

Применение физического и регрессионного подходов к измерению температуры поверхности суши по данным MODIS

С.В. Афонин

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

Для метеоусловий Томска на основе стандартных наземных измерений температуры почвы проведено тестирование двух методов, применяемых для атмосферной коррекции спутниковых измерений температуры поверхности суши – регрессионного спектрального алгоритма и физического подхода. Полученные в работе данные демонстрируют явные преимущества предложенного физического подхода, который превосходит по точности спектральный регрессионный алгоритм как в условиях безоблачных измерений, так и при наличии облачности.

Ключевые слова: атмосферная коррекция, спутниковые измерения, температура поверхности суши.

Введение

Одно из решений задачи спутниковых измерений температуры поверхности суши (ТПС) с помощью системы EOS/MODIS – это применение регрессионного спектрального алгоритма (Wan, Dozier, 1996). Несмотря на его глобальное использование, он имеет ряд известных недостатков. Кроме того, тестирование алгоритма даже для безоблачных условий наблюдений дает достаточно противоречивые результаты. Так, по данным работ (Wan, 2002, 2004, 2008a) погрешность алгоритма не превышает 1К, а результаты работ (Mao, 2007; Wang, 2008) говорят о том, что даже в безоблачных условиях при использовании регрессионного алгоритма ошибки спутниковых измерений ТПС могут достигать 1.5–3К.

Альтернативой регрессионному алгоритму является более сложный и трудоемкий, но в то же время более корректный и универсальный физический подход, основанный на решении уравнений переноса теплового излучения через атмосферу в ИК-каналах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с учетом состояния атмосферы в момент спутниковых измерений. В зарубежной печати он называется RTM-подходом (от слов *Radiative Transfer Model*), и используется как в оперативной практике (Wan, Li, 1997), так и для тестирования приближенных методов (напр., Wan, 2008b). В наших работах (Афонин, 2008a, 2008b, 2009) получил развитие многофакторный физический подход (МФП), в котором применение модели переноса ИК-излучения для целей восстановления ТПС осуществляется совместно с данными оперативных, производимых одновременно с ДЗЗ, спутниковых измерений ключевых оптико-метеорологических параметров атмосферы. Цель этой работы – проведение совместной апробации МФП и регрессионного алгоритма при восстановлении ТПС для метеоусловий Томска.

1. Краткая характеристика подходов

Для корректного восстановления температуры поверхности суши должны учитываться ключевые искажающие факторы:

- поглощение теплового излучения поверхности атмосферными газами;
- поглощение и рассеяние излучения аэрозолем и перистыми облаками;
- излучательная способность земной поверхности.

В регрессионном алгоритме значение ТПС (T_s) определяется из соотношения вида:

$$T_s = C + \alpha \cdot (T_{11} + T_{12})/2 + \beta \cdot (T_{11} - T_{12})/2,$$

$$\alpha = A_1 + A_2 \cdot (1 - \varepsilon) + A_3 \cdot (\Delta\varepsilon/\varepsilon^2), \quad \beta = B_1 + B_2 \cdot (1 - \varepsilon) + B_3 \cdot (\Delta\varepsilon/\varepsilon^2),$$

$$\varepsilon = (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{12})/2, \quad \Delta\varepsilon = (\varepsilon_{11} - \varepsilon_{12})/2,$$

где T_{11} и T_{12} – измеренные значения радиационных температур в спектральных каналах 31 и 32 (центры $\lambda_1 \approx 11$ мкм и $\lambda_2 \approx 12$ мкм) расщепленного окна («split-window») прозрачности 10.5-12.5 мкм. Для учета искажающего влияния водяного пара фактически реализуется аналог известной в абсорбционной спектроскопии методики дифференциального поглощения. Выбор значений коэффициентов регрессии C , A_j , B_j ($j=1..3$) зависит от угла наблюдения, а также двух атмосферных параметров – температуры приземного воздуха T_A и общего влагосодержания атмосферы W , которые оперативно восстанавливаются по данным MODIS. С практической точки зрения регрессионные алгоритмы весьма просты и эффективны для глобального мониторинга ТПС. Однако при этом следует принимать во внимание ряд существенных ограничений к их использованию, перечисленных ниже.

