

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551.501.793, 551.510.42, 551.510.43

Изменчивость приземной концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ в г. Москве по наблюдениям в Метеорологической обсерватории МГУ

Д.П. Губанова^{1,2}, И.Б. Беликов¹, Н.Ф. Еланский¹,
А.И. Скороход¹, Н.Е. Чубарова^{3*}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

²Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова
105064, г. Москва, ул. Воронцово поле, 10

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119899, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1

Поступила в редакцию 7.07.2017 г.

Рассмотрены характерные для г. Москвы особенности временной изменчивости массовой концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ в приземном слое воздуха в зависимости от ряда параметров состояния атмосферы: концентрации некоторых малых газовых составляющих атмосферы, аэрозольной оптической толщины, приземной температуры, влажности воздуха и скорости ветра. Представлены результаты анализа рядов данных концентрации аэрозольных частиц $PM_{2,5}$ и газовых примесей SO_2 , NH_3 , NO_x , CO и O_3 , сформированных на основе непрерывных наблюдений в период с 2011 по 2013 г. Исследованы суточные и сезонные вариации концентраций аэрозолей $PM_{2,5}$ и газовых примесей, выявлены корреляционные связи между ними, проанализирована изменчивость концентрации частиц $PM_{2,5}$ в зависимости от концентрации некоторых газов, участвующих в образовании атмосферных аэрозолей, а также от метеорологических параметров. Данные по приземным концентрациям аэрозолей $PM_{2,5}$ сопоставлены с результатами измерений аэрозольной оптической толщины.

Ключевые слова: аэрозоли, массовая концентрация аэрозолей $PM_{2,5}$, малые газовые составляющие атмосферы, состав атмосферы, аэрозольная оптическая толщина, загрязняющие примеси; aerosols, $PM_{2,5}$, trace gases, atmospheric composition, aerosol optical depth, atmospheric pollutants.

Введение

Аэрозоли антропогенного происхождения оказывают существенное влияние на здоровье людей, состояние экосистем и климат Земли (радиационный форсинг, воздействие на процессы облако- и осадкообразования, радиационный баланс в атмосфере) [1–6]. Наиболее заметно их воздействие на окружающую среду и жизнедеятельность человека проявляется в урбанизированных и промышленно развитых районах. Первичные антропогенные аэрозоли поступают в воздух главным образом с выбросами промышленных предприятий (строительной, металлургической, химической и других отраслей), предприятий тепло- и электроэнергетики, автотранспорта. Основными источниками аэрозолей природного происхождения в городах и промышленных районах служат почва и в меньшей степени горение био-

массы [1–3, 6–8]. Вторичные аэрозоли, представляющие собой аэрозольные частицы мелкодисперсной фракции, образуются в ходе микрофизических и фотохимических процессов с участием водяного пара, органических соединений и газов-предшественников: диоксида серы, оксидов азота, аммиака, неметановых углеводородов, диметилсульфида, других газов и различных радикалов [1, 2, 6–9].

Источники первичных и вторичных городских аэрозолей, а также условия и механизмы образования аэрозольных частиц обуславливают их фракционный и химический составы. Как показали результаты наблюдений [1, 2, 6], типичное распределение по размерам городских аэрозолей описывается тремя модами: мелкодисперсной (ядра Айткена), аккумулятивной (конденсационной) и коагуляционной (крупнодисперсной), а большая часть частиц попадает в диапазон размеров 0,1–5,0 мкм. Наиболее опасными для здоровья человека являются мелкодисперсные частицы, представляющие собой гетерогенную смесь многих компонентов. В приземном слое воздуха крупных мегаполисов в составе аэрозольных частиц, как правило, присутствуют азотистая и серная кислота, аммиак, диоксид серы,

* Дина Петровна Губанова (dgubanova@mail.ru); Игорь Борисович Беликов (belikov@ifaran.ru); Николай Филиппович Еланский (n.f.elansky@mail.ru); Андрей Иванович Скороход (askorokhod@mail.ru); Наталья Евгеньевна Чубарова (natalia.chubarova@gmail.com).

окислы железа и цинка, мышьяк, свинец, углеродсодержащие соединения, кремнийсодержащие пылевые частицы, растительная пыльца и т.п. [1]. Такие частицы обладают большим временем жизни (до нескольких недель) и изменяющимися в пространстве и времени свойствами, которые определяются выбросами из различных природных и антропогенных источников, метеорологическими условиями и химическим режимом атмосферы. Также они подвержены переносу в региональном и глобальном масштабах, что усиливает их негативное экологическое воздействие.

Поэтому представляет большой интерес исследование закономерностей пространственной и временной изменчивости параметров аэрозольных частиц в воздушном бассейне городов и урбанизированных районах в зависимости от изменений газового состава атмосферы и метеорологических условий. В настоящей статье исследуются особенности временной изменчивости концентрации аэрозольных частиц размером менее 2,5 мкм ($PM_{2,5}$) в атмосфере московского мегаполиса в сравнении с изменениями концентрации малых газовых составляющих атмосферы (МГСА) (SO_2 , NH_3 , NO , NO_2 , CO , O_3), аэрозольной оптической толщины на длине волны 500 нм (AOT_{500}), скорости ветра, температуры и влажности воздуха.

1. Методы и средства измерений

В работе использованы данные прямых непрерывных измерений концентрации атмосферных аэрозолей и МГСА, оптических характеристик атмосферы и метеорологических параметров, проводившихся в течение 2011–2013 гг. в Метеорологической обсерватории МГУ им. М.В. Ломоносова (МО МГУ) и на экологической станции ИФА РАН, расположенной на территории обсерватории.

Для наблюдений применены автоматизированный интегрированный аппаратурно-программный измерительный комплекс, описанный в [10–14]. В его составе для измерения массовой концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ использовали анализатор пыли типа TEOM 1400ab производства компании Thermo Scientific Inc. (США), принцип действия которого основан на измерении собственной частоты механической колебательной системы. По изменению частоты колебаний определяется абсолютное значение массы атмосферных аэрозолей, осаждаемых на фильтре, который входит в колебательную систему [15, 16]. Состав приборов для измерений концентраций МГСА подробно описан в [11–13].

Аэрозольную оптическую толщину регистрировали с использованием стандартной модели автоматического солнечного фотометра CIMEL CE 318-2 [17]. В Метеорологической обсерватории данный прибор применяется для проведения измерений аэрозольных свойств атмосферы в рамках международной программы AERONET с 2001 г. [17–20].

