

УДК 551.501: 629.195.1

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ
ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО ДАННЫМ
СПУТНИКОВОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Доктор физ.-мат. наук

Ж.Ш. Жантаев

Доктор техн. наук

А.Х. Ахмеджанов

И.В. Каипов

Усовершенствована технология расчета температуры подстилающей поверхности на основе спутниковой информации с применением программных пакетов обработки космических изображений.

Распределение температуры подстилающей поверхности является важным параметром при описании физических процессов, происходящих на земной поверхности. Температура земной поверхности, рассчитанная с использованием спутниковых данных, после соответствующей параметризации, может быть использована для оценки прогнозов, полученных на основе мезомасштабных и глобальных метеорологических и климатических моделей [1], при анализе изменений земного покрытия [2], для мониторинга и расчета влажности почвы [3] и т.д. Излучательная способность земной поверхности также является критическим параметром, который влияет на точность расчета температуры земной поверхности при использовании алгоритма расщепленного окна. Было выполнено большое количество работ, касающихся этого аспекта проблемы [4-10]. В работе [11] использовался метод температурно-независимых индексов для расчета излучаемости земной поверхности.

Основываясь на результатах и анализе предыдущих исследований, и требовании для определения температурных режимов в геодинамически активных зонах, авторами предложен модифицированный алгоритм построения температурных полей. Он отличается от стандартного, предложенного разработчиками продуктов MODIS, способа определения излучающей способности земной поверхности и параметров атмосферы.

При определении температуры подстилающей поверхности возникают две основные трудности. Одна из них – влияние излучающей способности земной поверхности. Поскольку земная поверхность не является абсолютно черным телом, то это обстоятельство необходимо принять во

внимание при расчетах. Другой трудностью является учет процессов, происходящих в атмосфере. Даже при небольшой облачности атмосферные аэрозоли могут значительно повлиять на восходящее излучение, а следовательно, и на результаты расчета температуры подстилающей поверхности. Основным поглотителем теплового инфракрасного излучения при ясном безоблачном небе является водяной пар. Учет его влияния на пропускную способность атмосферы, необходим для корректного расчета температуры поверхности земли.

Рассмотрим наиболее широко применяемые на практике алгоритмы расчета температуры подстилающей земной поверхности (ТПП). Алгоритм расчета температуры подстилающей земной поверхности основывается на переносе термического излучения от земной поверхности через атмосферу к удаленному сенсору. Излучающая способность поверхности должна учитываться при подсчете теплового потока от Земли. Атмосфера также оказывает влияние на полученное сенсором излучение. С учетом вышесказанного уравнение переноса излучения для расчета ТПП можно записать следующим образом:

$$B_i(T_i) = \tau_i(\theta) [\varepsilon_i B_i(T_s) + (1 - \varepsilon_i) I_i^\downarrow] + I_i^\uparrow$$

T_i – яркостная температура в i -ом канале, $\tau_i(\theta)$ – пропускная способность атмосферы в i -ом канале в направлении обзора θ (зенитный угол от надира), ε_i – излучающая способность, $B_i(T_{i,s})$ – функция Планка, I_i^\downarrow – нисходящий и I_i^\uparrow – восходящий поток излучения, соответственно.

Функция Планка является ядром уравнения переноса, и ее упрощение является одним из необходимых условий расчета температуры подстилающей земной поверхности. Она разлагается в ряд Тейлора по малому значению отклонения температуры от среднего. В результате её можно заменить линейным уравнением $B_i = a_i + b_i T$. Расчет излучения производится в интервале температур от 273 до 322 °К для 31 и 32-го каналов MODIS. Регрессионные линейные уравнения выглядят следующим образом:

$$B_{31}(T) = 0,13787 \cdot T_{31} - 31,65677, \quad \sigma^2 = 0,9971$$

$$B_{32}(T) = 0,11849 \cdot T_{32} - 26,50036, \quad \sigma^2 = 0,9978$$

Величина среднеквадратичного отклонения σ^2 указывает на высокую степень корреляции.

