Пространственная изменчивость аэрозольной оптической толщины на территории Московского региона по спутниковым и наземным данным

Е. Ю. Жданова, Н. Е. Чубарова

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова Москва, 119991, Россия E-mail: ekaterinazhdanova214@gmail.com

Проведено исследование восстановлений аэрозольной оптической толщины (АОТ) по данным современного спутникового радиометра VIIRS для городской территории Москвы. Радиометр VIIRS является прибором последнего поколения, установленным на борту полярно-орбитального спутника Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi NPP). Показано, что в центре города наблюдаются повышенные значения АОТ по спутниковым восстановлениям, однако достоверность определения разности значений АОТ между пригородом и центром города не является высокой в связи с тем, что точность восстановления АОТ существенно зависит от использованных оценок отражательных свойств подстилающей поверхности. Выявлено, что в алгоритме восстановления АОТ VIIRS существуют дополнительные неопределённости, связанные с выбором аэрозольной модели для Московского региона. Предложено корректировать данные AOT по данным VIIRS для территории Московского региона по значениям наземных измерений солнечного фотометра CIMEL на станции Метеорологической обсерватории МГУ AERONET. По полученным скорректированным значениям АОТ рассчитано пространственное распределение УФ-радиации за счёт ослабления аэрозолем на территории Московского региона. Вариации УФ-индексов за счёт неоднородности распределения аэрозоля для рассмотренного случая превосходят 15 % и составляют величину 1 УФ-индекс.

Ключевые слова: аэрозоль, аэрозольная оптическая толщина, Москва, спутниковые измерения, VIIRS, MODIS

Одобрена к печати: 15.10.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-236-248

Введение

Атмосферный аэрозоль оказывает заметное влияние на поступление солнечной радиации, а также на здоровье человека. Для оценки ослабления солнечной радиации аэрозолем широко применяется такой параметр, как аэрозольная оптическая толщина (AOT), которая является интегралом по высоте коэффициента аэрозольного ослабления излучения. Для определения аэрозольных свойств атмосферы применяются спутниковые и наземные измерения. Эталонными — наиболее точными, используемыми для валидации методов восстановления аэрозольных свойств атмосферы по спутниковым приборам, — являются наземные измерения АОТ солнечными фотометрами CIMEL, установленными в рамках глобальной сети AERONET (Holben et al., 1998).

Восстановления аэрозольной оптической толщины по спутниковым измерениям основаны на измерениях отражённой солнечной радиации на верхней границе атмосферы, а также применении заранее определённых микрофизических и оптических моделей аэрозоля и расчётов модели радиационного переноса. Восстановления аэрозольной оптической толщины осуществлялись по данным большого числа спутниковых приборов AVHRR, MODIS, MISR, MTI, ATSR, TOMS, OMI, GOME, SCIAMACHY, POLDER, SeaWIFS (Mishchenko et al., 2007). Спутниковые данные обладают важным свойством большого пространственного охвата, а современные спутниковые измерения имеют также достаточно высокое пространственное разрешение. В 2011 г. был запущен полярно-орбитальный спутник нового поколения Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi NPP), оснащённый сканирующим видимым и инфракрасным радиометром VIIRS (Jackson et al., 2013). Данные радиометра VIIRS в будущем продолжат многолетние восстановления АОТ по данным спектрорадиометра MODIS. Радиометр VIIRS имеет достаточно большую полосу обзора (около 3000 км). Размер пикселей VIIRS для каналов среднего разрешения составляет $0,742 \times 0,776$ км в надире и $1,6 \times 1,58$ км на краю полосы (Jackson et al., 2013).

Кроме того, поскольку аэрозольные частицы оказывают значительное влияние на качество приземного воздуха, то во многих городах Земного шара организованы наземные регулярные наблюдения за приземной концентрацией частиц с диаметром меньше 2,5 и 10 мкм (PM2,5 и PM10). Для пространственно-временного распределения PM2,5 и PM10 характерна высокая изменчивость в связи с более высокой чувствительностью этих характеристик к приземным эмиссиям по сравнению с AOT, определяемой для всего атмосферного столба. Большое число исследований посвящено анализу связи между аэрозольной оптической толщиной и концентрацией частиц PM2,5 и PM10. Связи между концентрациями PM и AOT определяются распределением размеров аэрозольных частиц, относительной влажностью, типом аэрозоля, вертикальной структурой коэффициента аэрозольного ослабления (van Donkelaar et al., 2011). Изменчивость PM2,5 совместно с AOT в условиях Москвы изучалась в работе (Губанова и др., 2017). Было выявлено, что в тёплый период года (с апреля по август) при активном конвективном перемешивании связь между AOT и PM2,5 тесная и статистически значимая.

