

С.В. Афонин^{1,2}, В.В. Белов^{1,2,3}, М.В. Энгель^{1,2}

Сравнительный анализ спутниковых аэрозольных данных типа MODIS Aerosol Products

¹ *Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

² *Отдел проблем информатизации Томского научного центра СО РАН*

³ *Томский государственный университет*

Поступила в редакцию 1.08.2007 г.

Представлены результаты сравнительного статистического анализа двух коллекций (С4 и С5) тематических продуктов MODIS Aerosol Products для территории Западной Сибири, содержащих результаты восстановления характеристик аэрозоля из космоса по данным прибора MODIS. Проведено сравнение данных для двух спутниковых систем – TERRA и AQUA. Определены характер и величина соответствующих различий в значениях массовой концентрации аэрозоля, аэрозольной оптической толщины и показателя Ангстрема.

Введение

С 2001 г. в Институте оптики атмосферы (ИОА) СО РАН ведутся региональные исследования оптических характеристик атмосферного аэрозоля с привлечением спутниковых данных. Для этих целей используются базы данных (БД) спутниковой информации и программное обеспечение для ее обработки [1, 2], на базе которых в ИОА создан и развивается INTERNET-ресурс (<http://www.sat-lros.iao.ru/>). Информационной основой БД являются результаты измерений аппаратуры спутников системы NOAA POES и тематические продукты спутниковой системы EOS/MODIS – MODIS Atmosphere Products (MODIS-AP), полученные нами из центров хранения и обработки спутниковых данных NASA (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/>).

На основе данных MODIS Aerosol Products (MOD04_L2, level 2) из четвертой коллекции (С4), которая начала формироваться в 2003 г., для Томского региона ранее была проведена валидация спутниковых данных и были выполнены исследования спектральной аэрозольной оптической толщины [3]. С 2006 г. центры хранения и обработки спутниковых данных NASA начали распространение пятой коллекции (С5) тематических продуктов MODIS, при подготовке которой было внесено большое количество изменений [4, 5] в алгоритмы восстановления аэрозольных характеристик. В этой связи очевидна актуальность исследований, аналогичных работе [6], по сравнительному анализу данных двух коллекций (С4 и С5) MODIS Aerosol Products, которые позволили бы определить основные изменения статистики аэрозольных данных на региональном уровне за счет методических изменений.

В статье представлены результаты сравнительного анализа следующих типов данных:

- файлов MOD04_L2 коллекций С4 и С5 (спутник TERRA);
- файлов MOD04_L2 коллекции С5 для спутников TERRA и AQUA;
- пространственных распределений усредненных значений АОТ для Томского региона на основе данных коллекции С5 (спутник TERRA).

1. Сравнение данных коллекций С4 и С5

Все работы для сравнительного анализа двух коллекций проведены на основе файлов типа MOD04_L2, полученных в результате тематической обработки одних и тех же гранул. Файлы MOD04 содержат данные об аэрозольных характеристиках атмосферы с пространственным разрешением 10 км для территории 50–62° с.ш. и 70–92° в.д. за временной период с апреля по октябрь 2001–2004 гг. Количество таких гранул составляет от 1389 до 1571 в зависимости от года.

На начальном этапе работы был произведен количественный анализ значений параметра Confidence Flag (CF), который отражает уровень качества восстановления аэрозольных характеристик по спутниковым данным прибора MODIS и зависит от состояния облачности и подстилающей поверхности. Из базовых описаний штатных алгоритмов восстановления следует, что параметр CF имеет 4 значения – от 0 до 3 (0 – плохой, 1 – предельный, 2 – хороший, 3 – отличный). При этом следует подчеркнуть, что, несмотря на существование четырех уровней качества, на самом деле в коллекции С4 использованы только уровни 3 и 0. Относительное количество разных значений параметра CF для

2001 г. — средние значения для каждого месяца и для полного весенне-осеннего периода — приведены на рис. 1.

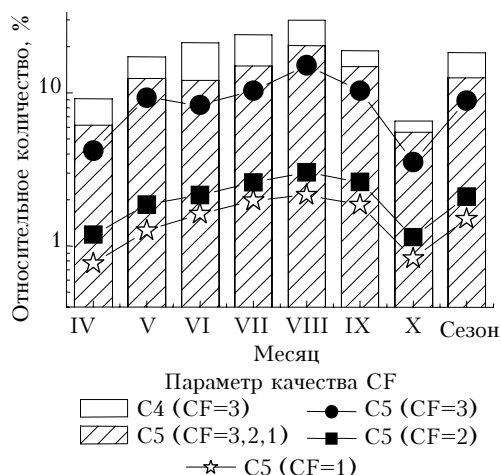


Рис. 1. Средние за месяц и сезон значения относительного количества восстановленных (параметр CF > 0) аэрозольных параметров. Данные C4 и C5, спутник TERRA, 2001 г.

