

Тренды характеристик атмосферного аэрозоля в Москве по данным многолетних измерений сети AERONET

Е.Ю. Жданова, Ю.О. Хлестова, Н.Е. Чубарова*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, 1

Поступила в редакцию 4.02.2019 г.

Рассмотрены многолетние тренды аэрозольной оптической толщины (АОТ) в Москве по данным наземных измерений сети AERONET (2002–2016 гг.), которые свидетельствуют об уменьшении АОТ. Показано, что в разные месяцы теплого периода года тренды АОТ отличаются по величине; наибольший отрицательный тренд АОТ наблюдается в апреле, если не учитывать влияние лесных пожаров в другие месяцы. Представлен совместный анализ изменений АОТ и индексов атмосферной циркуляции, который показал, что дополнительное влияние на межгодовые изменения АОТ в апреле оказывает Скандинавский индекс. Преобладающим типом аэрозоля (более 60% наблюдений) для территории Москвы является мелкодисперсный слабопоглощающий аэрозоль. Не выявлено направленных изменений типов аэрозоля в последние десятилетия.

Ключевые слова: атмосферный аэрозоль, аэрозольная оптическая толщина, AERONET, многолетние измерения, Москва; atmospheric aerosols, aerosol optical thickness, AERONET, long-term measurements, Moscow.

Введение

Оптические и микрофизические свойства атмосферного аэрозоля являются значимыми климатическими параметрами. Основной оптический параметр, характеризующий атмосферный аэрозоль, — аэрозольная оптическая толщина (АОТ); кроме того, важную роль играет параметр Ангстрема, который характеризует распределение частиц по размерам, а также альbedo однократного рассеяния, связанное с поглощающими свойствами частиц. Временные вариации АОТ, полученные преимущественно по данным спутниковых измерений, отличаются в разных регионах земного шара: на территории Европы и Северной Америки обнаружены отрицательные временные тренды АОТ, а в Азии, в частности на территории Китая, наблюдаются, напротив, положительные тренды [1]. Спутниковые оценки знаков временных трендов АОТ подтверждаются и наземными данными: изменения свойств атмосферного аэрозоля исследовались на основе результатов многолетних (порядка 10 лет) наблюдений сети AERONET по всему миру [2]. Межгодовая изменчивость АОТ на большой части территории России (Дальневосточное Приморье, Западная Сибирь, Забайкалье) имеет общий характер, с максимумами, в последние годы обусловленными лесными пожарами [3]. Оценки взаимо-

связей вариаций АОТ в разных регионах России (Приуралье, Поволжье, Сибирь, Дальний Восток) представлены в [4, 5]. Также было обнаружено, что параметр Ангстрема, как и АОТ, имеет отрицательный временной тренд в Европе, что косвенно свидетельствует об уменьшении доли антропогенного аэрозоля [2].

Тренд временных изменений АОТ на территории Москвы как по данным актинометрических измерений с 1955 г. [6], так и по данным измерений солнечного фотометра CIMEL, AERONET с 2002 г. [7] отрицательный. В [6] отмечается, что значения АОТ в Москве в последние годы, начиная с 1994 г. после очищения атмосферы от продуктов извержения вулкана Пинатубо, сравнимы со значениями АОТ, наблюдаемыми в Арктическом регионе. Основными факторами, которые могут влиять на временные тренды АОТ, — это изменения эмиссий аэрозолей и газов-предшественников и динамика атмосферы, в том числе возможные изменения атмосферной циркуляции. Непериодические влияния на временной ряд АОТ оказывают лесные и торфяные пожары, извержения вулканов.

Для восстановления аэрозольных свойств атмосферы по данным спутниковых измерений необходима информация о типе аэрозоля. Неопределенность задания аэрозольной модели приводит к дополнительным погрешностям восстановления АОТ.

Таким образом, основная задача работы состоит в том, чтобы выявить возможные причины временных трендов АОТ и определить преобладающий тип аэрозоля на территории Москвы.

* Екатерина Юрьевна Жданова (ekaterinazhdanova214@gmail.com); Юлия Олеговна Хлестова (khlestova2013@yandex.ru); Наталья Евгеньевна Чубарова (Natalia.chubarova@gmail.com).

