

## Изучение влияния динамических и термических характеристик пограничного слоя атмосферы на загрязнение атмосферного воздуха Московского мегаполиса

К. В. Родина,<sup>\*</sup> Е. Г. Семутникова<sup>†</sup>

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
физический факультет, кафедра физики атмосферы  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2*

(Поступила в редакцию 31.01.2021; подписана в печать 20.05.2021)

В данной статье основное внимание уделено оценке влияния природных пожаров и неблагоприятных метеорологических условий на загрязнение воздуха в городе Москве, детально рассматривается случай аэрозольного загрязнения задымленной атмосферы московского региона в июле 2016 г. Основными индикаторами горения, исследуемыми в данной работе, являются взвешенные частицы PM10 и PM2.5. Представлены расчеты основных статистических характеристик концентраций PM10 и PM2.5: среднее значение, медиана и мода, коэффициенты парной корреляции отдельно для PM10 и PM2.5 между разными станциями, так и между PM10 и PM2.5 на одной станции для периода всего 2016 и 2018 гг., так и для периода задымления в июле 2016 г. и периода с неблагоприятными метеорологическими условиями (НМУ) в сентябре 2018 г. Проанализирован суточный ход при задымлении в сравнении с типичным ходом в теплый период и в условиях НМУ. На основе внутрисуточной динамики концентраций PM10 и PM2.5 в июле 2016 г. и в сентябре 2018 г. рассмотрена зависимость загрязнения от термической стратификации атмосферного пограничного слоя (АПС). Проведен анализ зависимости концентраций аэрозолей от скорости ветра в АПС.

PACS: 92.60.Mt

УДК: 3937

Ключевые слова: мегаполис, инверсия, слабое рассеивание, взвешенные частицы, пограничный слой.

### ВВЕДЕНИЕ

Атмосфера Земли — это естественная среда обитания человечества и всей биосферы Земли. Чистый атмосферный воздух является непреложным условием для здоровой жизни. Многие важнейшие виды деятельности человека, связанные с социально-экономическим развитием, приводят к загрязнению воздушного бассейна среды обитания большинства населения [1].

Проблема чистоты атмосферы не является для нас чем-то новым. Данное понятие возникло вместе с появлением промышленности, использующей для своей работы уголь, а затем нефть. Стремительный рост численности человечества и его научно-технической вооружённости в корне изменили ситуацию на нашей планете. Значительный процент населения проживает на территориях, где загрязнение атмосферного воздуха достигает уровней, которые приводят к негативным последствиям для здоровья.

Правительством Российской Федерации разрабатываются проекты об охране атмосферного воздуха. Они периодически пересматриваются с учетом новых требований к его качеству и поступления новых данных о токсичности и поведении загрязняющих веществ в воздушном бассейне. Улучшение качества воздуха на территории страны имеет важное социально-экономическое значение [2].

Загрязнение атмосферы имеет природное или антропогенное происхождение. К наиболее значимым антропогенным источникам относятся выбросы при сжигании топлива автотранспортом и для удовлетворения энергетических потребностей, а также выбросы промышленных предприятий. К основным природным источникам в условиях города относится пыление с подстилающей поверхности, дальний перенос, в том числе от природных пожаров, фотохимические процессы [3].

Загрязнение воздуха (в т.ч. в городах) определяется не только объемом поступления загрязняющих веществ от антропогенных и природных источников, но и способностью атмосферы к рассеиванию, т.е. метеорологическими условиями. Среди основных факторов, которые могут приводить к существенному росту или снижению загрязнения относятся термическая стратификация атмосферы и динамические характеристики пограничного слоя атмосферы [4].

В данной работе основное внимание уделено оценке влияния природных пожаров на загрязнение воздуха в городе Москве, детально рассматривается случай аэрозольного загрязнения задымленной атмосферы московского региона в июле 2016 г.

### 1. ВЗВЕШЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ

Основными индикаторами горения, исследуемыми в данной работе, являются взвешенные частицы PM10 и PM2.5.

Взвешенные частицы — твёрдые или жидкие частицы, представляющие смесь пыли, золы, сажи, дыма, сульфатов, нитратов и др. веществ и находящиеся

\*E-mail: RodinaKV@eco.mos.ru

†E-mail: SemutnikovaEG@mos.ru

во взвешенном состоянии в воздухе. Взвешенные вещества состоят из частиц разного химического происхождения и состава, поэтому для удобств классификации и определения вреда, наносимого взвешенными веществами, их обычно делят на основе размера фракции частиц. Под  $PM_{10}$  обычно понимаются частицы с диаметром менее 10 мкм.  $PM_{2.5}$  используется в свою очередь, для частиц с диаметром менее 2.5 мкм [5].

Частицы могут либо непосредственно выбрасываться в атмосферный воздух (первичные РМ), либо образовываться в атмосфере из таких газообразных прекурсоров, как двуокись серы, окислы азота, аммиак и неметановые летучие органические соединения (вторичные частицы). Первичные РМ и газообразные прекурсоры могут происходить как из искусственных (антропогенных), так и из природных (неантропогенных) источников [6, 7].

