

С.В. Афонин¹, В.В. Белов^{1,2}, М.В. Панченко^{1,2}, С.М. Сакерин¹, М.В. Энгель¹

Корреляционный анализ пространственных полей аэрозольной оптической толщи на основе спутниковых данных MODIS

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

² *Томский государственный университет*

Поступила в редакцию 18.02.2008 г.

На основе спутниковых данных MODIS Aerosol Products (2001–2006 гг.) для Томского региона выполнен корреляционный анализ характеристик аэрозольной оптической толщины и балла облачности, необходимый для выбора оптимальной стратегии развития на этой территории наземной фотометрической сети AEROSIBNET.

Введение

Исследование оптических характеристик аэрозоля является одной из важных задач в решении проблемы корректного расчета радиационных характеристик атмосферы. Для получения информации об их пространственно-временной изменчивости необходима постановка измерений на обширных территориях. Очевидно, что для решения этих задач наиболее перспективно сочетание наземных и спутниковых измерений. Современные архивы глобальных и региональных спутниковых измерений параметров атмосферы являются уникальной основой для проведения широкого диапазона научных и прикладных исследований. Одним из направлений подобных исследований, проводимых в Институте оптики атмосферы (ИОА) СО РАН, является изучение оптических характеристик атмосферного аэрозоля с привлечением спутниковых данных аппаратуры NOAA POES и спектро радиометра MODIS (спутники EOS). В результате этих исследований для Томского региона (55–62° с.ш., 74–90° в.д.) ранее были получены статистические данные о пространственно-временной изменчивости аэрозольной оптической толщи (АОТ, τ) и характеристик облачности [1–5].

В данной статье проведен корреляционный анализ спутниковой информации типа MODIS Aerosol Products (Level 2) для Томского региона с целью получения корреляционных характеристик пространственных полей АОТ. Постановка этой задачи и некоторые предварительные результаты были рассмотрены в работе [6]. Проведение исследований представляет интерес для решения вопросов оптимизации размещения наземной фотометрической сети AEROSIBNET [7] (с точки зрения рационального положения и расстояния между пунктами наблюдений), оценки размеров и простран-

ственной конфигурации аэрозольных (АОТ) полей, а также влияния на них преобладающих циркуляций и расположения аэрозольных источников.

Содержание исследований заключалось в решении следующих задач:

– анализ статистических данных о пространственно-временной изменчивости балла облачности в регионе;

– анализ полей коэффициентов пространственной корреляции аэрозольной оптической толщи $R_{АОТ}(x, y)$, где x, y – географические долгота и широта;

– анализ радиальной зависимости функции $R_{АОТ}(d)$, где величина d – это удаление точки спутниковых наблюдений от центральной точки (Томск);

– анализ азимутальной зависимости коэффициентов $R_{АОТ}(\varphi)$, где величина φ – это азимутальный угол, отсчитываемый от направления на север.

1. Методика исследований

Для проведения исследований была использована база спутниковой информации MODIS Aerosol Products (Level 2, Collection 005) за период 2001–2006 гг. для региона с координатами 50–64° с.ш. и 65–105° в.д. Обработка данных осуществлялась с использованием программного обеспечения, составляющего основу специализированного INTERNET-ресурса ИОА СО РАН [8, 9].

Для решения поставленных в работе задач было обработано около 10000 файлов (гранул) типа MOD04_L2 (спутник TERRA, данные 2001–2006 гг.) и MYD04_L2 (спутник AQUA, данные 2003–2006 гг.), полученных через INTERNET из архивов NASA Goddard Distributed Active Archive Center (DAAC). Для каждого рассмотренного года были

выбраны данные параметра Corrected_Optical_Depth_Land, относящиеся к сезонному периоду май–сентябрь, когда на территории региона реализуются требуемые условия для проведения космомониторинга атмосферного аэрозоля. Методическая погрешность спутниковых данных АОТ находится в диапазоне значений $\pm 0,05 \pm 0,15\tau$ [10]. Результаты работ [1, 3, 4] подтверждают эти оценки для Томска.