1. Материалы и методы

Для характеристики временной изменчивости АОТ и параметра Ангстрема (440–870 нм) в Москве использовались данные фотометра CIMEL сети AERONET версии 3, уровень обработки 2 с дополнительной облачной фильтрацией [7] за период 2002–2016 гг. Также были рассмотрены альbedo однократного рассеяния на длине волны 440 нм (SSA_{440}) и доля частиц мелкодисперсной моды на длине волны 550 нм (FMF_{550}) (версия 3, уровни обработки 2 и 1.5). Данные измерений АОТ на длине волны 500 нм с помощью параметра Ангстрема для области 440–870 нм были пересчитаны в АОТ на стандартной длине волны 550 нм (AOT_{550}). Подробное описание данных многолетних измерений аэрозольных свойств атмосферы с помощью фотометра CIMEL в Москве и их обобщения представлены в [7, 8].

Для анализа условий изменений атмосферной циркуляции использовались временные ряды среднемесячных значений индексов атмосферной циркуляции – Standardized Northern Hemisphere Teleconnection Indices (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>), среди которых выделяются следующие циркуляционные моды (индексы): Североатлантический (North Atlantic Ocean – NAO), Полярно-Евразийский (Polar-Eurasia – POL), Скандинавский (Scandinavian – SCA), Восточно-Атлантический (East Atlantic – EA), Восточно-Атлантический – Западно-Российский (East Atlantic – West Russia – EAWR) и др. Индексы NAO, EA, POL являются показателями интенсивности зональной циркуляции. Рост индекса SCA характеризует усиление меридионального обмена.

К анализу были привлечены стандартные метеорологические измерения температуры воздуха, скорости и направления ветра. Для выделения типов аэрозоля была применена классификация, в которой критериями выступали альbedo однократного рассеяния и доля мелкодисперсной фракции аэрозоля [9].

Поскольку атмосфера представляет собой совокупность нестационарных процессов, кроме оценки временного тренда методом линейной регрессии, был применен метод эмпирической модовой декомпозиции (empirical mode decomposition – EMD) [10] и его ансамблевая модификация (EEMD) [11]. Это перспективный метод для исследования нестационарных и нелинейных сигналов.

2. Результаты

2.1. Временные тренды АОТ в Москве и основные моды циркуляции

Вероятная причина отрицательных трендов АОТ в Москве – сокращение эмиссий загрязняющих веществ на региональном уровне. В частности, существует устойчивая тенденция к снижению выбросов частиц размерами менее 2,5 и 10 мкм ($PM_{2,5}$, PM_{10}) [12]. В последние годы наблюдается умень-

шение концентрации взвешенных частиц и в Москве [13]. Кроме того, можно полагать, что причиной отрицательных трендов АОТ является уменьшение антропогенных эмиссий, так как наблюдаются отрицательные тренды параметра Ангстрема. Они могут свидетельствовать о сокращении доли мелкодисперсного аэрозоля, а антропогенный аэрозоль обычно представлен мелкодисперсной фракцией (рис. 1). В других регионах земного шара, например в Северной Америки и в Европе [2], также наблюдаются положительные тренды альbedo однократного рассеяния аэрозоля, свидетельствующие об уменьшении его поглощательной способности, что указывает на глобальный характер очищения атмосферы.

Вклад в величину временных трендов АОТ могут вносить изменения циркуляционных режимов атмосферы. В [14] выявлены изменения атмосферной циркуляции и их связь с вариациями АОТ в Южных Балканах. В то же время анализ обратных траекторий для московских условий не выявил значимого влияния этого фактора на тренды АОТ за период 2002–2014 гг. [7].

Рассмотрим многолетние вариации AOT_{550} в Москве для месяцев с апреля по сентябрь (рис. 1), поскольку эти месяцы наиболее полно обеспечены данными измерений. Наименее обеспечены данными ноябрь, декабрь и январь в связи с большой облачностью. По среднесуточным AOT_{550} были рассчитаны среднемесячные значения. Наблюдается значимый (оценка по t -статистике, значимость $p = 0,05$) отрицательный тренд AOT_{550} , который составляет в абсолютных единицах $-0,0011$ в год или в относительных единицах $-0,6\%$ в год, если исключить из временного ряда данные, которые соответствуют влиянию пожаров 2002, 2010 и 2016 гг.

