

## Методика предварительной оценки точности метеоданных MODIS при атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений

М.В. Энгель<sup>1</sup>, **С.В. Афонин<sup>1</sup>**, В.В. Белов<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 19.03.2013 г.

На основе результатов численного моделирования и обработки реальных спутниковых данных предложена методика автоматической оценки качества метеоданных MODIS, используемых при атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений температуры земной поверхности.

*Ключевые слова:* спутниковые ИК-измерения, атмосферная коррекция, спутниковые метеоданные, оценка точности метеоданных; satellite IR measurements, atmospheric correction, satellite meteorological data, estimation of accuracy of meteorological data.

### Введение

В работах сотрудников ИОА СО РАН [1–4] был теоретически обоснован и апробирован многофакторный физический подход (МФП) к атмосферной коррекции (АК) спутниковых ИК-изображений земной поверхности и восстановлению температуры земной поверхности (ТЗП) в спектральных каналах диапазонов 3,5–4 и 8–13 мкм. Кроме того, в ИОА СО РАН на базе МФП разработан прототип Web-ресурса для атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений [5, 6]. Одним из важных аспектов атмосферной коррекции (особенно для Web-ресурса) является автоматическая предварительная оценка точности используемых для АК спутниковых метеоданных, главным образом температуры и влажности воздуха. Этот вопрос в общих чертах затрагивался в нашей работе [3] и зарубежных работах [7, 8].

### 1. Принципы проведения оценки

Как известно, атмосферная коррекция спутниковых инфракрасных изображений земной поверхности, полученных для метеоусловий прозрачной или замутненной атмосферы и ламбертовской подстилающей поверхности, основана на решении для каждого пикселя изображения уравнения переноса излучения

с эффективной длиной волны  $\lambda$  относительно параметра  $T_s$  (температура земной поверхности):

$$I_\lambda = B(\lambda, T_\lambda) = \varepsilon_\lambda B(\lambda, T_s) t_\lambda + I_{trm}^\uparrow + I_{sol}^\uparrow + r_\lambda (I_{trm}^\downarrow + I_{sol}^\downarrow). \quad (1)$$

В длинноволновом диапазоне (8–13 мкм), в котором вклад солнечного излучения фактически равен нулю, уравнение (1) имеет более простой вид и требует при его решении значительно меньшего количества вычислений:

$$I_\lambda = B(\lambda, T_\lambda) = \varepsilon_\lambda B(\lambda, T_s) t_\lambda + I_{trm}^\uparrow + r_\lambda I_{trm}^\downarrow. \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) включают:

- измеряемую на спутнике интенсивность входящего ИК-излучения  $I_\lambda$  (эквивалентную ей радиационную температуру  $T_\lambda$ );
- функцию пропускания атмосферы  $t_\lambda$ ;
- интенсивность  $I_{trm}^\uparrow$  собственного теплового излучения атмосферы;
- интенсивность  $I_{sol}^\uparrow$  – рассеянное аэрозолями (облачностью) солнечное излучение;
- $I_{trm}^\downarrow$ ,  $I_{sol}^\downarrow$  – интенсивности падающих на поверхность потоков теплового излучения атмосферы и солнечного излучения,
- $B(\lambda, T_s)$  – функцию Планка;
- излучательную способность поверхности  $\varepsilon_\lambda$ , ее коэффициент отражения  $r_\lambda = 1 - \varepsilon_\lambda$ .

Отметим, что с целью задания спектральной излучательной способности  $\varepsilon_\lambda$  земной поверхности в ИК-каналах прибора MODIS применяются данные

\* Марина Владимировна Энгель (angel@iao.ru);  
**Сергей Васильевич Афонин**; Владимир Васильевич Белов (belov@iao.ru).

MODIS UCSB Emissivity Library [http://www.ices.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html] или база данных Global Infrared Land Surface Emissivity Database [http://cimss.ssec.wisc.edu/iremis/].