Номинальное (при измерениях в надир) пространственное разрешение спутниковых данных MODIS Aerosol Products (Level 2) составляет 10 км. Далее путем пространственного и временного усреднения для региона нами осуществлялся расчет средних за сезон характеристик для рассматриваемого региона (50–64° с.ш., 65–105° в.д.) с шагом 0,5° по широте и 1° по долготе. Таким образом, пространственное разрешение усредненных данных имеет номинальный порядок 56×62 км (для географической широты Томска).

Коэффициенты пространственной корреляции аэрозольной оптической толщины $R_{\text{АОТ}}(x, y)$ были получены в радиусе 1100 км относительно центральной точки с географическими координатами 56,5° с.ш. и 85,0° в.д. (г. Томск).

Для изучения азимутальной зависимости коэффициентов $R_{\text{АОТ}}(\varphi)$ осуществлялась селекция данных по четырем угловым секторам (центральная точка – г. Томск) в диапазоне $\pm 45^\circ$ от направлений на север ($\varphi = 0^\circ$), восток (90°), юг (180°) и запад (270°).

2. Результаты исследований

На первом этапе исследований необходимо было проанализировать для рассматриваемого региона спутниковые данные о пространственном распределении балла облачности, характеризуемого в данном случае параметром Cloud_Fraction_Land (CFL). Важность этих данных заключается в том, что их анализ позволяет изучать вопрос о преимуществах тех или иных локальных точек мониторинга атмосферного аэрозоля, где условия наблюдений оптимальны с точки зрения минимального мешающего влияния облачности.

На рис. 1 представлены средние за сезон карты балла облачности, полученные за период 2001–2006 гг. по данным спутника EOS/TERRA. Анализ этих карт привел к несколько неожиданному результату, который состоит в следующем.