Основная задача исследования состоит в выявлении возможностей использования спутниковых данных для оценки пространственно-временного распределения аэрозоля в Московском регионе с целью последующей оценки эффектов неоднородного распределения аэрозоля на УФ-радиацию.

Использованные материалы

Для определения пространственного распределения аэрозольной оптической толщины на территории Московского региона использовались современные данные спутникового радиометра VIIRS, установленного на полярно-орбитальном спутнике Suomi NPP. Радиометр VIIRS является сканирующим сенсором, измеряющим отражённое и испускаемое излучение Земли и атмосферы в 22 спектральных каналах на длинах волн от 412 до 12 050 нм (Jackson et al., 2013). Восстановление аэрозольной оптической толщины осуществляется для каждого пиксела с разрешением 750 м. Официальными данными уровня 2 является набор данных EDR (environmental data record). Данные уровня 2 содержат восстановления аэрозольной оптической толщины, параметра Ангстрема, который качественно характеризует распределение частиц по размерам, и концентрацию взвешенных в воздухе веществ. Наборы данных EDR имеют пространственное разрешение 6 км в надире и представляют собой ячейку, включающую 8×8 пикселей. Аэрозольная оптическая толщина напрямую восстанавливается на длине волны 550 нм (АОТ550), используя ожидаемое (эмпирически определённое) отношение между отражательной способностью поверхности в синем (488 нм) и красном (672 нм) каналах. Отражательные способности в других каналах используются для выбора подходящей аэрозольной модели. Алгоритм восстановления АОТ над сушей использует пять аэрозольных микрофизических моделей: пыль, сильно поглощающий смог, слабо поглощающий смог, аэрозоль в чистых городских условиях, аэрозоль в загрязнённых городских условиях. АОТ на длинах волн 412, 445, 488, 555, 672, 746, 865, 1240, 1610, 2250 нм рассчитывается с помощью нормализованных коэффициентов ослабления для выбранной аэрозольной модели. Данные уровня 2 снабжены флагами качества. Алгоритм восстановления АОТ имеет ряд ограничений: АОТ не восстанавливается над водной поверхностью, над высоко отражающей поверхностью, в условиях облачности и др.

Глобальная оценка спутниковых восстановлений AOT550 VIIRS по данным сетей AERONET и MAN показала, что средняя ошибка составляет 0,01 над океанами и -0,01 над сушей; 64 и 71 % восстановлений AOT550 попадает в диапазон погрешностей, установленных MODIS: $\pm(0,03 + 0,05AOT)$ и $\pm(0,05 + 0,15AOT)$ над океаном и сушей соответственно. Однако между данными AOT550 VIIRS и MODIS существуют значительные региональные различия, что связано, главным образом, с различиями алгоритмов восстановления AOT. Согласно оценкам качества восстановления AOT, VIIRS над сушей завышает AOT над растительностью и недооценивает над поверхностью с преобладанием почвы (Liu et al., 2014).

В работе использовались восстановления АОТ из набора EDR на длине волны 550 нм для территории Московского региона за тёплый период (май – сентябрь) 2014—2017 гг. Были отобраны только те данные, которые имели самый высокий флаг качества, т.е. наиболее надёжные восстановления АОТ в уверенно безоблачных условиях.

В качестве наиболее точных оценок аэрозольной оптической толщины на длине волны 500 нм использовались наземные данные фотометра CIMEL на двух станциях AERONET: Метеорологической обсерватории МГУ (МО МГУ) (55,707 с.ш., 37,522 в.д.) и станции Звенигород (55,695 с.ш., 36,775 в.д.). Для сопоставления спутниковых восстановлений АОТ с наземными АОТ данные фотометров CIMEL версии 3 уровня 2 пересчитывалась на длину волны 550 нм с учётом волнового показателя Ангстрема. Кроме того, АОТ, полученные по наземным измерениям, дополнительно были проконтролированы на наличие облачности по данным визуальных наблюдений в МО МГУ. Новая версия 3 данных фотометров CIMEL существенно отличается от версии 2. Подробное описание различий версий и их оценок для станции МО МГУ представлено в сборнике «Эколого-климатические характеристики атмосферы в 2016 г. по данным метеорологической обсерватории МГУ имени М. В. Ломоносова», М.: МАКС Пресс, 2017. Полученная разница между архивом версии 2 с применением облачной фильтрации версии 3 составляет для среднегодовых значений АОТ500 –0,01, а для годовых медианных значений — 0,02 (Хлестова, Чубарова, 2017).

