

Апробация способа восстановления АОТ над сушей по спутниковым измерениям MODIS в ИК-диапазоне спектра

С.В. Афонин^{1,2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Томский государственный университет

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 15.03.2011 г.

На основе опубликованных результатов численного моделирования и обработки реальных спутниковых данных исследована возможность восстановления аэрозольной оптической толщи по ИК-измерениям в спектральных каналах, расположенных в диапазонах 3,5–4 и 8–13 мкм. На примере данных спутниковой системы EOS/MODIS проведена апробация этого подхода для Томского региона.

Ключевые слова: аэрозоль, оптическая толщина, спутниковые ИК-измерения; aerosol, optical depth, satellite IR measurements.

Введение

В настоящее время существует возможность оперативных измерений аэрозольной оптической толщи (АОТ) средствами космического пассивного зондирования [1]. При этом есть ряд проблем и ограничений, среди которых особо можно выделить отсутствие спутниковых измерений параметров аэрозоля в ночное время суток. Частично эти проблемы можно решить с помощью инфракрасного мониторинга аэрозоля из космоса. Однако сейчас его основное применение – это детектирование пылевых бурь и аэрозоля вулканического происхождения (например, [2–4]) над водной поверхностью. При этом восстановление АОТ над сушей по данным спутниковых инфракрасных измерений из космоса фактически отсутствует. Ранее автором в работе [5] был проведен предварительный анализ возможностей применения ИК-измерений из космоса для мониторинга аэрозоля в интересах решения задачи атмосферной коррекции спутниковых ИК-изображений. В этой статье рассматриваются результаты восстановления над сушей (в Томском регионе) аэрозольной оптической толщи на основе спутниковых измерений в ИК-каналах спектрометра EOS/MODIS.

1. Восстановление АОТ по ИК-измерениям MODIS над океаном

Рассмотрим результаты работы [4], где по спутниковым данным MODIS за 2004–2006 гг. ре-

шалась задача детектирования над Атлантикой пылевых выносов из Сахары. Детектирование осуществлялось с использованием четырех ИК-каналов MODIS (20, 30, 31, 32), расположенных в спектральных диапазонах 3,66–3,84; 9,58–9,88; 10,78–11,28 и 11,77–12,27 мкм. На основе регрессионного анализа спутниковых измерений аэрозольной оптической толщи $\tau_{0,55}$ в канале $\lambda = 0,55$ мкм (использованы 34 файла спутниковых данных типа MxD04_L2) совместно с измерениями яркостных температур в ИК-каналах MODIS авторами [4] было получено выражение для вычисления аналога АОТ – параметра TDI (Thermal-infrared Dust Index):

$$TDI = c_0 + c_{20}T_{20} + c_{30}T_{30} + c_{31}T_{31} + c_{32}T_{32}. \quad (1)$$

Значения регрессионных коэффициентов в выражении (1)

c_0	c_{20}	c_{30}	c_{31}	c_{32}
-7,9370	0,1227	0,0260	-0,7068	0,5883

Проводя анализ значений коэффициентов выражения (1), можно отметить, что сумма коэффициентов $c_{20} + c_{31} + c_{32} = 0,004$, т.е. фактически равна нулю. Из абсолютных значений коэффициентов следует, что минимальное влияние на величину TDI должны оказывать измерения в спектральном диапазоне 9,58–9,88 мкм (канал 30), который предназначен для измерения общего содержания озона в атмосфере. Поскольку ошибки радиометрических измерений составляют порядка $\delta T_\lambda = 0,05$ К в каналах 20, 31, 32 и 0,25 К для канала 30, то из выражения (1) следует, что среднеквадратическая ошибка восстановления АОТ за счет этого фактора будет менее 0,05.

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

С использованием тестовой выборки из 191762 измерений АОТ в [4] для значений $\tau_{0,55}$ и TDI были получены коэффициент корреляции $R = 0,87$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0,208$. Несмотря на удовлетворительный уровень корреляции между $\tau_{0,55}$ и TDI, следует отметить наличие «ветвей» на графике соотношения этих величин, где TDI превышает $\tau_{0,55}$ в несколько раз. Кроме того, авторы [4] подчеркивают, что полученные ими результаты относятся к восстановлению АОТ для пылевых выносов в конкретном регионе, а применимость их для других регионов, типов аэрозоля и подстилающей поверхности требует дополнительных исследований.