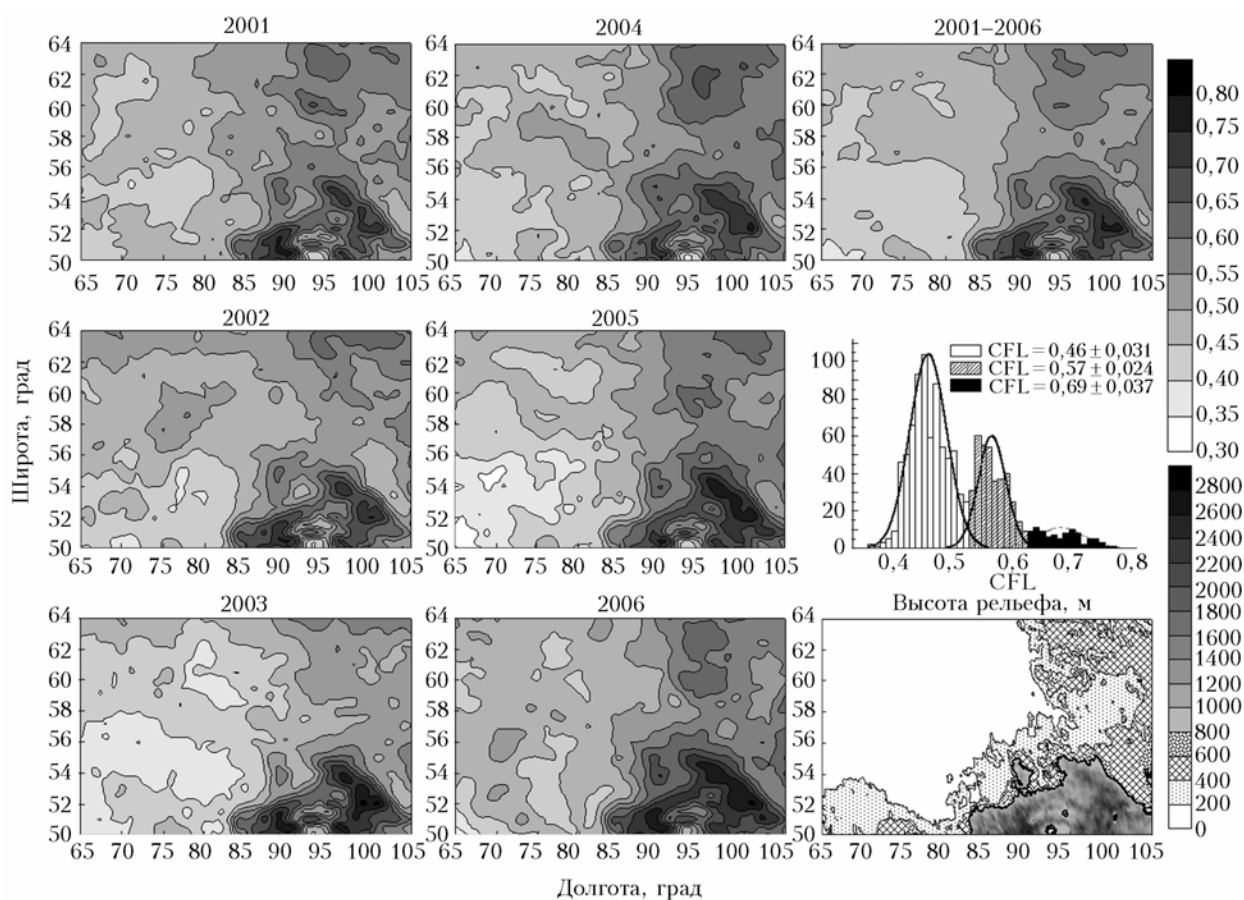


Рис. 1. Карты пространственного распределения балла облачности (CFL), рельеф местности и гистограмма CFL (для данных, усредненных по годам)

Все сезонные карты параметра CFL можно условно разделить на два обширных участка (в сумме порядка 90% площади), которые хотя и имеют разные средние значения параметра CFL, но характеризуются относительно слабой (около 2–4%) пространственной изменчивостью балла облачности. Однако наряду с этим выделяются и зоны «аномально» высоких значений балла облачности, где CFL больше 0,6. Карты и частотная гистограмма параметра CFL на рис. 1 подтверждают этот факт. Как следует из данных о высоте рельефа местности (см. рис. 1), «аномальные» значения параметра CFL были получены для тех участков поверхности, где высота рельефа превышает уровень 800 м. На наш взгляд, одним из объяснений этому является особенность работы алгоритма восстановления параметра Cloud_Fraction_Land для возвышенных и гористых участков местности.

В целом, анализ построенных по спутниковым данным сезонных карт балла облачности не выявил для рассматриваемого региона оптимальных точек наземного мониторинга атмосферного аэрозоля. Необходимо также отметить тот факт, что результаты и выводы, полученные на основе данных спутника EOS/TERRA, подтверждаются и данными со спутника EOS/AQUA.

Если дополнительным критерием для выбора места размещения узла наземной фотометрической сети AEROSIBNET является участие этого прибора в подспутниковых экспериментах, то следует учитывать представленные в настоящей статье данные об «аномальных» значениях балла облачности для возвышенных и гористых участков местности и остающиеся пока вопросы [5] к точности данных MODIS Aerosol Products.

Следующий этап исследований включал получение и анализ полей коэффициентов пространственной корреляции $R_{AOT}(x, y)$ аэрозольной оптической толщи.

Основные данные с результатами расчетов R_{AOT} для спектрального канала 466 нм представлены на рис. 2–4. (Следует отметить, что изложенные ниже результаты и выводы аналогичны и для данных, относящихся к спектральному каналу 660 нм). На рис. 2 приведены усредненные за сезон карты $R_{AOT}(x, y)$, полученные за период 2001–2006 гг. по данным спутника EOS/TERRA. Сезонные карты $R_{AOT}(x, y)$ дополняет рис. 3, где представлены данные о радиальной зависимости функции $R_{AOT}(d)$, а также рис. 4, где приведены данные об азимутальных особенностях $R_{AOT}(\varphi)$.