Данные рис. 1 позволяют сделать вывод о том, что в среднем относительное количество данных с допустимым качеством восстановления аэрозольных параметров (при значениях CF > 0) составляет 12–20% для коллекции C4 и 12–14% для коллекции C5. При этом четко прослеживается сезонное изменение этого параметра: от 6–12 и 4–10%

(в случае C4 или C5 соответственно) для ранней весны и поздней осени до 16–30 и 17–20% для летнего периода, когда реализуются оптимальные условия для мониторинга аэрозоля (состояние подстилающей поверхности, зенитный угол Солнца). Говоря о данных максимального качества (CF = 3), следует иметь в виду, что относительное количество таких ситуаций от числа восстановленных значений параметров (CF = 1,2,3) составляет около 70%.

Таким образом, предварительный анализ данных о параметре CF позволил нам оценить для каждого месяца реальную статистическую обеспеченность рассматриваемого региона спутниковой информацией MODIS об атмосферном аэрозоле.

Далее перейдем к результатам сравнения некоторых аэрозольных параметров. Анализ перечня тех изменений [5], которые были внесены при формировании коллекции C5 в методы и алгоритмы восстановления аэрозольных характеристик, позволил нам выбрать для дальнейшего сравнительного анализа три важных параметра:

- массовая концентрация аэрозоля (МКА),
- аэрозольная оптическая толщина (АОТ) в канале 466 нм (τ_{466}),
- параметр α формулы Ангрстрема $\tau(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}$, характеризующий спектральное изменение АОТ для длин волн 466 и 660 нм.

На рис. 2 приведены результаты сравнительного анализа указанных аэрозольных параметров для 2001 г. — средние значения для каждого месяца и для всего весенне-осеннего периода.

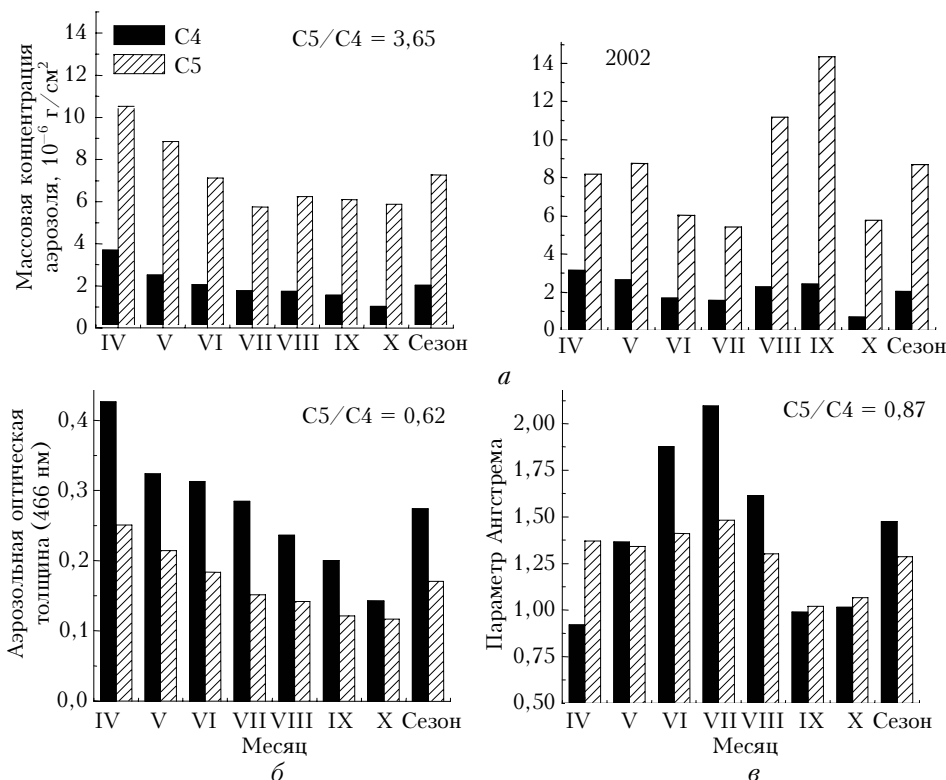


Рис. 2. Средние за месяц и сезон значения аэрозольных параметров: а — массовой концентрации аэрозоля; б — аэрозольной оптической толщины (466 нм); в — параметра α формулы Ангрстрема. Данные C4 и C5, 2001 г., спутник TERRA. Величина C5/C4 — отношение значений для C5 и C4