Для анализа результатов наблюдений были сформированы массивы данных концентраций аэ-

розолей $PM_{2,5}$, МГСА, AOT_{500} и метеорологических параметров (атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха, скорости и направления приземного ветра) с осреднением по интервалам 20 мин, 1 сут, 1 мес и 1 год, согласно [21].

2. Результаты и обсуждение

Суточная, сезонная и годовая изменчивость концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ в сравнении с изменчивостью концентрации МГСА

Содержание аэрозолей в приземном слое атмосферы над территорией мегаполиса зависит от процессов их образования (эмиссия, седиментация, коагуляция, фотохимические реакции и др.) и метеорологических условий, которые обуславливают пространственно-временную изменчивость и ярко выраженную внутрисуточную цикличность параметров аэрозолей. На рис. 1 представлен суточный ход массовой концентрации аэрозольных частиц $PM_{2,5}$ по данным наблюдений в МО МГУ за период 2011–2013 гг., осредненный для разных сезонов. С целью исключения влияния долговременных межгодовых вариаций концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ (о чем будет сказано ниже) анализировалось отношение разовой концентрации Q_i (за 20 мин) к среднесуточной концентрации Q_c за данные сутки.

Как видно из рисунка, эти вариации характеризуются наличием двух выраженных максимумов утром и вечером и разделяющих их периодов с пониженными значениями (в середине дня и в предутреннее время). Утренний максимум концентрации частиц $PM_{2,5}$ возникает главным образом вследствие развития температурной инверсии в предутренние часы. Днем в летнее время инверсия, за редким исключением, исчезает, возрастает интенсивное конвективное перемешивание и концентрация частиц $PM_{2,5}$ вблизи земной поверхности существенно снижается. Вечером в летний период инверсия устанавливается, как правило, в позднее время, что приводит к накоплению аэрозоля в приземном слое и образованию вечернего максимума его концентрации.

Зимой характер суточных вариаций аэрозолей $PM_{2,5}$ заметно меняется. В дневное время резко ослаблено конвективное перемешивание и температурная инверсия часто сохраняется. Это приводит к образованию протяженной по времени области высоких концентраций частиц $PM_{2,5}$ в течение всего светлого времени суток. Вечером концентрация аэрозолей снижается, а в утренние часы опять возрастает по аналогии с летним периодом. Весной и осенью, как видно из рис. 1, происходит плавный переход особенностей суточного хода от летнего к зимнему режиму и наоборот.

Характер суточных вариаций аэрозолей $PM_{2,5}$ весьма близок с выявленными в [12, 13, 22, 23] особенностями суточных вариаций для основных загрязняющих атмосферу в г. Москве МГСА, таких как NO_x , CO и SO_2 .

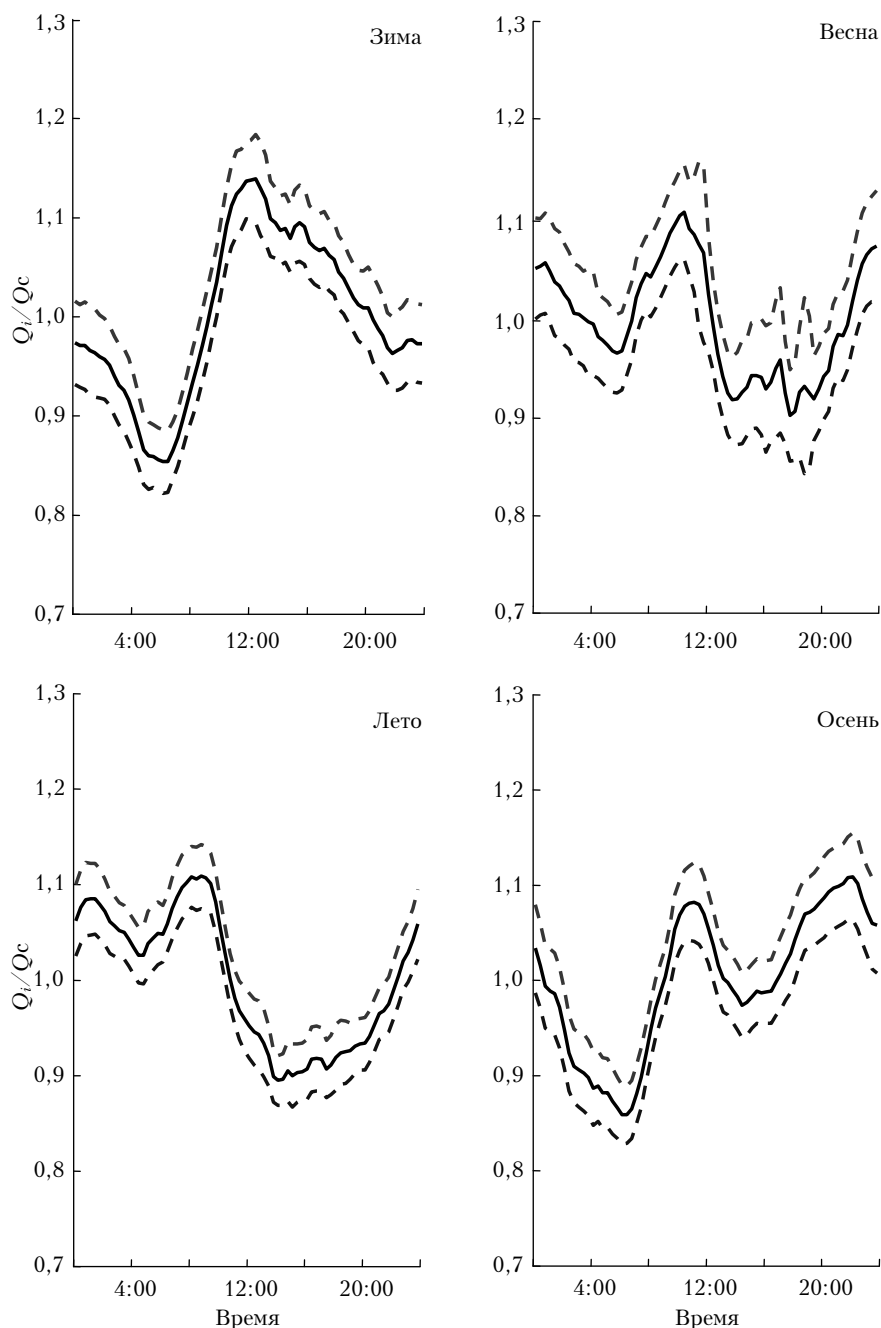


Рис. 1. Суточные вариации массовой концентрации аэрозолей $PM_{2.5}$ в различные сезоны по данным наблюдений за 2011–2013 гг. Пунктирными линиями показаны доверительные интервалы для вероятности 0,95

Это свидетельствует об аналогичном характере механизмов формирования повышенных концентраций загрязняющих МГСА и аэрозолей в мегаполисе и об общих источниках МГСА и первичных аэрозолей. Основной вклад в эмиссии загрязняющих соединений в г. Москве вносят автомобильный транспорт, промышленные и теплоэнергетические предприятия. Наблюдаемое в весенне-летний период наибольшее сходство характера суточного хода концентраций CO , NO_x , SO_2 и частиц $PM_{2.5}$ может быть связано с возрастанием в это время года интенсивности их источников. Кроме того, в этот пе-

риод активируются процессы образования вторичных аэрозолей из газов-предшественников: NO_x , SO , NH_3 , летучих органических соединений и первичных аэрозольных частиц.

