

Сравнение данных наземного и спутникового мониторинга аэрозольной оптической толщины атмосферы для территории России

И. Н. Плахина¹, Н. В. Панкратова¹, Е. Л. Махоткина²

¹ *Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва, 119017, Россия*
E-mail: inna@ifaran.ru

² *Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова*
Санкт-Петербург, 194021, Россия
E-mail: makhotk@mail.ru

Исследования атмосферных аэрозолей проводятся во всем мире с целью оценки их воздействия на радиационный баланс Земли, на региональные и глобальные изменения климата. Аэрозоли представляют собой мелкие твердые частицы или капельки жидкости, взвешенные в воздухе, диаметр которых варьирует от нескольких нанометров до нескольких десятков микрометров. Они различаются по источникам, размерам, форме, составу и времени жизни в атмосфере. Существуют различные подходы к экспериментальным исследованиям аэрозолей в атмосфере, например наземные или спутниковые наблюдения. В настоящем исследовании представлены комбинированные спутниковые измерения, полученные с помощью аппаратуры MODIS, наземные наблюдения Российской актинометрической сети (ГМС) и данные станций наземной аэрозольной роботизированной сети (AERONET) для оценок аэрозольной оптической толщины атмосферы (АОТ) на длине волны 550 нм и последующих сопоставлений. В настоящей работе использованы данные всех трех систем наблюдений. Оценки выполнены для нескольких регионов России: Европейской территории, дальневосточного Приморья, Забайкалья. По результатам анализа попарно синхронизированных рядов дневных значений АОТ выявлен существенный разброс данных, в то же время средние многолетние значения АОТ для трех систем наблюдений близки как по величине, так и по диапазону вариаций.

Ключевые слова: аэрозольная оптическая толщина, актинометрическая сеть России, AERONET, MODIS

Одобрена к печати: 31.12.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-225-234

Введение

Трудности оценки радиационного воздействия аэрозолей на климатическую систему обусловлены недостатком знаний об их микрофизических и оптических свойствах и о вариациях распределения аэрозолей по пространству (Voucher et al., 2013). Для понимания динамики распределения аэрозолей и их влияния на глобальные и региональные изменения климата необходимо изучение динамики аэрозольной оптической толщины (АОТ). АОТ является индикатором оптических свойств атмосферы из-за корреляции между концентрациями аэрозольных частиц и коэффициентами ослабления света. Для мониторинга глобального аэрозольного бюджета и его радиационного воздействия на климат широко используется спутниковое дистанционное зондирование (Ситнов, 2011а, б). Достоинством этого метода является обширное покрытие по пространству. При этом неоднородности атмосферы (облачность, наличие или отсутствие температурной инверсии) могут оказывать существенное влияние на качество полученных результатов. Наземные измерения позволяют скорректировать искажающий эффект от вышеуказанных атмосферных параметров. Однако локальные измерения на отдельной станции не могут дать полной картины распределения аэрозолей над конкретным регионом в силу значительной пространственной и временной неоднородности аэрозольных частиц в атмосфере. Таким образом, сопоставление спутниковых и наземных наблюдений позволяет восстановить более полную картину распределения оптических характеристик атмосферы.

Использованные данные и анализ результатов

В работе использованы три типа данных: измерения, полученные со спутников Terra и Aqua спектрометром MODIS (Moderate Resolution Imaging SpectroRadiometer), результаты наземных наблюдений Российской актинометрической сети (ГМС) и данные станций всемирной наземной аэрозольной роботизированной сети (AERONET).

Сеть AERONET (AErosol RObotic NETwork, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>) (Dubovik, King, 2000; Dubovik et al., 2000, 2002) предназначена для получения данных в режиме реального времени, создания их архива и последующей обработки с целью изучения пространственно-временной изменчивости распределения аэрозоля. На данный момент насчитывается более 1000 станций по всему миру, только восемь из которых расположены в России. В качестве инструментов в сети используются солнечные фотометры CIMEL, современная конфигурация которых позволяет производить измерение АОТ на длинах волн (λ) 340, 380, 440, 500, 670, 870, 940 и 1020 нм. Заявленная точность измерения составляет 0,01 (для $\lambda = 440$ нм и более) (Dubovik et al., 2000). Наряду с прямыми солнечными измерениями эти фотометры проводят измерение углового спектра яркости неба. Специальный алгоритм (Dubovik, King, 2000), разработанный для данного типа фотометров, позволяет проводить восстановление большого числа проинтегрированных по высоте параметров аэрозоля, таких как индикатриса рассеяния, время выживания кванта (альbedo однократного рассеяния), распределение частиц по размерам и спектрально зависимый комплексный показатель преломления. Наблюдения производятся при условии свободного от облаков диска Солнца. Достоинством методики является единообразие методов, приборов и алгоритмов измерений на всех станциях. АОТ вычисляется исходя из спектрального ослабления луча на каждой длине волны по закону Бугера.