2. Восстановление АОТ по ИК-измерениям MODIS над сушей

Восстановление АОТ над сушей проводилось на основе спутниковых данных для участка (56–58° с.ш. и 84–86° в.д.) территории Томской области. Уровень АОТ в окрестностях Томска контролировался с помощью данных станции AERONET. Был проведен совместный анализ результатов спутниковых измерений АОТ в канале $\lambda = 0,55$ мкм и яркостных температур в ИК-каналах (20, 22, 29, 30, 31, 32) MODIS. Каналы 22 и 29 расположены в спектральных диапазонах 3,929–3,989 и 8,4–8,7 мкм соответственно. Для регрессионного анализа использовались спутниковые данные, полученные со спутника Terra в 2004 и 2006 гг., включая:

- радиометрические измерения (файлы MOD021KM) с номинальным пространственным разрешением (FOV), равным 1 км, и данные геопривязки радиометрических измерений (файлы MOD03);

- облачную маску (MOD35_L2, FOV = 1 км) для отбора безоблачных ситуаций;

- вертикальные профили температуры и влажности (MOD07_L2, FOV = 5 км) для учета молекулярного поглощения при атмосферной коррекции радиометрических измерений;

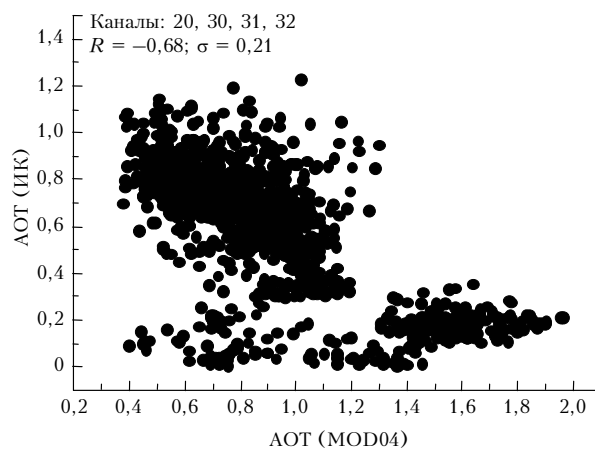
- аэрозольную оптическую толщину в канале $\lambda = 0,55$ мкм (MOD04_L2, FOV = 10 км).

Перечисленные выше данные были получены по сети Интернет с сайта LAADS Web (Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System, <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>). Для согласования пространственного разрешения спутниковых данных MOD04 и MOD21KM радиометрические измерения усреднялись в окне 11×11 пикселей вокруг точки измерения АОТ. Тестовая выборка составила около 1220 пар спутниковых измерений. Среднее значение АОТ составило свыше 0,9, т.е. рассматривались оптические условия спутниковых наблюдений с достаточно высоким уровнем замутненности атмосферы.

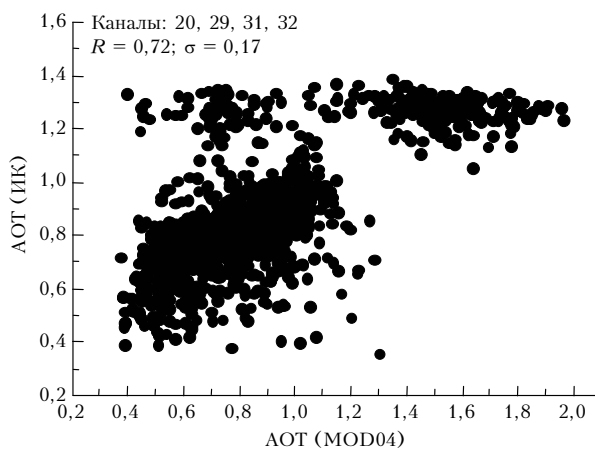
На первом этапе проводилась попытка получить значения TDI с помощью выражения (1) со значениями регрессионных коэффициентов из таблицы.

В результате этих вычислений (рис. 1, а) были получены отрицательный коэффициент корреляции

между TDI и $\tau_{0,55}$, а также область значений этих величин, где они отличались почти на порядок. Причина этого – существенное различие соотношений для водной поверхности и суши яркостных температур T_{20} , с одной стороны, и T_{30} , T_{31} , T_{32} – с другой.