Типичными источниками образования мелкодисперсных взвешенных частиц  $PM_{2.5}$  являются любые процессы горения, а также дизельные двигатели. Мелкие взвешенные частицы длительное время (недели) присутствуют в воздухе и являются носителями сульфатов, нитратов (вследствие контакта с диоксидами азота и серы), тяжелых металлов, полициклических соединений и других химических соединений. Частицы с размером меньше микрона могут образовываться при конденсации металлов или органических веществ, испаряющихся в процессе высокотемпературного горения [8].

Данные, касающиеся РМ и общественного здравоохранения, неизменно указывают на вредное воздействие на здоровье при величинах экспозиции, которым подвергаются жители городов во всем мире, как в развитых, так и в развивающихся странах.  $PM_{10}$  могут свободно проникать в легкие и накапливаться в них в течение всей жизни [9]. С грубой фракцией  $PM_{10}$  (то есть с частицами размером от 2.5 до 10 мкм) связана заболеваемость дыхательных путей. Однако наиболее тесная связь между смертностью от сердечно-сосудистых заболеваний и долгосрочным воздействием РМ наблюдалась в отношении концентрации  $PM_{2.5}$  [10, 11].

В соответствии с принятыми гигиеническими нормативами в Российской Федерации для содержания  $PM_{10}$  в атмосферном воздухе устанавливается среднесуточная ПДК на уровне  $60 \text{ мкг/м}^3$ , среднегодовая ПДК — на уровне  $40 \text{ мкг/м}^3$  и разовая ПДК —  $300 \text{ мкг/м}^3$ . Для концентраций  $PM_{2.5}$  среднесуточная ПДК составляет  $35 \text{ мкг/м}^3$ , среднегодовая ПДК —  $25 \text{ мкг/м}^3$  и разовая ПДК —  $160 \text{ мкг/м}^3$  [12].

## 2. ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН НА УРОВЕНЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА

Метеорологические условия оказывают существенное влияние на перенос и рассеивание вредных примесей, поступающих в атмосферу.

Неблагоприятные метеорологические условия (НМУ) — совокупность метеорологических условий вызывающих ухудшение рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и способствующих их накоплению в приземном слое атмосферы [13]. Отмечаются в Москве в среднем от 40 до 50 дней в году. Концентрации отдельных загрязняющих веществ при НМУ, в среднем, возрастали по сравнению с обычно наблюдаемыми значениями в 1.5 – 2.2 раза.

Рост концентраций загрязняющих веществ наблюдается как при снижении скорости ветра, так и под влиянием сильного ветра, когда увеличивается пыление с подстилающей поверхности. Особенно ярко это выражено в весенний период, когда снежный покров уже сошел, а травяной еще не установился.

Самыми худшими условиями для рассеивания примесей считается наличие приземной инверсии. Инверсия температуры препятствует вертикальным перемещениям воздуха и способствует образованию дымки, тумана, смога, облаков, миражей. Инверсия сильно зависит от местных особенностей рельефа [14].

## 3. ЭПИЗОД ЗАДЫМЛЕНИЯ АТМОСФЕРЫ МОСКОВСКОГО РЕГИОНА В ИЮЛЕ 2016 Г.

Один из последних актуальных эпизодов загрязнения атмосферного воздуха при аномальном атмосферном переносе был отмечен в июле 2016 г.

В июле 2016 г. в отсутствие на ЕТР массовых пожаров в атмосфере над московским регионом отмечалась дымная мгла. В Москве мгла отмечалась в дневные часы 24, 25 и 27 июля с уменьшением горизонтальной дальности видимости до 4 км.

Причиной восточного переноса в тропосфере над Сибирью вблизи  $60^\circ \text{ с. ш.}$  в двух первых декадах июля 2016 г. было меридиональное расположение областей высокого и низкого давления, характерное для атмосферного блокирования дипольного типа — с областью высокого давления к северу от области низкого давления [15].

По данным научно-исследовательского спутника Aqua (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) были построены карты движения смога на московскую область (рис. 1).

## 4. ЭПИЗОД АНОМАЛЬНОГО ТЕПЛОГО СЕНТЯБРЯ В 2018 ГОДУ

В Центральном федеральном округе средняя температура прошедшего сентября превысила норму более чем на  $3^\circ \text{ C}$ , и он стал здесь самым теплым с 1938 г.