Кроме того, дополнительно для оценки пространственного распределения аэрозоля использовались восстановления AOT550 спутникового радиометра MODIS (TERRA, AQUA) коллекции C006 MOD04_3K и MYD04_3K с разрешением 3 км, обозначенные самым высоким флагом качества (QF = 3) (Remer et al., 2013).

Дополнительно для характеристики пространственной неоднородности аэрозоля использовались данные измерений концентрации взвешенных частиц у поверхности Земли сети Мосэкомониторинга (PM10).

Результаты

Для оценки качества спутниковых восстановлений АОТ в первую очередь были проведены сравнения АОТ, определённой по спутниковым данным, с наблюдениями фотометра CIMEL на двух станциях Московского региона. Сравнение спутниковых и наземных измерений проведено согласно рекомендованной методике (Petrenko et al., 2012): были выбраны спутниковые данные, расположенные в радиусе примерно 27,5 км вокруг станций AERONET (данный радиус позволяет создать оптимальную выборку наблюдений), и с минимальной разницей по времени измерений (от нескольких минут до 15 мин в отдельных случаях). Временной ход выбранных значений АОТ550 по спутниковым и наземным наблюдениям для станции МО МГУ представлен на *рис. 1* (см. с. 239).

Высокие значения АОТ550 в полученной выборке в ясных условиях по наземным данным отмечались 15 июля (0,35; 0,45) и 30 июля (0,38) 2016 г. Кроме того, отметим, что высокие значения АОТ550 в связи с распространением дыма от сибирских лесных пожаров наблюдались 24 июля 2016 г. (АОТ550 = 1,06). Однако измерения в этот день были исключены из выборки из-за наличия облаков на диске Солнца и связанного с этим дополнительного ослабления прямого излучения.



Рис. 1. Временной ход АОТ на длине волны 550 нм по спутниковым и наземным данным для станции МО МГУ



Рис. 2. АОТ550 по спутниковым (VIIRS) и наземным данным: *а* — для станции Звенигород; *б* — для станции МО МГУ. Серым цветом показана линия 1:1, красным — линейная регрессия, чёрным — границы погрешностей ±(0,05 + 0,15AOT). МАЕ — абсолютная ошибка; RMSE — среднеквадратическая ошибка; RMB — отношение средних значений АОТ_{VIIRS} и АОТ_{AERONET}

Результаты сравнений спутниковых восстановлений АОТ550 и наземных данных для МО МГУ и Звенигорода представлены на *puc. 2* (см. с. 239). Видно, что для станции Звенигород, расположенной вне городской зоны, наблюдается лучшее согласие между наземными и спутниковыми данными. Для станции МО МГУ, находящейся в городской черте, спутниковые данные АОТ550 оказываются в среднем завышенными на 0,06 по данным полученной выборки. Для станции Звенигород 93 % спутниковых восстановлений АОТ550 VIIIRS находится в диапазоне погрешностей $\pm(0,05 + 0,15$ АОТ), для станции МО МГУ — 68 %.

Дополнительно рассмотрим данные MODIS для станции MO MГУ в утренние часы отдельно для спутника TERRA и AQUA (*puc. 3*). Отметим, что восстановления AOT550 лучше согласуются с наземными данными, однако для данных, полученных со спутника TERRA, характерно завышение AOT550 в городских условиях, но меньшее, чем для VIIRS (RMB = 1,18 по сравнению с 1,39 для VIIRS). Переоценка AOT550 в городских условиях по данным MODIS исследована в работе (Munchak et al., 2013).

Распределение разностей между спутниковыми (VIIRS) и наземными измерениями AOT550 представлено на *рис. 4.* Для станции Звенигород в 50 % случаев разность спутниковых наземных и измерений AOT550 составляет -0.02...0.02; около 30 % приходится на разность -0.05...0.02. Для станции МО МГУ разность наземных и спутниковых измерений сдвинута в сторону положительных значений: около 60 % значений разностей приходится на диапазон 0.02-0.15.