Кроме линейного был рассчитан тренд с помощью EEMD (ансамбль из 100 реализаций, 60 ансамблей, амплитуда шума 0,1 стандартного отклонения) [15] (рис. 2). Для месяцев, не обеспеченных данными, пропуски были заменены соответствующими медианными значениями, чтобы сохранить целостность временного ряда. Временной тренд AOT_{550} , полученный по методу EEMD (медианное значение), меньше по абсолютной величине, чем линейный тренд. В последние годы наблюдается уменьшение трендовой составляющей, что соответствует слабой межгодовой изменчивости AOT_{550} в Москве [16]. В рассматриваемый период максимумы AOT_{550} объясняются неперiodическим влиянием лесных пожаров 2002 и 2010 гг., а также выносом продуктов горения от сибирских лесных пожаров 2016 г.

Далее были отдельно рассмотрены тренды AOT_{550} для каждого месяца с апреля по сентябрь. Значимый ($p = 0,05$) отрицательный линейный тренд AOT_{550} наблюдается в апреле (абсолютное значение $-0,014$, относительное значение -6% в год) и, если учитывать лесные пожары 2002 г., в сентябре ($-0,0242$; -11% в год). Полученные величины линейных трендов немного больше, чем в [7], за счет низких значений АОТ в последние годы.

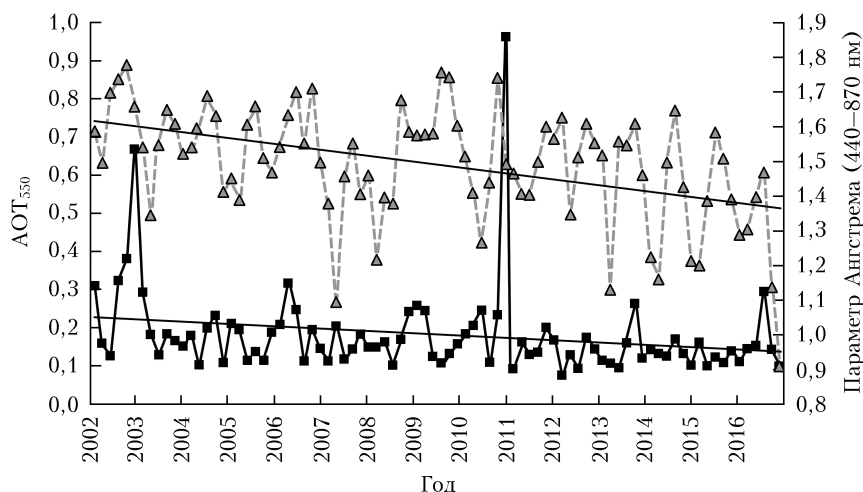


Рис. 1. Временной ход среднемесячных значений AOT_{550} (■) и параметра Ангрстрема (Δ) (апрель – сентябрь) в Москве

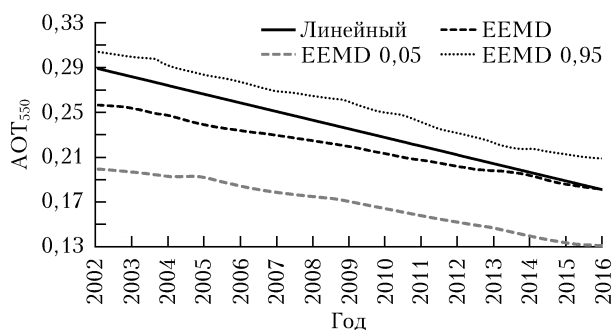


Рис. 2. Многолетние тренды AOT_{550} в Москве, полученные методами линейной регрессии и EEMD (медианное значение, 5-й и 95-й процентиля) (апрель – сентябрь)

Поскольку величины трендов AOT в разные месяцы года отличаются, дополнительно было исследовано возможное изменение циркуляционных особенностей атмосферы. В частности, были рассмотрены одновременные измерения AOT и направления ветра на высоте 10 м в стандартные метеорологические сроки (рис. 3). Из временного ряда мгновенных

измерений AOT_{550} были получены часовые усреднения, которые затем сопоставлялись с измерениями направления ветра в стандартные метеорологические сроки. На рис. 3 видно, что в полученной выборке, так же как и в исходном ряде, проявляется тенденция к снижению AOT в последнее время (2013–2017 гг.).

Далее была рассчитана повторяемость направлений ветра для периодов 2002–2013 и 2014–2016 гг., которая показала, что в полученной выборке меньшие AOT в последние годы могут быть обусловлены большей повторяемостью ветров западных румбов (рис. 4). Такие циркуляционные условия могут создаваться под влиянием передних частей антициклонов над Центральной Европой, а также в тылу атлантических циклонов, траектории которых смещены к северу.