Сопоставление концентраций аэрозолей $PM_{2.5}$ с данными измерений концентрации аэрозолей PM_{10} на сети станций ГПБУ «Мосэкомониторинг» в г. Москве [24, 25] показало, что на качественном уровне картина изменения среднесуточной концентрации частиц $PM_{2.5}$ в летнее время аналогична среднесуточному ходу концентрации частиц PM_{10} . Однако ночной минимум концентрации частиц

PM_{2,5}, в отличие от PM₁₀, выражен слабее по отношению к послеполуденному минимуму. Это связано с тем, что в ночные часы сток мелких частиц PM_{2,5} на подстилающую поверхность происходит менее интенсивно, чем более крупных и тяжелых частиц PM₁₀.

На рис. 2, а показаны диаграммы среднемесячных значений концентрации частиц PM_{2,5}. Видно, что общий средний уровень концентраций повысился с 2011 по 2013 г. Это может свидетельствовать о возрастании антропогенной нагрузки (в частности, увеличении потока автотранспорта). Для указанных лет сезонные вариации заметно различаются. Но общим остается повышенное содержание аэрозолей PM_{2,5} в приземном воздухе с мая по август и пониженное — с октября по март. Средний уровень концентрации частиц PM_{2,5} не претерпевал сильных скачков от сезона к сезону

и в течение всех месяцев наблюдений колебался в диапазоне (20 ± 10) мкг/м³. Наибольшая амплитуда сезонного хода отмечается в 2011 г. (летом массовая концентрация аэрозолей PM_{2,5} в 2–3 раза больше, чем в холодное время года). Нехарактерное для среднего сезонного хода резкое возрастание концентрации частиц PM_{2,5} в феврале и декабре 2012 г. совпадает с периодами продолжительного похолодания. В такие периоды московские ТЭЦ используют для отопления зданий, кроме природного газа, резервное жидкое топливо, что сопровождается повышением содержания в воздухе SO₂ [13] и, очевидно, частиц PM_{2,5}. Сравнительный анализ значений массовой концентрации аэрозолей PM_{2,5} в приземном слое атмосферы г. Москвы и ряда других крупных мегаполисов мира показал, что эти величины сопоставимы (от одного до нескольких десятков мкг/м³) [26–29].

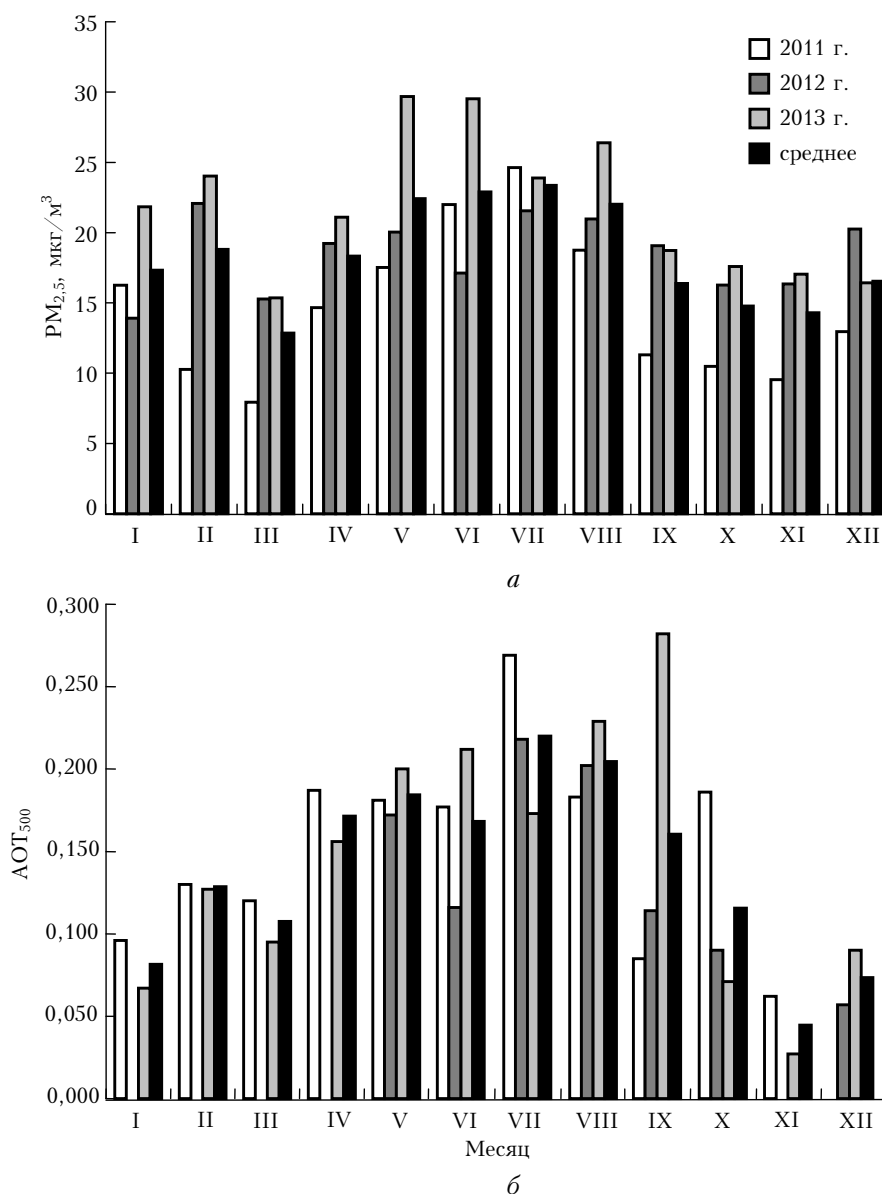


Рис. 2. Годовой ход среднемесячных значений массовой концентрации аэрозолей PM_{2,5} и AOT₅₀₀ за 2011–2013 гг.