Рис. 3. АОТ550 для станции МО МГУ по спутниковым (MODIS) и наземным данным. Серым цветом показана линия 1:1, красным и синим — линейная регрессия, чёрным — границы погрешностей ±(0,05 + 0,15AOT). МАЕ — абсолютная ошибка; RMSE — среднеквадратическая ошибка; RMB — отношение средних значений АОТ_{VIIRS} и АОТ_{AERONET}





Наиболее вероятной причиной завышения АОТ по спутниковым данным на территории города является ошибка в определении отражательных свойств подстилающей поверхности, поскольку городская поверхность является более яркой по сравнению со средним глобально определённым значением отражательной способности поверхности (Jackson et al., 2013). Тенденции к завышению АОТ по данным MODIS в районах с высокой отражательной способностью, в частности в городских районах Пакистана, отмечены в работе (Gupta et al., 2013). В среднем по восстановлениям АОТ550 MODIS среднего разрешения (1 град) было получено, что для Московского региона разность между городом и пригородом составляет +0,03, что согласуется с данными измерений AERONET в МО МГУ и Звенигороде (Δ AOT550 = +0,02) (Chubarova et al., 2011).

В качестве иллюстрации рассмотрим отражательную способность на верхней границе атмосферы по данным VIIRS в дни с низкими рассчитанными и наблюдёнными AOT (*puc. 5*). Хорошо выделяется область с низкой отражательной способностью в районе национального парка Лосиный остров и область более высокой отражательной способности в центре города. Таким образом, следует ожидать, что использование в алгоритме восстановления AOT постоянных значений отражательной способности поверхности приведёт к переоценке AOT в центральных районах города. Для улучшения качества восстановления AOT по спутниковым данным, в частности, применимы методики нахождения минимальной отражательной способности поверхности (Wong et al., 2010).



Рис. 5. Отражательная способность на верхней границе атмосферы в синем (М3) и красном (М5) каналах по данным VIIRS



Рис. 6. Повторяемость выбранной аэрозольной модели VIIRS за тёплый период 2014–2017 гг. для территории Москвы (15 км от центра города)



Рис. 7. Разность между AOT550 VIIRS и AERONET в зависимости от выбранной аэрозольной модели в мае 2014 г. Оранжевой линией показана доля мелкодисперсного аэрозоля. Чёрная линия — AOT 550 по данным МО МГУ. Цветные столбцы показаны без накопления

Кроме неопределённостей, связанных с ошибками в определении отражательных свойств подстилающей поверхности, ошибки в определении АОТ по спутниковым данным могут быть связаны с выбором аэрозольной модели. Оценки погрешностей за счёт выбора аэрозольной модели путём сопоставления с данными сети AERONET представлены в работе (Wang et al., 2017). Получено, что за период измерений с 23 января 2013 г. по 28 февраля 2017 г. в Восточной Европе и на Европейской территории России наиболее часто выбираемая алгоритмом VIIRS аэрозольной модели за тёплый период 2014–2017 гг. на территории в радиусе 15 км от центра Москвы отличается от указанной выше (*puc. 6*).

Наибольшая повторяемость за тёплый период 2014—2017 гг. выбранной VIIRS аэрозольной модели для центральных районов Москвы приходится на пылевой аэрозоль, которые характеризуется такими свойствами, как преобладание частиц крупного размера и слабое поглощение в видимом диапазоне спектра (Dubovik et al., 2002). На *рис.* 7 представлены разности АОТ 550 VIIRS в центре Москвы (в радиусе 15 км) и АОТ на станции МО МГУ в зависимости от выбранной модели для мая 2014 г. Как видно на рисунке, чаще всего наибольшие ошибки в определении АОТ наблюдаются при выборе алгоритмом VIIRS модели пылевого аэрозоля. Эта модель предполагает малую долю мелкодисперсной фракции аэрозоля (менее 0,4) (Lee et al., 2010). Видно, что выбор модели пылевого аэрозоля алгоритмом VIIRS в соответствии с данными AERONET по фракции мелкодисперсного аэрозоля согласуется лишь 20 мая 2014 г. Для алгоритма MODIS выбор аэрозольной модели является заранее предопределённым, и для территории Московского региона в рассматриваемый временной интервал это среднепоглощающий мелкодисперсный аэрозоль (альбедо однократного рассеяния –0,91). Согласно данным другого спутникового радиометра ОМІ, аэрозоль был определён как пылевой за рассматриваемый период только 21 мая 2014 г., что согласовалось с алгоритмом выбора аэрозольной модели VIIRS во втором случае 21 мая и привело к относительно низким ошибкам в восстановлении АОТ.

Рассмотрим распределение АОТ550 по данным VIIRS для территорий с различной удалённостью от центра Москвы в среднем за тёплый период 2014—2017 гг. (*табл. 1*). Из таблицы видно, что среднее значение АОТ550 убывает по мере удаления от центра города. В центре в радиусе 5 км АОТ550 составляет 0,38. За пределами МКАД среднее значение АОТ550 — 0,16, что близко к среднему значению АОТ550 по данным станции МО МГУ (0,14). В *табл. 2* представлены средние значения АОТ550 за тот же период по данным MODIS. Вероятно, полученные оценки являются завышенными для центра города как по данным VIIRS, так и MODIS. На основе данных валидации АОТ550 коллекции MOD_3K по самолётным измерениям в городском округе Балтимора – Вашингтона показано, что спутниковые данные имеют высокие ошибки при восстановлении АОТ над городской поверхностью (Munchak et al., 2013).