Для решения уравнений (1) и (2) необходимо задать оптико-метеорологическое состояние атмосферы и, в частности, вертикальные профили температуры  $T(z)$  и влажности  $W(z)$  воздуха. Их можно получить, используя спутниковые (например, EOS/MODIS, NPP/VIIRS) или прогностические данные. Очевидно, что в случае отсутствия ошибок  $\delta T(z)$  и  $\delta W(z)$  в профилях метеопараметров значения  $T_{s,\lambda}$ , восстановленные в разных ИК-каналах, будут совпадать. Согласно [3] возможно совпадение  $T_{s,\lambda}$  и при наличии ошибок в метеоданных, если выполняется условие вида  $\delta T(z) = 10\delta W(z)$ , что приводит к взаимной компенсации влияния ошибок на результаты восстановления ТЗП. В иных же случаях при наличии ошибок в метеоданных значения восстановленных  $T_{s,\lambda}$  будут отличаться [3, 7, 8].

Этот факт иллюстрируют расчетные данные (программа MODTRAN) для спутниковой системы MODIS (табл. 1) ( $\delta T(z) = 2$  К и  $\delta W(z) = 20\%$ ), полученные для различных климатических моделей атмосферы.

Таблица 1

**Погрешность  $\delta T_{s,\lambda}$  восстановления ТЗП за счет ошибок задания метеопараметров атмосферы**

Метеопараметр	Спектральный канал, мкм					
	3,5–4,1			8–13		
	#20	#21	#23	#29	#31	#32
<i>Тропики</i>						
$\delta T$	-0,31	-0,19	-0,39	-1,61	-1,92	-3,05
$\delta W$	0,26	0,04	0,04	1,78	2,23	3,56
<i>Лето средних широт</i>						
$\delta T$	-0,25	-0,18	-0,39	-1,02	-0,94	-1,42
$\delta W$	0,18	0,02	0,02	0,88	1,09	1,73
<i>Зима средних широт</i>						
$\delta T$	-0,11	-0,19	-0,42	-0,31	-0,13	-0,18
$\delta W$	0,05	0,00	0,00	0,17	0,11	0,16
<i>Субарктическое лето</i>						
$\delta T$	-0,18	-0,17	-0,37	-0,64	-0,50	-0,74
$\delta W$	0,15	0,01	0,01	0,62	0,70	1,07

Оценка точности метеоданных очевидным образом требует при выборе двух реперных каналов выполнения следующих условий:

- при фиксированных ошибках  $\delta T$  и  $\delta W$  разница восстановленных в каналах ТЗП имеет максимальную величину и значимым образом превышает ошибки радиометрических спутниковых ИК-измерений;

- минимальный объем вычислений, что возможно при относительно малой спектральной ширине каналов ( $< 100$  см<sup>-1</sup>) и в отсутствие вклада рассеянного и отраженного солнечного излучения (т.е. исключаются каналы диапазона 3,5–4,1 мкм), который как дополнительный искажающий фактор может помешать получению правильной оценки;

- относительно небольшие значения коэффициентов отражения  $r_\lambda$  земной поверхности и их различий в каналах.

Анализ данных табл. 1 позволяет сделать вывод, что в случае EOS/MODIS перечисленным выше условиям удовлетворяют каналы 31 и 32 диапазона 8–13 мкм с центрами на  $\lambda$ , равной 11 и 12 мкм. Зная измеренную со спутника интенсивность  $I_\lambda$  или соответствующее ей значение радиационной (яркостной) температуры  $T_\lambda$ , задав значения  $\epsilon_\lambda$  и  $r_\lambda$ , а также проведя расчеты величин, стоящих в правой части уравнения (2), можно восстановить  $T_{s,\lambda}$  в указанных ИК-каналах. Затем по абсолютному значению разницы восстановленных «спектральных» ТЗП уже возможно оценить для каждого пикселя спутникового ИК-изображения качество его атмосферной коррекции.