Используя спектральную базу ASTER (URL: <http://speclib.jpl.nasa.gov>), было определено, что материалы, составляющие

земную поверхность, имеют излучательную способность выше 0,97 с незначительными отклонениями в диапазоне длин волн 10,78...11,28 мкм и 11,77...12,27 мкм. Хотя земная поверхность имеет сложную структуру, можно выделить 3 основных компонента (растительность, почва и вода). Для водной поверхности можно непосредственно использовать значения излучаемости для термических каналов MODIS. Для земной поверхности излучаемость можно рассчитать из соотношения:

$$\varepsilon B(T) = P_v \varepsilon_v B(T_v) + (1 - P_v) \varepsilon_s B(T_s),$$

$$\varepsilon = P_v R_v \varepsilon_v + (1 - P_w - P_v) R_s \varepsilon_s,$$

где ε – средняя излучаемость смешанного пикселя, T – средняя температура пикселя, T_i ($i = v, s$) – температура компонента пикселя, P_v – растительная фракция, ε_v и ε_s определяют излучаемость растений и почвы соответственно. Излучение R_v и R_s вычисляются из соотношения

$$R_i = B(T_i)/B(T),$$

где i определяет растительность ($i = v$) и почву ($i = s$). Разница температур растительности и почвы незначительна при температуре воздуха над поверхностью почвы около 15 °С, при температуре воздуха 50 °С, разница составляет 10...12 °С.

Методика классификации покрытия земной поверхности (MLCCA) включает две базы данных. В алгоритме классификации используется как база данных наземных наблюдений по всему земному шару, так и многомерные мультиспектральные и разновременные данные MODIS. Результаты многочисленных экспериментов показали, что для различных атмосферных условий при ясном небе точность расчета содержания воды составляет ± 13 %. Точность можно повысить путем привлечения дополнительных каналов MODIS, температурного профиля атмосферы и т.д.

Пропускная способность атмосферы может быть промоделирована с использованием пакетов MODTRAN, LOWTRAN. Для проведения моделирования в качестве входных параметров необходимо задать атмосферные профили. Получить измеренные профили атмосферных параметров для определенного срока задача невыполнимая. Одним из путей определения пропускной способности является моделирование различных атмосферных ситуаций (разное содержание воды, профили температуры и влажности) и получение эмпирических формул.

Результаты моделирования показали существенное различие в значениях пропускной способности атмосферы для 31 и 32 каналов MODIS. С увеличением содержания воды в атмосфере эти различия возрастают, а также появляется зависимость пропускной способности от температуры. Пропускная способность зависит и от других газов составляющих атмосферу, однако их содержание меняется незначительно, и во многих расчетах не учитывается. Что касается излучаемости земной поверхности, то были проанализированы 78 значений дневной и ночной радиояркой температуры, при различных покрытиях земной поверхности, для пары длин волн (11,2 и 12,3 мкм). Расчет продукта MOD07 выполнен с использованием программного пакета IMAPP. Наиболее репрезентативными, проанализированными и доступными для научных исследований являются климатические данные TOVS (TOVS – это вертикальный зондировщик атмосферы). TOVS climate data – коллекция данных трех инструментов на борту серии полярных спутников NOAA. Инструменты: HIRS (High Infrared Sounder – инфракрасный зондировщик), MSU (Microwave Sounder Unit – микроволновый зондировщик), SSU (Stratospheric Sounder Unit – стратосферный зондировщик). Приборы TOVS были впервые запущены на борту спутника TIROS-N 13 октября 1978 года. Данные включают следующие метеорологические параметры: излучение при ясном и облачном небе, профили температуры и влажности, температуру воздуха у земли и над водной поверхностью, температуру земной и водной поверхности, облачное покрытие, высоту облачности, осадки, излучающую способность земной поверхности, восходящую длинноволновую радиацию, альбедо, вертикальный профиль озона. Эти геофизические параметры интерполированы в узлы регулярной сетки, с шагом $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ и разделены на временные группы: ежедневные, пятидневные, ежемесячные, сезонные, годовые.

В стандартном алгоритме температура подстилающей поверхности (продукт MOD11_L2 LST) генерируется с использованием MODIS продукта (MOD021KM), данных геолокации (MOD03), атмосферных профилей температуры и влажности – продукт (MOD07_L2), маски облачности продукт (MOD35_L2), земного покрытия (MOD12Q1), и снежного покрова (MOD10_L2). Информация об атмосферных профилях находится в продукте MOD07: общее содержание озона; параметр устойчивости атмосферы; содержание водяного пара; температурные и влажностные профили атмосферы, на 20 и 15 уровнях соответственно.