	АОТ550, среднее	АОТ550, скорректированное по AERONET, МО МГУ	Количество измерений
Окружность радиусом 2 км от центра Москвы	0,37	0,22	29
Окружность радиусом 5 км от центра Москвы	0,38	0,21	214
Окружность радиусом 15 км от центра Москвы	0,29	0,19	2324
Площадь между окружностями радиусами	0,38	0,21	184
2 и 5 км от центра Москвы			
Площадь между окружностями радиусами	0,32	0,2	391
5 и 8 км от центра Москвы			
Площадь между окружностями радиусами	0,28	0,17	1721
8 и 15 км от центра Москвы			
Площадь между окружностями радиусами 20 и 50 км от центра Москвы	0,16	0,1	23 733

Таблица 1. Средние значения АОТ550 за тёплый период 2014—2017 гг. в безоблачных условиях, VIIRS, и их скорректированные значения по данным AERONET, МО МГУ

Таблица 2. Средние значения АОТ550 за тёплый период 2014—2017 гг. в безоблачных условиях, MODIS (TERRA/AQUA)

	Среднее	Количество измерений
Окружность радиусом 2 км от центра Москвы	0,24/0,24	25/23
Окружность радиусом 5 км от центра Москвы	0,25/0,23	275/272
Окружность радиусом 15 км от центра Москвы	0,20/0,18	3818/3393
Площадь между окружностями радиусами 2 и 5 км от центра Москвы	0,25/0,23	250/249
Площадь между окружностями радиусами 5 и 8 км от центра Москвы	0,23/0,21	784/649
Площадь между окружностями радиусами 8 и 15 км от центра Москвы	0,18/0,16	2759/2472
Площадь между окружностями радиусами 20 и 50 км от центра Москвы	0,15/0,13	46 046/42 735

Для того чтобы скорректировать завышенные спутниковые восстановления АОТ на городской территории с целью оценки пространственной неоднородности распределения аэрозоля, полученные спутниковые восстановления АОТ VIIRS в каждой ячейке были умножены на величину $AOT_{CIMEL}/AOT_{VIIRS\ mean}$, где AOT_{CIMEL} — это AOT550, измеренная на станции MO MГУ, $AOT_{VIIRS\ mean}$ — средняя AOT550 в радиусе 27,5 км от станции AERONET MO MГУ. Средние скорректированные значения AOT550, полученные на основе данных VIIRS, представлены в *табл.* 1. Полученные скорректированные значения 3 км (см. *табл.* 1 и 2). Разность между AOT550 в центре города и за городом составила по спутниковым данным около 0,1.

В качестве иллюстрации скорректированные спутниковые восстановления AOT550 VIIRS для 15 июля 2016 г. показаны на *рис. 8*.







Рис. 9. Распределение полуденных значений УФ-индекса в Московском регионе 15 июля 2016 г. с учётом скорректированных измерений AOT550 VIIRS

Средняя по территории Москвы АОТ 550 нм 15 июля 2016 г. — 0,45. В алгоритме VIIRS для восстановления АОТ была выбрана модель чистого городского аэрозоля. Согласно спутниковым восстановлениям наибольшие значения АОТ наблюдаются в центральных частях города, а для MODIS область максимальных значений АОТ сдвинута немного к северу. При сопоставлении полученных результатов с данными наземных измерений концентрации взвешенных частиц PM10 (*puc. 8в*) видно, что концентрации PM10 также выше в центральных частях города, что качественно согласуется с полученным распределением АОТ по данным VIIRS.

Оценим пространственные изменения УФ-радиации, связанные с пространственной неоднородностью поля аэрозоля. Для этого скорректированная AOT550, определённая по спутниковым данным, была пересчитана на длину волны 380 нм с использованием параметра Ангстрема (380–550 нм), вычисленного по измерениям фотометра CIMEL в MO MГУ. Отметим, что параметр Ангстрема по спутниковым данным присутствует и в наборе данных EDR VIIRS, однако качество его определения в этом случае низкое, как и по данным MODIS (Levy et al., 2010).