Данная ситуация связана с нарушением нормального распределения центров действия в атмосфере. Как известно, существует два гигантских атмосферных вихря: циркумполярный циклон — над Северным полю-

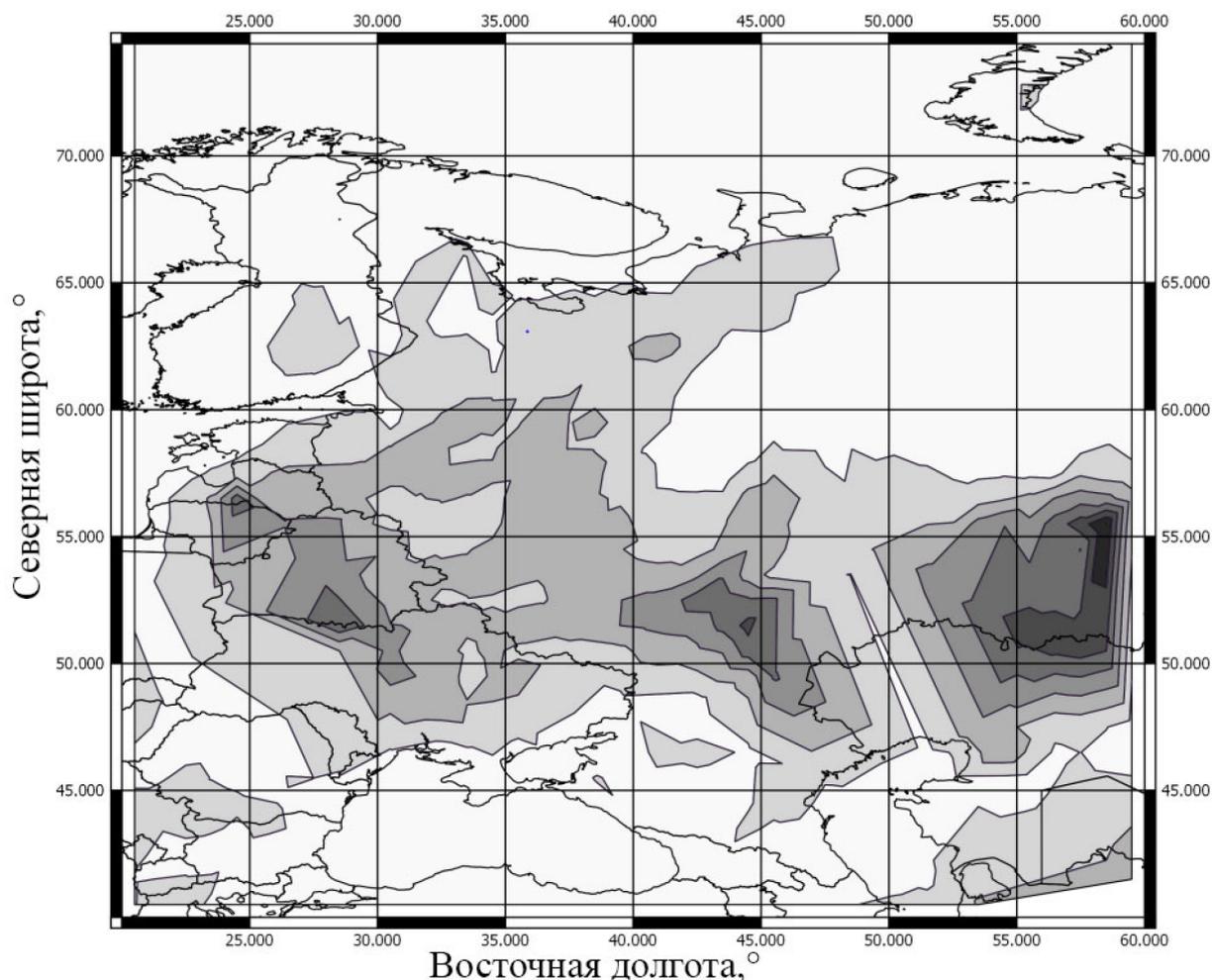


Рис. 1. Движение смога из Сибири на Московскую область 25.07.2016 г.

сом, область высокого давления — над югом. Данные объекты должны создавать некий нормальный климатический фон, однако под влиянием глобального потепления усиливаются неширотные процессы. Блокирующий антициклон находится в неподвижном состоянии не 5 – 7 суток, как положено, а 2 – 3 недели. Соответственно все циклоны, идущие с запада, вынуждены огибать его либо с севера, либо с юга. Поэтому возникает засушливая погода с южной тягой ветров и ежедневным прогревом воздуха с помощью лучистой энергии Солнца [16].

Данная ситуация привела к неблагоприятной экологической обстановке, когда были отмечены десять дней с неблагоприятными метеорологическими условиями, на рис. 2 для наглядности они выделены красным цветом. В указанные дни отмечались наличие инверсии, слабая скорость ветра, пониженная влажность и отсутствие осадков, что привело к накоплению взвешенных частиц в приземном слое атмосферы.



Рис. 2. Ход среднесуточной температуры в сентябре 2018 года

##### 5. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ О ЗАГРЯЗНЕНИИ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В МОСКВЕ

Данные о концентрациях взвешенных веществ, термических и динамических характеристиках в АПС были представлены ГПБУ «Мосэкомониторинг».