- Учет поглощения теплового излучения производится только для водяного пара, но при этом отсутствует в явном виде учет искажений, вызванных другими газами, а также аэрозолями и облачностью.
- Коэффициенты регрессии определены расчетным путем для ограниченного диапазона метеорологических ситуаций в безоблачной атмосфере. Для их выбора используются значения параметров T_A и W , которые не отражают реальное вертикальное распределение температуры и влажности в атмосфере.
- Известна существенная зависимость погрешности восстановления ТПС от ошибок измерений T_{11} и T_{12} , а также от точности задания значений спектральной излучательной способности поверхности в каналах (ε_{11} , ε_{12}), их разности $\Delta\varepsilon$.

Перечисленные выше недостатки регрессионного алгоритма фактически отсутствуют или не так значимы при использовании МФП, краткая характеристика которого приведена ниже.

а) На основе физических моделей селективного и континуального поглощения инфракрасного излучения осуществляется корректный учет искажающего влияния атмосферных газов (H_2O , CO_2 , O_3 , N_2O , CH_4), оптически активных в спектральных диапазонах 3.5–4 и 8–13 мкм. Учет поглощения H_2O производится на основе вертикальных профилей температуры и влагосодержания воздуха, полученных по данным MODIS. Профили других газов задаются с помощью климатических моделей.

б) Ошибки $\delta T_A(z)$ и $\delta W(z)$ задания профилей метеоданных частично компенсируются. Это происходит благодаря тому, что значения $\delta T_A(z)$ и $\delta W(z)$ в среднем связаны приближенным соотношением вида $\delta W[\%] \approx 10 \cdot \delta T_A[^\circ]$. В работе (Афонин, 2010а) путем сопоставления спутниковых и радиозондовых измерений вертикальных профилей метеопараметров показана выполнимость такого соотношения для метеоданных MODIS. Представленные в той же работе результаты радиационных расчетов, а также результаты имитационного моделирования по восстановлению ТПС показали возможность применения метеоданных MODIS для проведения с удовлетворительной точностью атмосферной коррекции ИК-измерений. Дополнительным средством снижения влияния ошибок задания метеоданных на результаты восстановления ТПС является использование восстановленных в каналах 31 и 32 «спектральных» значений ТПС ($T_{s,\lambda}$) по принципу «расщепленного окна» (Афонин, 2008b, 2009).

в) Для учета искажающего влияния аэрозоля и полупрозрачной облачности используются данные восстановления параметров этих атмосферных компонентов по измерениям

в каналах MODIS видимого участка спектра (продукты MxD04_L2, MxD06_L2), а также инфракрасного диапазона (Афонин, 2010b).

г) Спектральные значения излучательной способности ϵ_λ задаются по аналогии с регрессионным алгоритмом, то есть с помощью глобальной карты типов земной поверхности и таблиц значений ϵ_λ , соответствующих этим типам. При этом в явном виде не задается значение $D\epsilon$, а влияние ошибок задания излучательной способности заметно меньше, чем в случае регрессионного алгоритма.

2. Методика выполнения работ

Общий подход к решению поставленной задачи заключался в сопоставлении результатов восстановления ТПС по данным спутниковой системы MODIS и стандартных измерений температуры почвы, которые регулярно производятся на метеорологической площадке в Томске (координаты $56^\circ 26.5'$ с.ш., $84^\circ 58.7'$ в.д.). Её местоположение отмечено символом А на карте этого района Томска, полученной с помощью программы Google Earth (рис. 1). Этот символ расположен в центре квадратного полигона, имеющего линейные размеры порядка 1000 м, что соответствует номинальному пространственному разрешению на поверхности данных ИК-каналов MODIS.

