

Результаты тестирования двух методов атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений температуры земной поверхности

С.В. Афонин*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1
Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 27.12.2009 г.

Для атмосферных условий Томска на основе стандартных наземных измерений температуры почвы получены результаты тестирования двух методов, используемых для атмосферной коррекции спутниковых измерений температуры земной поверхности – регрессионного спектрального метода и физического подхода. Полученные данные демонстрируют явные преимущества используемого нами физического подхода, который превосходит по точности спектральный регрессионный метод, как в условиях безоблачных измерений, так и при наличии облачности.

Ключевые слова: атмосферная коррекция, спутниковые измерения, температура земной поверхности; atmospheric correction, the satellite measurements, the land surface temperature.

Введение

В настоящее время решение задачи атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений температуры земной поверхности (ТЗП) для системы EOS/MODIS осуществляется на основе регрессионного спектрального SW («split-window») метода [1, 2]. В рамках SW-метода по измерениям в двух спектральных каналах ($\lambda_1 \approx 11$ и $\lambda_2 \approx 12$ мкм) осуществляется учет поглощения теплового излучения водяным паром, однако учет влияния полупрозрачной облачности и аэрозоля в явном виде отсутствует. Тестирование спектрального метода для безоблачных условий наблюдений дает противоречивые результаты: по данным работ [3–5] погрешность метода не превышает 1 К, а результаты работ [6, 7] говорят о том, что даже в безоблачных условиях ошибки спутниковых измерений ТЗП могут достигать 1,5–3 К.

Альтернативой спектральному методу является более сложный и трудоемкий, но в то же время более корректный и универсальный физический подход, основанный на решении уравнения переноса теплового излучения через атмосферу с учетом реального состояния атмосферы в момент спутниковых измерений. В зарубежной печати он называется RTM-методом (*Radiative Transfer Model*) и чаще используется для тестирования приближенных методов (см., например, [8]). В наших работах [9, 10] развивается комплексный подход, где применение

модели переноса излучения осуществляется совместно с данными оперативных спутниковых измерений ключевых метеорологических и оптических параметров атмосферы. Несмотря на существующее скептическое отношение к качеству спутниковых метеорологических данных (см., например, [11]), результаты наших работ говорят о возможности их использования как априорной информации об атмосфере в моделях переноса теплового излучения.

Цель этой работы – проведение совместной валидации спектрального SW-метода [1, 2] и RTM-метода [9, 10] для атмосферных условий Томска.

1. Методика выполнения работ

Общий подход к решению поставленной задачи заключался в сопоставлении результатов восстановления ТЗП по данным спутниковой системы EOS/MODIS и результатов стандартных измерений температуры почвы, которые регулярно производятся на метеорологической площадке в Томске (координаты 56°26,5' с.ш., 84°58,7' в.д.). Для решения поставленной задачи были использованы следующие исходные данные:

- результаты наземных измерений температуры почвы за период с мая по сентябрь 2001–2004 гг.;
- файлы телеметрической информации EOS/MODIS для спутника Terra, полученные по сети Интернет с сайта LAADS Web (*Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System*, <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>);

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

– файлы с результатами восстановления ТЗП по спутниковым измерениям MODIS (MOD11_L2 v.5) на основе спектрального метода [1, 2], которые получены по сети Интернет с сайта LP DAAC Web (*Land Processes Distributed Active Archive Center*, https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/get_data/data_pool);

– результаты восстановления ТЗП в ИК-каналах 22, 29, 31, 32 EOS/MODIS на основе тематической обработки телеметрической информации MODIS с использованием RTM-метода [9, 10].

Спутниковые измерения ТЗП относились (аналогично [6]) только к ночным снимкам. В этом случае можно рассчитывать на существенно меньшую, чем в дневное время, пространственную и временную изменчивость температуры тестового участка поверхности. Здесь исключается ситуация, когда температура поверхности при переходе из тени на освещенную Солнцем часть увеличивается на 20 К.

Максимальные расхождения по времени между спутниковыми и наземными измерениями не превышали 30 мин, а выбранные снимки попали во временной интервал 20:30–21:30 местного времени. Кроме того, снимки с помощью облачной маски (Cloud Mask, MOD35) были разбиты на две категории – безоблачные (СМ = 3) и облачные (СМ = 2,1). Полученная в результате такого отбора статистическая выборка спутниковых и наземных измерений температуры почвы составила 95 пар для безоблачных условий наблюдений и 27 пар для облачных ситуаций.