Информация об уровне загрязнения атмосферного воздуха поступает с 56-ти автоматических станций контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА). На автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы круглосуточно, в непрерывном режиме, измеряются средние двадцатиминутные концентрации 26-х химических веществ и метеорологические параметры, определяющие условия рассеивания примесей в атмосфере (скорость и направление ветра, температура, давление, влажность, вертикальная компонента скорости ветра).

С Останкинской телебашни (высотный пост) поступают данные о профиле температуры и ветра до высоты 503 м, а также давление, влажность и температура «точки росы» на приземном уровне. Функционируют два температурных профилера МТП-5, которые в режиме реального времени измеряют профили температуры и ветра и позволяют определить интенсивность вертикального перемешивания воздуха и высоту слоя перемешивания, автоматические осадкомеры [17, 18].

В работе были взяты данные с 14 станций, измеряющих концентрации РМ10, и с 12 станций, измеряющих концентрации РМ2.5, за 2016 г.; данные с 12 станций, измеряющих концентрации РМ10, и данные с 10 станций, измеряющих концентрации РМ2.5. Станции расположены в различных районах Москвы на разном удалении от центра, характеризуют различные функциональные зоны (территории вблизи автотрасс, жилые зоны, зоны вблизи промышленных предприятий).

Станции выбирались исходя из идентичности методов и периодичности измерений концентраций РМ10 и РМ2.5 (все измерения приборами ТЕОМ на основе метода микровибровесов).

Для анализа термических характеристик атмосферы использовались данные температурного профилера МТП-5, расположенного в микрорайоне Кожухово (район Косино-Ухтомский). Микроволновые температурные профилеры МТП-5 обеспечивают практически непрерывные автоматизированные измерения профилей температуры в диапазоне высот 0 – 600 м с погрешностью 0.5°C с частотой 1 раз в 20 мин [19].

## 6. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Методы обработки данных контроля загрязнения атмосферы изложены в действующем «Руководстве по контролю загрязнения атмосферы» [20].

Выполненные на автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы измерения дают возможность выявить статистические закономерности изменчивости концентраций частиц аэрозоля. В работе запланировано рассчитать основные статистические характеристики концентраций взвешенных частиц РМ10 и РМ2.5, включая средние значения, медианы, моды, коэффициенты корреляции.

## 7. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАРИАЦИЙ АЭРОЗОЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА В МОСКВЕ ЗА ПЕРИОД ЗАДЫМЛЕНИЯ И ЗА 2016 Г., А ТАКЖЕ ЗА ДНИ С НМУ В СЕНТЯБРЕ 2018 Г. И ЗА 2018 Г.

В рамках выполнения работы для каждого ряда концентраций РМ10 и РМ2.5 (исходные 20-ти минутные значения) были рассчитаны основные статистические характеристики: среднее значение, медиана и мода, рассчитаны коэффициенты парной корреляции отдельно для РМ10 и РМ2.5 между разными станциями, так и между РМ10 и РМ2.5 на одной станции для периода всего 2016 г. и всего 2018 г., так и для периода задымления в июле 2016 г. и для дней с НМУ в сентябре 2018 г. Проанализирован суточный ход.

Существенно более низкое значение моды РМ10 на всех АСКЗА, по сравнению со среднегодовыми значениями за 2016 и за 2018 гг., свидетельствует о том, что большую часть времени в городе преобладают низкие концентрации РМ10, а в повышение среднегодовой концентрации РМ10 вносят вклад отдельные эпизоды высоких загрязнений. Это также подтверждается снижением значений медианы по сравнению со среднегодовой концентрацией (рис. 3).

За период задымления наблюдалось возрастание всех основных статистических характеристик для РМ10 и РМ2.5 (мода, медиана, среднее), что наглядно видно на (рис. 2 (2.2, 2.4)): среднее значение концентраций увеличилось в 2–3 раза; медиана увеличилась в 2–4 раза; наибольший скачок в значения отмечен для моды, значения которой возросли в 2–9 раз. Более значительный рост значений медианы и моды (по сравнению со средним значением), может свидетельствовать о том, что в период задымления произошло сглаживание кривой распределения концентраций взвешенных частиц, при смещении пика кривой в сторону более высоких значений.

Следует отметить, что в период задымления снизилась изменчивость средних концентраций РМ10 и РМ2.5 по территории города в зависимости от функциональной зоны. Кроме того, в составе взвешенных частиц РМ10 возросла доля мелкой фракции с размером менее 2.5 мкм, что на фоне отсутствия существенного роста загрязнения по оксиду углерода, углеводородам, оксидам азота, является признаком переноса в Москву продуктов горения из удаленных территорий.