Для решения поставленной задачи были использованы следующие исходные данные для спутников Terra и Aqua:

- результаты наземных измерений температуры почвы за период с мая по сентябрь 2001–2004 гг.;
- данные уровня L1b (MxD021KM) и уровня L2 (MxD07 и MxD35), полученные по сети Интернет с сайта LAADS Web (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>);
- результаты восстановления ТПС в ИК-каналах (22, 29, 31, 32) MODIS на основе обработки спутниковых измерений с использованием МФП;
- данные о ТПС (MxD11 v.5), восстановленные на основе регрессионного алгоритма и полученные с сайта LP DAAC Web (https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/get_data/data_pool).

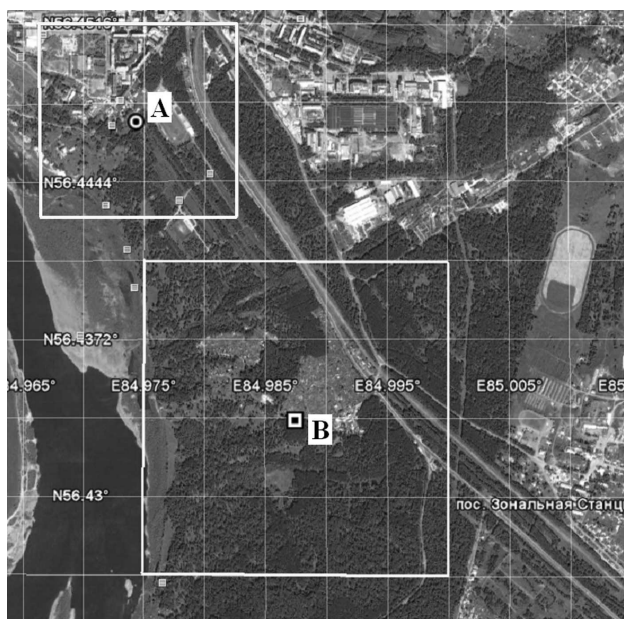


Рис. 1. Изображение района проведения тестовых работ (по данным Google Earth), символ А – метеоплощадка, символ В – центр тестового полигона (1.5×1.5 км)

Спутниковые измерения ТПС отбирались (по примеру работы Wang, 2008) только для ночных снимков. В этом случае можно рассчитывать на существенно меньшую, чем в дневное время, пространственную и временную изменчивость ТПС для тестового полигона. Здесь исключается ситуация, когда температура при переходе из тени на освещенную Солнцем часть поверхности возрастает на величину до 20К. Максимальные расхождения по времени между спутниковыми и наземными измерениями не превышали 30 минут (в среднем менее 15 минут), а выбранные снимки попали во временной интервал 14:40–15:30 GMT для спутника Terra и 20:30–21:30 GMT для спутника Aqua. С помощью облачной маски (MxD35) снимки были разбиты на две категории – безоблачные (значение маски CM=3) и облачные (CM=2,1). Полученная в результате отбора тестовая выборка измерений температуры почвы составила 181 пару для безоблачных условий и 79 пар для облачных ситуаций.

3. 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 м. В связи с этим обстоятельством на первом этапе работ для тестового полигона 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 MODIS попадают объекты, температуры которых заметно отличаются от температуры почвы, измеряемой на метеоплощадке.

Снимок высокого пространственного разрешения тестового полигона, полученный в безоблачных условиях со спутника Landsat7 в тепловом канале прибора ETM+ ($\lambda=10.40\text{--}12.50$ мкм, 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 3.2К. Различие среднего для полигона А значения радиационной температуры T_λ и значения T_λ на метеоплощадке составило 2.6К. В этой связи на основе спутниковых данных ETM+ была исследована территория, примыкающая к полигону А, и на некотором удалении от него выбран новый тестовый полигон, центр которого отмечен на рис.1 символом В. Линейный размер нового полигона превышает 1500 м, вариации радиационной температуры для него в 2 раза меньше, чем на полигоне А. Различие среднего для полигона В значения радиационной температуры T_λ и значения T_λ на метеоплощадке не превышает 0.5К. Для оценки пространственной однородности полигона В было проведено его “сканирование” с помощью скользящего окна размером 1 км × 1 км. Разница полученных в результате этого средних для каждого окна значений T_λ (всего 121) составила менее 0.2К.