Данные AERONET находятся в свободном доступе. В настоящей работе использованы значения АОТ суточного разрешения уровня 1,5, предварительно прошедшие контроль качества и фильтрацию от облачности. АОТ рассчитывалась для $\lambda = 550$ нм по формуле (Eck et al., 1999): $\tau_a = \beta \lambda^{-\alpha}$, $\alpha = -d \ln \tau_a / d \ln \lambda$, где τ_a — АОТ для длины волны λ ; α — параметр Ангстрема; $\beta = 1$.

В качестве спутниковой информации проанализированы данные измерений аппаратурой MODIS, установленной на борту спутников Terra (EOS AM-1) и Aqua (EOS PM-1) (Remer et al., 2009). В настоящей работе использованы данные 3-го уровня (средние суточные) коллекции 5.1 (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>). Использовалась величина Optical_Depth_Land_And_Ocean — АОТ для длины волны 550 нм. Разрешение данных — $1 \times 1^\circ$. Таким образом, значения АОТ_{MODIS} для пунктов актинометрической сети РФ и AERONET извлекались для домена $1 \times 1^\circ$, в котором находилась соответствующая станция наблюдений.

Наземные измерения Российской актинометрической сети (ГМС) представлены Главной геофизической обсерваторией им. А. И. Воейкова (Махоткина и др., 2006; Плахина и др., 2007, 2009, 2011). Метод вычисления АОТ (спектральной аэрозольной оптической толщины атмосферы для $\lambda = 0,55$ мкм) по сетевым измерениям прямой солнечной радиации, измеренной у поверхности Земли, включая аспекты оценок интегрального влагосодержания по приземной упругости водяного пара, предложен и описан в работах (Абакумова и др., 1983; Тарасова, Ярхо, 1991) с указанием ограничений и погрешностей оценок.

Сравнение аэрозольной оптической толщины атмосферы, полученной различными системами наблюдений

Сравнение данных наземных (ГМС) и спутниковых (MODIS) наблюдений уже проводилось для оценки сходимости средних месячных значений АОТ (см., например, работу (Плахина и др., 2009)). Совместный анализ результатов, получаемых различными системами наблюдений, необходим для установления взаимного соответствия спутниковых и наземных наблюдений по АОТ. Примеры сопоставления данных двух типов для дневных значений АОТ (за период 2004–2016 гг.) для станций Нолинск, Цимлянск (ЕТР) и Уссурийск (дальневосточное Приморье РФ) представлены на *рис. 1* (см. с. 227), а также в *табл. 1* (см. с. 229).

Поскольку аппаратура MODIS фиксирует осреднённое значение для домена $1 \times 1^\circ$, а данные ГМС – АОТ в точке, показания двух систем заметно отличаются, что говорит о пространственной неоднородности значений АОТ. Кроме того, время осреднения для двух систем наблюдений различается, соответственно, коэффициент корреляции R^2 небольшой и варьирует от 0,40 до 0,70. Для спутниковых данных характерен более широкий разброс величин, при этом средние спутниковые значения, как правило, выше средних по данным ГМС (кроме станций Якутск и Иркутск). Регрессионный коэффициент $K < 1$, т. е. для спутниковых оценок характерны более значительные положительные выбросы, чем при наземной актинометрической регистрации.

На *рис. 2, 3 и 4* (см. с. 228) показаны синхронные дневные спутниковые и наземные наблюдения АОТ за период 2004–2016 гг. для станций Якутск (AERONET) – Якутск (ГМС), Екатеринбург (AERONET) – Верхнее Дуброво (актинометрическая сеть), Иркутск (AERONET) – Хомутово (ГМС), Уссурийск (AERONET) – Сад-Город (ГМС). Представлены пары рядов для сравнения величин АОТ, полученных на сети AERONET и со спутника MODIS (см. *рис. 2*), на сети AERONET и на актинометрической сети (см. *рис. 3*), со спутника MODIS и на актинометрической сети (см. *рис. 4*). Для каждой пары наблюдений АОТ были рассчитаны коэффициенты корреляции и построены регрессионные уравнения. Отметим, что для станции Иркутск (Хомутово) в Забайкалье и для станции Якутск ряды дневных значений АОТ при разных способах наблюдений имеют слабую взаимосвязь, что может быть обусловлено некоторыми смещениями друг относительно друга пунктов наблюдений сети AERONET и актинометрической сети (Иркутск – станция AERONET и Хомутово – актинометрическая станция ГМС). Расхождение спутниковых и наземных рядов АОТ вызвано различными методиками получения данных: наземные измерения производятся в определённой точке, спутниковые – в домене $1 \times 1^\circ$. Имеют значение нестабильность (пространственная и временная) аэрозольного состава атмосферы, например при пожарах в Забайкалье, облачные помехи и более высокие систематические и случайные погрешности регистрации при малых значениях АОТ на севере (Якутск). В целом регионы севера АТР и Забайкалье нуждаются в специальном, более детализированном анализе, который находится за рамками настоящей работы.

