

## Мониторинг аэрозоля по данным MODIS в ИК диапазоне спектра

С.В. Афонин

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

На основе литературных данных, результатов численного моделирования и обработки реальных спутниковых данных демонстрируется возможность восстановления аэрозольной оптической толщи (АОТ) 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:** аэрозольная оптическая толщина, спутниковые измерения, ИК диапазон.

### Введение

В настоящее время средства космического пассивного зондирования активно применяются для глобального и регионального мониторинга аэрозоля (Remer et al., 2005). Однако есть ряд проблем и ограничений, среди которых можно отметить отсутствие измерений параметров аэрозоля в ночное время суток. Частично эти проблемы можно решить с помощью ИК мониторинга аэрозоля из космоса, который сейчас имеет ограниченное применение для детектирования пылевых бурь и аэрозоля вулканического происхождения (Ackerman, 1997; Merchant et al., 2006). Одной из немногих является работа (Нао, Ци, 2007), где наряду с решением задачи детектирования выноса сахарского аэрозоля над Атлантикой на основе регрессионного подхода также показана возможность оценки аэрозольной оптической толщи (АОТ) по спутниковым ИК измерениям спектрорадиометра MODIS. К сожалению, отсутствие здесь учета в явном виде молекулярного поглощения, имеющего заметные различия в каналах MODIS, ставит под сомнение универсальность предложенного подхода. Также открытым остался вопрос о применимости этого подхода над сушей. В работе (Афонин, 2010) был проведен анализ возможностей использования ИК измерений для мониторинга аэрозоля из космоса и сформулирован принцип «физического» подхода к решению этой задачи. Цель данной работы – анализ результатов мониторинга аэрозоля над сушей на основе измерений в ИК каналах MODIS с применением регрессионного и физического подходов.

### 1. Регрессионный подход к восстановлению АОТ по ИК измерениям MODIS

Рассмотрим результаты упомянутой выше работы (Нао, Ци, 2007), где решалась задача детектирования над Атлантикой пылевых выносов из Сахары и оценки оптической толщины аэрозоля по спутниковым ИК измерениям спектрорадиометра MODIS. 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 совместно со значениями радиационных температур  $T_{20} \dots T_{32}$  в ИК каналах MODIS авторами работы было получено линейное соотношение (1) для вычисления параметра TDI (Thermal-infrared Dust Index):

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

Значения коэффициентов  $c_0 \dots c_{32}$  соотношения (1) приведены ниже в табл. 1:

Таблица 1. Значения регрессионных коэффициентов в (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 оценку величины TDI должны оказывать измерения в спектральном диапазоне 9,58...9,88 мкм (канал 30), который, как известно, предназначен для измерения общего содержания озона в атмосфере. Ошибки радиометрических измерений составляют порядка  $\delta T_\lambda = 0,05$  К в каналах 20, 31, 32 и  $\delta T_\lambda = 0,25$  К для канала 30, поэтому из выражения (1) следует, что среднеквадратическая ошибка восстановления АОТ за счет этого фактора будет менее 0,05.

На основе тестовой выборки из 191 762 измерений АОТ (использовались данные из 34 файлов типа MxD04\_L2) для значений  $\tau_{0,55}$  и TDI были получены коэффициент корреляции  $R = 0,87$  и среднеквадратичное расхождение  $\sigma = 0,208$ . Несмотря на хороший уровень корреляции между  $\tau_{0,55}$  и TDI, авторами было отмечено наличие “ветвей” на графике соотношения этих величин, где TDI превышает  $\tau_{0,55}$  в несколько раз. Кроме того, авторы 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. Физический подход к определению АОТ по спутниковым ИК измерениям