В дни с НМУ в сентябре 2018 г. так же как и в период задымления в 2016 г. наблюдалось возрастание всех основных статистических характеристик для РМ10 и РМ2.5 (мода, медиана, среднее) среднее значение концентраций РМ2.5 увеличилось в 1.3 раза; медиана увеличилась в 1.6 раза; мода возросла в 2 раза. Среднее значение концентраций РМ10 увеличилось в 1.6 раз; медиана увеличилась в 3 раза; мода возросла в 2.3 раза. Меньшее увеличение статистических харак-

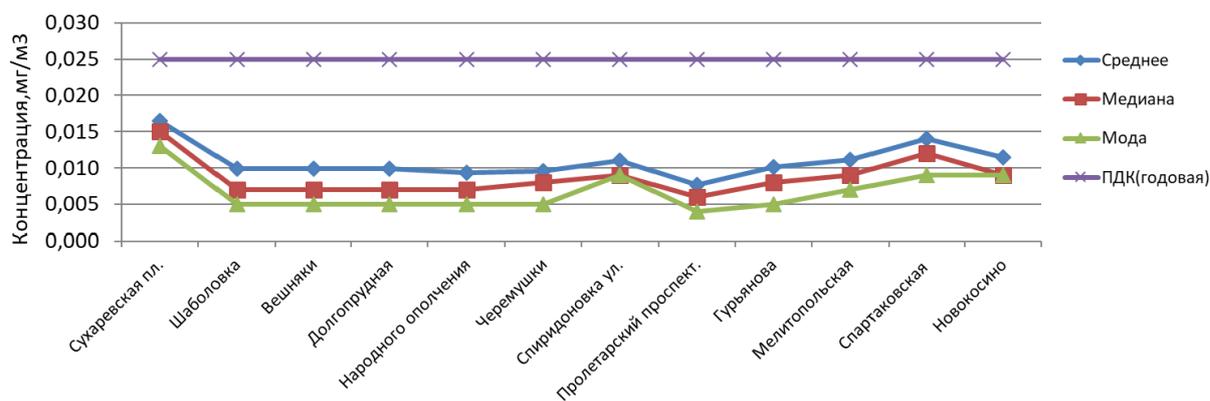


Рис. 3. Статистические характеристики PM10 за 2016 г.

теристик при сопоставлении с периодом задымления в 2016 г. говорит о не столь сильном влиянии НМУ на повышение концентраций взвешенных частиц из-за местных источников загрязнений по сравнению с ситуацией затора загрязнителей.

В период с НМУ наблюдается изменчивость средних концентраций PM10 и PM2.5 по территории города в зависимости от функциональной зоны, наибольшее увеличение отмечено на АСКЗА, расположенных рядом с автомагистралями (Сухаревская пл., МКАД, Спартаковская пл.). Рост остальных загрязняющих веществ (оксид углерода, углеводороды, оксиды азота и т.д.) подтверждает негативное влияние НМУ.

Для периода задымления для всех станций отмечен рост коэффициентов корреляции. Средний коэффициент корреляции между концентрациями взвешенных частиц на различных станциях увеличился в 1.16 раза для PM10 и составил 0.770 и в 1.24 раза для PM2.5 (0.874). Рост коэффициентов корреляции, а также более высокие значения для PM2.5, подтверждают влияние одного мощного источника загрязнения на уровень содержания аэрозоля в атмосферном воздухе Москвы.

Для периода НМУ в сентябре 2018 г. также как и в предыдущем эпизоде для всех станций отмечен рост коэффициентов корреляции. Средний коэффициент корреляции между концентрациями взвешенных частиц на различных станциях увеличился в 1.1 раза для PM10 и составил 0.580 и в 1.23 раза для PM2.5 (0.691). Оба значения коэффициента корреляции являются значимыми и показывают тесную связь между концентрациями взвешенных частиц на различных станциях.

Примерно одинаковое увеличение коэффициентов корреляции за период задымления 2016 года и за период НМУ в сентябре 2018 года говорит о глобальности двух происходящих процессов, когда наблюдается рост концентраций взвешенных частиц PM10 и PM2.5 на всей территории Москвы.

## 8. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ НА ВНУТРИСУТОЧНЫЙ ХОД АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ В 2016 Г.

С целью анализа влияния термической стратификации на уровень загрязнения атмосферного воздуха для каждой из станций был посчитан средний суточный ход за теплый период 2016 г. и внутрисуточный ход для периода задымления (рис. 4 и рис. 5). На графиках произведено сравнение среднего суточного хода за теплый период (на графиках представлен черным цветом, для построения взяты среднечасовые значения) с суточным ходом концентраций взвешенных частиц за период задымления.

В течение теплого периода внутрисуточная динамика концентраций PM10 демонстрирует слабую изменчивость. Наблюдается небольшое снижение концентраций в предутренние часы и рост с 10 до 12 часов дня.

В период задымления наблюдается существенный рост концентраций PM10 в течение всех суток. При этом, в отличие от типичного хода для теплого периода, когда днем концентрации снижаются, в период пикового задымления существенного снижения загрязнения в дневные часы до уровня всего теплого периода не отмечалось, хотя по данным анализа температурной стратификации днем инверсионные слои разрушались и вертикальное перемешивание улучшалось.