Несмотря на значительные расхождения в абсолютных дневных величинах АОТ, ряды имеют схожую относительную изменчивость значений АОТ (*табл. 1–3*, см. с. 229). Средние по всему временному интервалу в несколько лет и при длине ряда в несколько сот точек наземных систем наблюдений (AERONET и ГМС) и спутниковых данных (MODIS) достаточно близки как по величине, так и по диапазону вариаций (стандартное отклонение от среднего для синхронных рядов). При сравнении ГМС и MODIS «обобщённое» расхождение средних АОТ составляет величину в -12% , при сравнении AERONET и MODIS: $+11\%$, AERONET и ГМС: -1% .

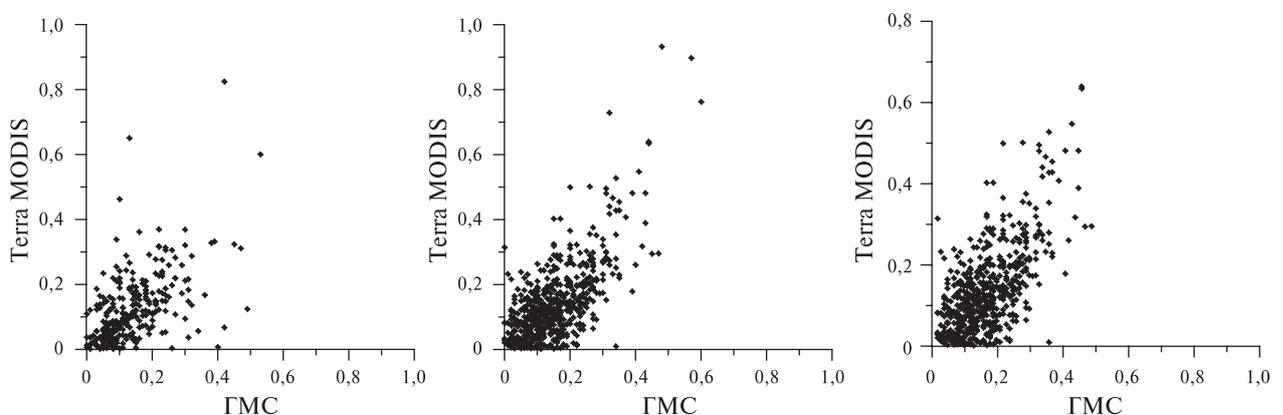


Рис. 1. Примеры сопоставления данных сети ГМС и спутника Terra (MODIS) для станций Нолинск, Цимлянск, Уссурийск: *а* – Цимлянск: $R^2 = 0,67$, $y = (0,62x + 0,03) \pm 0,008$ (среднеквадратическая ошибка); *б* – Нолинск: $R^2 = 0,47$, $y = (0,87x + 0,01) \pm 0,008$; *в* – Уссурийск: $R^2 = 0,68$, $y = (0,78x + 0,06) \pm 0,008$

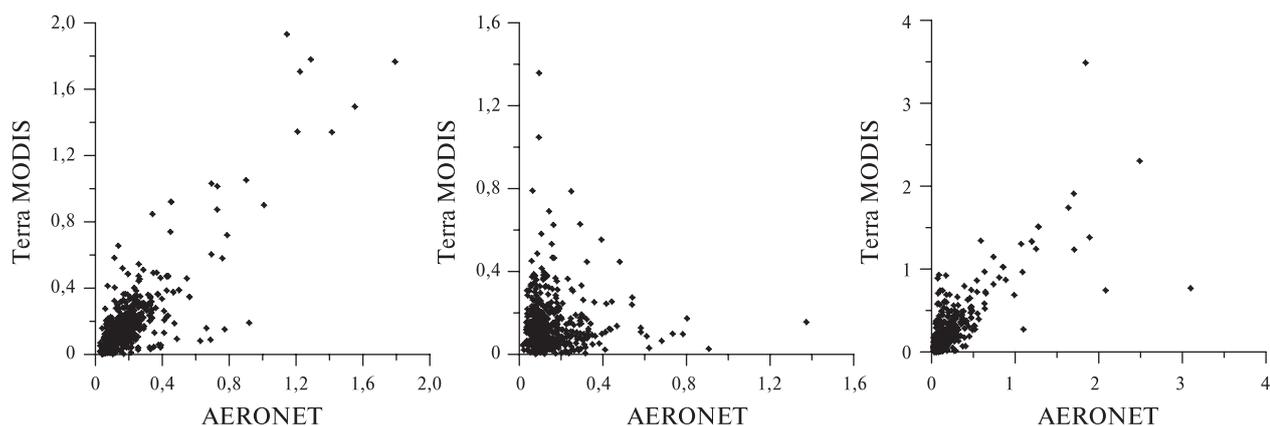


Рис. 2. Примеры сопоставления данных сети AERONET и спутника Terra (MODIS) для станций Екатеринбург, Иркутск, Якутск: *a* — Екатеринбург: $R^2 = 0,67$, $y = 0,97x \pm 0,02$ (среднеквадратическая ошибка); *б* — Иркутск: $R^2 = 0,47$, $y = (-0,048x + 0,15) \pm 0,02$; *в* — Якутск: $R^2 = 0,61$, $y = (0,83x + 0,04) \pm 0,03$