На *рис. 9* показано распределение АОТ380 и рассчитанных с её учётом УФ-индексов для полуденных условий 15 июля 2016 г. В качестве оптических параметров аэрозоля альбедо однократного рассеяния на длине волны 440 нм задавалось равным 0,93 (в УФ-диапазоне — 0,94), а фактор асимметрии индикатрисы рассеяния на длине волны 440 нм равным 0,7 (в УФ-диапазоне — 0,75). Коэффициент вариации рассчитанных значений УФ-индексов составляет 3 %; УФ-индексы на рассматриваемой территории изменяются от 5,4 до 6,4 только за счёт изменений АОТ, что составляет более 15 %.

Заключение

Проведено сравнение восстановлений АОТ по данным спутникового радиометра VIIRS для городской территории Москвы. Показано, что в центре города наблюдаются повышенные значения АОТ по спутниковым восстановлениям, однако достоверность определения разности между пригородом и центром города не является высокой в связи с тем, что точность восстановления АОТ зависит от использования достоверной информации об отражательных свойствах подстилающей поверхности. Город является более яркой поверхностью по сравнению с отражающими свойствами, заданными в алгоритме VIIRS, что приводит к погрешностям при восстановлении АОТ. Для улучшения качества восстановления АОТ по спутниковым данным, в частности, применимы методики нахождения минимальной отражательной способности поверхности.

Выявлено, что в алгоритме VIIRS существуют дополнительные неопределённости, связанные с выбором аэрозольной модели для московского региона, что может являться ещё одной причиной завышенных относительно наземных наблюдений восстановлений АОТ.

Предложено корректировать значения AOT VIIRS с учётом наземных данных AERONET, для того чтобы сохранять пространственные особенности в распределении AOT на территории Московского региона, о наличии которых косвенно свидетельствуют данные Мосэкомониторинга. Полученная разность между AOT550 в центре и за городом составляет по спутниковым данным около 0,1, что может быть завышено вследствие указанных выше причин. Для уточнения полученной оценки разности AOT в центре города и в пригороде необходимо привлечение дополнительных данных.

По полученным данным рассчитано пространственное изменение УФ-радиации за счёт ослабления аэрозолем. Вариации УФ-индексов за счёт неоднородности распределения аэрозоля для рассмотренного случая превосходит 15 % и составляют величину 1 УФ-индекс.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 17-77-10132). Авторы благодарны исследователям команд VIIRS, MODIS, AERONET и ГПБУ «Мосэкомониторинг» за данные, использованные в работе. Также авторы выражают признательность О. И. Государевой за полезное обсуждение материалов.

Литература

- 1. *Губанова Д. П., Беликов И. Б., Еланский Н. Ф., Скороход А. И., Чубарова Н. Е.* Изменчивость приземной концентрации аэрозолей РМ2.5 в г. Москве по наблюдениям в Метеорологической обсерватории МГУ // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 12. С. 1033–1042.
- 2. *Хлестова Ю. О., Чубарова Н. Е.* Основные характеристики аэрозоля по данным солнечно-небесного фотометра CIMEL сети AERONET // Эколого-климатические характеристики атмосферы в 2016 г. по данным метеорологической обсерватории МГУ имени М. В. Ломоносова. М.: МАКС Пресс, 2017. С. 162–174.
- 3. *Chubarova N. Y., Sviridenkov M.A., Smirnov A., Holben B. N.* Assessments of urban aerosol pollution in Moscow and its radiative effects // Atmospheric Measurement Techniques. 2011. V. 4. No. 2. P. 367–378.
- 4. *Dubovik O., Holben B., 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. Atmospheric Sciences. 2002. V. 59. No. 3. P. 590–608.
- Gupta P., Khan M. N., da Silva A., Patadia F. MODIS aerosol optical depth observations over urban areas in Pakistan: quantity and quality of the data for air quality monitoring // Atmospheric Pollution Research. 2013. V. 4. No. 1. P. 43–52.
- Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I., Tanre D., Buis J. P., Setzer A., Vermote E., Reagan J. A., Kaufman Y. J., Nakajimu T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET — A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sensing of Environment. 1998. V. 66. No. 1. P. 1–16.
- Jackson J. M., Liu H., Laszlo I., Kondragunta S., Remer L. A., Huang J., Huang H. C. Suomi-NPP VIIRS aerosol algorithms and data products // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2013. V. 118. No. 22. P. 12673–12689.
- 8. *Lee J., Kim J., Song C. H., Kim S. B., Chun Y., Sohn B. J., Holben B. N.* Characteristics of aerosol types from AERONET sunphotometer measurements // Atmospheric Environment. 2010. V. 44. No. 26. P. 3110–3117.
- Levy R. C., Remer L. A., Kleidman R. G., Mattoo S., Ichoku C., Kahn R., Eck T. F. Global evaluation of the Collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land // Atmospheric Chemistry and Physics. 2010. V. 10. No. 21. P. 10399–10420.
- Liu H., Remer L.A., Huang J., Huang H. C., Kondragunta S., Laszlo I., Min O., Jackson J. M. Preliminary evaluation of S-NPP VIIRS aerosol optical thickness // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2014. V. 119. No. 7. P. 3942–3962.
- Mishchenko M. I., Geogdzhayev I. V., Cairns B., Carlson B. E., Chowdhary J., Lacis AA., Liu L., Rossowa W. B., Travis L. D. Past, present, and future of global aerosol climatologies derived from satellite observations: A perspective // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2007. V. 106. No. 1–3. P. 325–347.

