

УДК 551.510.42; 551.510.411.35; 504.3.054

ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ЧЕРНОГО УГЛЕРОДА И АЭРОЗОЛЕЙ PM_{10} И $PM_{2.5}$ В ПРИЗЕМНОМ ВОЗДУХЕ МЕГАПОЛИСА

© 2024 г. А. А. Виноградова^{а,*}, Д. П. Губанова^а, В. М. Копейкин^а

^аИнститут физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017 Россия

*e-mail: anvinograd@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.01.2024 г.

После доработки 18.03.2024 г.

Принята к публикации 10.04.2024 г.

Рассмотрены результаты непрерывных наблюдений за массовой концентрацией черного углерода и аэрозолей PM_{10} , $PM_{2.5}$ в приземном слое атмосферы в центре Московского мегаполиса в 2022 г. Интерпретация результатов выполнена с учетом анализа метеорологических данных, обратных траекторий переноса воздушных масс к Москве и данных реанализа MERRA-2 о пространственном распределении пыли и черного углерода в приземном воздухе европейской части России. Выделены дни (менее 9%) аномального повышения концентрации частиц PM_{10} и черного углерода, обусловленного атмосферным переносом аэрозолей горения и пыли к Москве из других регионов. Исследована изменчивость типичного (вне таких эпизодов) аэрозоля мегаполиса на разных временных масштабах – от суточного до сезонного. Основной вклад в загрязнение атмосферы мегаполиса пылью и углеродсодержащими аэрозолями вносят локальные антропогенные источники (транспорт, теплоэнергетика, промышленные предприятия, объекты строительства). Высокая корреляция установлена между величинами концентрации черного углерода и частиц $PM_{2.5}$ в суточных и сезонных изменениях. Приведенные данные о загрязнении воздуха черным углеродом и аэрозолями $PM_{2.5}$ и PM_{10} в крупных городах мира показывают, что по уровню аэрозольного загрязнения Московский мегаполис не превосходит крупные города Европы и Северной Америки.

Ключевые слова: атмосфера, Московский мегаполис, приземный аэрозоль, PM_{10} , $PM_{2.5}$, черный углерод, массовая концентрация, атмосферный перенос, метеорологические параметры

DOI: 10.31857/S0002351524030054 EDN: JHYCOE

ВВЕДЕНИЕ

Характеристики и свойства атмосферных аэрозолей обладают большой пространственно-временной изменчивостью и зависят от многообразных факторов (синоптических условий, метеорологических параметров, химического состава и реакционной способности атмосферы, интенсивности и эффективности источников и стоков) [Будыко, 1974; Кондратьев и др., 2007; Seinfeld, Pandis, 2006]. В крупных городах разнообразие аэрозолей и их воздействия на жизнедеятельность человека и окружающую среду проявляются наиболее заметно. Этому способствуют специфические локальные условия мегаполисов: особый ветровой режим и орография, плотность и разновысотность застройки, городские ландшафты с большими площадями, запечатанными дорожным покрытием, урбаноземы с искусственной интродуцированной растительностью, фор-

мирование над городом “острова тепла” [Кузнецова и др., 2017; Chapman et al., 2017; Lokoshchenko, Alekseeva, 2023] и теплового загрязнения, создаваемого антропогенными потоками тепла [Гинзбург, Докукин, 2021; Varentsov et al., 2020], а также непостоянство сложного газо-аэрозольного состава атмосферы, определяющего ее химическую активность. В урбанизированных районах при наличии множества интенсивных локальных антропогенных источников усиливается вредное воздействие аэрозольных частиц на условия жизнедеятельности и здоровье населения. Как показали результаты исследований, в современной городской среде с интенсивно развивающимися экономикой и транспортом основными составляющими массы атмосферного аэрозоля являются пыль, биоаэрозоли и черный углерод (сажа) [Chubarova et al., 2022; Diapouli et al., 2017; Mousavi et al., 2018; Popovicheva et al., 2022; Ramachandran, Rajesh, 2007].