При исследовании особенностей сезонных изменений концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ представляет интерес их сопоставление с сезонным ходом тех МГСА, которые принимают участие в фотохимических процессах, приводящих к образованию вторичных аэрозольных частиц, в частности SO_2 и NH_3 . Характер их сезонных вариаций за период наблюдений 2011–2013 гг. оказался близок к типичному среднему сезонному ходу за более чем десятилетние исследования в МО МГУ [12, 13], что обусловлено отсутствием в эти годы погодных аномалий, например таких, как в 2002 и 2010 гг. (подробный анализ особенностей сезонного хода ряда МГСА для этих лет представлен в работах [11–13]). В частности, для NH_3 , как показано в [11], характерно ярко выраженное увеличение значений среднесуточной концентрации в теплое время года (апрель–август). Основные источники антропогенного NH_3 в московском мегаполисе – это транспорт и в меньшей степени промышленные предприятия. Различные бытовые химические вещества, мусорные свалки и сточные воды также способствуют поступлению в атмосферу первичных аэрозолей. Кроме того, аэрозольные частицы мелких фракций, содержащие NH_3 , могут переноситься в столицу из прилегающих пригородных и сельских районов, где источниками NH_3 являются болотистые местности Подмосковья, животноводческие фермы и химические удобрения, применяемые на сельскохозяйственных землях. Интенсивность данных источников возрастает в теплое время года. В таких условиях активизируются атмосферные фотохимические процессы с участием NH_3 , приводящие к формированию мелкодисперсных вторичных аэрозольных частиц, которые вносят вклад в увеличение массовой концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ в весенне-летний период.

Концентрация SO_2 , согласно данным [11–13], характеризуется повышенными значениями в зимнее время (январь–февраль), что может быть связано с увеличением активности городских антропогенных источников аэрозолей в холодный период (в частности, предприятий топливно-энергетического комплекса). Однако анализ годового хода среднемесячных концентраций SO_2 и частиц $PM_{2,5}$ не выявил заметной связи этих составляющих атмосферы ни в холодное время года, ни в теплый весенне-летний период. Это подтверждают и результаты корреляционного анализа среднемесячных значений концентрации аэрозольных частиц $PM_{2,5}$ и SO_2 , представленные в табл. 1. Возможно, сказываются эпизодические залповые выбросы SO_2 в холодное время года, когда для поддержания нормальной работы системы отопления временами используется жидкое топливо.

Для некоторых других МГСА обнаружена устойчивая значимая корреляция с аэрозолями $PM_{2,5}$ (табл. 1). Высокие значения коэффициентов корреляции между концентрациями частиц $PM_{2,5}$ и CO характерны для всех месяцев года. В течение многих месяцев хорошо коррелируют значения концентраций частиц $PM_{2,5}$ и NO_2 . Это говорит о том, что состав выбросов от основных антропогенных ис-

точников указанных газовых примесей и первичных аэрозольных частиц (транспорт, ТЭЦ, промышленность) мало зависит от сезона. Следует подчеркнуть, что в 2011–2013 гг. отмечался некоторый рост среднегодовых значений концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ и большинства МГСА, хотя вариации последних за более длительное время измерений (2002–2014 гг.) демонстрируют небольшой отрицательный тренд [11, 13]. Этот рост совпадает по времени с восстановлением промышленного производства и активности автомобильных перевозок в московском мегаполисе после кризиса 2008–2009 гг.

Таблица 1
Средние за 2011–2013 гг. значения коэффициентов корреляции между концентрацией $PM_{2,5}$ и концентрацией некоторых МГСА

Месяц	Газ					
	SO_2	NH_3	O_3	NO	NO_2	CO
Январь	0,61	0,83	-0,60	0,76	0,61	0,83
Февраль	0,38	0,25	-0,53	0,65	0,72	0,76
Март	0,34	0,76	-0,35	0,44	0,57	0,69
Апрель	0,17	0,71	0,05	0,42	0,62	0,60
Май	0,35	0,77	-0,09	0,37	0,52	0,59
Июнь	0,17	0,80	-0,10	0,61	0,73	0,82
Июль	-0,18	0,70	0,25	0,33	0,73	0,70
Август	0,28	0,80	0,43	0,28	0,70	0,60
Сентябрь	-0,06	0,71	-0,06	0,37	0,71	0,62
Октябрь	0,12	0,45	-0,26	0,44	0,36	0,61
Ноябрь	0,08	0,23	-0,46	0,35	0,13	0,59
Декабрь	0,18	0,41	-0,58	0,55	0,44	0,70

Характер годового хода массовой концентрации частиц $PM_{2,5}$ в приземном слое атмосферы г. Москвы качественно соответствует характеру изменений концентрации частиц PM_{10} , описанному в [21], однако несколько отличается от закономерностей временной изменчивости содержания фоновое субмикронного аэрозоля, ранее установленных в [30, 31]. Это обусловлено в основном существенной ролью региональных источников в аэрозольном загрязнении атмосферы.

Значения наблюдаемой концентрации частиц PM_{10} в 1,5–2 раза выше, чем значения концентрации частиц $PM_{2,5}$, что объясняется существенным вкладом в общую массу более крупных и тяжелых аэрозольных частиц (диаметром 2,5–10 мкм). Для Москвы характерной особенностью является повышенное содержание в теплое время года как частиц $PM_{2,5}$, так и частиц PM_{10} . Но в отличие от аэрозолей PM_{10} , для которых годовой максимум чаще всего наблюдается в апреле, для аэрозолей $PM_{2,5}$ максимум охватывает длительный период с апреля по август. Такая размытость максимума частиц $PM_{2,5}$ может объясняться несколькими аспектами. В Московском регионе подстилающая поверхность – один из важнейших факторов, обуславливающих аэрозольное загрязнение приземного слоя атмосферы. После схода снежного покрова (как правило, в апреле) и до появления растительности в атмосферу попадает большое количество частиц, накопившихся за зиму в снеге, а также выветривающихся из почвы. Летний период в г. Москве характеризуется повышением химической активности

атмосферы и достаточно часто повторяющимися застойными синоптическими ситуациями, что приводит к образованию вторичных аэрозолей и накоплению загрязняющих примесей в приземном слое атмосферы. Косвенный признак высокой активности процессов образования вторичных аэрозолей из газов-предшественников в июле–августе — ослабленная корреляция частиц $PM_{2,5}$ с основными продуктами сжигания топлива (NO , CO), повышенная корреляция — с NH_3 и смена отрицательной корреляции частиц $PM_{2,5}$ с O_3 на положительную. Как было показано в [32], именно в эти два месяца в российских городах, расположенных на широте г. Москвы, окислительные свойства атмосферы наиболее ярко выражены, что, в частности, приводит к преобладанию фотохимического образования O_3 над его разрушением.