Из данных рис. 2,а следует, что переход от С4 к С5 привел к значительным изменениям массовой концентрации аэрозоля. Введение множителя $\exp(4,5\sigma^2)$, где σ – полуширина используемой модели логнормального распределения размеров частиц, в среднем увеличило для данных С5 абсолютные значения МКА в 3,5–4 раза. Описание правил вычисления значений σ для используемых аэрозольных моделей можно найти в [4, с. 30]. В ряде случаев (например, для данных 2002 г.) переход от С4 к С5 влечет не только увеличение значений МКА, но и изменение сезонного хода среднемесячных значений этого параметра, включая положения максимумов.

На рис. 2,б приводятся данные о средних значениях АОТ в канале 466 нм. Как и в случае с МКА, переход от данных С4 к данным С5 привел к заметным изменениям τ_{466} . В среднем их значения уменьшились на 25–40%. Максимальные различия (до 50%) данных для С4 и С5 характерны для летних месяцев.

Как следует из анализа данных рис. 2,в, наименьшие относительные изменения из трех рассматриваемых параметров претерпел параметр α формулы Ангрстрема. В среднем различие этого параметра в С4 и С5 составляет 13–16% и заметно уменьшается в 2004 г. до уровня 6%. При этом следует отметить, что максимальные различия этого параметра характерны для апреля, где среднее отношение значений С5/С4 составляют 1,35–1,50.

2. Сравнение данных спутниковых систем TERRA и AQUA

На втором этапе работ был выполнен сравнительный анализ данных MxD04_L2 для двух спутниковых систем TERRA и AQUA (MxD = MOD для TERRA и MxD = MYD для AQUA), на которых установлены приборы MODIS. В этом случае сравнения производились по тем же трем характеристикам атмосферного аэрозоля – МКА, τ_{466} и параметра α . Все работы для сравнительного анализа двух спутниковых систем проводились с использованием файлов MxD04_L2 (пятая коллекция – С5) для территории 50–62° с.ш. и 70–92° в.д. за временной период с апреля по октябрь 2003–2006 гг. Количество таких гранул составляет в зависимости от года от 1988 до 2020 для спутника TERRA и 1978–2021 для спутника AQUA.

Иллюстрации результатов сравнительного анализа аэрозольных параметров МКА, τ_{466} и параметра α для 2003 г. (средние значения для каждого месяца и для всего весенне-осеннего периода) приведены на рис. 3.

Данные рис. 3,а позволяют сделать вывод о том, что в среднем расхождения значений МКА для двух спутников не являются значительными (до 10%). При этом необходимо отметить тот факт, что эти различия уменьшаются с «возрастом» данных от 2003 до 2006 г. В дальнейшем предполагается выяснить, имеет ли это обстоятельство случай-

ный характер. Максимальные различия МКА наблюдаются для весенних месяцев.