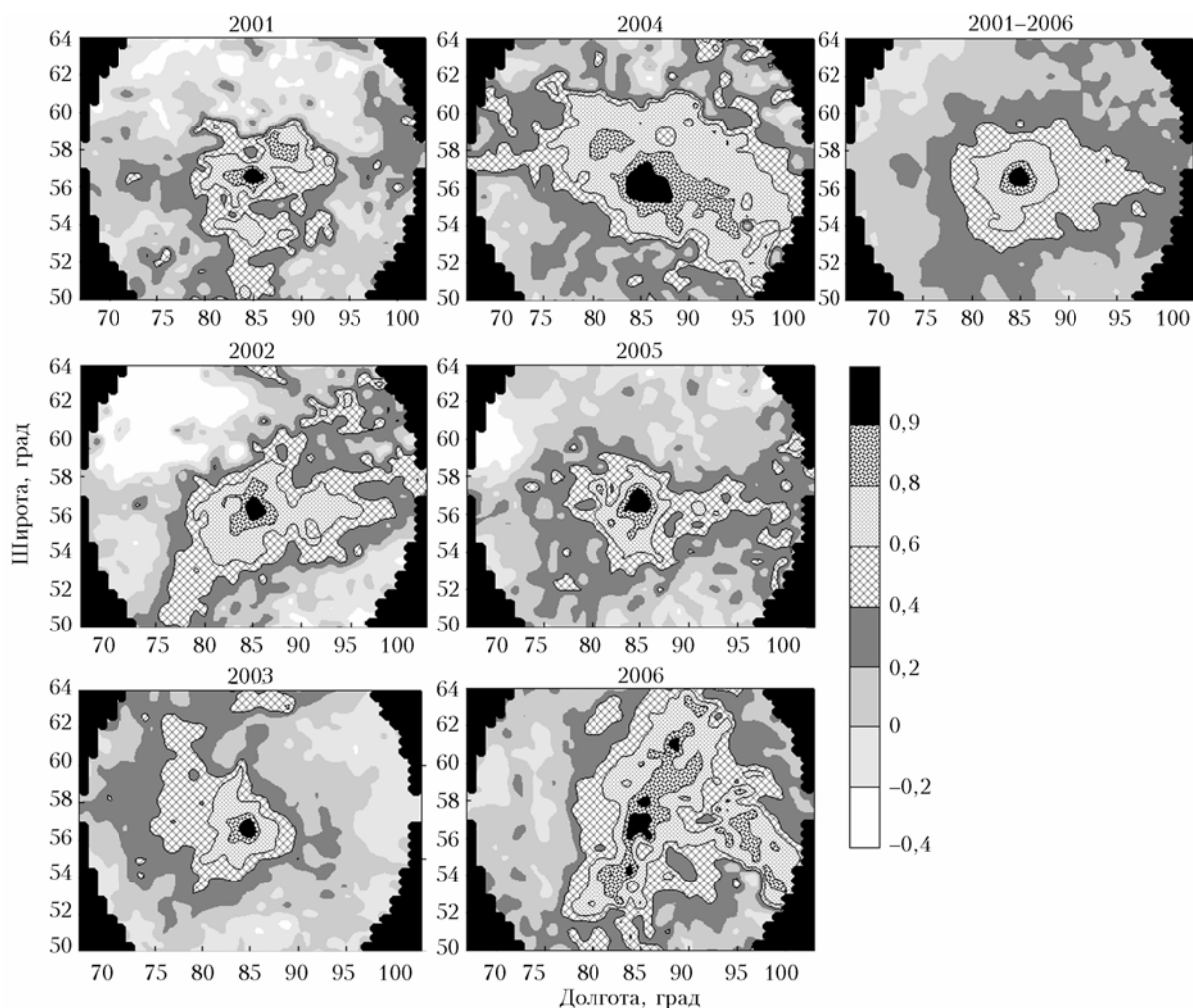


Рис. 2. Карты коэффициентов пространственной корреляции АОТ для Томска ($\lambda = 466$ нм)

