулярного поглощения для атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений

С.В. Афонин*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 24.04.2012 г.

На основе результатов имитационного моделирования получены оценки влияния обновлений, произведенных в период 2007–2011 гг. в моделях молекулярного поглощения, на результаты атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений в окнах атмосферной прозрачности. Результаты моделирования показали, что при отсутствии вклада отраженной от поверхности солнечной радиации влияние этих обновлений на результаты восстановления температуры земной поверхности значимо только в спектральном диапазоне 3,5–4 мкм и составляет менее 0,6–1,3 К.

Ключевые слова: атмосферная коррекция, спутниковые ИК-измерения, модели континуума MT_CKD и CAVIAR, база данных HITRAN; atmospheric correction, satellite IR measurements, MT_CKD and CAVIAR continuum models, HITRAN database.

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 корректного 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 идут дискуссии. В работах [1–5] исследовано влияние спектроскопических данных, их качества, а также различных моделей континуума на результаты радиационных расчетов. В нашей работе [6] получены оценки роли молекулярного поглощения ИК-излучения для задачи атмосферной коррекции спутниковых измерений в каналах диапазонов 3,5–4,1 и 10,3–12,6 мкм. Для этого нами была использована популярная модель переноса излучения LBLRTM (Line-By-Line Radiative Transfer Model) версии v11.3 [7], разработанная в 2007 г. в Atmospheric and Environmental Research (AER), Inc. Однако уже после 2007 г. в ней было проведено заметное обновление коэффициентов континуума в модели MT_CKD-2.5, а также параметров спектральных линий в базе данных HITRAN. Результаты лабораторных работ [8–10] демонстрируют даже более высокие по срав-

нению с MT_CKD-2.5 значения коэффициентов континуального поглощения водяного пара в диапазоне 3–5 мкм. Все эти обстоятельства требуют ответа на вопрос о том, насколько указанные изменения моделей молекулярного поглощения значимы для задачи атмосферной коррекции спутниковых измерений в ИК-окнах атмосферной прозрачности и приведут ли они к серьезной ревизии результатов, полученных ранее для решения этой задачи.

1. Анализ изменений в моделях поглощения

Полуэмпирические модели континуума СКД (затем MT_CKD) – авторы S.A. Clough, F.X. Kneizys, R.W. Davies, M.J. Mlawer, D.C. Tobin – развиваются уже много лет и активно применяются в радиационных кодах и алгоритмах атмосферной коррекции спутниковых измерений. Они включают параметры моделей континуума для молекул H₂O, CO₂, N₂, O₃. Так, для водяного пара коэффициент континуального поглощения $k_{cont}(v)$ записывается в виде

$$k_{cont}(v) = \rho_S v \tanh\left(\frac{hc\nu}{2kT}\right) \left[\left(\frac{\rho_S}{\rho_0}\right) C_S(v, T) + \left(\frac{\rho_F}{\rho_0}\right) C_F(v, T) \right],$$

где ν – волновое число, см⁻¹; $hc/k = 1,43879$ К/см⁻¹; T – температура, К; ρ_S и ρ_F – плотности водяного пара и уширяющего буферного газа, мол/см³; ρ_0 – плотность воздуха для реперных условий ($T_0 = 296$ К

* Сергей Васильевич Афонин (afonin@iao.ru).

и давление $P_0 = 1$ атм), мол./см³; $C_S(v, T)$ и $C_F(v, T)$ – табулированные сечения континуального поглощения, см³/мол.

На рис. 1, *a* в качестве примера приведены коэффициенты $C_S(v, T)$ и $C_F(v, T)$ для различных версий моделей MT_CKD континуума водяного пара: 2.1 (2007 г.), 2.4 (2009 г.) и 2.5 (2010 г.).