Наличие в сезонном ходе концентрации частиц $PM_{2,5}$ второго максимума, приходящегося на зимний период, вероятно, связано с действием антропогенных источников, интенсивность которых возрастает в холодное время года. Окислительные свойства атмосферы в это время из-за низкой температуры воздуха и малой освещенности сильно ослаблены, процессы разрушения O_3 преобладают (максимальная отрицательная корреляция концентрации частиц $PM_{2,5}$ с концентрацией O_3), а образования вторичных аэрозолей практически не происходит.

Сравнение концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ с AOT_{500}

Для сравнений выбирались среднесуточные величины концентрации частиц $PM_{2,5}$ и AOT_{500} . По погодным условиям число дней с наблюдениями AOT_{500} варьируется от нуля до 27–30 дней в месяц при количестве измерений в сутки до 50–55. На рис. 2, б показан годовой ход среднесуточных значений AOT_{500} за 2011–2013 гг. наблюдений в МО МГУ. Многолетнее типичное сезонное изменение среднесуточных значений AOT_{500} [33] на качественном уровне схоже с годовым ходом среднесуточных значений массовой концентрации частиц $PM_{2,5}$ (см. рис. 2, а). Ряды данных за 2011 и 2012 гг. характеризуются неявно выраженными максимумами весной и летом, что соответствует многолетним закономерностям изменения среднесуточной AOT_{500} [18, 33]. В большинстве случаев, сезонный ход AOT_{500} имеет двойной весенний и летний максимумы, что может быть обусловлено преобладанием в атмосфере в теплый период мелкодисперсных аэрозольных частиц. Весенний максимум согласуется с климатическими данными, свойственными Московскому региону. В это время года подстилающая поверхность уже освобождается от снега, но еще не покрыта травяным покровом, способствующим за счет удерживания частиц почвы ослаблению их выветривания в приземный слой атмосферы. Однако наиболее сильно бывает выражен летний максимум AOT_{500} (июль–август), что обусловлено засушливой погодой, способствующей возникновению пожаров, а также более активным формированием

вторичных аэрозолей. Высокое среднесуточное значение AOT_{500} в сентябре 2013 г. нехарактерно для этого времени года. Оно получено путем осреднения всего по пяти дням наблюдений, когда погодные условия были близки к летним. В зимний период низкие значения AOT_{500} объясняются преобладанием относительно чистого воздуха из северных и западных регионов.

Анализ корреляционных связей среднесуточных и среднесуточных значений массовой концентрации частиц $PM_{2,5}$ и AOT_{500} по данным наблюдений за период 2011–2013 гг. выявил весьма значительную дисперсию коэффициента корреляции как от месяца к месяцу, так и от года к году, не позволяющую установить закономерности. Однако связь между среднесуточными значениями приземной концентрации аэрозольных частиц $PM_{2,5}$ и величинами AOT_{500} в теплый сезон (с апреля по август), когда в пограничном слое происходит активное конвективное перемешивание, достаточно отчетливо выражена и статистически значима (см. табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между концентрацией $PM_{2,5}$ и AOT_{500}			
Месяц	2011	2012	2013
Апрель	0,74 (14)	—	0,83 (15)
Май	0,83 (17)	0,65 (8)	0,80 (19)
Июнь	0,79 (24)	0,60 (21)	0,87 (8)
Июль	0,76 (27)	0,79 (22)	0,68 (13)
Август	0,82 (18)	0,79 (16)	0,61 (22)

Примечание. В скобках приведено количество значений; прочерк означает отсутствие данных.

Влияние метеорологических условий на концентрацию аэрозолей $PM_{2,5}$ и AOT_{500}

Метеорологические процессы определяют перенос примесей от источников, их перемешивание и накопление в приземном слое атмосферы, влияют на образование аэрозольных частиц и их физико-химическую трансформацию. Измерения концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ и AOT_{500} на одной станции, даже продолжительные, очевидно, не позволяют сколько-нибудь полно исследовать сложный механизм такого влияния. Но можно установить степень и характер зависимости концентрации частиц $PM_{2,5}$ и AOT_{500} от параметров, определяющих состояние приземного слоя воздуха: скорости ветра, температуры и влажности воздуха.

Рис. 3 демонстрирует значимую связь между среднесуточными значениями концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$, AOT_{500} и горизонтальной скоростью ветра. Наиболее высокие концентрации частиц $PM_{2,5}$ и AOT_{500} наблюдаются при малых скоростях ветра. Закономерно, что скорость ветра играет существенную роль для приземных концентраций аэрозолей, чем для AOT_{500} , за счет того, что в последнем случае определенным вкладом может давать высотный перенос аэрозоля из других регионов.

Поэтому для AOT_{500} зависимость прослеживается только при очень больших значениях скорости ветра, когда резко уменьшается влияние приземных источников аэрозоля. Сравнительный анализ влияния скорости ветра на изменение концентрации частиц $PM_{2,5}$ и основных МГСА антропогенного происхождения в атмосфере столичного мегаполиса [13, 34] показывает их схожие характерные особенности. Это косвенно подтверждает подобие причин формирования повышенных концентраций загрязняющих МГСА и аэрозолей в мегаполисе.

Зависимость концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ и AOT_{500} от температуры (рис. 3, в, г) показывает увеличение количества и массы частиц с ее повышением, что свидетельствует о благоприятных условиях образования вторичных мелкодисперсных аэрозолей при высоких температурах, наблюдающихся в теплый период года. При этом, как и в случае со скоростью ветра, зависимость от температуры в большей степени выражена для концентрации приземных аэрозолей, чем для общего содержания аэрозолей в столбе атмосферы. Важно подчеркнуть,