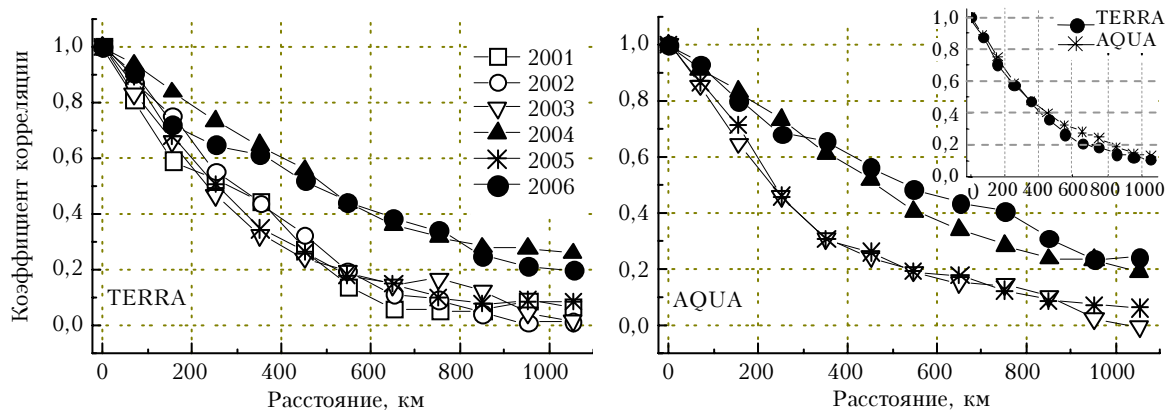


Рис. 3. Радиальная зависимость коэффициентов пространственной корреляции АОТ для Томска ($\lambda = 466$ нм). На фрагменте усредненные по годам данные для спутников TERRA и AQUA