2. Анализ результатов

Проведение сравнительного анализа спутниковых данных MODIS, имеющих номинальное пространственное разрешение 1000 м, и локальных (точечных) наземных измерений температуры почвы очевидным образом требует, чтобы тестовая площадка обладала относительной пространственной однородностью в пределах 1–2 пикселей спутникового изображения. При этом учитывается и погрешность географической привязки спутниковых данных порядка 500–700 м. В связи с этим обстоятельством на первом этапе работ для тестового участка в районе метеоплощадки было исследовано пространственное распределение температуры поверхности.

Следует отметить, что метеоплощадка находится в непосредственной близости от реки и городских построек. Это приводит к тому, что в пределах одного пикселя на изображении прибора MODIS попадают объекты, температуры которых заметно отличаются от температуры, измеряемой на метеоплощадке. Спутниковый снимок высокого пространственного разрешения, полученный для безоблачных условий со спутника Landsat 7 в тепловом канале прибора ETM+ (линейный размер пикселя 57 м) подтверждает это. В районе метеоплощадки на участке с линейным размером порядка 1000 м вариации измеряемых со спутника радиационных температур достигают 2,5 К. Поэтому на основе спутниковых данных ETM+ была исследована территория, примыкающая к тестовому участку, и был выбран новый тестовый участок на некотором удалении от метео-

площадки. Линейный размер нового участка превышал 1500 м, вариации радиационной температуры составили уже менее 1 К, а средняя температура была близка к температуре на метеоплощадке.

На рис. 1 представлены результаты сравнительного анализа данных наземных измерений ТЗП (T_S) и значений температуры поверхности, восстановленной по спутниковым данным MODIS на основе спектрального метода (T_{SW}) и RTM-метода (T_{RTM}) для безоблачных условий наблюдений.

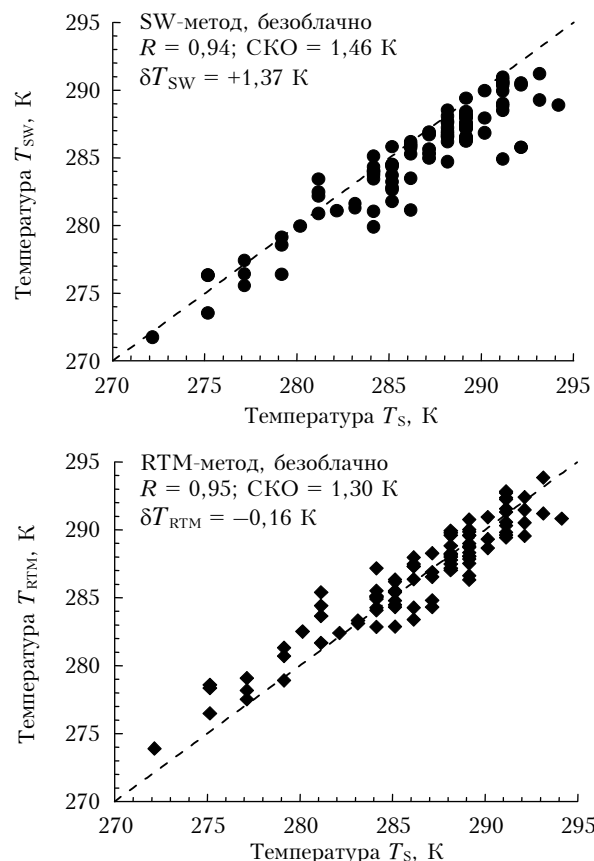


Рис. 1. Результаты тестирования двух спутниковых методов для безоблачных условий наблюдений: R – коэффициент корреляции, δT_{SW} и δT_{RTM} – среднее расхождение температур

Анализ этих данных позволяет отметить тот факт, что наземные и спутниковые измерения имеют высокие коэффициенты корреляции $R = 0,94 \div 0,95$ для обоих методов. Однако важно отметить и заметные различия в результатах применения двух спутниковых методов. Для спектрального метода средняя величина $\delta T_{SW} = T_S - T_{SW}$ составляет около +1,4 К, в то время как $\delta T_{RTM} = T_S - T_{RTM}$ не превышает –0,2 К. Таким образом, полученный результат качественно и количественно совпадает с выводами авторов [6, 7] о том, что спектральный метод может заметно занижать восстанавливаемые значения ТЗП. Для RTM-метода различия наземных и спутниковых данных соответствуют высокой точности восстановления ТЗП.

Для облачных условий наблюдений результаты сравнительного анализа наземных и спутниковых измерений представлены на рис. 2.