- Munchak L. A., Levy R. C., Mattoo S., Remer L. A., Holben B. N., Schafer J. S., Hostetler C. A., Ferrare R. A. MODIS 3 km aerosol product: applications over land in an urban/suburban region // Atmospheric Measurement Techniques. 2013. V. 6. No. 7. P. 1747–1759.
- 13. *Petrenko M., Ichoku C., Leptoukh G.* Multi-sensor aerosol products sampling system (MAPSS) // Atmospheric Measurement Techniques. 2012. V. 5. No. 5. P. 913–926.
- 14. *Remer L.A., Mattoo S., Levy R. C., Munchak L.A.* MODIS 3 km aerosol product: algorithm and global perspective // Atmospheric Measurement Techniques. 2013. V. 6. No. 7. P. 1829–1844.
- 15. Van Donkelaar A., Martin R. V., Levy R. C., da Silva A. M., Krzyzanowski M., Chubarova N. E., Semutnikova E., Cohen A. J. Satellite-based estimates of ground-level fine particulate matter during extreme events: A case study of the Moscow fires in 2010 // Atmospheric Environment. 2011. V. 45. No. 34. P. 6225–6232.
- Wang W., Pan Z., Mao F., Gong W., Shen L. Evaluation of VIIRS Land Aerosol Model Selection with AERONET Measurements // Intern. J. Environmental Research and Public Health. 2017. V. 14. No. 9. P. 1016.
- 17. *Wong M.S.*, *Lee K.H.*, *Nichol J.E.*, *Li Z.* Retrieval of Aerosol Optical Thickness Using MODIS 500×500 m², a Study in Hong Kong and the Pearl River Delta Region // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2010. V. 48. No. 8. P. 3318–3327.

Spatial variability of aerosol optical thickness on the territory of Moscow and Moscow Region by satellite and ground based data

E. Yu. Zhdanova, N. E. Chubarova

Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia E-mail: ekaterinazhdanova214@gmail.com

Spatial variability of aerosol optical thickness (AOT) is estimated based on satellite data of the stateof-the-art VIIRS radiometer on the territory of Moscow and Moscow Region. The VIIRS radiometer is the latest generation sensor on board the polar-orbiting satellite Suomi National Polar-orbiting Partnership (Suomi NPP). It is shown that higher satellite retrieval AOT are observed in the center of the city in comparison with suburb territory. But reliability of the determined difference in AOT between suburb territory and the city center is not high enough due to uncertainties of satellite algorithms in evaluation of surface reflectance. It is also revealed that AOT retrieval VIIRS algorithm has additional uncertainties connected with the choice of aerosol model for Moscow region. Methodology of satellite AOT correction according to ground based measurements of CIMEL solar photometer (AERONET) at Meteorological Observatory of Moscow State University is proposed. Based on the obtained corrected AOT, spatial distribution of UV radiation is estimated taking into account distribution of AOT on the territory of Moscow and Moscow Region. Spatial variations of UV indexes for the considered case study exceed 15 % and reach 1 UV index due to inhomogeneity of aerosol distribution.

Keywords: aerosol, aerosol optical thickness, Moscow, satellite retrievals, VIIRS, MODIS

Accepted: 15.10.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-236-248

References

- Gubanova D. P., Belikov I. B., Elanskii N. F., Skorokhod A. I., Chubarova N. E., Izmenchivost' prizemnoi kontsentratsii aerozolei PM2.5 v g. Moskve po nablyudeniyam v Meteorologicheskoi observatorii MGU (Variability of PM2.5 surface concentrations in Moscow according to MSU meteorological observatory data), *Optika atmosfery i okeana*, 2017, Vol. 30, No. 12, pp. 1033–1042.
- Khlestova Yu. O., Chubarova N. E., Osnovnye kharakteristiki aerozolya po dannym solnechno-nebesnogo fotometra CIMEL seti AERONET (The main characteristics of aerosols according to the measurements of sun and sky CIMEL photometer AERONET network), In: *Ekologo-klimaticheskie kharakteristiki atmo-*

sfery v 2016 g. po dannym meteorologicheskoi observatorii MGU imeni M. V. Lomonosova (Environmental and Climate Characteristics of the atmosphere in 2016 according to the measurements of the Meteorological Observatory of Moscow State University), Moscow: MAKS Press, 2017, pp. 162–174.