Для оценки вклада атмосферной циркуляции в изменение AOT_{550} были проанализированы ее индексы (рис. 5). Значимые коэффициенты линейной корреляции между AOT и индексами циркуляции приведены в табл. 1.

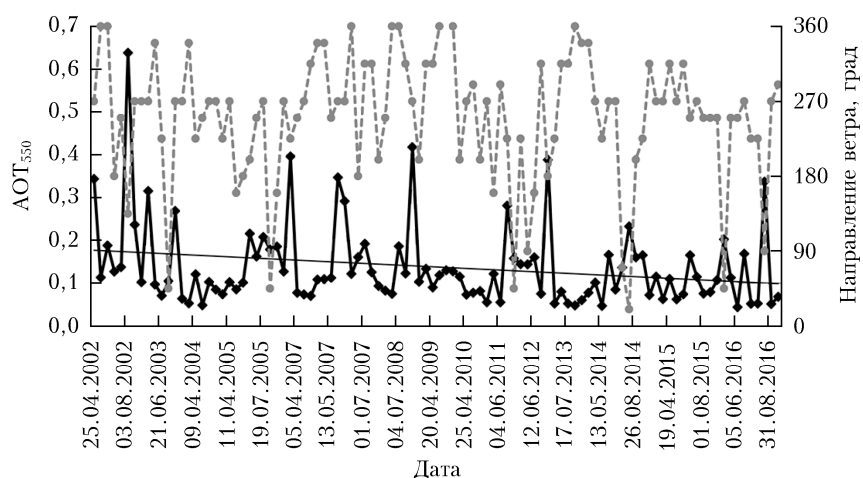


Рис. 3. Выборка одновременных измерений направления ветра (•) на высоте 10 м и AOT_{550} (♦) (апрель – сентябрь)

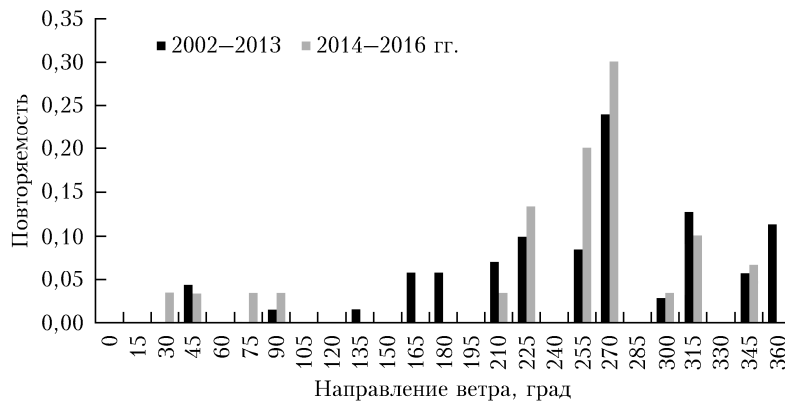


Рис. 4. Повторяемость направлений ветра в течение двух периодов: 2002–2013 и 2014–2016 гг.

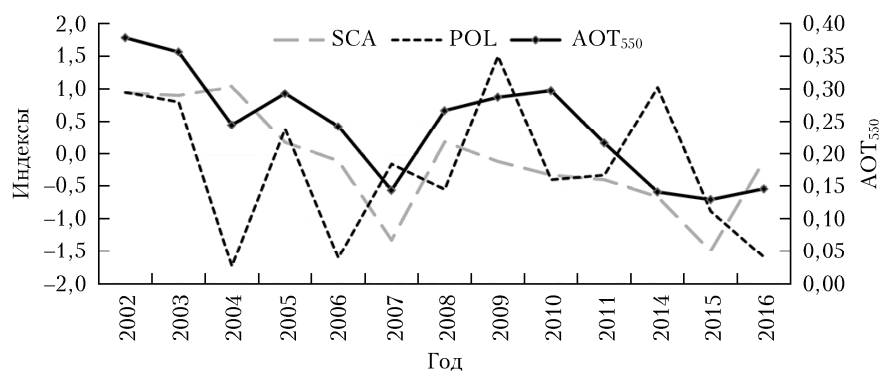


Рис. 5. Среднемесячные значения индексов атмосферной циркуляции и AOT₅₅₀ в апреле

Таблица 1

Значимые коэффициенты корреляции между AOT и индексами атмосферной циркуляции

Месяц	NAO	SCA	POL
Апрель	–	0,78	0,41
Май	–	–	–0,5
Июнь	0,55	–	–

Значимая корреляция между индексом NAO и AOT в июне может быть связана с продолжительностью волн тепла, для которой в [17] показана значимая линейная отрицательная связь с индексом SCA; его положительная фаза характеризуется мощным антициклоном над Скандинавией и депрессией над Сибирью [18]. В апреле и мае прослеживается противофазная связь AOT с индексом POL. Изменения последнего свидетельствуют об изменении интенсивности западного переноса [19]; в апреле наблюдается уменьшение POL, а в мае его рост.