На рис. 2 и в табл. 1 представлены результаты сравнительного анализа данных наземных измерений температуры почвы (T_s) и значений ТПС, восстановленной по данным MODIS на основе регрессионного алгоритма ($T_{s,p}$) и физического подхода ($T_{s,\phi}$).

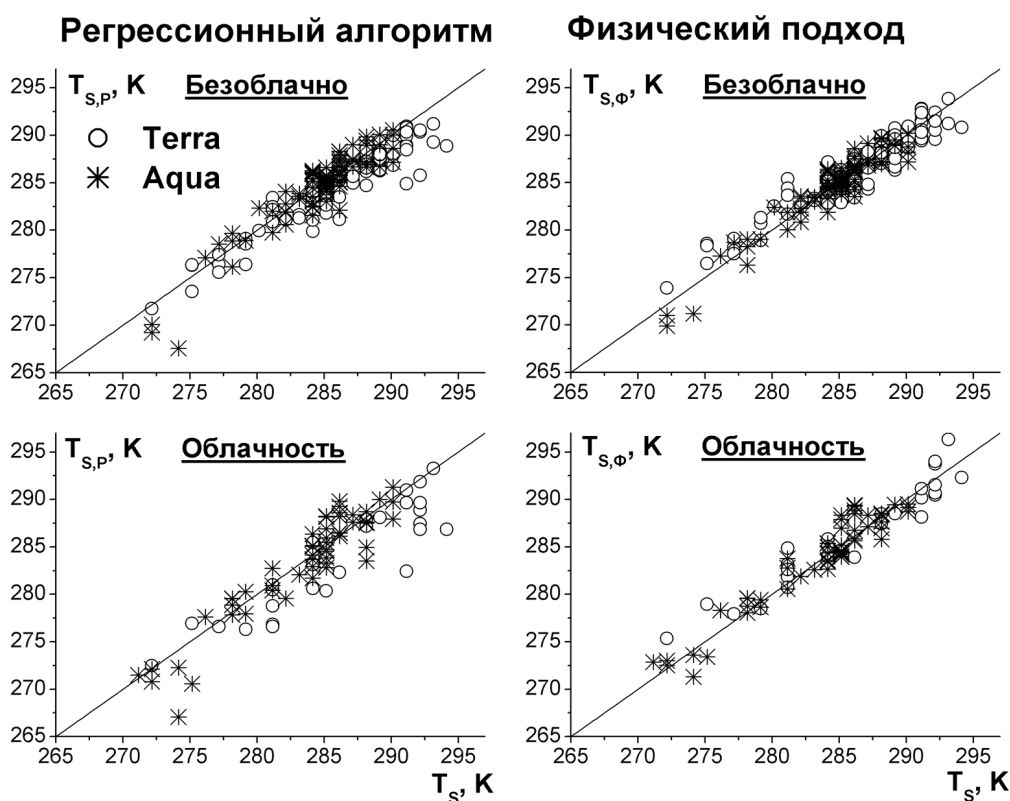


Рис. 2. Результаты измерения ТПС с помощью спутниковых методов по данным MODIS (для метеословий Томска)

Таблица 1. Результаты тестирования двух спутниковых методов измерения ТПС: μ и σ – среднее расхождение и СКО наземных и спутниковых данных, R-коэффициент корреляции, n – количество измерений

Метод	Безоблачно	Облачность
<i>Спутник Terra</i>		
Регрессионный	$\mu=+1.37\text{K}$, $\sigma=1.46\text{K}$ $R=0.94$, $n=95$	$\mu=+2.27\text{K}$, $\sigma=2.43\text{K}$ $R=0.90$, $n=25$
МФП	$\mu=-0.16\text{K}$, $\sigma=1.30\text{K}$ $R=0.95$	$\mu=-0.40\text{K}$, $\sigma=1.67\text{K}$ $R=0.95$
<i>Спутник Aqua</i>		
Регрессионный	$\mu=+0.13\text{K}$, $\sigma=1.51\text{K}$ $R=0.93$, $n=86$	$\mu=+0.15\text{K}$, $\sigma=2.04\text{K}$ $R=0.92$, $n=54$
МФП	$\mu=+0.01\text{K}$, $\sigma=1.20\text{K}$ $R=0.95$	$\mu=-0.30\text{K}$, $\sigma=1.45\text{K}$ $R=0.95$