Выходной файл содержит данные о температуре и радиояркостной температуре земной поверхности, излучаемости в 31 и 32 каналах, зенитном угле, времени, широте и долготе для каждых 5 линий сканирования и 5 пикселей, локальных и глобальных атрибутов. Продукт MOD11_L2 рассчитывается с использованием обобщенного алгоритма расщепленного окна. Поля температуры и содержания водяного пара рассчитываются с разрешением 5×5 км из продукта MOD07_L2. Для определения ТПП необходимо рассчитать излучаемость для каждого пикселя поверхности. Температура земной поверхности рассчитывается только для свободных от облачности пикселей, определяемых через MODIS продукт MOD35_L2. Расчет занимает значительные временные и вычислительные ресурсы.

В модифицированном алгоритме изменения коснулись способа определения атмосферных данных. Если в стандартном алгоритме для определения атмосферных профилей температуры и влажности используется продукт (MOD07_L2), то в модифицированном профили получают по климатическим данным TOVS. В стандартном алгоритме радиояркостная температура T_b определяется как средняя спектральная функция отклика (весовой метод интегрирования) для каждого из 2-х каналов. В области температур насыщения (платформа Terra 392 К – для 31 и 340 К – для 32 каналов; платформа Aqua: 387 К – для 31 и 340 К – для 32 каналов) ошибка может превышать 0,1 К для 8, 9 и 10 детекторов. Для уменьшения ошибки применяется линейная корреляция. Коэффициенты определялись путем сравнения данных полученных с использованием весового метода интегрирования и метода центральной длины волны. Класс покрытия каждого пикселя определяется из продукта MOD12Q1. После того как идентифицирован класс пикселя, излучаемость \mathcal{E}_{31} и \mathcal{E}_{32} вычисляется по базе данных. В стандартном алгоритме излучаемость находится путем загрузки набора частей 10°×10° MODIS карт покрытия, что значительно превышает размеры сцены и увеличивает время вычисления. В модифицированном алгоритме загружаются только лента глобальной карты покрытия, соответствующая определенным долготам. Используется такая же классификация, что и в стандартном алгоритме. Глобальная карта в проекции Plate Carrée (Бинарный MOD12Q1 1 km) доступна на сайте разработчиков (<http://duckwater.bu.edu/lc/mod12q1.html>). В модифицированном алгоритме маска облачности и водной поверхности накладывается при конвертации формата HDF в GeoTiff формат.

Изменения, внесенные в стандартный алгоритм.

1. Модифицирован метод радиометрической коррекции каналов (31 и 32).

2. Используются климатические данные для определения температуры и влажности.

3. Модифицирован метод расчета излучаемости.

4. Не используется маска облачности.

Технология расчета по модифицированному алгоритму (рис.):

1. Выбор сцен по заданным критериям (Территория – Казахстан, Время суток – ночь, Облачность < 30 %).

2. Расчет температуры подстилающей земной поверхности (на выходе продукт LST).

3. Расчет маски облачности и водной поверхности (на выходе продукт MOD14).

4. Наложение маски облачности и водной поверхности (MOD14+LST+MOD03).

5. Конвертация HDF формата в GeoTiff формат или рисунок (JPG или PNG).