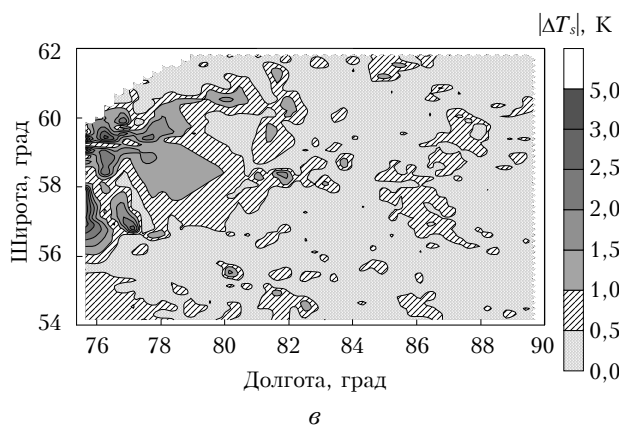
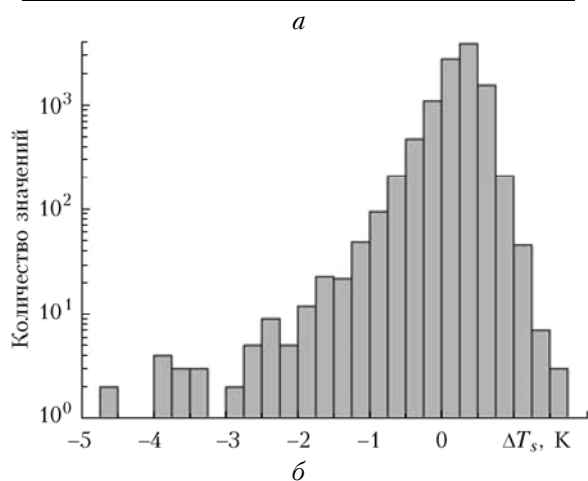
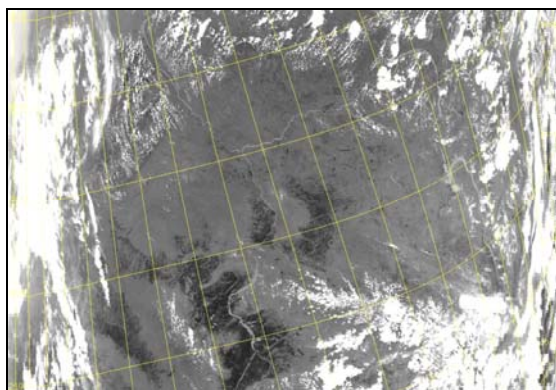
Для получения априорной оптико-метеорологической информации при проведении АК используются файлы MxD07\_L2, которые содержат восстановленные по спутниковым данным с номинальным (т.е. в надире) пространственным разрешением 5 км вертикальные профили температуры и влажности воздуха, а также общее содержание озона в столбе атмосферы. Кстати, для системы EOS/MODIS необходимые при решении задачи значения радиационных температур  $T_\lambda$  также можно получить из файлов типа MxD07\_L2, имеющих по сравнению с файлами калиброванных измерений L1b (MxD021KM) значительно меньший размер. Это важно в случае использования пользователем Web-ресурса атмосферной коррекции, когда файлы, необходимые для проведения оценки точности метеоданных, закачиваются по сети Интернет из удаленных источников (например, с сайта LAADS Web). Далее рассмотрим пример проведения оценки точности метеоданных MODIS.

## 2. Пример проведения оценки

Для проведения оценки метеоданных MODIS было использовано спутниковое изображение Томской области (54–62° с.ш., 74–90° в.д.) из [5, 6] за 23 июня 2006 г. со спутника Terra в канале 31 MODIS (рис. 1, а). На рис. 1 приведены гистограмма  $\Delta T_s = T_{s,31} - T_{s,32}$  разницы восстановленных в каналах 31 и 32 значений ТЗП и пространственное распределение абсолютного значения  $\Delta T_s$ .