Для краткого описания физического подхода к мониторингу аэрозоля из космоса в ИК диапазоне спектра обратимся к данным работы (Афонин, 2010), где на основе результатов численного имитационного моделирования было проведено изучение вопроса о влиянии замутненной атмосферы на спутниковые ИК измерения и на результаты их атмосферной коррекции. Расчеты были выполнены с помощью известной программы MODTRAN в четырех ИК диапазонах (3,5...4; 8,3...9,3; 10,3...12,3; и 11,5...12,5 мкм), которые для краткости обозначим как  $\lambda = 3,7; 8,8; 11$  и  $12$  мкм. Для модели лета средних широт и зенитных углов трассы наблюдений  $\Theta V = 0$  и  $45^\circ$  производился расчет температурной поправки  $\Delta T_{HAZE}$  ( $\Delta T_{HAZE} = T_{MOL} - T_{HAZE}$ ), т. е. разницы между радиационными температурами ( $T_{MOL}$ ), которые соответствуют случаю прозрачной атмосферы, и ситуации, когда в атмосфере присутствует аэрозоль или перистые облака ( $T_{HAZE}$ ). Расчеты проводились для трех типов оптических ситуаций в атмосфере: а) аэрозоль приземного слоя (модели *rural, maritime, urban, desert*); б) стратосферный поствулканический аэрозоль (*volcanic*); в) перистая облачность (*тонкая и плотная*) с нижней границей их высоты порядка 10 км.

В табл. 2 приведены оптические характеристики моделей замутненной атмосферы: альbedo однократного рассеяния  $\omega_0$  и фактор асимметрии  $g$  индикатрисы рассеяния  $P(\mu)$ . Подстилающая поверхность – ламбертовская, пространственно однородная, излучающая по закону Планка.

Таблица 2. Характеристики рассеяния аэрозоля и перистой облачности ( $\omega_0; g$ )

Тип	Спектральные каналы, мкм			
	3,7	8,8	11,0	12,0
<i>Rural</i>	0,900; 0,727	0,406; 0,645	0,597; 0,655	0,549; 0,679
<i>Maritime</i>	0,911; 0,714	0,546; 0,669	0,379; 0,680	0,194; 0,660
<i>Urban</i>	0,502; 0,738	0,376; 0,677	0,404; 0,697	0,328; 0,702
<i>Desert</i>	0,906; 0,716	0,547; 0,588	0,681; 0,693	0,662; 0,730
<i>Volcanic</i>	0,946; 0,669	0,569; 0,471	0,500; 0,411	0,498; 0,414
<i>Cirrus тонкие</i>	0,836; 0,774	0,762; 0,865	0,324; 0,852	0,387; 0,804
<i>Cirrus плотные</i>	0,550; 0,958	0,517; 0,975	0,513; 0,977	0,539; 0,944

В качестве примера полученных результатов моделирования на рис. 1 приведена зависимость  $\Delta T_{HAZE}$  от оптической толщины  $\tau_{0,55}$  на длине волны  $\lambda = 0,55$  мкм для различных типов аэрозоля и перистого облака (зенитный угол трассы наблюдения  $\Theta V = 51^\circ$ ). Из анализа расчетных данных следует вывод: в условиях замутненной атмосферы искажение спутниковых измерений в ИК каналах, вызванное слоями аэрозоля или перистой облачности, достигает в зависимости от канала значимого уровня  $\Delta T_{HAZE} \sim 0,5$  К для оптической толщины  $\tau_{0,55} > 0,25 \dots 1,9$  (приземный слой аэрозоля) и  $\tau_{0,55} > 0,02 \dots 0,25$  (высота рассеивающих слоев  $H_{scat} > 10$  км).

Полученные данные очевидным образом должны быть дополнены оценками чувствительности  $\Delta T_{HAZE}$  к ошибкам задания ключевых параметров аэрозоля и облачности: оптической толщины  $\tau_{0,55}$ , альbedo однократного рассеяния аэрозоля  $\omega_A$ , индикатрисы рассеяния  $P(\mu)$ , высоты рассеивающего слоя. Результаты расчетов выявили доминирующий вклад ошибок задания  $\tau_{0,55}$  при оценке  $\Delta T_{HAZE}$ . Допустимые ошибки задания  $\tau_{0,55}$  и  $H_{scat}$  составляют порядка 20...30 % и 1...2 км, соответственно.