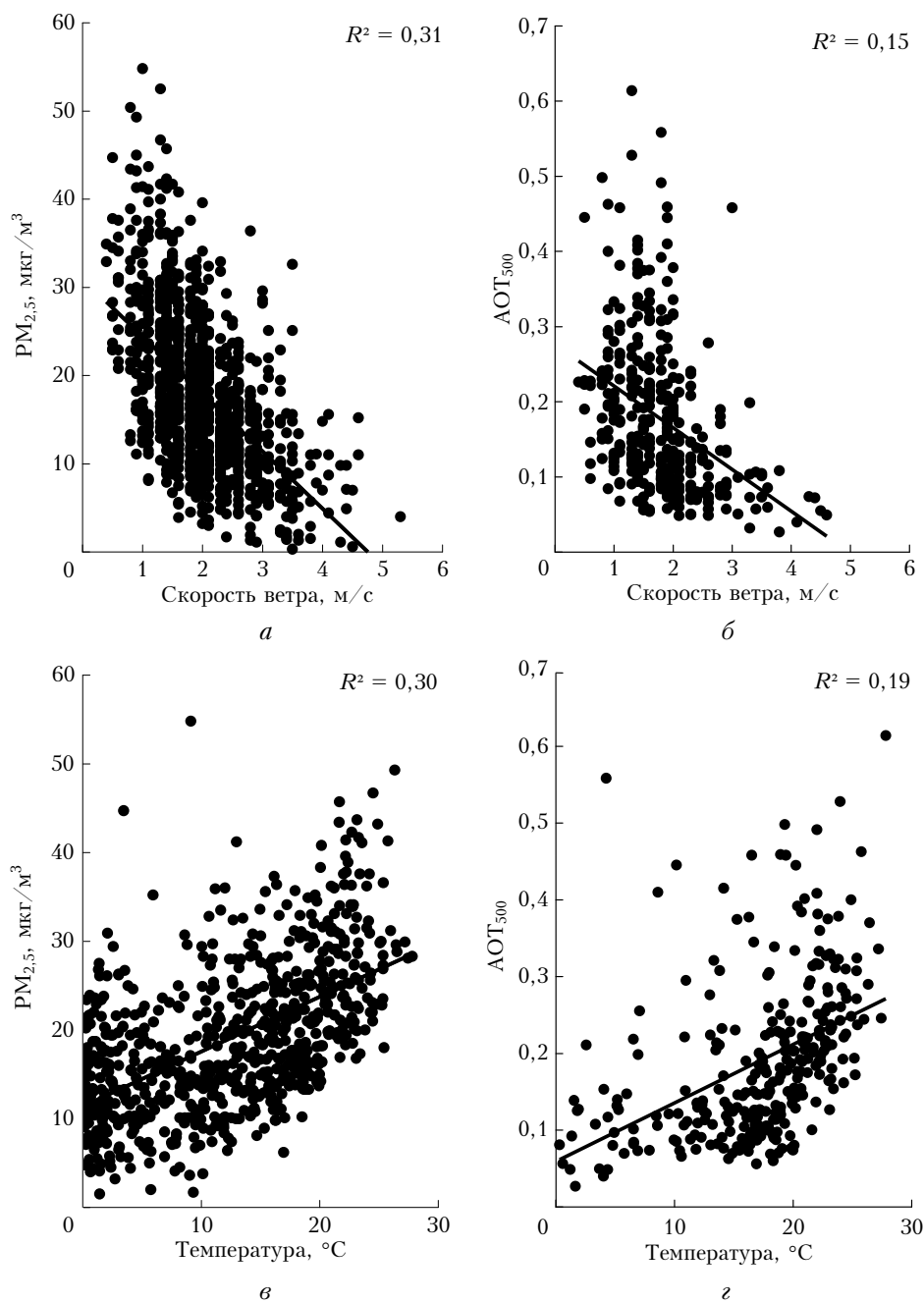


Рис. 3. Зависимость среднесуточных значений массовой концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ и AOT_{500} от среднесуточной горизонтальной скорости ветра (а, б) и среднесуточной температуры воздуха (в, г)

что имеющихся данных недостаточно для того, чтобы разделить собственно влияние температуры, ведущее к образованию вторичных аэрозолей, от сезонных процессов, связанных с атмосферным переносом и поступлением аэрозолей от земной поверхности на более высокие уровни благодаря конвективному перемешиванию. Очевидно, свой вклад в вариации содержания мелкодисперсных аэрозолей над Москвой вносят все перечисленные процессы.

Несмотря на то, что с увеличением относительной влажности воздуха процессы аэрозолеобразования в атмосфере протекают интенсивнее [1, 2] и способствуют росту концентрации аэрозольных

частиц, по наблюдениям 2011–2013 гг. не установлена сколько-нибудь значимая связь между среднесуточными значениями концентрации частиц $PM_{2,5}$ и относительной влажности воздуха (для теплого периода $R^2 = 0,01$).

На рис. 4 приведены зависимости между среднесуточными значениями приземной концентрации аэрозольных частиц $PM_{2,5}$ и AOT_{500} в различные сезоны.

Как видно из рисунка, связь между этими двумя характеристиками наименее ярко выражена зимой, что может быть обусловлено локализацией загрязнений в приземном слое. В летний и в некоторой