Антропогенное образование черного углерода происходит в основном в результате неполного сгорания ископаемого топлива (дизельное топливо, бензин, газ, уголь), при истирании шин и дорожного покрытия, от предприятий теплоэнергетического комплекса, а также при горении биомассы (горение свалок, сельскохозяйственные и лесные пожары). Свежие (только образованные) наночастицы черного углерода объединяются в агрегаты в виде фрактальных кластеров, которые впоследствии смешиваются с другими аэрозольными компонентами (пыль, сульфаты, органика) [Popovicheva et al., 2014b; Popovicheva et al., 2022]. Такие частицы токсичны и усугубляют риски заболеваний дыхательной и сердечно-сосудистой систем [Janssen et al., 2012; Steiner et al., 2013].

Кроме того, углеродсодержащие и пылевые частицы влияют на радиационный баланс Земли и относятся к климатически значимым компонентам атмосферных аэрозолей [Bond et al., 2013; Cess et al., 1980; Chaibou et al., 2020; Chubarova et al., 2024; Jacobson, 2010; Mahowald et al., 2014; Schepanski, 2018]. Например, черный углерод (сажа) поглощает солнечное излучение, тем самым нагревает атмосферу и влияет на радиационный баланс Земли в глобальном масштабе [Bond et al., 2013]. Оценки показывают [Jacobson, 2010], что черный углерод – это второй по значимости фактор, после углекислого газа, способствующий глобальному потеплению путем прямого воздействия. Пылевой аэрозоль по величине воздействия на климат может быть сравним с дымовым при оценке климатических последствий извержений вулканов и пожаров [Будыко, 1974; Brinkman, McGregor, 1983; Cess et al., 1980], но физика воздействия различна, поскольку различаются спектральные зависимости оптических характеристик.

В городских условиях, наряду с локальными антропогенными источниками черного углерода и пыли (транспорт, предприятия теплоэнергетического комплекса, объекты строительства и др.) на уровень аэрозольного загрязнения воздуха в целом и на концентрацию углеродсодержащей и пылевой компонент аэрозоля, в частности, может существенно воздействовать региональный и дальний перенос аэрозолей горения и пыли [Diapouli et al., 2017; Gubanova et al., 2022a, 2022b; Popovicheva et al., 2022; Popovicheva et al., 2024;

Ramachandran, Rajesh, 2007; Salvador et al., 2013; Tiwari et al., 2013].

Наиболее важные пути стока аэрозоля из приземного воздуха – это влажное и сухое осаждение на поверхность, включая растительность, крыши зданий, сооружений и других объектов, перенос атмосферными массами. Среди процессов эмиссии и стока аэрозоля приземной атмосферы необходимо также иметь в виду постоянно существующий круговорот – осаждение аэрозоля на поверхность и возвращение его с поверхности (перевевание ветром, транспортом) вместе с частичками пыли и почвы.

Все перечисленные выше факторы обуславливают сильные пространственные и временные флуктуации характеристик основных компонент городского приземного аэрозоля, что существенно затрудняет изучение закономерностей короткопериодной и долговременной изменчивости концентрации черного углерода и пылевых частиц и оценку воздействия разных условий на ее формирование.

Наряду с непрерывными наблюдениями за уровнем концентрации аэрозольных частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} [Sokhi et al., 2021] в последние годы в мире уделяется большое внимание исследованию распределения источников черного углерода и оценке их вклада в аэрозольное загрязнение городов и урбанизированных районов [Briggs, Long, 2016; Popovicheva et al., 2022; Popovicheva et al., 2024]. Московский мегаполис является крупнейшим мегаполисом Европы и одним из самых северных мегаполисов в мире (вторым после Санкт-Петербурга). Природные условия средних широт Евразии определяют множество и разнообразие источников и стоков атмосферного аэрозоля, меняющихся в течение года, а также от года к году, и связанных со спецификой окружающей среды и синоптико-метеорологических условий. Несмотря на развитую городскую наземную сеть непрерывного мониторинга качества атмосферного воздуха [<https://mosecom.mos.ru/stations>] и эпизодические наблюдения отдельных групп исследователей [Глазкова и др., 2012; Губанова и др., 2017; Губанова и др., 2023a; Копейкин и др., 2018; Копейкин и др., 2019; Кузнецова и др., 2014; Gubanova et al., 2022a, 2022b; Popovicheva et al., 2020; Popovicheva et al., 2022; Popovicheva et al., 2024] в разных точках Москвы, достоверная картина изменчивости состава городского при-

земного аэрозоля на ее территории в различных временных масштабах с учетом многочисленных антропогенных и природных факторов все еще не сформирована.