Для сравнения там же приведены коэффициенты модели континуума СКД-2.1 (1996 г.). Анализ данных рис. 1, *a* говорит о том, что для моделей MT_CKD версий 2.1–2.4 коэффициенты фактически совпадают. По данным рис. 1, *b* в модели MT_CKD-2.4 коэффициенты $C_F(v, T)$ увеличены в диапазоне 820–960 см⁻¹ (10,4–12,2 мкм) в среднем всего на 2%. А вот в модели MT_CKD-2.5 для спектрального диапазона 3–5 мкм на основе данных высокого спектрального разрешения произведены существенные обновления параметров континуума. Анализ измерений спутниковых приборов IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) и AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), а также прибора наземного базирования AERI (Atmospheric Emitted Radiance Interferometer) привел к следующему:

– для молекулы H₂O коэффициенты $C_S(v, T)$ значительно увеличены в диапазоне 2000–3200 см⁻¹

(3,1–5 мкм), а максимальные изменения (достигающие 10 раз) приходятся на спектральную область 3,5–4 мкм;

– для молекулы CO₂ коэффициенты в диапазоне 2000–3000 см⁻¹ изменены в 0,7–1,6 раза, также введена их температурная зависимость в диапазоне 2386–2434 см⁻¹.

После 2007 г. изменения параметров спектральных линий для ряда молекул затронули общее количество линий N_L , их интенсивность, положение и полуширину.

В табл. 1 для 6 молекул (H₂O, CO₂, O₃, N₂O, CH₄, HNO₃), значимых (согласно [6]) для атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений, приведены данные об N_L и суммарной интенсивности S_0 линий для базы данных HITRAN-2004 (с изменениями до 01.01.2007 г.), а также о процентном изменении суммарной интенсивности (δS_0) для ее последующих версий.

Анализ этих данных с учетом результатов работы [6] позволяет сделать предварительное предположение о слабом влиянии изменений в моделях селективного поглощения на результаты атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений в каналах спектральных диапазонов 3,5–4,1 и 10,3–12,6 мкм.