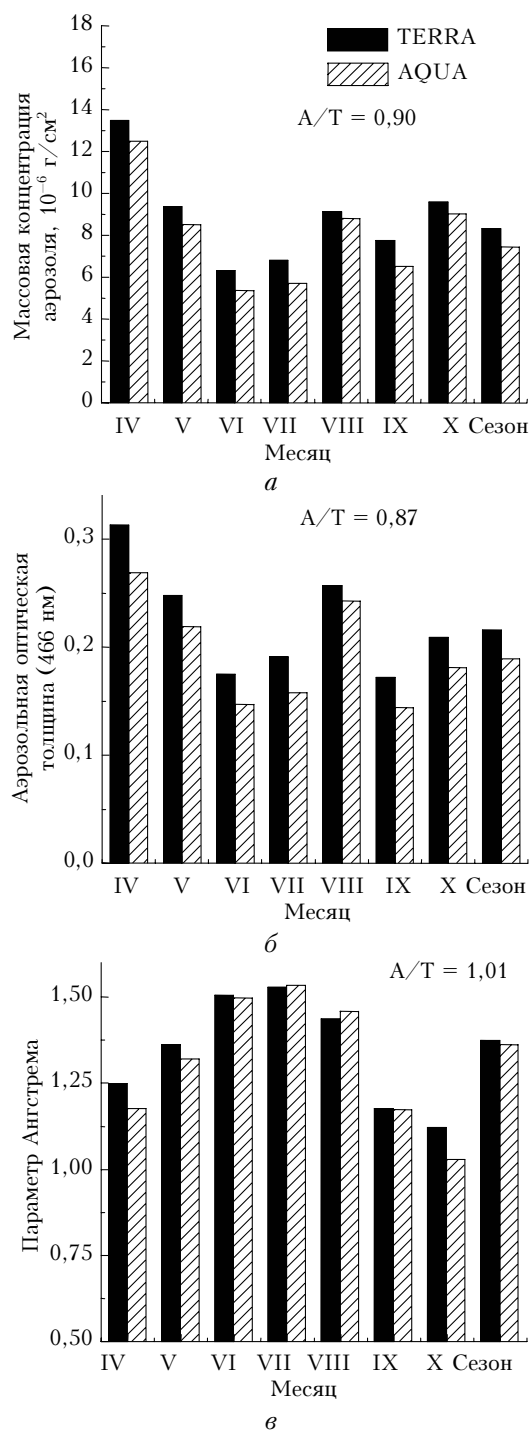


Рис. 3. Средние за месяц и сезон значения аэрозольных параметров: а – массовой концентрации аэрозоля; б – аэрозольной оптической толщины (466 нм); в – параметра Ангрстрема. Данные С5, спутники TERRA и AQUA, 2003 г. Величина А/Т – отношение значений для AQUA и TERRA

На рис. 3,б также приводятся данные о средних по выбранному региону АОТ в спектральном канале 466 нм. Как и в случае с МКА, очевидно

отсутствие заметных различий в средних значениях τ_{466} . Эти различия не превышают 13% и сопоставимы с методической погрешностью восстановления АОТ порядка $\pm 0,05 \pm 0,15\tau$. Однако следует отметить один любопытный факт, который потребует дальнейшего объяснения и состоит в том, что знак средних различий $\tau_{C5} - \tau_{C4}$ может быть разным для каждого года (например, $+0,027$ в 2003 г. и $-0,017$ в 2006 г.), но при этом он сохраняется для каждого месяца этого года.

Для данных 2003 и 2004 гг. различия α составили всего 1% при максимальных отклонениях до 5%. Однако для данных 2005 и 2006 гг. средний уровень расхождений возрос до 11–12%, основной вклад в величину которых внесли летние месяцы.

3. Пространственное распределение АОТ

В заключительной части нашей работы мы провели анализ того, как изменения в методах и алгоритмах восстановления характеристик аэрозоля проявились в пространственной структуре спутниковых данных MODIS. Ранее на базе данных C4 анализ пространственных распределений усредненных значений АОТ выявил существование пространственно неоднородных структур [2, 3], что входит в противоречие с ожидаемой квазиоднородностью распределений АОТ. Мы предполагали, что появление подобных структур объясняется неучтенным вкладом подстилающей поверхности в алгоритме восстановления АОТ. Как следует из описания изменений в алгоритмах [5], один из пунктов непосредственно отражает попытку более точной оценки альбеда подстилающей поверхности для ее учета в алгоритмах восстановления АОТ.

На рис. 4 приведены пространственные распределения значений τ_{466} (разрешение $0,5^\circ$ по широте и 1° по долготе) для 2001 г., полученные путем сезонного усреднения данных за период май–сентябрь. Из данных для коллекции C4, как и было показано нами в более ранних работах [2, 3], следует заметная пространственная неоднородность полей АОТ, структура которых хорошо коррелирует с пространственным распределением различных типов подстилающей поверхности. При этом величина неоднородностей превышает уровень методических погрешностей. Сравнивая данные C4 с данными C5, можно сделать два основных вывода.

1. Пространственная структура значений аэрозольной оптической толщины τ_{466} для C5 также содержит пространственные неоднородности, которые имеют сходное с данными C4 локальное расположение.

2. Масштаб неоднородностей и их величина заметно уменьшились, что отражает положительный эффект от изменений в оценках альбеда подстилающей поверхности.

В качестве количественных характеристик тех изменений, которые произошли в пространственных полях АОТ при переходе от данных C4 к данным C5, можно привести оценки коэффициентов

межгодовой корреляции пространственных структур для каждой из коллекций. В идеальной ситуации при отсутствии мощных локальных источников аэрозольного загрязнения атмосферы или каких-либо неучтенных факторов аэрозольные поля для рассматриваемых пространственных масштабов должны быть близки к стохастическим, квазиоднородным. Следовательно, и коэффициенты межгодовой корреляции в этом случае должны быть близки к 0. Для коллекции C4 значения коэффициентов корреляции составляют диапазон $0,52-0,75$. Для коллекции C5 аналогичные коэффициенты корреляции уменьшаются в среднем на $0,15$.