Более тридцати пяти лет назад в Институте физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН (ИФА РАН) при активном участии В. М. Копейкина были начаты и успешно продолжаются в настоящее время наблюдения за изменчивостью характеристик сажевой компоненты приземного аэрозоля в условиях Московского мегаполиса [Виноградова и др., 2020; Горчаков и др., 2004; Емиленко, Копейкин, 2009; Копейкин и др., 1993, 1998, 2008, 2018; Копейкин, Пономарева, 2020; Porovicheva et al., 2014a]. При его участии также изучались аэрозоли горения и углеродсодержащий аэрозоль в различных районах России и за ее пределами [Ван Ген Чен и др., 2003; Горчаков и др., 2018; Копейкин и др., 2019; Свириденков и др., 2006; Шевченко и др., 2019; Vinogradova et al., 2020]. Данное исследование дополняет экспериментальный ряд данных таких наблюдений в Москве и является последней работой В. М. Копейкина, безвременно ушедшего в 2023 г.

Настоящая работа имела целью экспериментально выявить и оценить изменчивость величин концентрации черного углерода и аэрозолей разной размерности при одновременных измерениях этих параметров в приземном воздухе в одном и том же месте мегаполиса. Результаты этой работы могут быть полезны не только для уточнения оценки уровня аэрозольного загрязнения приземного воздуха и его пространственной изменчивости в Москве, но также для исследовательской роли сажевой и пылевой компонент аэрозоля в процессах изменения регионального климата и состояния городских экосистем.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данном исследовании выполнен анализ временной изменчивости массовой концентрации аэрозольных частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} и сажевой компоненты аэрозоля по результатам натурных наблюдений в Москве в течение 2022 г. Экспериментальные данные о концентрации и составе приземного аэрозоля были получены в ходе комплексного аэрозольного эксперимента, реализуемого с осени 2019 г. по настоящее время в Москве, на территории Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, расположенного в центре города и окруженного офисными и старыми жилыми зданиями

на территории с малым количеством травяных газонов и зеленых насаждений.

Счетная концентрация различных фракций частиц в диапазоне диаметров 0.2–10 мкм измеряется с помощью оптико-электронных счетчиков аэрозольных частиц ОЭАС-05 и лазерных аэрозольных спектрометров ЛАС-П (разработчик – НИФХИ им. Л. Я. Карпова) в непрерывном режиме с интервалом 5 мин. Принцип действия этих приборов основан на регистрации аэрозольных частиц различных размеров по изменению интенсивности рассеянного света с помощью фотодетекторов. Массовая концентрация аэрозольных частиц рассчитывалась по известной формуле [Seinfeld, Pandis, 2006] с использованием экспериментальной информации о распределении числа аэрозольных частиц по размерам и их счетной концентрации:

$$M_i(D_p) = \frac{\pi}{6} \times D_p^3 \times N_i(D_p), \quad (1)$$

где $\rho = 1.8 \text{ г/см}^3$ – плотность частиц городского аэрозоля, D_p – средний диаметр частиц в каждой размерной фракции (в предположении, что все частицы – сферические), $N_i(D_p)$ – счетная концентрация частиц каждой размерной фракции:

$$N_i(D_p) = \int_{D_{p1}}^{D_{p2}} n_N^0 d \log_{10}(D_p), \quad (2)$$

где $n_N^0 = dN / d \log_{10}(D_p)$ – измеренное приборами ЛАС-П и ОЭАС-05 распределение числа аэрозольных частиц по размерам. Значение плотности (1.8 г/см^3) для аэрозольных частиц размером 0.2–10 мкм выбрано для городских условий с учетом результатов выполненного авторами исследования, опубликованного в работе [Губанова и др., 2023б].

Массовая концентрация приземного аэрозоля $PM_{2.5}$ и PM_{10} определялась суммированием значений концентрации соответствующих размерных фракций частиц, входящих в состав PM_{10} и $PM_{2.5}$.