Анализ данных, полученных для безоблачных условий, позволяет отметить тот факт, что наземные и спутниковые измерения ТПС имеют для обоих методов высокий коэффициент корреляции $R > 0.93$. Для МФП значения СКО (σ) меньше на 0.15–0.30K по сравнению с регрессионным алгоритмом. При одинаковых значениях спектральной излучательной способности поверхности это может говорить о более корректном в рамках МФП учете состояния атмосферы в момент измерения ТПС.

В случае облачных условий наблюдений коэффициент корреляции уменьшается на 0.02-0.04 для регрессионного алгоритма и остается прежним ($R=0.95$) для физического подхода. Для регрессионного алгоритма значения СКО возрастают по сравнению с данными для безоблачных условий на 0.9K и 0.6K для спутников Terra и Aqua, соответственно. Аналогичные изменения СКО для физического подхода составляют менее 0.4K и 0.3K. То есть, при облачных условиях наблюдений погрешность регрессионного алгоритма

заметно увеличилась, в то время как точность МФП остается стабильной и лишь незначительно уступает результатам применения МФП для безоблачных условий.

Сравнивая данные, полученные для разных спутников, можно отметить их главное различие. Для спутника Terra получены заметные расхождения в средних отклонениях (μ) спутниковых и наземных измерений ТПС. Так, для спектрального алгоритма средняя величина $\delta T_p = T_s - T_{s,p}$ составляет около +1.4К, в то время как $\delta T_\phi = T_s - T_{s,\phi}$ не превышает -0.2К. Для спутника Aqua значения величины μ составляют от -0.30К до +0.15К для обоих методов. Выяснение причин этих различий потребует дополнительных исследований.

Заключение

Полученные в работе результаты тестирования двух спутниковых методов атмосферной коррекции спутниковых измерений ТПС демонстрируют явные преимущества используемого нами физического подхода, который превосходит по точности регрессионный спектральный алгоритм, особенно при наличии облачности.

Литература

1. Wan Z., Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land surface temperature measurement from space // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1996. V.34. No.4. P. 892–905.
2. Wan Z., Li Z.-L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1997. V.35. No.4. P. 980–996.
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. No.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. No.1. P. 261–274.
5. Wan Z. New refinements and validation of the MODIS land-surface temperature/emissivity products // Remote Sens. Environ. 2008a. V.112. No.1. P. 59–74.
6. Wan Z., Li Z.-L. Radiance-based validation of the V5 MODIS land-surface temperature product // Int. J. Remote Sens. 2008b. V.29. No.17–18. P. 5373–5395.
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. No.D21102. P. 1–17.
8. Wang W., Liang S., Meyers T. Validating MODIS land surface temperature products using long-term nighttime ground measurements // Remote Sens. Environ. 2008. V.112. No.3. P. 623–635.
9. Афонин С.В., Соломатов Д.В. Методика учета оптико-метеорологического состояния атмосферы для решения задач атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений // Оптика атмосферы и океана. 2008а. 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 атмосферы и океана. 2008б. Т.21. №12. С. 1056–1063.
11. Афонин С.В., Белов В.В., Соломатов Д.В. Физические основы и результаты применения RTM-метода в задачах инфракрасного зондирования земной поверхности из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Вып. 6. Т.1. С. 22–32.
12. Афонин С.В. К вопросу о применимости восстановленных из космоса метеоданных MODIS для атмосферной коррекции спутниковых ИК измерений // Оптика атмосферы и океана. 2010а. Т.23. №8. С. 684–690.
13. 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. 2010б. Т.23. №11. С. 995–1005.

The application of physical-based approach and split-window algorithm to the measurement of land surface temperature using MODIS data

S.V. Afonin

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

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 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.

Keywords: atmospheric correction, the satellite measurements, the surface land temperature.