Для концентраций PM2.5 складывается несколько иная картина. С начала затора задымленного воздуха произошло резкое повышение уровня загрязнения, однако от суток к суткам внутрисуточная динамика PM2.5 изменялась не существенно. Таким образом, концентрация PM2.5 в меньшей степени была подвержена влиянию изменчивости термической стратификации, даже в период интенсивных НМУ, и в большей степени определялась дальним переносом.

Аналогично 2016 г. для каждой из станций был посчитан средний суточный ход взвешенных частиц за теплый период 2018 г. и за дни с НМУ в сентябре.

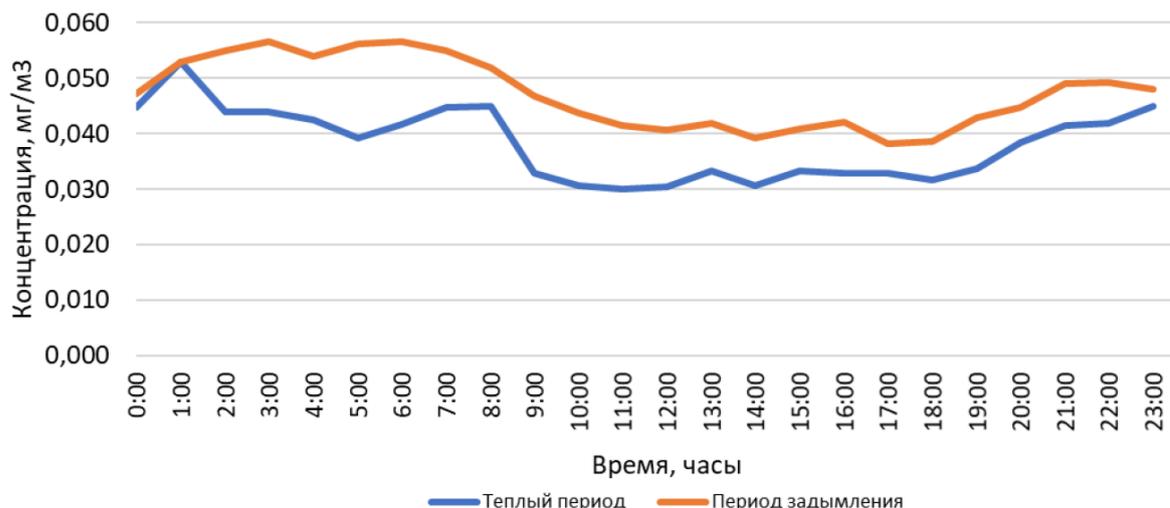


Рис. 4. Среднесуточный ход взвешенных частиц PM10 за теплый период и за период задымления в 2016 г.

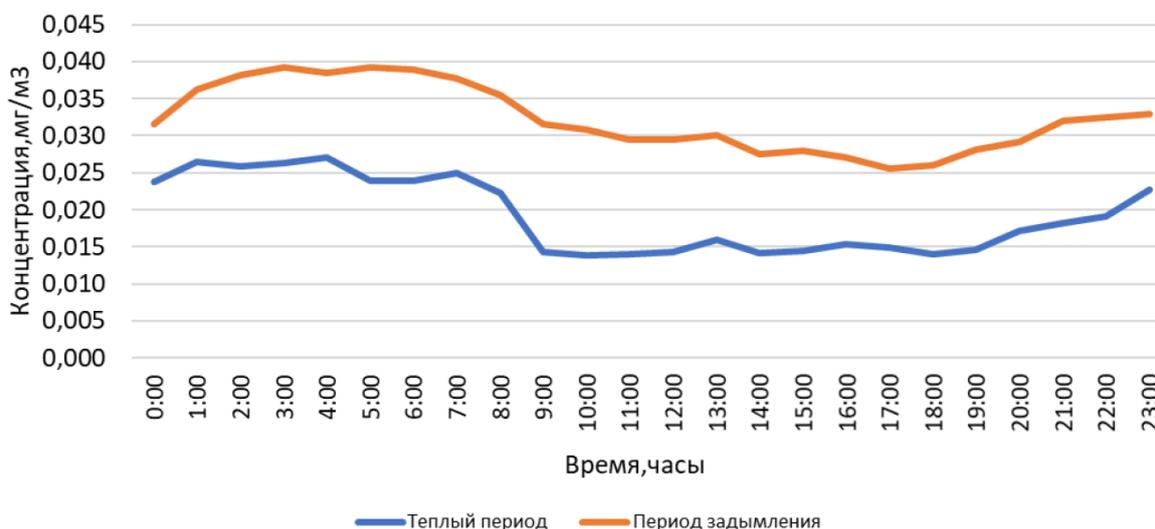


Рис. 5. Среднесуточный ход взвешенных частиц PM2.5 за теплый период и за период задымления в 2016 г.

Если во время задымления не отмечалось существенного изменения концентраций в течение суток, то в дни с НМУ на всех станциях отмечены концентрации PM10 и PM2.5 выше среднегодовых в данном месте, заметно увеличение концентраций в ночные часы, когда возникала инверсия, и уменьшение, когда происходило разрушение инверсионных слоев и улучшалось вертикальное перемешивание.