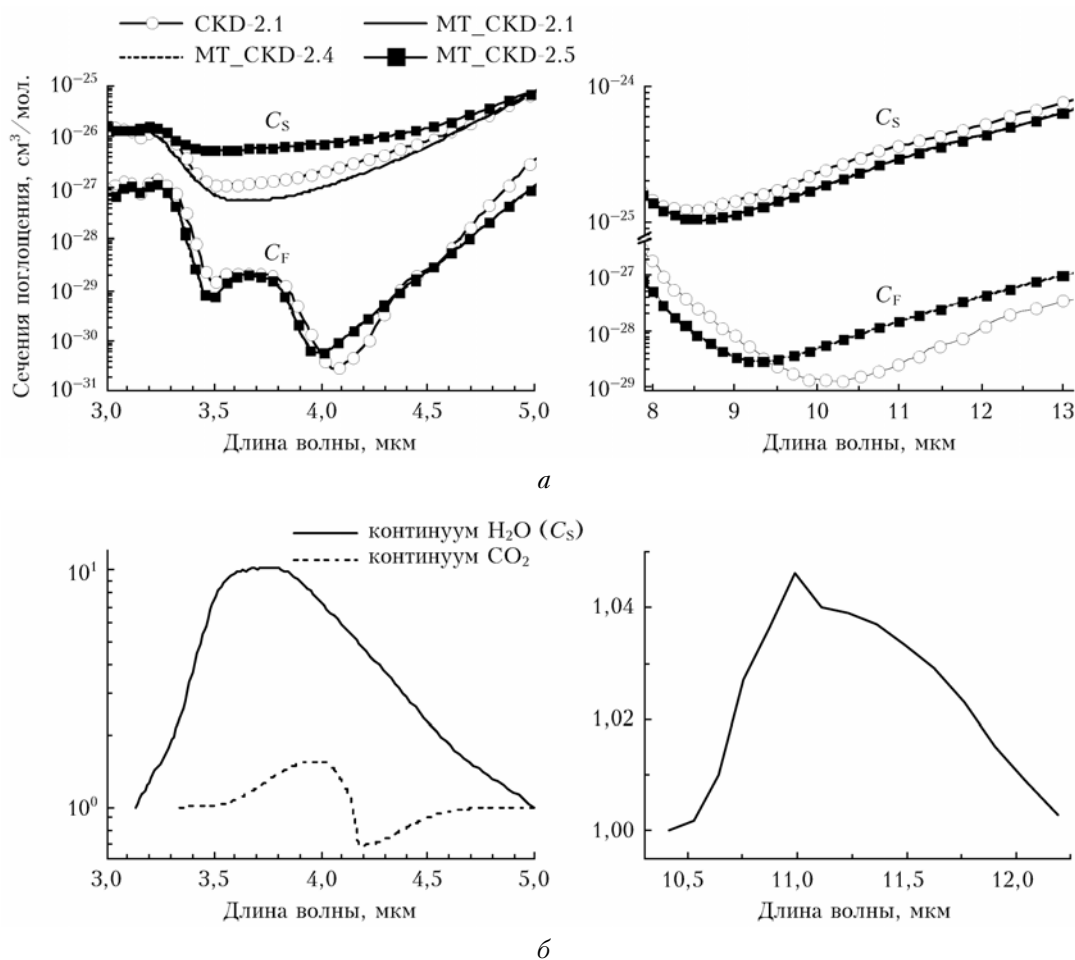


Рис. 1. Сечения континуального поглощения H₂O для различных моделей (*a*); относительные изменения в коэффициентах континуума MT_CKD-2.x для H₂O и CO₂ (*b*)

Таблица 1

Изменения в количестве линий N_L , их суммарной интенсивности S_0 (см/мол.) для различных версий базы данных HITRAN

Молекула	N_L, S_0		$N_L, \delta S_0, \%$			N_L, S_0		$N_L, \delta S_0, \%$		
	2007 г.		2009 г.	2010 г.	2011 г.	2007 г.		2009 г.	2010 г.	2011 г.
	3,5–4,1 мкм					10,3–12,6 мкм				
H ₂ O	1158 $2,373 \cdot 10^{-25}$	1158 0,0921	x	x	x	393 $1,287 \cdot 10^{-24}$	393 0,0782	x	x	x
CO ₂	955 $3,763 \cdot 10^{-26}$	x	983 1,0857	10286 4,1688	1435 $1,479 \cdot 10^{-24}$	x	1647 -0,9709	14569 -0,8707		
O ₃	9446 $1,046 \cdot 10^{-23}$	x	x	22455 9,3077	18165 $3,103 \cdot 10^{-22}$	x	x	18276 0,0087		
N ₂ O	7344 $6,996 \cdot 10^{-22}$	x	x	x	314 $2,199 \cdot 10^{-24}$	x	x	x		
CH ₄	29245 $8,472 \cdot 10^{-23}$	x	x	36024 0,4674	443 $1,237 \cdot 10^{-27}$	x	x	690 -4,1311		
HNO ₃	Линии отсутствуют					145903 $2,254 \cdot 10^{-20}$	x	x	203011 2,8565	

Примечание. Символ «x» означает отсутствие изменений в параметрах N_L и S_0 .

2. Анализ результатов моделирования

Для оценки влияния обновлений модели молекулярного поглощения на результаты атмосферной коррекции спутниковых измерений в диапазонах 3,5–4,1 и 10,3–12,6 мкм выполнено имитационное моделирование с использованием различных версий модели LBLRTM для ИК-каналов спутниковых приборов Terra/MODIS (каналы M20, M22, M23, M31, M32) и NOAA19/AVHRR (каналы A3b, A04, A05). Границы каналов приведены в табл. 2.

В настоящей статье при моделировании была рассмотрена ситуация, когда вкладом отраженной от поверхности солнечной радиации можно пренебречь. Это условие реализуется, например, при решении двух задач. Первая – это восстановление из космоса температуры земной поверхности (ТЗП) в спектральных каналах диапазона 10,3–12,6 мкм с одновременным контролем качества входных метеоданных [6]. Вторая – это актуальная для атмосферной коррекции задача восстановления аэрозольной оптической толщи в ночное время суток с использованием спутниковых ИК-измерений в обоих спектральных диапазонах [11].

Спектральные различия δT_λ в результатах применения различных версий модели LBLRTM для расчета радиационной температуры T_λ (эквивалентной интенсивности I_λ восходящего ИК-излучения на верхней границе атмосферы) иллюстрируют данные рис. 2.