Важным итогом анализа результатов численного моделирования является вывод, что при любых значениях величин  $\tau_{0,55}$  и зенитного угла  $\Theta V$  соотношение величины  $\Delta T_{HAZE}$  в различных ИК каналах MODIS отличается для всех трех типов рассмотренных при численном моделировании оптических ситуаций. Из этого вытекает основной принцип применения на практике физического подхода к ИК мониторингу оптического состояния замутненной атмосферы. В случае прозрачной атмосферы значения температур подстилающей поверхности, восстановленные в различных ИК каналах прибора, в идеале должны *совпадать* после учета характеристик молекулярного поглощения, а также излучательной способности поверхности. В случае замутненной атмосферы это совпадение нарушается. Амплитуда и соотношение различий будет зависеть от характера и величины замутненности атмосферы. Анализ спектральных различий радиационных температур позволит определить тип оптической ситуации и её ключевую характеристику – АОТ.

### 3. Восстановление АОТ по ИК измерениям MODIS над сушей

Восстановление АОТ над сушей проводилось на основе спутниковых данных MODIS для прямоугольного участка (56–58° с.ш. и 84–86° в.д.) на территории Томской области.

Был проведен совместный анализ данных спутниковых измерений АОТ в канале  $\lambda = 0,55$  мкм и радиационных температур в ИК каналах MODIS (20, 22, 29, 30, 31, 32). Каналы 22 и 29 расположены в спектральных диапазонах 3,93...3,99 и 8,4...8,7 мкм, соответственно. Для регрессионного анализа использовались данные, полученные со спутника Terra в 2004 и 2006 гг.:

- радиометрические измерения (файлы MOD021KM) с номинальным пространственным разрешением (FOV), равным 1 км, и данные геопривязки радиометрических измерений;
- облачная маска (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;
- аэрозольная оптическая толщина в канале  $\lambda = 0,55$  мкм (MOD04\_L2, FOV = 10 км) в качестве тестовой информации для оценки качества результатов мониторинга аэрозоля по данным MODIS в ИК диапазоне спектра.

Перечисленные выше данные были получены по сети Интернет с сайта LAADS [<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>]. Для согласования пространственного разрешения спутниковых данных MOD04 и MOD021KM радиометрические измерения усреднялись в окне  $11 \times 11$  пикселей вокруг точки измерения АОТ из файлов MOD04. Тестовая выборка составила около 1220 пар спутниковых измерений. Среднее значение АОТ превышало 0,9, т. е. рассматривались оптические условия спутниковых наблюдений с достаточно высоким уровнем замутненности атмосферы.

На первом этапе была проведена попытка получить значения TDI с помощью выражения (1) со значениями регрессионных коэффициентов из табл. 1. В результате этих вычислений (рис. 2а) был получен отрицательный коэффициент корреляции между TDI и  $\tau_{0,55}$ , а также наличие области значений этих величин, где они отличались почти на порядок. Причина этого – существенные различия соотношений для водной поверхности и суши  $T_{20}$  с одной стороны и  $T_{30} \dots T_{32}$  с другой.

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). Результаты анализа показали, что первые две комбинации обладают преимуществами перед третьей. Согласно данным рис. 2б, для первой комбинации коэффициент корреляции  $R = 0,72$  и среднеквадратичное отклонение  $\sigma = 0,17$ . При этом в отдельных случаях здесь наблюдаются существенные различия значений АОТ, восстановленных в каналах видимой и инфракрасной областях спектра.

После регрессионного анализа спутниковых данных был применен физический подход, сформулированный в п. 2 статьи. Как уже говорилось, он основан на восстановлении АОТ по спектральным различиям значений радиационных температур, полученных в ИК каналах MODIS после учета молекулярного поглощения, который можно осуществить с использованием программы MODTRAN и спутниковых данных MOD07\_L2 о вертикальных профилях метеопараметров атмосферы.