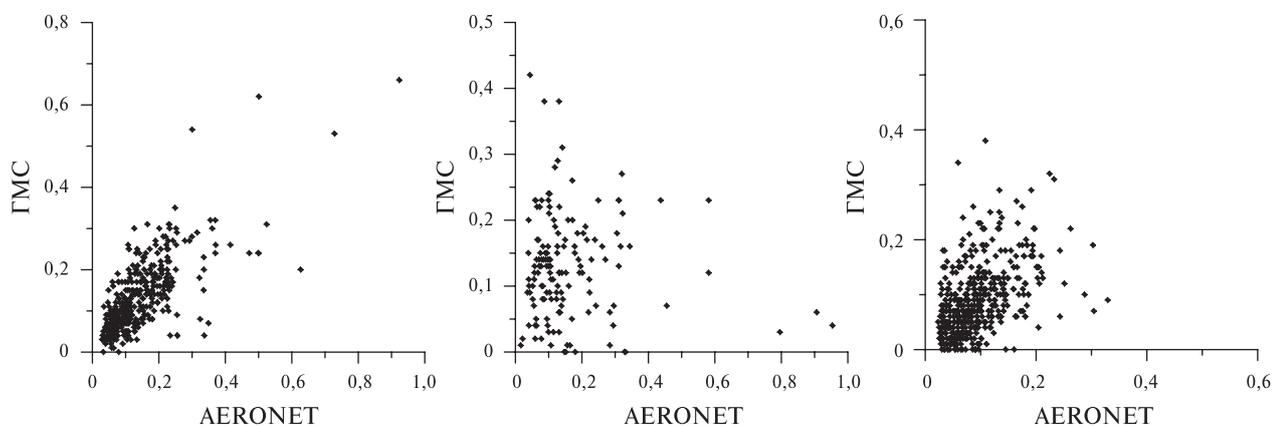


Рис. 3. Примеры сопоставления АОТ данных сети AERONET и данных Российской актинометрической сети для станций Екатеринбург, Иркутск, Якутск: *a* — Екатеринбург: $R^2 = 0,52$, $y = (0,63x + 0,04) \pm 0,004$ (среднеквадратическая ошибка); *б* — Иркутск: $R^2 = 0,20$, $y = (-0,04x + 0,13) \pm 0,006$; *в* — Якутск: $R^2 = 0,22$, $y = (0,58x + 0,03) \pm 0,003$

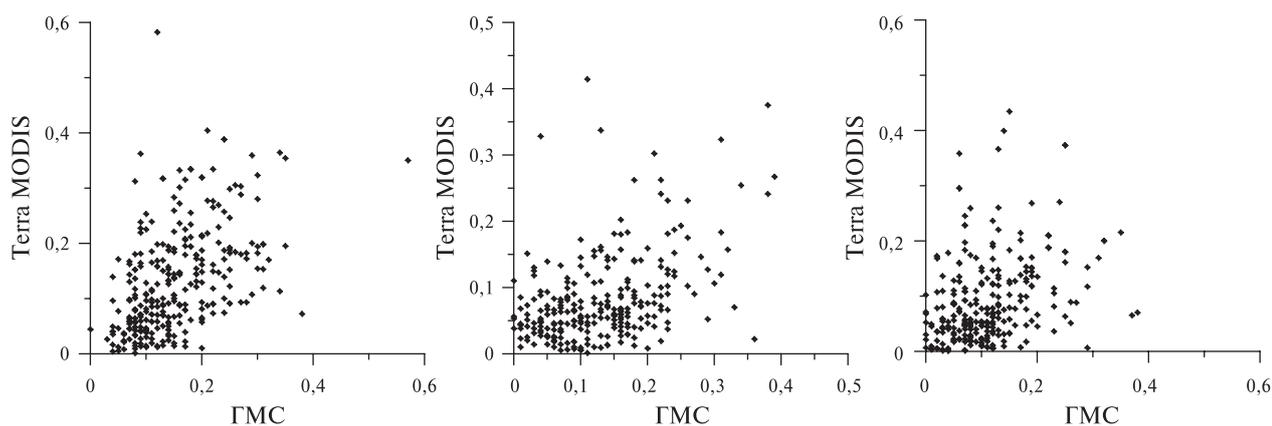


Рис. 4. Примеры сопоставления спутниковых данных MODIS и данных Российской актинометрической сети (АОТ ГМС) для станций Екатеринбург, Иркутск, Якутск: *a* — Екатеринбург: $R^2 = 0,31$, $y = (0,6x + 0,04) \pm 0,007$ (среднеквадратическая ошибка); *б* — Иркутск: $R^2 = 0,18$, $y = (0,36x + 0,03) \pm 0,004$; *в* — Якутск: $R^2 = 0,12$, $y = (0,37x + 0,05) \pm 0,005$

Таблица 1. Характеристики синхронных рядов АОТ спутниковых и наземных систем наблюдений