Анализ величины δT_λ говорит о том, что, исключая гиперспектральные спутниковые измерения (с эффективной полушириной каналов порядка 1 см^{-1} и менее), отличия в моделях будут значимы только в канале 3,5–4,1 мкм и они вызваны изменениями модели континуума.

Численный эксперимент по восстановлению ТЗП производился следующим образом. Для имитации спутниковых измерений I_λ использовалась модель LBLRTM-12.1 (разработана в октябре 2011 г.), основанная на базе данных параметров спектральных линий HITRAN-2008 [12] и модели континуума MT_CKD-2.5 (2010 г.). Расчеты I_λ осуществлялись для метеомодели прозрачной атмосферы при заданных значениях ТЗП и излучательной способности $\epsilon_\lambda = 0,8 \div 1,0$ ламбертовской поверхности. Другие версии LBLRTM (v11.3, v11.6, v11.7), разработанные в период 2007–2010 гг., применялись для вычисления требуемых для атмосферной коррекции характеристик – функции пропускания t_λ , интенсивности I_{atm} собственного теплового излучения атмосферы, $I_{\text{trm}}^\downarrow$ – интенсивности падающего на поверхность потока теплового излучения атмосферы. С помощью перечисленных величин имитировалось восстановление из космоса ТЗП ($T_{S,\lambda}$) в ИК-канале с эффективной длиной волны λ путем решения уравнения переноса $I_\lambda = \epsilon_\lambda B(\lambda, T_S) t_\lambda + I_{\text{atm}} + r_\lambda I_{\text{trm}}^\downarrow$ относительно T_S , где $r_\lambda = 1 - \epsilon_\lambda$; $B(\lambda, T_S)$ – функция Планка. Тогда разница $\delta T_S = T_{S,\lambda} - T_S$ будет обусловлена использованием для восстановления ТЗП разных

Таблица 2

Спектральные границы (мкм) ИК-каналов MODIS и AVHRR

Спектральный канал							
3,5–4,1 мкм				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

Значение обновлений 2007–2011 гг. в моделях молекулярного поглощения...