Отмечена большая изменчивость концентраций PM2.5 в течение суток в зависимости от НМУ по сравнению со значениями концентраций PM10, что подтверждает влияние инверсии и ухудшения вертикального перемешивания.

Было проведено сравнение зависимости концентрации PM10 и PM2.5 от скорости ветра за 01.07.2016–

08.07.2016, когда также наблюдались неблагоприятные метеорологические условия, за период задымления и за период с НМУ в сентябре 2018 г.

В период с 1 по 7 июля и в сентябре 2018 г. (когда были дни с НМУ) отмечается типичный рост концентраций PM10 и PM2.5 при снижении скорости ветра, и наоборот. В период задымления четкая зависимость между скоростью ветра и концентрациями аэрозольных частиц отсутствует. Это говорит о том, что в данный период рассеивание аэрозольных частиц при росте скорости ветра не происходило, а имело место поступление взвешенных частиц в результате дальнего переноса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ вариаций концентраций  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$  (индикаторов горения) в атмосферном воздухе города в условиях задымленной атмосферы летом 2016 г. и в дни с НМУ в сентябре 2018 г. Были рассчитаны основные статистические характеристики концентраций  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$ : среднее значение, медиана и мода, коэффициенты парной корреляции отдельно для  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$  между разными станциями, так и между  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$  на одной станции для периода всего 2016 и 2018 гг., так и для периода задымления в июле 2016 г. и периода с НМУ в сентябре 2018 г. Проанализирован суточный ход при задымлении в сравнении с типичным ходом в теплый период и в условиях НМУ. На основе внутрисуточной динамики концентраций  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$  в июле 2016 г. и в сентябре 2018 г. рассмотрена зависимость загрязнения от термической стратификации АПС. Проведен анализ зависимости концентраций аэрозолей от скорости ветра в АПС.

Результаты проведенного анализа свидетельствуют, что заток загрязненного воздуха из районов пожаров в Сибири и НМУ оказали существенное влияние на концентрации взвешенных веществ в атмосферном воздухе в городе Москве.

За период задымления наблюдалось возрастание всех основных статистических характеристик для концентраций  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$ : среднее значение концентраций увеличилось в 2 – 3 раза; медиана увеличилась в 2 – 4 раза; наибольший скачок в значения отмечен для моды, значения которой возросли в 2 – 9 раз. Средний коэффициент корреляции между концентрациями взвешенных частиц на различных станциях увеличился с 0.660 по 0.770 для  $PM_{10}$ , с 0.706 по 0.874 для  $PM_{2.5}$ , с 0.816 по 0.940 для  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$ .

В период задымления снизилась изменчивость средних концентраций  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$  по территории города в зависимости от функциональной зоны.

За период НМУ в сентябре 2018 г. также наблюдалось возрастание всех основных статистических характеристик для концентраций  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$ ,

но не столь высокое, как в период задымления, что говорит об отсутствии затока загрязнителей: среднее значение концентраций увеличилось в 1.3 – 1.6 раза; медиана увеличилась в 1.6 – 3 раза; мода увеличилась в 2 – 2.3 раза. Средний коэффициент корреляции между концентрациями взвешенных частиц на различных станциях увеличился с 0.529 по 0.580 для  $PM_{10}$ , с 0.564 по 0.691 для  $PM_{2.5}$ , с 0.760 по 0.890 для  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$ .

В период НМУ наблюдалась изменчивость средних концентраций  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$  по территории города в зависимости от функциональной зоны.

В составе взвешенных частиц  $PM_{10}$  возросла доля мелкой фракции с размером менее 2.5 мкм.

Было рассчитано частотное распределение средне-суточных значений концентраций  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$  за год и за период задымления, за который произошло смещение максимума частоты в сторону более высоких значений. В период задымления частотная гистограмма имеет два максимума, при этом повторяемость наиболее часто фиксируемых концентраций не превышает 12%.

Показано, что в период задымления (25, 26, 27 июля) в ночные часы в АПС формировались слабые (до 3 гр) приземные инверсии. Однако преобладающий вклад в загрязнение, особенно для  $PM_{2.5}$ , вносил заток задымленного воздуха, термическая стратификация оказала меньшее влияние на формирование загрязнения (существенного изменения формы суточного хода  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$  по сравнению с теплым периодом не отмечено. По сравнению с днями с НМУ в сентябре 2018 г. роста концентраций  $PM_{10}$  также не зафиксировано, для  $PM_{2.5}$  отмечено увеличение концентраций в течение всех суток).

Анализ концентраций  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$  от скорости ветра на высоте показал, что рассеивание аэрозольных частиц в период задымления при росте скорости ветра не происходило (концентрации  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$  возрастали), что обусловлено поступлением взвешенных частиц в результате дальнего переноса. В период НМУ концентрации ожидаемо понижались с увеличением скорости ветра и наоборот.