Для атмосферной коррекции данных был применен программный комплекс, представленный в работах (Афонин, Соломатов, 2008; Соломатов, 2010). На рис. 3 приведены результаты применения физического подхода для восстановления АОТ. Сравнение данных рис. 2б и 3 говорит о том, что физический подход по точности обладает заметными преимуществами перед регрессионным подходом – для тестовой выборки были получены значения

$R = 0,86$  и  $\sigma = 0,14$ . При этом важным является отсутствие существенных различий между результатами восстановления АОТ с применением данных MODIS в видимой и инфракрасной области спектра.

В заключение было проведено сравнение данных спутниковых измерений АОТ в видимой и инфракрасной областях спектра с данными наземных фотометрических измерений АОТ на станции сети AERONET. Результаты сравнения представлены в табл. 3, которая содержит величину  $\bar{\tau}$  – среднее значение АОТ для трех типов данных, а также  $\mu$  и  $\sigma$  – их среднее расхождение и СКО.

Таблица 3. Результаты сравнения наземных (AERONET) и спутниковых (MODIS) измерений АОТ

Тип данных	$\bar{\tau}$	$\mu$	$\sigma$
AERONET	0,876		
MOD04	0,895	-0,019	0,174
MODIS (ИК)	0,909	-0,033	0,199

С учетом известного выражения  $\Delta\tau = \pm(0,05 + 0,15\tau)$ , используемого для оценки методической погрешности спутниковых измерений АОТ (Remer et al., 2005), данные табл. 3 позволяют сделать следующий вывод. Значения АОТ, полученные из космоса по измерениям MODIS в инфракрасной и видимой области спектра, имеют близкую погрешность, практически лежащую в пределах методической.

Автор выражает признательность руководству и сотрудникам NASA, благодаря усилиям которых с сайта LAADS Web были получены спутниковые данные MODIS, использованные в этой работе. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 11-01-00673-а), Государственных контрактов № 14.740.11.0204 и 02.740.11.0674.

## Литература

1. *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*. 2010. Т. 23. № 11. С. 995–1005.
2. *Афонин С.В., Соломатов Д.В.* Методика учета оптико-метеорологического состояния атмосферы для решения задач атмосферной коррекции спутниковых ИК измерений // *Оптика атмосферы и океана*. 2008. Т. 21. № 2. С. 147–153.
3. *Соломатов Д.В.* Алгоритмы и программные средства атмосферной коррекции спутниковых ИК измерений на основе RTM-метода: Дис. ... канд. тех. наук. 05.13.18. Томск, 2010. 139 с.
4. *Ackerman S.A.* Remote sensing aerosols using satellite infrared observations // *J. Geophysical Research*. 1997. V. 102. N. D14. P. 17 069–17 079.
5. *Hao X., Qu J.J.* Saharan dust storm detection using moderate resolution imaging spectroradiometer thermal infrared bands // *Applied Remote Sensing*. 2007. V. 1. 013510. P. 1–9.
6. *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 Sensing of Environment*. 2006. V. 104. N. 1. P. 15–30.
7. *Remer L.A., Kaufman Y.J., Tanre D., Mattoo D., Chu D.A., Martins J.V., Li R.R., Ichoku C., Levy R.C., Kleidman R.G., Eck T.F., Vermote E., Holben B.N.* The MODIS aerosol algorithm, products and validation // *J. Atmospheric Sciences*. 2005. V. 62. N. 6. P. 947–973.

# Remote Sensing of Aerosol According to MODIS Satellite Data in IR Spectral Range

**S.V. Afonin**

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

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  $\mu\text{m}$  wavelength channels. By the example of data of EOS/MODIS satellite system, we tested this approach for Tomsk region.

**Keywords:** aerosol optical depth, satellite measurements, IR spectral range.