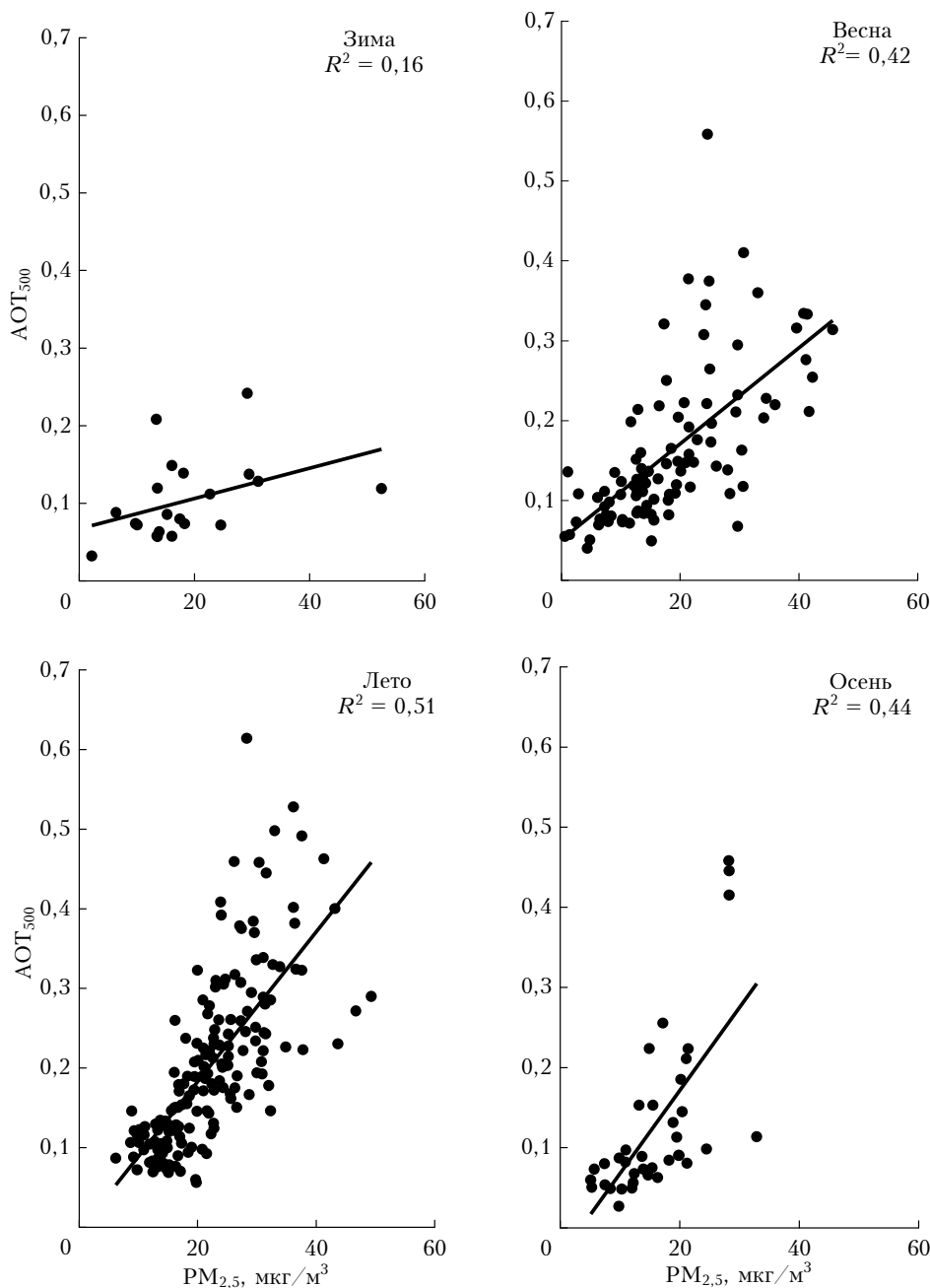


Рис. 4. Взаимозависимость среднесуточных значений приземной концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ и AOT_{500} в различные сезоны

мере весенний периоды взаимозависимость концентрации частиц $PM_{2,5}$ и AOT_{500} становится более заметной и статистически значимой ($R^2 = 0,51$).

Подобные сезонные особенности могут быть связаны с меняющимся в течение года высотным распределением аэрозоля, а также с сезонными особенностями процессов перемешивания в пограничном слое атмосферы.

Заключение

Анализ вариаций концентрации аэрозольных частиц размером не более 2,5 мкм и некоторых малых газовых составляющих атмосферы в приземном слое воздуха столичного мегаполиса по данным наблюдений в МО МГУ за 2011–2013 гг. показал, что годовой ход и межгодовая изменчивость массовой концентрации частиц $PM_{2,5}$ и МГСА носят ярко выраженный сезонный характер, близкий к типичному среднему для мегаполисов. В частности, наибольшая массовая концентрация аэрозолей $PM_{2,5}$ наблюдается в весенне–летний период (в 2–3 раза выше, чем в холодный период года) с пиком в июле–августе. Второй максимум концентрации частиц $PM_{2,5}$ приходится на зиму (январь–февраль), что связано в основном с действием антропогенных источников, интенсивность которых возрастает в холодное время года. Результаты корреляционного анализа величин массовой концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ и газовых примесей (NH_3 , CO , NO_2) позволили выявить значимую корреляцию между ними в разные сезоны, указывающую на общие источники поступления первичных аэрозолей и загрязняющих МГСА в атмосферу столичного мегаполиса и на возможное образование мелкодисперсных аэрозолей из газов-предшественников.

Корреляционные исследования связей между концентрацией частиц $PM_{2,5}$ и AOT_{500} выявили существенные вариации коэффициентов корреляции в зависимости от сезона. Это свидетельствует как о комплексном воздействии локальных источников аэрозолей и дальнего переноса, так и о сложном режиме конвективного перемешивания в Москве. В целом стабильно высокая корреляция характерна для теплых месяцев с более активным конвективным перемешиванием.

Выявлена значимая зависимость концентрации частиц $PM_{2,5}$ и AOT_{500} от горизонтальной скорости ветра и температуры и отсутствие таковой от влажности воздуха.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 16-17-10275 «Исследование аэрозольного загрязнения в Москве») и РФФИ (проект № 16-05-00109 «Исследование возмущений газового состава приземного атмосферного воздуха над Москвой»).

1. Кондратьев К.Я., Ивлев Л.С., Кративин В.Ф. Свойства, процессы образования и последствия воздействия атмосферного аэрозоля: от нано- до глобальных масштабов. СПб.: ВВМ, 2007. 860 с.
2. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2006. 1232 p.