2.2. Типы аэрозоля в Москве

Определение типов аэрозоля важно для спутниковых алгоритмов восстановления AOT. Для выделения типов аэрозоля в Москве была использована классификация [9] (табл. 2).

Таблица 2

Классификация типов аэрозоля в зависимости от альbedo однократного рассеяния частиц SSA и доли мелкодисперсного аэрозоля FMF [9]

Тип аэрозоля	Значения параметров
Мелкодисперсный непоглощающий	FMF > 0,6; SSA > 0,95
Мелкодисперсный поглощающий:	FMF > 0,6;
– слабопоглощающий	0,90 < SSA ≤ 0,95
– среднепоглощающий	0,85 < SSA ≤ 0,90
– сильнопоглощающий	SSA ≤ 0,85
Смешанный	0,4 < FMF < 0,6
Крупнодисперсный непоглощающий	FMF < 0,4; SSA > 0,95

Из всей выборки одновременных измерений SSA и FMF уровня 2 за период 2002–2015 гг., усредненных за часовые интервалы, 62% случаев соответствуют мелкодисперсному поглощающему, 36% – мелкодисперсному непоглощающему и 1% – смешанному аэрозолю (табл. 3). Случаи, когда в Москве был зафиксирован слабопоглощающий пылевой аэрозоль, состоящий из крупных частиц, составляют менее 1%. В частности, адвекция пылевого аэрозоля из регионов Африки и Ближнего Востока наблюдалась в мае 2007 г., что было определено с помощью метода обратных траекторий. Так как параметры SSA и FMF в архиве уровня 2 определены только

Таблица 3

Доли типов аэрозоля (%) в соответствии с данными измерений для Москвы за период 2002–2015 гг. в апреле – сентябре

Аэрозоль	По данным AERONET		
	уровень 2	уровень 1.5	уровень 1.5 (AOT ₄₄₀ > 0,2)
Смешанный	1	8	2
Мелкодисперсный непоглощающий	36	25	30
Мелкодисперсный поглощающий (слабо-, средне-, сильнопоглощающий в общем количестве случаев)	62 (60, 30, 10)	67 (47, 30, 23)	67 (53, 29, 18)
Количество случаев	244	3683	1727

при высоких значениях AOT₄₄₀ (>0,4), то были рассмотрены еще и данные уровня 1.5 с учетом их дополнительной проверки на отсутствие облачности во время измерений. Преобладание слабопоглощающего мелкодисперсного аэрозоля наблюдалось для всех месяцев теплого периода (апрель – сентябрь) 2002–2015 гг. как по данным измерений уровня 2, так и уровня 1.5 (табл. 3).

Кроме того, было сделано дополнительное уточнение: типы аэрозоля были определены по данным версии 1.5 при условии, что AOT₄₄₀ > 0,2. При таком условии погрешности восстановления SSA оцениваются величиной 0,03 [20], что позволяет использовать предлагаемую классификацию [9] для определения типов аэрозоля при невысокой замутненности атмосферы.

Временные изменения типов аэрозоля в Москве по данным уровня 1.5 показаны на рис. 6.

Полученная изменчивость типов аэрозоля не позволяет говорить о значимых изменениях его состава.

Заключение

Рассмотрены многолетние тренды аэрозольной оптической толщины в Москве, показывающие уменьшение AOT. Основной причиной этого в последние десятилетия является очищение атмосферы в связи с уменьшением количества эмиссий аэрозолей и газов-предшественников. Показано, что в разные месяцы теплого периода года тренды AOT отличаются по величине; наибольший отрицательный тренд наблюдается в апреле, если не учитывать влияние лесных пожаров в другие месяцы. Представлен совместный анализ изменений AOT и индексов атмосферной циркуляции, который показал, что дополнительное влияние на межгодовые изменения AOT в апреле оказывают изменения Скандинавского индекса. Также по данным ограниченной выборки получено, что в последние годы (2014–2016 гг.) низкие AOT могут быть связаны с большей повторяемостью ветров западной четверти.