Пункт наблюдений	АОТ _{ГМС}				АОТ _{MODIS}				N
	среднее	медиана	макс.	ст. откл.	среднее	медиана	макс.	ст. откл.	
Умба	0,08	0,07	0,29	0,05	0,14	0,10	2,41	0,16	886
Краснодар	0,20	0,17	0,69	0,1	0,19	0,16	1,86	0,14	2200
Сочи	0,17	0,15	0,77	0,13	0,18	0,15	1,88	0,14	2110
Каменная степь	0,13	0,10	0,58	0,11	0,18	0,14	2,25	0,17	1389
Гигант	0,15	0,14	0,84	0,1	0,18	0,15	1,24	0,14	1837
Цимлянск	0,14	0,11	0,60	0,11	0,18	0,14	1,27	0,15	1082
Бугрино	0,11	0,10	0,37	0,07	0,15	0,12	1,07	0,12	833
Нолинск	0,11	0,09	0,53	0,09	0,19	0,14	3,17	0,23	922
Верхнее Дуброво	0,12	0,10	0,56	0,08	0,20	0,15	3,18	0,22	1092
Иркутск	0,13	0,13	0,39	0,08	0,08	0,07	0,41	0,07	256
Якутск	0,11	0,10	0,38	0,07	0,09	0,07	0,43	0,08	275
Уссурийск	0,23	0,20	1,23	0,19	0,26	0,19	1,00	0,19	326

Таблица 2. Характеристики синхронных рядов АОТ спутниковых и наземных (AERONET) систем наблюдений

Пункт наблюдений	АОТ _{AERONET}				АОТ _{MODIS}				N
	среднее	медиана	макс.	ст. откл.	среднее	медиана	макс.	ст. откл.	
Якутск	0,16	0,10	3,10	0,25	0,18	0,11	3,49	0,26	835
Иркутск	0,16	0,12	1,26	0,15	0,14	0,11	1,36	0,14	520
Екатеринбург	0,20	0,16	1,79	0,19	0,19	0,15	1,93	0,22	835
Уссурийск	0,27	0,22	2,45	0,19	0,23	0,17	1,53	0,19	847

Таблица 3. Характеристики синхронных рядов АОТ наземных (AERONET) и наземных (ГМС) систем наблюдений

Пункт наблюдений	АОТ _{AERONET}				АОТ _{ГМС}				N
	среднее	медиана	макс.	ст. откл.	среднее	медиана	макс.	ст. откл.	
Якутск	0,09	0,08	0,33	0,05	0,09	0,07	0,38	0,06	478
Иркутск	0,13	0,09	0,74	0,11	0,13	0,11	0,56	0,09	195
Екатеринбург/ Дуброво	0,14	0,11	0,92	0,10	0,13	0,11	0,66	0,09	392
Уссурийск	0,17	0,15	1,35	0,11	0,19	0,17	1,00	0,12	427

Дальний Восток — регион РФ с повышенной аэрозольной замутнённостью атмосферы

В последние годы появилась серия работ (Сакерин и др., 2011, 2012), в которых рассматривается временная изменчивость АОТ в различных регионах России (от Дальнего Востока до Поволжья) по данным спутниковых (MODIS) и наземных (AERONET) наблюдений за 10-летний период. Среди этих результатов обращают на себя внимание данные станции Уссурийск (Приморье), для которой в 2006, 2008 и 2009 гг. зафиксированы экстремально высокие значения АОТ. Известно также, что характерные и разнообразные условия прозрачности

атмосферы на российском Дальнем Востоке формируются под влиянием воздушных потоков, поступающих со стороны океана и континентальных воздушных выносов, в частности с территории Китая. Российское Приморье — регион, уникальный по разнообразию атмосферного аэрозоля, многообразию источников и высокой изменчивости его количества: выносы минерального (пустыни северо-западного Китая) и антропогенного (северо-восточный Китай) аэрозоля, развитая муссонно-бризовая циркуляция и соседство с областями с различными типами подстилающей поверхности и разной антропогенной нагрузкой (океан, пустыня и промышленно развитые регионы Китая, Кореи и Японии).

В настоящей работе проведён совместный анализ данных спутниковых и наземных наблюдений АОТ на $\lambda = 0,55$ мкм над Дальневосточной частью территории России (40–55° с. ш., 130–145° в. д.) в период 2008–2015 гг. Объектом исследования стали наземные данные, полученные на станции Уссурийск (AERONET) и девяти актинометрических станциях Росгидромета (ГМС), а также данные, полученные со спутников Terra и Aqua аппаратурой MODIS.

Синхронизированные данные получены преимущественно для тёплого сезона (в период с марта-апреля до сентября-октября) и практически отсутствуют в зимние месяцы. Сопоставление данных разных типов для дневных значений АОТ представлено в *табл. 4*. Предварительно была произведена «ручная» выбраковка значений АОТ, отброшены ситуации, когда АОТ различаются более чем в три раза с учётом тенденций изменения АОТ во времени.