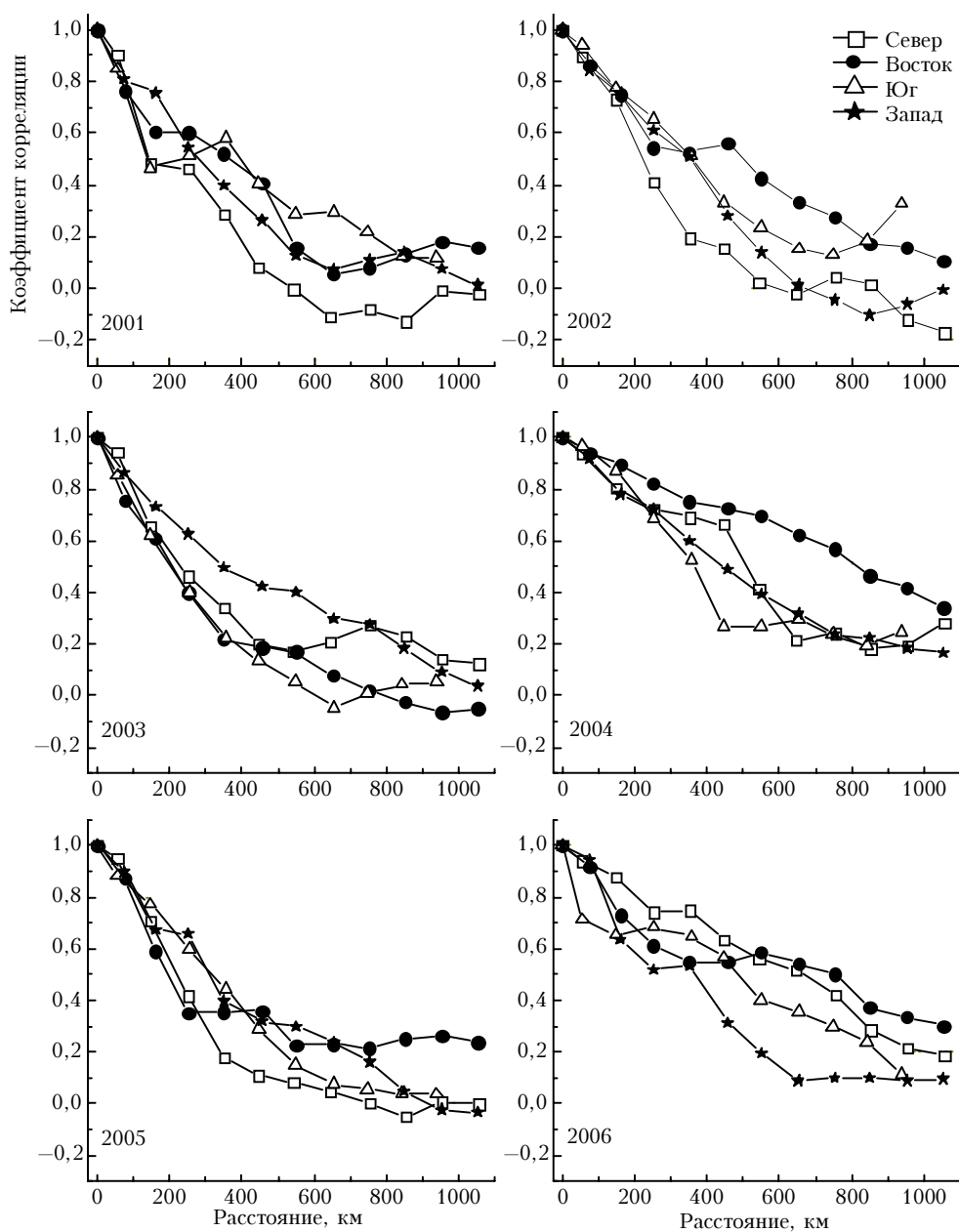


Рис. 4. Азимутальная зависимость коэффициентов пространственной корреляции АОТ для Томска ($\lambda = 466$ нм)

Анализ рис. 2 позволяет сделать ряд выводов. Для областей положительной корреляции АОТ можно отметить тот факт, что конфигурации полей коэффициентов $R_{\text{АОТ}}(x, y)$ отличаются межгодовым разнообразием. При этом можно ввести условную классификацию типов полей $R_{\text{АОТ}}(x, y)$. Вначале классифицируем их по пространственным размерам.

Первый тип $R_{\text{АОТ}}(x, y)$, характерный для данных 2001, 2003, 2005 гг., можно отнести к «пространственно локализованным» полям. Как следует из данных рис. 3, для этого типа полей характерно относительно резкое уменьшение значений $R_{\text{АОТ}}(d)$ с ростом параметра d , когда на расстоянии $d = 400$ км средняя по азимуту величина $R_{\text{АОТ}}$ составляет не более 0,4, а для $d = 600$ км – менее 0,2.

Второй тип $R_{\text{АОТ}}(x, y)$, характерный для данных 2002, 2004, 2006 гг., можно отнести к «пространственно размытым» полям. Для них, по сравнению с первым типом, характерно более плавное изменение значений $R_{\text{АОТ}}(d)$. В этом случае средних по азимуту коэффициент корреляции превышает $R_{\text{АОТ}}$ для первого типа на величину порядка 0,2 (см. рис. 3).

Приведем характерные для функции $R_{\text{АОТ}}(d)$ диапазоны значений коэффициентов корреляции. Они составляют около 0,8 для $d = 100$ км, ~0,5 для $d = 300$ км, ~0,3 для $d = 600$ км и уменьшаются до уровня ~0,1 при значении $d = 1000$ км. Для получения этих оценок удобной является аппроксимация коэффициентов пространственной корреляции АОТ функцией вида $R_{\text{АОТ}}(d) = \exp(-d/m)$. В этом случае параметр m составляет примерно 300–400 км для полей первого типа и 700–750 км для полей второго типа.

Кроме условной классификации по пространственным размерам полей $R_{\text{АОТ}}(x, y)$, можно отметить некоторые особенности их азимутальной ориентации. Анализируя рис. 2, можно выделить случаи, когда поле $R_{\text{АОТ}}(x, y)$ имеет доминирующее направление: 2001 г. – «юг»; 2002, 2005, 2006 гг. – «восток»; 2003 г. – «запад»; 2004 г. – «юго-восток».