Для Москвы характерным типом аэрозоля является слабопоглощающий мелкодисперсный аэрозоль, которому свойственно преобладание мелкодисперсной фракции (FMF₅₅₀ > 0,6) и слабое поглощение (0,90 < SSA < 0,95). Не выявлено направленных изменений типов аэрозоля в последние десятилетия.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 17-77-10132).

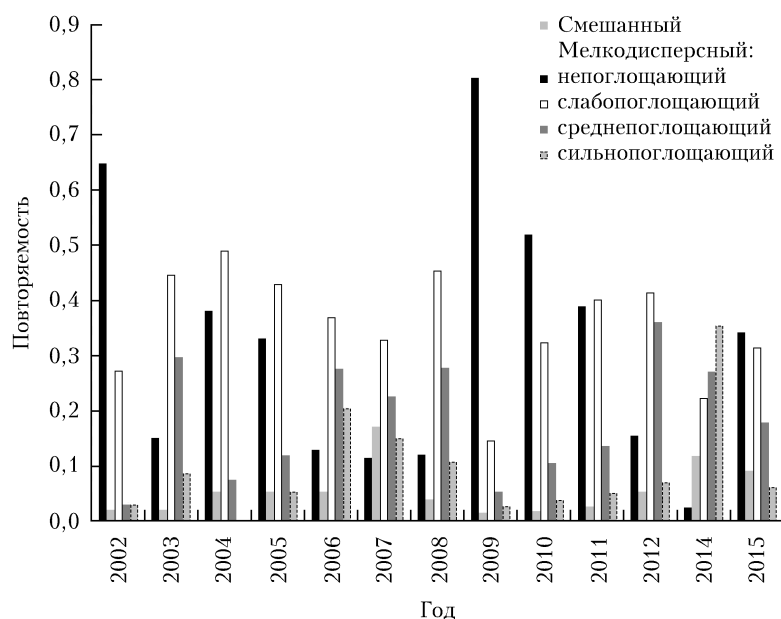


Рис. 6. Повторяемость типов аэрозоля в Москве с апреля по сентябрь в 2002–2015 гг.