- 3. Chubarova N.Y., Sviridenkov M.A., Smirnov A., Holben B.N., Assessments of urban aerosol pollution in Moscow and its radiative effects, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, Vol. 4, No. 2, pp. 367–378.
- 4. Dubovik O., Holben B., 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. Atmospheric Sciences*, 2002, Vol. 59, No. 3, pp. 590–608.
- 5. Gupta P., Khan M. N., da Silva A., Patadia F., MODIS aerosol optical depth observations over urban areas in Pakistan: quantity and quality of the data for air quality monitoring, *Atmospheric Pollution Research*, 2013, Vol. 4, No. 1, pp. 43–52.
- 6. Holben B. N., Eck T. F., Slutsker I., Tanre D., Buis J. P., Setzer A., Vermote E., Reagan J. A., Kaufman Y. J., Nakajimu T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A., AERONET A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sensing of Environment*, 1998, Vol. 66, No. 1, pp. 1–16.
- Jackson J. M., Liu H., Laszlo I., Kondragunta S., Remer L. A., Huang J., Huang H. C., Suomi-NPP VIIRS aerosol algorithms and data products, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, Vol. 118, No. 22, pp. 12673–12689.
- 8. Lee J., Kim J., Song C. H., Kim S. B., Chun Y., Sohn B. J., Holben B. N., Characteristics of aerosol types from AERONET sunphotometer measurements, *Atmospheric Environment*, 2010, Vol. 44, No. 26, pp. 3110–3117.
- 9. Levy R. C., Remer L. A., Kleidman R. G., Mattoo S., Ichoku C., Kahn R., Eck T. F., Global evaluation of the Collection 5 MODIS dark-target aerosol products over land, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, Vol. 10, No. 21, pp. 10399–10420.
- Liu H., Remer L.A., Huang J., Huang H.C., Kondragunta S., Laszlo I., Min O., Jackson J. M., Preliminary evaluation of S-NPP VIIRS aerosol optical thickness, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, Vol. 119, No. 7, pp. 3942–3962.
- Mishchenko M. I., Geogdzhayev I. V., Cairns B., Carlson B. E., Chowdhary J., Lacis A.A., Liu L., Rossowa W. B., Travis L. D., Past, present, and future of global aerosol climatologies derived from satellite observations: A perspective, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2007, Vol. 106, No. 1–3, pp. 325–347.
- 12. Munchak L.A., Levy R.C., Mattoo S., Remer L.A., Holben B.N., Schafer J.S., Hostetler C.A., Ferrare R.A., MODIS 3 km aerosol product: applications over land in an urban/suburban region, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, Vol. 6, No. 7, pp. 1747–1759.
- 13. Petrenko M., Ichoku C., Leptoukh G., Multi-sensor aerosol products sampling system (MAPSS), *Atmo-spheric Measurement Techniques*, 2012, Vol. 5, No. 5, pp. 913–926.
- 14. Remer L.A., Mattoo S., Levy R.C., Munchak L.A., MODIS 3 km aerosol product: algorithm and global perspective, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2013, Vol. 6, No. 7, pp. 1829–1844.
- Van Donkelaar A., Martin R.V., Levy R.C., da Silva A.M., Krzyzanowski M., Chubarova N.E., Semutnikova E., Cohen A.J., Satellite-based estimates of ground-level fine particulate matter during extreme events: A case study of the Moscow fires in 2010, *Atmospheric Environment*, 2011, Vol. 45, No. 34, pp. 6225–6232.
- Wang W., Pan Z., Mao F., Gong W., Shen L., Evaluation of VIIRS Land Aerosol Model Selection with AERONET Measurements, *Intern. J. Environmental Research and Public Health*, 2017, Vol. 14, No. 9, p. 1016.
- Wong M. S., Lee K. H., Nichol J. E., Li Z., Retrieval of Aerosol Optical Thickness Using MODIS 500×500 m², a Study in Hong Kong and the Pearl River Delta Region, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2010, Vol. 48, No. 8, pp. 3318–3327.