Данные рис. 4 позволяют в дополнение к этим выводам получить количественные оценки коэффициентов $R_{\text{АОТ}}$ для четырех угловых секторов, определенных в разд. 1 «Методика исследований». В целом рис. 4 соответствует выполненной классификации по доминирующим направлениям и подтверждает тот факт, что на оси «восток–запад» доминирующим в большинстве рассмотренных случаев является восточное направление, когда $R_{\text{АОТ}}(\varphi = 90^\circ)$ больше $R_{\text{АОТ}}(\varphi = 270^\circ)$. Наглядной иллюстрацией этого являются средние за период 2001–2006 гг. данные $R_{\text{АОТ}}$ (см. рис. 2), где пространственное поле коэффициентов корреляции вытянуто именно в восточном направлении. Исключением здесь являются только данные 2003 г., где $R_{\text{АОТ}}(\varphi = 90^\circ)$ меньше $R_{\text{АОТ}}(\varphi = 270^\circ)$.

В случае же оси «север–юг» доминирующее направление выделить уже нельзя.

Следует подчеркнуть, что результаты и выводы, полученные при анализе полей коэффициентов пространственной корреляции АОТ на основе данных спутника EOS/TERRA, также подтверждаются и данными спутника EOS/AQUA.

Заключение

Исследования корреляционных полей АОТ позволили сделать следующие выводы.

- Существуют межгодовые различия конфигураций корреляционных полей, для которых возможна их условная классификация по пространственным размерам и азимутальной ориентации.
- Коэффициенты пространственной корреляции АОТ можно аппроксимировать функцией вида $R_{\text{АОТ}}(d) = \exp(-d/m)$, где значение параметра m составляет величину порядка 300–400 км (первый тип поля) и 700–750 км (второй тип поля).
- Определены азимутальные особенности поля коэффициентов пространственной корреляции АОТ. При этом на оси «восток–запад» доминирующим в большинстве рассмотренных случаев является восточное направление. Одной из вероятных причин этого может являться преобладающий западно-восточный перенос воздушных масс.

1. Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В. Статистический анализ оптико-метеорологических параметров атмосферы Томского региона на основе спутниковых данных MODIS // Междунар. симп. стран СНГ по атмосферной радиации «МСАР-04»: Тезисы докл. СПб.: Изд-во СПб.ГУ, 2004. С. 102–103.
2. Афонин С.В. Некоторые результаты изучения характеристик оптического состояния атмосферы в Томском регионе по спутниковым данным MODIS // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 5–6. С. 400–405.
3. Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В. Анализ региональных спутниковых данных MODIS Products // Сб. научн. статей «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: Изд-во GRANP polygraph, 2005. Т. 2. С. 336–342.
4. 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.
5. Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В. Сравнительный анализ спутниковых аэрозольных данных типа MODIS Aerosol Products // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21. № 3. С. 235–239.
6. Афонин С.В., Белов В.В., Панченко М.В., Сакерин С.М., Энгель М.В. Изучение корреляционных характеристик пространственных полей аэрозольной оптической толщи по спутниковым данным MODIS // XII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири»: Тезисы докл. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2005. С. 56.
7. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Панченко М.В., Полькин В.В., Холбен Б.Н., Смирнов А.В., Береснев С.А., Горда С.Ю., Корниенко Г.И., Николаиш-

- кин С.В., Поддубный В.А., Тацилин М.А. Результаты мониторинга атмосферного аэрозоля в азиатской части России по программе AEROSIBNET в 2004 г. // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. № 11. С. 968–975.
8. 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 атмосфер. и океана. 2005. Т. 18. № 1–2. С. 52–60.
9. 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. 133–143.
10. 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

S.V. Afonin, V.V. Belov, M.V. Panchenko, S.M. Sakerin, M.V. Engel. Correlation analysis of aerosol optical thickness spatial fields on the base of MODIS data.

Correlation analysis of aerosol optical thickness spatial fields and cloud amount has been conducted for the Tomsk region, based on MODIS Aerosol Products data (2001–2006). The analysis is necessary for a choice of optimal regional strategy for development of the ground-based photometric AEROSIBNET network.