1. Yoon J., Hoyningen-Huene W.V., Vountas M., Burrows J.P. Analysis of linear long-term trend of aerosol optical thickness derived from SeaWiFS using BAER over Europe and South China // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11, N 23. P. 12149–12167.
2. Li J., Carlson B.E., Dubovik O., Laciš A.A. Recent trends in aerosol optical properties derived from AERONET measurements // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 22. P. 12271–12289.
3. Сакерин С.М., Андреев С.Ю., Бедарева Т.В., Кабанов Д.М., Корниенко Г.И., Holben V., Smirnov A. Аэрозольная оптическая толщина атмосферы в Дальневосточном Приморье по данным спутниковых и наземных наблюдений // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. Т. 24, № 8. С. 654–660.
4. Андреев С.Ю., Афонин С.В., Бедарева С.А., Береснев С.А., Букин О.А., Голобокова Л.П., Горбаренко Е.В., Горда С.Ю., Грибанов К.Г., Еремина Т.А., Жамсуева Г.С., Журавлева Т.Б., Захаров В.И., Заяханов А.С., Кабанов Д.М., Козлов В.С., Корниенко Г.И., Ломакина Н.Я., Лужецкая А.П., Майор А.Ю., Маркелов Ю.И., Наговицына Е.С., Нагуслева С.А., Насртдинов И.М., Нецветаева О.Г., Николашкин С.В., Оболкин В.А., Онищук Н.А., Павлов А.Н., Панченко М.В., Поддубный В.А., Полькин В.В., Потемкин В.Л., Рассказчикова Т.М., Рокотян Н.В., Ростов А.П., Сакерин С.М., Салюк П.А., Смирнов А.В., Скляднева Т.К., Столярчук С.Ю., Тацилин М.А., Терпугова С.А., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С., Филиппова У.Г., Ходжер Т.В., Холбен Б.Н., Цыдыпов В.В., Чеснокова Т.Ю., Шмаргунов В.П., Шмирко К.А., Энгель М.В. Исследование радиационных характеристик аэрозоля в Азиатской части России / под ред. С.М. Сакерина. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012. 482 с.
5. Сакерин С.М., Андреев С.Ю., Бедарева Т.В., Кабанов Д.М., Поддубный В.А., Лужецкая А.П. Пространственно-временная изменчивость аэрозольной оптической толщины атмосферы на территории Поволжья, Урала и Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана*. 2012. Т. 25, № 11. С. 958–962.
6. Горбаренко Е.В., Рублев А.Н. Многолетние изменения оптической толщины аэрозоля в Москве с учетом коррекции в сильно замутненной атмосфере // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2016. Т. 52, № 2. С. 213–221.
7. Chubarova N.Y., Poliukhov A.A., Gorlova I.D. Long-term variability of aerosol optical thickness in Eastern Europe over 2001–2014 according to the measurements at the Moscow MSU MO AERONET site with additional cloud and NO₂ correction // *Atmos. Meas. Tech.* 2016. V. 9, N 2. P. 313–334.
8. Chubarova N., Smirnov A., Holben B.N. Aerosol properties in Moscow according to 10 years of AERONET measurements at the meteorological observatory of Moscow State University // *Geogr., Environ., Sustain.* 2011. V. 4, N 1. P. 19–32.
9. 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 // *Atmos. Environ.* 2010. V. 44, N 26. P. 3110–3117.
10. Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen N.-C., Tung C.C., Liu H.H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // *Proc. Roy. Soc. A*. 1998. V. 454, N 1971. P. 903–995.
11. Wu T.Y., Chung Y.L. Misalignment diagnosis of rotating machinery through vibration analysis via the hybrid EEMD and EMD approach // *Smart Mater. Struct.* 2009. V. 18, N 9. P. 095004.
12. Tørseth K., Aas W., Breivik K., Fjæraa A.M., Fiebig M., Hjellbrekke A.G., Myhre C.L., Solberg S., Yttri K.E. Introduction to the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) and observed atmospheric composition change during 1972–2009 // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12, N 12. P. 5447–5481.
13. Доклад «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2017 году» / под ред. А.О. Кульбачевского. М.: ДПИООС, 2018. 358 с.
14. Koukoulis M.E., Kazadzis S., Amiridis V., Ichoku C., Balis D.S., Bais A.F. Signs of a negative trend in the MODIS aerosol optical depth over the Southern Balkans // *Atmos. Environ.* 2010. V. 44, N 9. P. 1219–1228.
15. Zhang Z.Y., Wong M.S., Nichol J. Global trends of aerosol optical thickness using the ensemble empirical mode decomposition method // *Int. J. Climatol.* 2016. V. 36, N 13. P. 4358–4372.
16. Эколого-климатические характеристики атмосферы Москвы в 2017 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ им. М.В. Ломоносова / под ред. М.А. Локощенко. М.: Макс-Пресс, 2018. 240 с.
17. Рочева Э.В., Смирнов В.Д. О тенденциях в изменении продолжительности «волн тепла» на территории России // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2013. Т. 25. С. 94–114.
18. Попова В.В. Современные изменения климата на севере Евразии как проявление вариаций крупномасштабной атмосферной циркуляции // *Фундам. и прикл. климатол.* 2018. № 1. С. 84–112.
19. Gao T., Yu J., Paek H. Impacts of four northern-hemisphere teleconnection patterns on atmospheric circulations over Eurasia and the Pacific // *Theor. Appl. Climatol.* 2017. V. 129, N 3–4. P. 815–831.
20. 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.: Atmos.* 2000. V. 105, N D8. P. 9791–9806.

E.Yu. Zhdanova, Yu.O. Khlestova, N.E. Chubarova. Trends in parameters of atmospheric aerosols in Moscow according to long-term AERONET observations.

Trends in aerosol optical thickness (AOT) in Moscow are determined based on long-term (2002–2016) AERONET network observations. The trend in AOT at a wavelength of 550 nm (AOT₅₅₀) is characterized by the negative sign in warm season. It is shown that trends in AOT are negative and have different values in different months. The largest negative trend is in April, if the impact of forest fires in other months of the warm season is neglected. The joint analysis of changes in AOT₅₅₀ and indices of atmospheric circulation is performed. It is shown that the Scandinavian index has an additional effect on the interannual changes in AOT₅₅₀ in April. It is ascertained that fine weakly-absorbing aerosol is the most representative for Moscow. No pronounced changes in the frequency of aerosol types have been identified in recent decades.