Таблица 4. Обобщённые данные о дневных значениях АОТ в период 2008–2015 гг., полученных по данным различных наблюдательных систем (AERONET, MODIS и ГМС) для района Уссурийска

Станция, источник данных АОТ	АОТ (средние за период 2008–2015 гг.)				
	среднее	макс.	σ	Число дней, уравнение регрессии	
1	2	3	4	5	
Уссурийск, MODIS	0,26	1,53	0,18	442, $y = 0,82x + 0,04$, $R^2 = 0,71$	1
Уссурийск, AERONET	0,28	1,25	0,19		
Уссурийск, MODIS	0,26	1,08	0,17	221, $y = 0,88x + 0,03$, $R^2 = 0,69$	2
Сад-Город, ГМС	0,26	0,92	0,16		
Уссурийск, AERONET	0,22	1,05	0,15	376, $y = 1,00x + 0,02$, $R^2 = 0,82$	3
Сад-Город, ГМС	0,22	1,00	0,14		

Примечание: в 5-м столбце таблицы 1) y — данные MODIS, x — данные AERONET; 2) y — данные MODIS, x — данные актинометрии; 3) y — данные AERONET; x — данные ГМС.

Как видно из *табл. 4*, предварительное фильтрование данных (отсеяно 25–30% количества синхронизированных наблюдений) существенно улучшает сходимость рядов и делает более надёжной валидацию спутниковых данных по наземным величинам (в среднем). Причинами расхождений, как уже указано выше, являются различия в процедурах исключения «облачных» воздействий, асинхронность измерений, пространственное осреднение и пр. При увеличении периода осреднения сходимость данных существенно повышается.

Заключение

Проблема исследования изменчивости АОТ в различных регионах России по данным спутниковых (MODIS) и наземных (AERONET, ГМС) наблюдений за последнее десятилетие актуальна и представляет большой интерес. Для проведения сравнения значений АОТ атмосферы, получаемых независимыми системами, выполнено извлечение данных MODIS и AERONET,

а также оценено АОТ по наземным актинометрическим наблюдениям в разных регионах по всей территории РФ. Был сформирован объединённый архив синхронизированных дневных значений АОТ попарно по трём видам наблюдений. Данные системы AERONET наиболее однородны. Лучший результат можно было бы получить при анализе второго уровня, однако он существует только для определённого набора станций. Самые неоднородные ряды наблюдений получены с помощью аппаратуры MODIS/Terra. Проведённый регрессионный анализ показывает, что наблюдения MODIS, как правило, переоценивают АОТ, при этом средние значения AOT_{MODIS} близки или даже чуть ниже, чем АОТ для AERONET и ГМС.

По результатам анализа попарно синхронизированных рядов дневных значений АОТ в разных регионах РФ выявлен существенный разброс значений относительно средних по всему интервалу наблюдения. В то же время средние величины АОТ за несколько лет и при длине ряда в несколько сот точек наземных систем наблюдений (AERONET и ГМС) и спутниковых данных (MODIS) близки как по величине средних значений, так и по диапазону вариаций (стандартное отклонение от среднего для синхронных рядов). Отметим, что именно осреднения в несколько и более лет нужны для параметрических и валидационных анализов в региональных климатических исследованиях.

Расхождение наземных данных $AOT_{ГМС}$ и $AOT_{AERONET}$ и спутниковых AOT_{MODIS} вызваны различными способами пространственного осреднения (наземные — в точке, спутниковые — в домене $1 \times 1^\circ$), а также влиянием метеорологических факторов, в частности адвекцией замутнённых воздушных масс с характерным временем существования около суток, температурной стратификации и невидимых тонких облаков верхнего яруса. Но предваряющая сравнения фильтрация (отбраковка) данных обеспечивает вполне приемлемое соотношение статистических параметров рядов и их относительную изменчивость.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-05-05803 «Исследование согласованности данных наземного и спутникового мониторинга прозрачности, аэрозольной оптической толщины атмосферы на территории России») и РНФ (проект № 16-17-10275 «Исследование аэрозольного загрязнения в Москве»).

Литература

1. *Абакумова Г. М., Евневич Т. В., Никольская Н. П.* Влияние города на прозрачность атмосферы. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. 94 с.
2. *Махоткина Е. Л., Лукин А. Б., Плахина И. Н., Панкратова Н. В.* Анализ годового хода и межгодовой изменчивости аэрозольной оптической толщины атмосферы над территорией России // Исследование Земли из космоса. 2006. № 5. С. 63–71.
3. *Плахина И. Н., Махоткина Е. Л., Панкратова Н. В.* Вариации аэрозольной оптической толщины атмосферы на территории России в последние 30 лет: сезонные изменения и многолетний ход // Метеорология и гидрология. 2007. № 2. С. 19–29.
4. *Плахина И. Н., Махоткина Е. Л., Панкратова Н. В.* Вариации аэрозоля в толще атмосферы по данным российской актинометрической сети (1976–2006 гг.) // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 4. С. 489–500.
5. *Плахина И. Н., Панкратова Н. В., Махоткина Е. Л.* Пространственные вариации фактора мутности атмосферы над Европейской территорией России в условиях аномального лета 2010 г. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 6. С. 1–6.
6. *Сакерин С. М., Андреев С. Ю., Бедарёва Т. В., Кабанов Д. М., Корниенко Г. И., Holben V., Смирнов А.* Аэрозольная оптическая толща атмосферы в дальневосточном Приморье по данным спутниковых и наземных наблюдений // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 8. С. 654–660.
7. *Сакерин С. М., Андреев С. Ю., Бедарёва Т. В., Кабанов Д. М.* Особенности пространственного распределения аэрозольной оптической толщи атмосферы в азиатской части России // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 6. С. 484–490.
8. *Ситнов С. А.* (2011a) Пространственно-временная изменчивость оптической толщи аэрозоля над центральной частью европейской территории России по данным спутниковых приборов MODIS // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 5. С. 634–652.