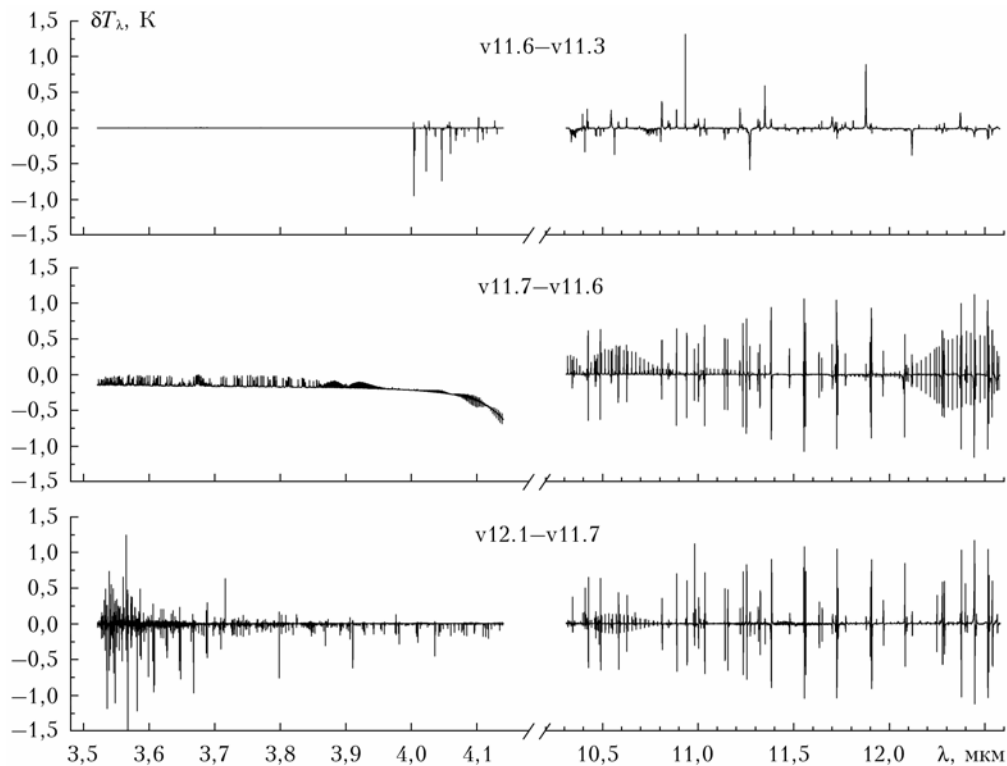


Рис. 2. Разница в значениях радиационной температуры T_λ , полученных с помощью различных версий модели LBLRTM при $\epsilon_\lambda = 1$

версий LBLRTM по сравнению с v12.1. Оценки δT_S проводились на основе климатических моделей атмосферы для углов наклона оси прибора $\Theta = 0$ и 45° (высота орбиты 700 км).

В табл. 3 представлены данные о δT_S , полученные для «экстремальных» метеоусловий тропиков

с высоким уровнем влагосодержания атмосферы $W = 4,2 \text{ г/см}^2$, значением $T_S = 299,7 \text{ К}$ при $r_\lambda = 0,0$ и $0,2$.

Аналогичные оценки δT_S , полученные при учете только селективного поглощения, дали для угла $\Theta = 45^\circ$ максимальное по абсолютной величине

Т а б л и ц а 3

Величина δT_S (К) в каналах MODIS и AVHRR, обусловленная использованием различных версий LBLRTM по сравнению с v12.1: тропические метеоусловия, значения $r_\lambda = 0,0$ (верхняя) и $0,2$ (нижняя строка)

Версия LBLRTM	Спектральный канал							
	3,5–4,1 мкм				10,3–12,6 мкм			
	M20	M22	M23	A3b	M31	M32	A04	A05
<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
	0,095	0,120	0,018	0,090	-0,002	-0,006	0,004	-0,013
v11.6	-0,192	-0,236	-0,328	-0,193	-0,001	-0,005	0,007	-0,011
	0,095	0,119	0,018	0,090	0,000	-0,004	0,006	-0,010
v11.7	-0,001	0,000	-0,001	-0,002	-0,001	0,008	-0,001	0,007
	-0,001	0,000	-0,001	-0,002	0,001	0,009	0,001	0,009
<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
	0,044	0,050	-0,133	0,037	-0,013	-0,030	-0,001	-0,048
v11.6	-0,314	-0,384	-0,544	-0,316	-0,002	-0,012	0,013	-0,024
	0,044	0,050	-0,131	0,037	-0,001	-0,012	0,013	-0,026
v11.7	-0,002	0,000	-0,002	-0,004	-0,001	0,019	-0,002	0,015
	-0,001	0,000	-0,002	-0,003	0,001	0,022	0,000	0,020

значение $\delta T_S = 0,013$ К для диапазона 3,5–4,1 мкм (в канале M23 прибора MODIS) и значение 0,01 К для диапазона 10,3–12,6 мкм (в канале A05 прибора AVHRR).

Анализ данных табл. 3 для случая $r_\lambda = 0$ позволяет сделать следующие основные выводы.

1. Для спектрального диапазона 3,5–4,1 мкм и угла $\Theta = 0^\circ$ максимальное значение δT_S составляет в зависимости от спектрального канала около 0,2–0,3 К по абсолютной величине. Для угла $\Theta = 45^\circ$ она возрастает на величину порядка секанса зенитного угла траектории, достигая уровня 0,3–0,6 К.

2. При $r_\lambda > 0$ происходит заметное уменьшение δT_S по абсолютной величине, в отличие от условия $r_\lambda = 0$. Так, при $r_\lambda = 0,2$ максимальное значение δT_S составляет всего 0,13 К.

3. 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.

4. Для случая селективного поглощения ИК-излучения влияние изменений в параметрах спектральных линий на результаты атмосферной коррекции спутниковых данных составляет менее 0,015 К, т.е. меньше уровня ошибки радиометрических спутниковых измерений.