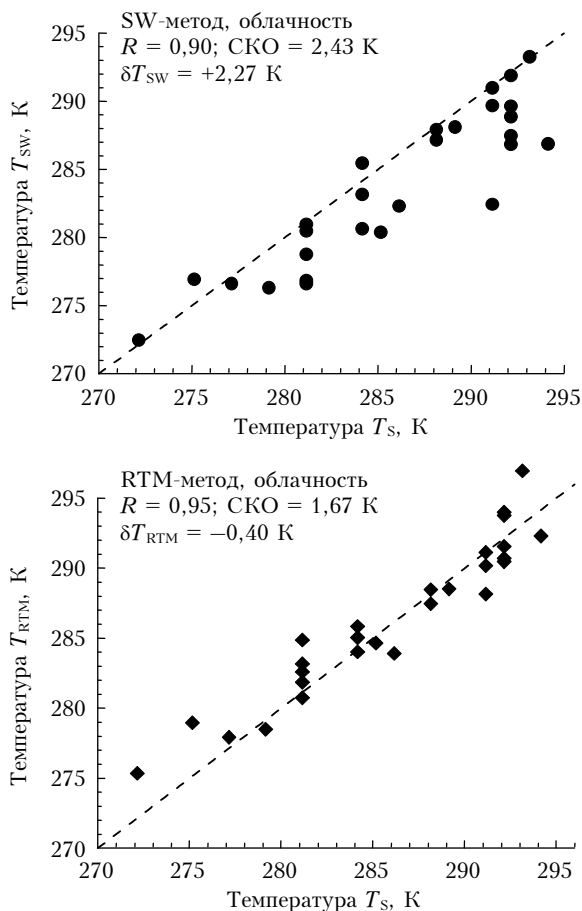


Рис. 2. Результаты тестирования двух спутниковых методов для облачных условий наблюдений

Согласно этим результатам значение δT_{SW} при наличии облачности увеличилось на 0,9 К и составило уже +2,3 К, в то время как значение δT_{RTM} изменилось всего до уровня $-0,4$ К. При этом коэффициент корреляции для спектрального метода уменьшился до $R = 0,90$ и остался прежним ($R = 0,95$) для RTM-метода. То есть при облачных условиях наблюдений погрешность SW-метода заметно увеличилась, в то время как точностные характеристики RTM-метода лишь незначительно уступают результатам его применения для безоблачных условий наблюдений.

Закключение

Полученные результаты валидации двух спутниковых методов атмосферной коррекции спутнико-

вых измерений ТЗП демонстрируют явные преимущества используемого нами физического RTM-метода, который превосходит по точности спектральный регрессионный метод как в условиях безоблачных измерений, так и при наличии облачности.

Автор выражает благодарность научному сотруднику ЛРОС Д.В. Соломатову за помощь в проведении расчетов, а также признателен ученым и техническому персоналу NASA, благодаря усилиям которых по сети Интернет были получены спутниковые данные MODIS уровней L1 и L2, использованные в этой статье.

1. Wan Z., Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature measurement from space // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 1996. V. 34. N 4. P. 892–905.
2. Wan Z. MODIS Land-Surface Temperature Algorithm Theoretical Background Document (LST ATBD), version 3.3 Inst. for Comput. Earth Syst. Sci. Univ. of Calif., Santa Barbara, 1999. [Электронный ресурс]: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod11.pdf
3. Wan Z., Zhang Y., Zhang Q., Li Z.-L. Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data // Remote Sens. Environ. 2002. V. 83. N 1–2. P. 163–180.
4. Wan Z., Zhang Y., Zhang Q., Li Z.-L. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature // Int. J. Remote Sens. 2004. V. 25. N 1. P. 261–274.
5. Wan Z. New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products // Remote Sens. Environ. 2008. V. 112. N 1. P. 59–74.
6. Wang W., Shunlin Liang S., Tilden Meyers T. Validating MODIS land surface temperature products using long-term nighttime ground measurements // Remote Sens. Environ. 2008. V. 112. N 3. P. 623–635.
7. Mao K., Shi J., Li Z., Tang H. An RM-NN algorithm for retrieving land surface temperature from EOS/MODIS data // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. D21102. P. 1–17.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Kerr Y.H., Guillou C., Lagouarde J.P., Nerry F., Ottlé C. LST Processor: Algorithm Theoretical Basis Document. CESBIO, Toulouse, ATBD 18/12/1998, 1998. 170 p.

S.V. Afonin. Testing results of two methods for atmospheric correction of satellite IR measurements of land surface temperature.

For the conditions of Tomsk, on the basis of standard ground-based measurements of the surface temperature we tested two methods, used for the atmospheric correction of the satellite measurements of the land surface temperature, namely the spectral regression method and physical-based (RTM) approach. The obtained data demonstrate clear advantages of the used physical-based approach, which is more accurate than the spectral regression method, both under conditions of clear-sky measurements and in the presence of clouds.