9. Ситнов С. А. (2011б) Анализ спутниковых наблюдений аэрозольных оптических характеристик и газовых примесей атмосферы над центральным районом Российской Федерации в период аномально высоких летних температур и массовых пожаров 2010 г. // *Оптика атмосферы и океана*. 2011. Т. 24. № 7. С. 572–581.
10. Тарасова Т. А., Ярхо Е. В. Определение аэрозольной оптической толщины атмосферы по измерениям прямой интегральной радиации // *Метеорология и гидрология*. 1991. № 12. С. 66–71.
11. Boucher O., Randall D., Artaxo P., Bretherton C., Feingold G., Forster P., Kerminen V.-M., Kondo Y., Liao H., Lohmann U., Rasch P., Satheesh S. K., Sherwood S., Stevens B., Zhang X. Y. Clouds and Aerosols // *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / eds. T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley. Ch. 7. Cambridge, United Kingdom, N. Y., USA: Cambridge University Press, 2013. P. 571–658. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.016.
12. Dubovik O., King M. D. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // *J. Geophysical Research*. 2000. V. 105. No. D16. P. 20673–20696.
13. Dubovik O., Smirnov A., Holben B. N., King M. D., Kaufman Y. J., Eck T. F., Slutsker I. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements // *J. Geophysical Research*. 2000. V. 105. No. D8. P. 9791–9806.
14. Dubovik O., Holben B. N., Eck T. F., Smirnov A., Kaufman Y. J., King M. D., Tanre D., Slutsker I. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide location // *J. Atmospheric Sciences*. 2002. V. 59. P. 590–608.
15. Eck T. F., Holben B. N., Reid J. S., Dubovik O., Smirnov A., O'Neill N. T., Slutsker I., Kinne S. Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosol // *J. Geophysical Research*. 1999. V. 104. P. 31333–31349.
16. Remer L., Tanre D., Kaufman Y., Levy R., Mattoo S. Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS: Collections 005 and 051: Revision 2. 2009. MODIS ATBD.

Comparison of ground and satellite monitoring of aerosol optical thickness of the atmosphere in Russia

I. N. Plakhina^{1,2}, N. V. Pankratova¹, E. L. Makhotkina²

¹ A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow 119017, Russia
E-mail: inna@ifaran.ru

² Main Geophysical Observatory, St. Petersburg 194021, Russia
E-mail: makhotk@mail.ru

Aerosol measurements are carried out around the world in order to determine their impact on the Earth's radiation balance, on regional and global climate changes. Aerosols are small solid particles or droplets of liquid suspended in air, the diameter of which varies from a few nanometers to several tens of micrometers. They vary in size, shape, composition and lifetime in the atmosphere. There are different approaches to measuring aerosols, for example, ground or satellite observations. In this study, we combine the satellite measurements obtained with the Moderate Resolution Imaging SpectroRadiometer (MODIS), the ground-based observations of the Russian actinometric network and the data from the stations of the world aerosolized aerosol network (AERONET) to compare the aerosol optical depth (AOD) at 550 nm. Studies were conducted for the territory of Russia as a whole, as well as for individual regions: the European territory of Russia, the Far East, the Baikal region. Based on the results of the analysis of synchronized series of daily AOD values, a significant range of data is revealed, while the average multi-year AOD values for the three observing methods are close in both magnitude and range of variations.