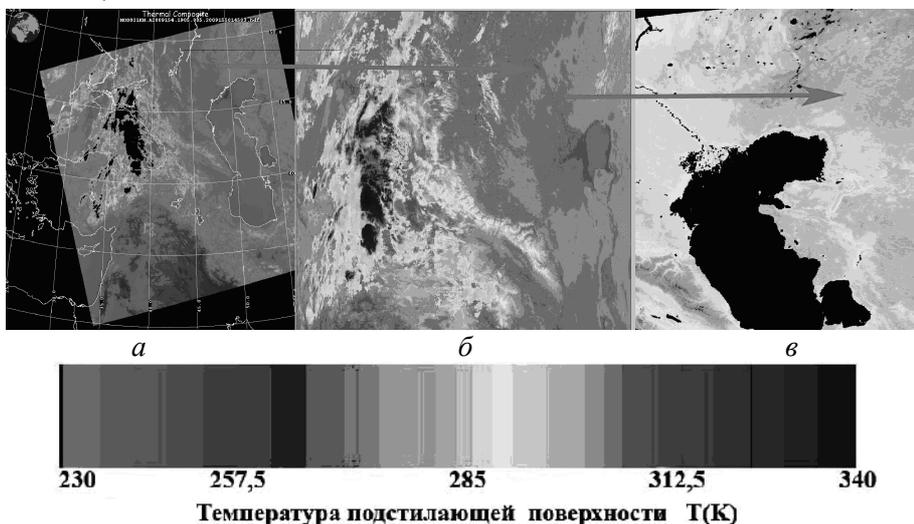


Рис. Технология расчета по модифицированному алгоритму (а – выбор по термическому композиту, б – расчет ТПП, в – представление данных в формате GeoTiff).

Сравнение рассчитанных по спутниковым данным температуры подстилающей поверхности с наземными измерениями является сложной задачей, поскольку земная поверхность гетерогенна как по температуре, так и по излучательной способности. Сравнение наземных точечных измерений и ос-

редненных по пространству спутниковых данных возможно, если измерения проводятся на термически однородной поверхности, размеры которой в несколько раз превышают разрешающую способность сенсора спутника (для сенсора MODIS она составляет 1 км²). Для уточнения предлагаемого метода необходимо провести расширенные измерения температуры поверхности на разных типах почв, растительного покрова и сезонов года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Bates J.J., X. Wu D.L. Jackson. Interannual variability of upper-tropospheric water vapor band brightness temperature // *J. Climate*, 1996, 9, - P. 427-438.
- 2 Becker F., Li Z. Towards a local split window method over land surfaces // *International Journal of Remote Sensing*, 11(3):369–393, 1990.
- 3 Coll, C., Caselles, V., Sobrino, A. and Valor, E. On the atmospheric dependence of the split-window equation for land surface temperature // *Remote Sensing of environment*, 27, 1994, – P. 105-122.
- 4 Franc A, Cracknell, A.P., Retrieval of land and sea surface temperature using NOAA-11 AVHRR data in northeastern Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 15, – P. 1695-1712.
- 5 Jackson D.L., Bates J.J. A 20-yr TOVSradiance Pathfinder data set for climate analysis // *Proceedings 10th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography*, 2000, – P. 426-429.
- 6 Qin Z., Olmo G.D., Karnieli A., 2001. Derivation of split window algorithm and its sensitivity analysis for retrieving land surface temperature from NOAA-advanced very high resolution radiometer data // *Geophysical Research*, – P. 22 655-22 670.
- 7 Snyder W., Wan Z. Surface temperature correction for active infrared reflectance measurements of natural materials // *Appl. Optics*, vol. 35, no. 13, 1996. – P. 2216-2220.
- 8 Susskind J., J. Rosenfield D. Reuter, M. T. Chahine. Remote Sensing of weather and climate parameters from HIRS2/MSU on TIROS-N // *J. Geophys. Res.*, vol. 89, no. D3, 1984. – P. 4677-4697.
- 9 Sutton, J. C., Gillespie T. J., Hilebrand P. D. Monitoring weather factors in relation to plant disease of dew periods // *Plant Disease*, vol. 68, no. 1, 1984. – P. 78-84.
- 10 Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive, Volume III, from Theory to Applications*, North Bergen, NJ: Book-Mart Press, Inc., 1986.

- 11 Vidal A. Atmospheric and emissivity correction of land surface temperature measured from satellite using ground measurements or satellite data // Int. J. Remote Sens., vol. 12, no. 12, 1991. – P. 2449-2460.

Институт космических исследований, г. Алматы

**СПУТНИКТИ БАРЛАП БАЙҚАУДЫ МӘЛІМЕТТИҢ ЖЕР БЕТІНІҢ
ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ ӨРІСТЕРІНІҢ АНЫҚТАУЫ**

Физ.-мат. ғылымд. докторы Ж.Ш. Жантаев
Техн. ғылымд. докторы А.Х. Ахмеджанов
И.В. Каипов

Астына төселген беттер температураның есептеуінің технологиясы ғарыштық суреттердің өңдеуінің программалық пакеттерінің қолдануымен спутникті мәліметтерін негізде жетілдірілген.