- [1] Уорк К., Уорнер С. Загрязнение воздуха. Источники и контроль М.: Мир. 1980. С. 540.
- [2] Федеральный закон от 04.05.1999 N 96-ФЗ (ред. от 08.12.2020) «Об охране атмосферного воздуха»
- [3] Степановских А. С. «Экология». Учебник для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА. 2003.
- [4] Ландсберг Г. Е. «Климат города». Гидрометеиздат, Л. 1983.
- [5] Адушкин В. В., Чен Б. Б., Попель С. И., Вайдер П. Г., Фридрих Ф., Извекова Ю. Н. // Доклады Академии наук. 2016. 446. N 5. С. 592.
- [6] Чижова В. С. // Вестник МАДИ. 2014. 2(37). С. 106.
- [7] Безуглая Э. Ю., Смирнова И. В. Воздух городов и его

изменения. СПб.: Астерион; 2008.

- [8] Попова С. А., Макаров В. И. // Оптика атмосферы и океана. 2011. 24. № 6.
- [9] Ревич Б. А., Шапошников Д. А., Семутникова Е. Г. // Медицина труда и промышленная экология. 2008. № 7. С. 29.
- [10] Ревич Б. А. // Проблемы прогнозирования. 2006. № 6. С. 114.
- [11] Мониторинг качества атмосферного воздуха для оценки воздействия на здоровье человека // Копенгаген: региональные публикации ВОЗ. Европейская серия. 2001. N 5. С. 293.
- [12] ГН 2.1.6.2604-10. Гигиенические нормативы «Дополне-

- ние № 8 к ГН2.1.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест». 2010.
- [13] Кузнецова И. Н., Шалыгина И. Ю., Нахаев М. И., Глазкова А. А., Захарова П. В., Лезина Е. А., Звягинцев А. М. // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра российской федерации. 2014. № 351. С. 154.
- [14] Безуглая Э. Ю., Берлянд М. Е. Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере. Гидрометеоздат, Л. 1983.
- [15] Горчаков Г. И., Ситнов С. А., Семутникова Е. Г., Копейкин В. Г., Карпов А. В., Исаков А. А., Горчакова И. А., Панкратова Н. В., Пономарева Т. Я., Кузнецов Г. А., Лоскутова О. В., Козловцева Е. А., Родина К. В. Крупномасштабное задымление европейской территории России и Белоруссии в июле 2016 г. // Аэрозоли Сибири. XXXIII Рабочая группа: Тезисы докладов. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2016. С. 57.
- [16] Бондаренко Л. В., Маслова О. В., Белкина А. В., Сухарева К. В. // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. 2018; № 2. С. 84.
- [17] <http://eco.mos.ru>.
- [18] <http://mosecom.ru>
- [19] Кузнецова И. Н., Кадыгров Е. Н., Миллер Е. А., Нахаев М. И. // Оптика атмосферы и океана. 2012. **25**, № 10. С. 877.
- [20] Руководство по контролю загрязнения атмосферы. РД 52.04.186-89 // Государственный комитет СССР по гидрометеорологии. Москва. 1991.

## Study of the influence of dynamic and thermal characteristics of the atmospheric boundary layer on atmospheric air pollution in the Moscow metropolis

K. V. Rodina<sup>a</sup>, E. G. Semutnikova<sup>b</sup>

*Department of Physics of atmosphere, Faculty of Physics Lomonosov Moscow State University  
Moscow 119991, Russia*

*E-mail: <sup>a</sup>RodinaKV@eco.mos.ru, <sup>b</sup>SemutnikovaEG@mos.ru*

This article focuses on assessing the impact of wildfires and adverse weather conditions on air pollution in Moscow. The article examines in detail the case of aerosol pollution of the smoky atmosphere of the Moscow region in July 2016. The main indicators of wildfire investigated in this work are particulate matter PM10 and PM2.5. Calculations of the main statistical characteristics of PM10 and PM2.5 concentrations are presented: the average value, median and mode and pair correlation coefficients separately for PM10 and PM2.5 between different stations and between PM10 and PM2.5 at one station for the entire period of 2016 and 2018 as well as for the smoke period in July 2016 and the period with bad weather conditions in September 2018. The diurnal course under smoke is analyzed in comparison with the typical course in the warm period and in the bad weather conditions. Based on the intra-day dynamics of PM10 and PM2.5 concentrations in July 2016 and September 2018 the dependence of pollution on the thermal stratification of the atmospheric boundary layer is considered. The dependence of aerosol concentrations on the wind speed in the atmospheric boundary layer is analyzed.

PACS: 96.60.Mt

*Keywords:* megapolis, inversion, weak scattering, particulate matter, boundary layer.

*Received 31 January 2021.*

### Сведения об авторах

1. Родина Кристина Владимировна — аспирант; тел.: (495) 691-93-92, e-mail: RodinaKV@eco.mos.ru.
2. Семутникова Евгения Геннадьевна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 697-61-81, e-mail: SemutnikovaEG@mos.ru.