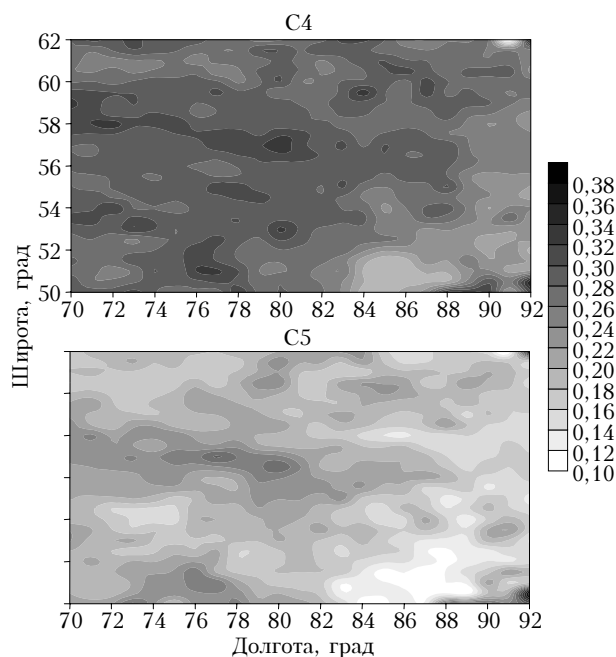


Рис. 4. Средние за сезон пространственные распределения аэрозольной оптической толщины (466 нм); спутник TERRA, 2001 г.

В дальнейшем мы предполагаем продолжение работ с новой коллекцией спутниковых данных MODIS Aerosol Products (C5) с целью ее дополнительной валидации и совершенствования методов восстановления параметров аэрозоля из космоса.

Заключение

1) Сравнение данных коллекций C4 и C5 для рассмотренного географического региона выявило наличие заметных (в некоторых случаях существенных) изменений в спутниковой информации MODIS по атмосферному аэрозолю.

2) Сравнение данных спутниковых систем TERRA и AQUA показало их относительно хорошее согласие для рассмотренного географического региона.

3) Изменения в алгоритмах восстановления аэрозольных параметров, выполненные для коллекции C5 [5], частично уменьшили искажающее влияние подстилающей поверхности на результаты их работы.

Авторы данной статьи выражают искреннюю признательность коллегам из Института космических исследований РАН д.т.н. Е.А. Лупяну, к.ф.-м.н. А.А. Мазурову и М.А. Бурцеву за помощь в получении по сети Интернет данных MODIS Aerosol Products (MxD04_L2) из архивов NASA.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы «Информационно-телекоммуникационные ресурсы СО РАН».

1. *Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В., Кох А.М.* Разработка в ИОА СО РАН базы данных региональной спутниковой информации и программного обеспечения для ее обработки // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 1–2. С. 52–60.
2. *Афонин С.В., Белов В.В., Куликов Г.Э., Энгель М.В.* Разработка программного обеспечения портала для использования региональной спутниковой информации в научных исследованиях // Вычисл. технол. 2006. Т. 11. Спец. выпуск. С. 127–135.

3. *Afonin S.V., Belov V.V., Engel' M.V.* Statistical analysis of the MODIS Atmosphere Products for the Tomsk Region // Proc. SPIE. 2005. V. 5979. P. 164–172.
4. *Remer L., Tanré D., Kaufman Y., Levy R., Mattoo S.* Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS: Collection 005. MODIS ATBD, November 2006. http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/docs/MOD04%3AMYD04_ATBD_C005_rev1.pdf.
5. *Mattoo S., Li R.-R., Martins J.V., Levy R., Chu D.A., Kleidman R., Ichoku C., Koren I.* Collection 005 Change Summary for MODIS Aerosol (04_L2) Algorithms (http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/C005_Changes/C005_Aerosol_5.2.pdf).
6. *Yang P., Zhang L., Hong G., Nasiri S.L., Baum B.A., Huang H.L., King M.D., Platnick S.* Differences between collection 4 and 5 MODIS ice cloud optical/microphysical products and their impact on radiative forcing simulations // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. 2007 (in Press). [http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/reference/docs/Yang_et_al_\(2007\).pdf](http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/reference/docs/Yang_et_al_(2007).pdf)

S.V. Afonin, V.V. Belov, M.V. Engel. Comparative analysis of space aerosol data of the MODIS Aerosol Product type.

Results of comparative statistic analysis of two collections (C4 and C5) from the MODIS thematic products for West Siberia, containing the retrieved characteristics of aerosol are presented. The comparison was carried out for two satellite systems: TERRA and AQUA. The character and magnitude of differences in values of aerosol mass concentrations, aerosol optical thickness, and the Angstrom unit are determined.