Расчеты для оценки качества метеоданных проводились для 10441 пикселя изображения, время расчетов на ПК (AMD Athlon, тактовая частота 2,9 ГГц) около 3 мин.

В табл. 2 приведены статистические параметры (средние значения, СКО, минимальные и максимальные значения) в каналах для радиационных температур, ТЗП и величины  $\Delta T_s$ . Анализ расчетных данных позволяет для рассмотренного примера получить основной результат: величина  $|\Delta T_s|$ , которая характеризует качество спутниковых метеоданных, составляет менее 0,5 К для 78,6% случаев и менее 1 К для 98,1% случаев.



Результаты оценки точности метеоданных MODIS: *а* – спутниковое изображение географического района; *б* – гистограмма значений  $\Delta T_s$ ; *в* – пространственное распределение величины  $|\Delta T_s|$

Таким образом, используемые нами метеоданные MODIS в целом обладают хорошей суммарной точностью и обеспечивают проведение атмосферной коррекции спутниковых данных.

Таблица 2

Статистические параметры температурных характеристик в каналах 31 и 32 MODIS

Параметр	$T_{31}$	$T_{32}$	$T_{s,31}$	$T_{s,32}$	$\Delta T_s$
Среднее	296,98	295,49	301,80	301,59	0,21
СКО	4,25	4,46	3,39	3,23	0,40
Минимальное	276,51	274,97	279,74	278,58	-4,73
Максимальное	312,84	310,24	319,13	318,48	1,98

Работа выполнена при поддержке и в рамках Государственного контракта 14.515.11.0030 и интеграционного проекта СО РАН № 131а.

1. *Афонин С.В., Соломатов Д.В.* Методика учета оптико-метеорологического состояния атмосферы для решения задач атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений // *Оптика атмосф. и океана.* 2008. Т. 21, № 2. С.147–153.
2. *Афонин С.В., Белов В.В., Соломатов Д.В.* Решение задач температурного мониторинга земной поверхности из космоса на основе RTM-метода // *Оптика атмосф. и океана.* 2008. Т. 21, № 12. С. 1056–1063.
3. *Афонин С.В.* К вопросу о применимости восстановленных из космоса метеоданных MODIS для атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 8. С. 684–690.
4. *Афонин С.В.* Результаты тестирования двух методов атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений температуры земной поверхности // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 4. С. 308–310.
5. *Энгель М.В., Афонин С.В., Белов В.В.* WEB-ресурс для атмосферной коррекции спутниковых данных // *Изв. ТПУ.* 2011. Т. 318, № 5. С. 94–99.
6. *Энгель М.В., Афонин С.В., Белов В.В.* WEB-ресурс для проведения атмосферной коррекции мультиспектральных спутниковых изображений земной и водной поверхности // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2011. Т. 8, № 3. С. 140–146.
7. *Wan Z., Li Z.-L.* Radiance-based validation of the V5 MODIS land-surface temperature product // *Int. J. Remote Sens.* 2008. V. 29, N 17–18. P. 5373–5395.
8. *Coll C., Vicente Caselles V., Valor E., Raquel Nicolòs R.* Comparison between different sources of atmospheric profiles for land surface temperature retrieval from single channel thermal infrared data // *Remote Sens. Environ.* 2012. V. 117, N 15. P. 199–210.

*M.V. Engel', S.V. Afonin, V.V. Belov.* Method for preliminary estimating of the accuracy of MODIS meteorological data for atmospheric correction of satellite IR measurements.

Based on results of numerical simulation and processing of real satellite data, a method is proposed for automatically estimating the quality of MODIS meteorological data, used for atmospheric correction of satellite IR measurements of land surface temperature.