Рассмотрим теперь оценки применения модели континуума CAVIAR (Continuum Absorption at Visible and Infrared wavelengths and its Atmospheric Relevance). Согласно [9] для $T = 293$ К в спектральном диапазоне 3,5–4,1 мкм коэффициенты $C_S(\nu, T)$ в модели CAVIAR примерно в 2–3 раза больше по сравнению с коэффициентами в модели MT_CKD-2.5. Соотношение коэффициентов $C_F(\nu, T)$ для моделей CAVIAR и MT_CKD-2.5 составляет по данным [10] для температуры воздуха 402 К величину от 3 до 200 в зависимости от длины волны. Указанные различия коэффициентов для моделей CAVIAR и MT_CKD-2.5 иллюстрирует рис. 3.

Далее с использованием модифицированной программы LBLRTM-12.1_{CAVIAR} (т.е. LBLRTM-12.1, в которой модель континуума MT_CKD-2.5 была заменена моделью континуума CAVIAR) по аналогии с уже описанным подходом к численному имитационному моделированию были получены расчетные данные о δT_S , представленные в табл. 4.

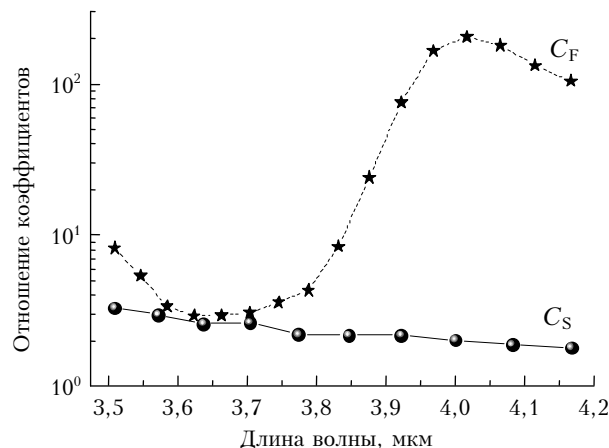


Рис. 3. Отношение коэффициентов C_S и C_F для моделей континуума CAVIAR и MT_CKD-2.5

Анализ данных табл. 4 позволяет сделать следующие основные выводы.

1. Для случая $r_\lambda = 0$ и угла $\Theta = 0^\circ$ максимальная величина δT_S составляет 0,6–0,8 К в зависимости от спектрального канала. Для угла $\Theta = 45^\circ$ она возрастает на величину порядка секанса зенитного угла траектории, достигая уровня 0,9–1,3 К.

2. При условии $r_\lambda > 0$ происходит заметное уменьшение δT_S по абсолютной величине по сравнению со случаем $r_\lambda = 0$. Так, при $r_\lambda = 0,2$ максимальное значение δT_S составляет всего 0,28 К.

Заключение

Полученные результаты позволяют говорить о следующем. Несмотря на значительные изменения в коэффициентах континуума водяного пара и обновление параметров спектральных линий, их влияние на результаты атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений значимо только в диапазоне 3,5–4 мкм и составляет при ночных наблюдениях менее 1 К при $r_\lambda > 0,05$ и $W < 4$ г/см². Таким образом, выполненные после 2007 г. изменения моделей поглощения не требуют серьезной ревизии результатов, которые были получены нами ранее по тематике атмосферной коррекции спутниковых радиометрических измерений в ИК-окнах атмосферной прозрачности.

Таблица 4

Величина δT_S (К) в каналах MODIS и AVHRR, обусловленная использованием различных версий LBLRTM по сравнению с v12.1_{CAVIAR}: тропические метеоусловия, значения $r_\lambda = 0,0$ (верхняя) и 0,2 (нижняя строка)

Версия LBLRTM	Спектральный канал							
	M20	M22	M23	A3b	M20	M22	M23	A3b
	Угол наклона оси прибора							
	$\Theta = 0^\circ$				$\Theta = 45^\circ$			
v11.3	-0,583	-0,683	-0,803	-0,607	-0,948	-1,10	-1,320	-0,987
	0,199	0,281	0,092	0,192	0,010	0,055	-0,262	-0,010
v12.1	-0,401	-0,455	-0,482	-0,424	-0,661	-0,746	-0,804	-0,699
	0,107	0,167	0,077	0,105	-0,036	0,006	-0,138	-0,050

Значение обновлений 2007–2011 гг. в моделях молекулярного поглощения...