а



б

Рис. 1. Результаты сопоставления для канала $\lambda = 0,55$ мкм данных MOD04 и значений TDI: а – использовано выражение (1); б – коэффициенты для TDI определены путем регрессионного анализа

Проведенный регрессионный анализ позволил получить новые значения коэффициентов для расчета TDI при различных сочетаниях ИК-каналов MODIS: (20, 29, 31, 32), (22, 29, 31, 32) и (20, 30, 31, 32). Из результатов регрессионного анализа следует, что первые две комбинации обладают преимуществами перед третьей. Согласно данным рис. 1, б, для первой комбинации коэффициент корреляции $R = 0,72$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0,17$.

После регрессионного анализа спутниковых данных был применен предложенный в [5] физический подход. Он основан на восстановлении АОТ по спектральным различиям значений температуры земной поверхности, восстановленных в ИК-каналах MODIS после учета молекулярного поглощения с помощью программы MODTRAN и спутниковых

данных MOD07_L2 о вертикальных профилях метеопараметров атмосферы. Для атмосферной коррекции данных был использован программный комплекс, разработанный в [6, 7]. На рис. 2 приведены результаты применения физического подхода для восстановления АОТ.

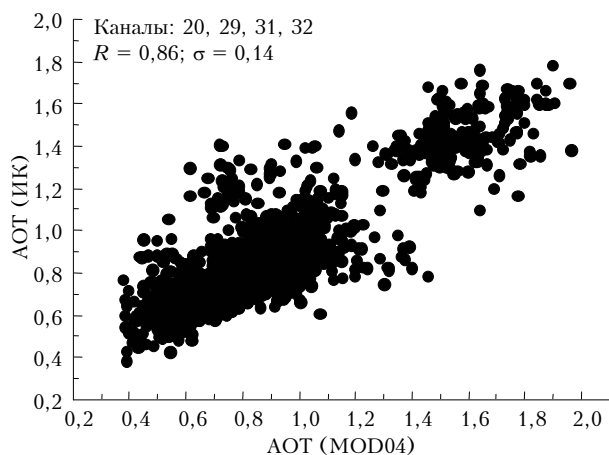


Рис. 2. Результаты сопоставления для канала $\lambda = 0,55$ мкм данных MOD04 и значений АОТ, восстановленных по ИК-измерениям MODIS с помощью физического подхода [5]

Сравнение данных рис. 1 и 2 говорит о том, что физический подход [5] по точности обладает заметными преимуществами перед регрессионным подходом, имея для тестовой выборки значения $R = 0,86$ и $\sigma = 0,14$, при отсутствии существенных различий между результатами его применения и данными восстановления АОТ в видимой области спектра.

S. V. Afonin. Retrieval of aerosol optical depth from satellite measurements in the infrared range.

Based on literature data and numerical simulation results, and by processing the actual satellite data, we explored the possibility for retrieval of the aerosol optical depth (AOD) from IR measurements in the 3,5–4 and 8–13 μm wavelength channels. By the example of data of EOS/MODIS satellite system, we tested this approach for Tomsk region.

Автор выражает признательность руководству и сотрудникам NASA, благодаря усилиям которых с сайта LAADS Web были получены спутниковые данные MODIS (уровни L1b и L2), использованные в настоящей статье.

1. *Remer L.A., Tanre D., Kaufman Y.* Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS: Collection 5. MODIS Algorithm Theoretical Basis Document No. ATBD-MOD-02 (2006). 87 pp. URL: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod02.pdf
2. *Ackerman S.A.* Remote sensing aerosols using satellite infrared observations // *J. Geophys. Res. D.* 1997. V. 102, N 14. P. 17069–17079.
3. *Merchant C.J., Embury O., Le Borgne P., Bellec B.* Saharan dust in nighttime thermal imagery: detection and reduction of related biases in retrieved sea surface temperature // *Remote Sens. Environ.* 2006. V. 104, N 1. P. 15–30
4. *Hao X., Qu J.J.* Saharan dust storm detection using moderate resolution imaging spectroradiometer thermal infrared bands // *J. Appl. Remote Sens.* 2007. V. 1. 013510. P. 1–9.
5. *Афонин С.В.* Анализ возможностей ИК-мониторинга аэрозоля и перистой облачности из космоса в интересах задачи атмосферной коррекции спутниковых изображений подстилающей поверхности // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23, № 11. С. 995–1005.
6. *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.
7. *Соломатов Д.В.* Алгоритмы и программные средства атмосферной коррекции спутниковых ИК-измерений на основе RTM-метода: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск: ИОА СО РАН, 2010. 21 с.