Keywords: aerosol optical depth, actinometric network of Russia, AERONET, MODIS

Accepted: 31.12.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-225-234

References

1. Abakumova G. M., Evnevich T. V., Nikolskaya N. P., *Vliyaniye goroda na prozrachnost atmosfery* (Influence of the city on the transparency of the atmosphere), Moscow: Izd. Moscow University, 1983, 94 p.
2. Makhotkina E. L., Lukin A. B., Plakhina I. N., Pankratova N. V., Analiz godovogo khoda i mezhgodovoy izmenchivosti aerazol'noy opticheskoy tolshchiny atmosfery nad territoriyey Rossii (Analysis of the annual course and interannual variability of the aerosol optical thickness of the atmosphere over the territory of Russia), *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 5, pp. 63–71.
3. Plakhina I. N., Makhotkina E. L., Pankratova N. V., Variatsii aerazol'noy opticheskoy tolshchiny atmosfery na territorii Rossii v posledniye 30 let: sezonnyye izmeneniya i mnogoletniy khod (Variations in the aerosol optical thickness of the atmosphere on the territory of Russia in the last 30 years: seasonal changes and long-term course), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2007, No. 2, pp. 19–29.
4. Plakhina I. N., Makhotkina E. L., Pankratova N. V., Variatsii aerazolya v tolshche atmosfery po dannym rossiyskoy aktinometricheskoy seti (1976–2006 gg.) (Variations of the aerosol in the atmosphere thickness according to the data of the Russian actinometric network (1976–2006)), *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2009, Vol. 45, No. 4, pp. 489–500.
5. Plakhina I. N., Pankratova N. V., Makhotkina E. L., Prostranstvennyye variatsii faktora mutnosti atmosfery nad Yevropeyskoy territoriyey Rossii v usloviyakh anomal'nogo leta 2010 g. (Spatial variations in the air turbidity factor above the European part of Russia under conditions of abnormal summer of 2010), *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2011, Vol. 47, No. 6, pp. 1–6.
6. Sakerin S. M., Andreev S. Yu., Bedarova T. V., Kabanov D. M., Kornienko G. I., Holben B., Smirnov A., Aerazol'naya opticheskaya tolshcha atmosfery v dal'nevostochnom Primor'ye po dannym sputnikovykh i nazemnykh nablyudeniy (Aerosol optical thickness of the atmosphere in the Far Eastern Primorye based on satellite and ground-based observations), *Optika atmosfery i okeana*, 2011, Vol. 24, No. 8, pp. 654–660.
7. Sakerin S. M., Andreev S. Yu., Bedarova T. V., Kabanov D. M., Osobennosti prostranstvennogo raspredeleniya aerazol'noy opticheskoy tolshchi atmosfery v aziatskoy chasti Rossii (Peculiarities of the spatial distribution of the aerosol optical thickness of the atmosphere in the Asian part of Russia), *Optika atmosfery i okeana*, 2012, Vol. 25, No. 6, pp. 484–490.
8. Sitnov S. A., (2011a) Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' opticheskoy tolshchi aerazolya nad tsentral'noy chast'yu yevropeyskoy territorii Rossii po dannym sputnikovykh priborov MODIS (Spatial-temporal variability of the aerosol optical stratum over the central part of the European territory of Russia according to the data of MODIS satellite instruments), *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*, 2011, Vol. 47, No. 5, pp. 634–652.
9. Sitnov S. A., (2011b) Analiz sputnikovykh nablyudeniy aerazol'nykh opticheskikh kharakteristik i gazovykh primesey atmosfery nad tsentral'nym rayonom Rossiyskoy Federatsii v period anomal'no vysokikh letnikh temperatur i massovykh pozharov 2010 g. (Analysis of satellite observations of aerosol optical characteristics and atmospheric gas admixtures over the central region of the Russian Federation in the period of anomalously high summer temperatures and mass fires in 2010), *Optika atmosfery i okeana*, 2011, Vol. 24, No. 7, pp. 572–581.
10. Tarasova T. A., Yarkho E. V., Opredeleniye aerazol'noy opticheskoy tolshchiny atmosfery po izmereniyam pryamoy integral'noy radiatsii (Determination of the aerosol optical thickness of the atmosphere from measurements of direct integrated radiation), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1991, No. 12, pp. 66–71.
11. Boucher O., Randall D., Artaxo P., Bretherton C., Feingold G., Forster P., Kerminen V.-M., Kondo Y., Liao H., Lohmann U., Rasch P., Satheesh S. K., Sherwood S., Stevens B., Zhang X. Y., Clouds and Aerosols, In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P. M. Midgley (eds.), Ch. 7, Cambridge, United Kingdom, New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2013, pp. 571–658, DOI: 10.1017/CBO9781107415324.016.
12. Dubovik O., King M. D., A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements, *J. Geophys. Res.*, 2000, Vol. 105, No. D16, pp. 20673–20696.
13. Dubovik O., Smirnov A., Holben B. N., King M. D., Kaufman Y. J., Eck T. F., Slutsker I., Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements, *J. Geophys. Res.*, 2000, Vol. 105, No. D8, pp. 9791–9806.
14. Dubovik O., Holben B. N., Eck T. F., Smirnov A., Kaufman Y. J., King M. D., Tanre D., Slutsker I., Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations, *J. Atmos. Sci.*, 2002, Vol. 59, pp. 590–608.

15. Eck T. F., Holben B. N., Reid J. S., Dubovik O., Smirnov A., O'Neill N. T., Slutsker I., Kinne S., Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosol, *J. Geophys. Res.*, 1999, Vol. 104, pp. 31333–31349.
16. Remer L., Tanre D., Kaufman Y., Levy R., Mattoo S., *Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS: Collections 005 and 051: Revision 2*, 2009, MODIS ATBD.