Однако следует отметить, что при учете вклада рассеянной от поверхности Земли солнечной радиации, т.е. при зондировании в дневное время при высоких значениях r_λ , влияние обновления модели континуума водяного пара на погрешность восстановления T_S в окне 3,5–4 мкм может возрасти в 2–3 раза.

Автор выражает признательность д.ф.-м.н. И.В. Пташнику за идею проведения исследований и полезные обсуждения полученных результатов.

1. Пташник И.В., Шайн К.П. Влияние обновления спектроскопической информации на расчет потоков солнечной радиации в атмосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16, № 3. С. 276–281.
2. 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.
3. 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.
4. Горчакова И.А., Членова Г.В., Вигасин А.А. Об учете континуального поглощения водяного пара в расчетах потоков теплового излучения // Оптика атмосфер. и океана. 2009. Т. 22, № 6. С. 546–551.
5. Фирсов К.М., Чеснокова Т.Ю. Чувствительность нисходящих длинноволновых потоков радиации к континуальному поглощению паров воды // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 8. С. 650–655.
6. Афонин С.В., Белов В.В., Соломатов Д.В. Решение задач температурного мониторинга земной поверхности из космоса на основе RTM-метода // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 12. С. 1056–1063.

7. Clough S.A., Shephard M.W., Mlawer E.J., Delamere J.S., Iacono M.J., Cady-Pereira K., Boukabara S., Brown P.D. Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes, Short Communication. // J. Quant. Spectros. and Radiat. Transfer. 2005. V. 91, N 2. P. 233–244.
8. Baranov Y.I., Lafferty W.J. The water-vapour continuum and selective absorption in the 3 to 5 μm spectral region at temperatures from 311 to 363 K // J. Quant. Spectros. and Radiat. Transfer. 2011. V. 112, N 8. P. 1304–1313.
9. Ptashnik I.V., McPheat R.A., Shine K.P., Smith K.M., Williams R.G. Water vapor self-continuum absorption in near-infrared windows derived from laboratory measurements // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. D16305. 16 p.
10. Ptashnik I.V., McPheat R.A., Shine K.P., Smith K.M., Williams R.G. Water vapour foreign-continuum absorption in near-infrared windows from laboratory measurements // Phil. Trans. Roy. Soc. A. 2012. V. 370, N 1968. P. 2557–2577.
11. Афонин С.В. Анализ возможностей ИК-мониторинга аэрозоля и перистой облачности из космоса в интересах задачи атмосферной коррекции спутниковых изображений подстилающей поверхности // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23, № 11. С. 995–1005.
12. Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., Benner D.C., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Brown L.R., Campargue A., Champion J.-P., Chance K., Coudert L.H., Dana V., Devi V.M., Fally S., Flaud J.-M., Gamache R.R., Goldman A., Jacquemart D., Kleiner I., Lacome N., Lafferty W., Mandin J.-Y., Massie S.T., Mikhailenko S.N., Miller C.E., Moazzen-Ahmadi N., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Orphal J., Perevalov V.I., Perrin A., Predoi-Cross A., Rinsland C.P., Rotger M., Simeckova M., Smith M.A.H., Sung K., Tashkun S.A., Tennyson J., Toth R.A., Vandaele A.C., Vander A.J. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer. 2009. V. 110, N 9–10. P. 533–572.

S.V. Afonin. Significance of 2007–2011 updates in the molecular absorption models for atmospheric correction of satellite IR measurements.

Simulation results were used to estimate the effect of updates, performed in the period of 2007–2011 in molecular absorption models, on results of the atmospheric correction of satellite IR measurements in the atmospheric transparency windows. The simulation results show that, when no contribution of surface-reflected solar radiation is present, the effect of these updates on retrievals of the land surface temperature is significant only in the spectral range 3.5–4 μm and is less than 0.6–1.3 K.