3. Ивлев Л.С. Начала физики погодо- и климатообразования. Ч. 1. Т. 2. Влияние аэродисперсных систем на динамические и другие климатообразующие процессы в атмосфере. Природные и техногенные аэрозоли. СПб.: ВВМ, 2009. 285 с.
4. Гинзбург А.С., Губанова Д.П., Минашкин В.М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Рос. хим. ж. 2008. Т. LII, № 5. С. 112–119.
5. Губанова Д.П. Роль углеродсодержащих и сульфатных аэрозолей в формировании и изменении климата // Восьмые Петряновские чтения. Москва, 28–30 июня 2011 г.: сб. науч. тр. М.: МГИУ, 2011. С. 210–243.
6. Pandis S.N., Wexler A.S., Seinfeld J.H. Dynamics of tropospheric aerosols // J. Phys. Chem. 1995. V. 99. P. 9646–9659.
7. Райсм П. Аэрозоли. Введение в теорию. М.: Мир, 1987. 279 с.
8. Meszaros E. Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry. Budapest: Akademia Kiado, 1999. 308 p.
9. Barth M.C., Rasch P.J., Kiehl J.T., Benkovitz C.M., Schwartz S.E. Sulfur chemistry in the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model: Description, evaluation, features, and sensitivity to aqueous chemistry // J. Geophys. Res. D. 2000. V. 105, N 1. P. 1387–1415.
10. Метеорологическая обсерватория МГУ. Химия атмосферного воздуха [Электронный ресурс]. URL: <http://www.momsu.ru/eco.html> (дата обращения: 16.02.2017).
11. Беликов И.Б., Горбаренко Е.В., Еремина И.Д., Жданова Е.Ю., Константинов П.И., Корнева И.А., Локощенко М.А., Незваль Е.И., Скороход А.И., Сократов С.А., Чубарова Н.Е., Шиловцева О.А., Полохов А.А., Горлова И.Д., Селиверстов Ю.Г., Гребенников П.Б. Эколого-климатические характеристики атмосферы в 2013 г. по данным метеорологической обсерватории МГУ / под ред. Н.Е. Чубаровой. М.: МАКС Пресс, 2014. 168 с.
12. Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Беликов И.Б., Скороход А.И., Шумский Р.А. Изменчивость газовых примесей в приземном слое атмосферы Москвы // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2007. Т. 43, № 2. С. 1–14.
13. Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Трифанова А.В., Беликов И.Б., Скороход А.И. О содержании малых газовых примесей в приземном слое атмосферы над Москвой // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2015. Т. 51, № 1. С. 39–51.
14. Состав атмосферы над Северной Евразией: эксперименты TROICA [Электронный ресурс]. URL: <http://ifaran.ru/troica/biblio/troica-ru.pdf> (дата обращения: 12.10.2016).
15. Thermo Scientific Ambient Particulate Monitor. TEOM® 1400ab. Product Specifications [Electronic resource]. URL: <http://www.thermo.com/air> (last access: 22.09.2016).
16. Allen G., Sioutas C., Koutrakis P., Reiss R., Lurmann F.W., Roberts P.T. Evaluation of the TEOM method for measurement of ambient particulate mass in urban areas // J. Air Waste Manage. Assoc. 1997. V. 47. P. 682–689.
17. Chubarova N., Poliukhov A., Gorlova I. 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 NO_2 correction // Atmos. Meas. Tech. 2016. V. 9, N 2. P. 313–334.
18. 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 // *Geography, Environment, Sustainability*. 2011. V. 4, N 1. P. 19–32.
19. *Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanré D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A.* AERONET – a federated instrument network and data archive for aerosol characterization // *Remote Sens. Environ.* 1998. N 66. P. 1–16.
 20. *Smirnov A., Holben B.N., Eck T.F., Dubovik O., Slutsker I.* Cloud-screening and quality control algorithms for the AERONET database // *Remote Sens. Environ.* 2000. N 73. P. 337–349.
 21. РД 52.04.667-2005. Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению и содержанию. М.: Росгидромет, 2006. 35 с.
 22. *Трефилова А.В., Артамонова М.С., Кудерина Т.М., Губанова Д.П., Давыдов К.А., Иорданский М.А., Гречко Е.И., Минашкин В.М.* Химический состав и микрофизические характеристики аэрозоля г. Москвы и Подмосковья в июне 2009 г. и на пике пожаров 2010 г. // *Геофизические процессы и биосфера*. 2012. Т. 11, № 4. С. 65–82.
 23. *Ракитин В.С., Фокеева Е.В., Гречко Е.И., Джола А.В., Кузнецов Р.Д.* Вариации содержания окиси углерода в атмосфере московского мегаполиса // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана*. 2011. Т. 47, № 1. С. 64–72.
 24. *Глазкова А.А., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Семутникова Е.Г.* Суточный ход концентрации аэрозоля (PM₁₀) летом в Московском регионе // *Оптика атмосфер. и океана*. 2012. Т. 25, № 6. С. 495–500.
 25. *Кузнецова И.Н., Глазкова А.А., Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Архангельская А.А., Звягинцев А.М., Семутникова Е.Г., Захарова П.В., Лезина Е.А.* Сезонная и суточная изменчивость концентраций взвешенных частиц в приземном воздухе жилых районов Москвы // *Оптика атмосфер. и океана*. 2014. Т. 27, № 6. С. 473–482.
 26. *Querola X., Alastuey A., Rodriguez S., Plana F., Ruiz C.R., Cots N., Massague G., Puig O.* PM₁₀ and PM_{2.5} source apportionment in the Barcelona Metropolitan area, Catalonia, Spain // *Atmos. Environ.* 2001. V. 35. P. 6407–6419.
 27. *Hains J.C., Chen L.-W.A., Taubman B.F., Doddridge B.G., Dickerson R.R.* A side-by-side comparison of filter-based PM_{2.5} measurements at a suburban site: A closure study // *Atmos. Environ.* 2007. V. 41. P. 6167–6184.
 28. *Steinberga I.* Variations of particulate matter concentrations and particle-associated substances in Latvia // *Environ. Clim. Technol.* 2011. V. 7. P. 113–118.
 29. *Gotschi T., Oglesby L., Mathys P., Monn C., Mannelis N., Koistinen K., Jantunen M., Hanninen O., Polanska L., Kunzli N.* Comparison of black smoke and PM_{2.5} levels in indoor and outdoor environments of four European cities // *Environ. Sci. Technol.* 2002. V. 36. P. 1191–1197.
 30. *Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А., Сидоров В.Н.* Исследование долгопериодной временной изменчивости концентрации субмикронного аэрозоля // *Оптика атмосфер. и океана*. 1998. Т. 11, № 6. С. 613–614.
 31. *Свириденков М.А., Сидоров В.Н., Горчаков Г.И.* О временной изменчивости содержания фоновых аэрозолей в приземном слое // *Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана*. 1983. Т. 19, № 11. С. 1226–1231.
 32. *Elansky N.F., Lavrova O.V., Skorokhod A.I., Belikov I.B.* Trace gases in the atmosphere over Russian cities // *Atmos. Environ.* 2016. V. 143. P. 108–119.
 33. *Чубарова Н.Е., Незваль Е.И., Беликов И.Б., Горбаренко Е.В., Еремич И.Д., Жданова Е.Ю., Корнева И.А., Константинов П.И., Локощенко М.А., Скороход А.И., Шиловцева О.А.* Климатические и экологические характеристики московского мегаполиса за 60 лет по данным Метеорологической обсерватории МГУ // *Метеорол. и гидрол.* 2014. № 9. С. 49–64.
 34. *Локощенко М.А., Еланский Н.Ф., Трифанова А.В.* Влияние метеорологических условий на загрязнение воздуха в Москве // *Вестн. РАН*. 2014. № 1. С. 64–67.

D.P. Gubanova, I.B. Belikov, N.F. Elansky, A.I. Skorokhod, N.E. Chubarova. **Variability of PM_{2.5} surface concentrations in Moscow according to MSU meteorological observatory data.**

Temporal variability of PM_{2.5} surface concentrations in Moscow and its dependence on other atmospheric parameters, such as trace gas concentrations, aerosol optical thickness (AOT), surface air temperature, humidity, and wind speed have been considered. Data rows of PM_{2.5} and SO₂, NH₃, NO_x, CO, and O₃ obtained during continuous measurements in 2011–2013 have been analyzed. Daily and seasonal variations in PM_{2.5} and trace gas concentrations as well as correlations between them have been studied. The variability of PM_{2.5} concentration has been considered in relation to trace gases participating in atmospheric aerosol formation and to meteorological parameters. Data on PM_{2.5} surface concentrations have been compared with aerosol optical depth (AOT₅₀₀) measured at the same site.