В течение всего 2022 г. в мониторинговом режиме, синхронно с определением микрофизических характеристик приземного аэрозоля, проводились измерения массовой концентрации сажевой компоненты аэрозоля в эквиваленте черного углерода (BC – black carbon) с помощью аэталометра AE33 фирмы Magee Scientific (Словения) [Кобелев и др., 2020; Drinovec et al., 2015; Hansen et al., 1984]. Детальное описание аэталометра и методических аспектов его применения представлено, например, в [Drinovec et al., 2015; Hansen et al., 1984].

Таблица 1. Средние \pm СКО и максимальные значения среднесуточной концентрации черного углерода, аэрозолей PM_{10} и $PM_{2.5}$ в Москве, $мкг/м^3$

Годы	Показатель концентрации	По всем исходным данным			Типичный, без аномальных эпизодов		
		Черный углерод	PM_{10}	$PM_{2.5}$	Черный углерод	PM_{10}	$PM_{2.5}$
2022	Средняя \pm СКО	1.6 ± 1.1	21 ± 13	6.0 ± 4.2	1.3 ± 0.6	18.3 ± 9.5	5.2 ± 3.0
	Максимум	9.3	99	30	2.8	56	21
2020–2022	Средняя	–	24.8	6.7	–	21 [Губанова и др., 2023а]	6.3 [Губанова и др., 2023а]

Более подробно условия и методика комплексного аэрозольного эксперимента, реализуемого в ИФА РАН с осени 2019 г. по настоящее время, описаны в [Губанова и др., 2023а, 2023б; Gubanova et al., 2022].

При интерпретации полученных результатов использовалась метеорологическая информация для московской метеостанции Балчуг и всего мегаполиса, полученная из открытых Интернет-источников [<http://rp5.ru>; <http://www.windy.com/ru>; <https://weatherarchive.ru/Pogoda/Moscow>]. Кроме того, был выполнен траекторный анализ движения воздушных масс к Москве с помощью модели HYSPLIT 4 [Stein et al., 2015; <https://www.arl.noaa.gov>] и применены данные реанализа MERRA-2 [Gelaro et al., 2017; <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>] о пространственном распределении черного углерода и пыли в приземном слое атмосферы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эпизоды аномально высокого аэрозольного загрязнения и типичный аэрозоль 2022 г.

На рис. 1 показан временной ход среднесуточных значений концентрации черного углерода и аэрозолей PM_{10} и $PM_{2.5}$ в центре Москвы в течение 2022 года, а некоторые статистические показатели приведены в табл. 1 (по всем исходным данным). Абсолютные значения концентрации BC хорошо соответствуют данным, полученным другими авторами ([Porovichcheva et al., 2022], четыре сезона за три года в 2018–2020 гг., см. далее табл. 4), а также несколько ниже уровня концентрации черного углерода, который наблюдался в дневное время в Москве в 2014–2016 гг. (от 1.7 до 4.4 $мкг/м^3$ в среднем в разные сезоны) [Копейкин и др., 2018].

В целом за 2022 г. в течение 31 сут (<9%) наблюдалось аномально высокое аэрозольное загрязнение приземного воздуха, когда среднесуточное

значение концентрации аэрозоля PM_{10} было выше ПДК = 60 $мкг/м^3$ [СанПиН, 2021] (среднесуточная концентрация частиц $PM_{2.5}$ круглогодично не превышала ПДК = 35 $мкг/м^3$ [СанПиН, 2021]), а черного углерода – выше 3.7 $мкг/м^3$ ($BC_{CP} + 2 \times СКО$), где BC_{CP} – среднегодовая концентрация черного углерода в приземном воздухе в центре Москвы за 2022 г. Это примерно столько же дней повышенного аэрозольного загрязнения воздуха со среднесуточными значениями концентрации частиц PM_{10} выше ПДК, сколько было зарегистрировано в ИФА РАН, а также по средним для всех станций МЭМ среднесуточным значениям PM_{10} в Москве в 2020–2021 гг. [Губанова и др., 2023а]. (ПДКс.с. для черного углерода в приземном воздухе городов и поселений составляет 50 $мкг/м^3$ [СанПиН, 2021] и предназначено, видимо, для пожарных). Как правило, в 2022 г. эти эпизоды были длительностью от 1 до 5 сут, совпадали с аномально высокими значениями концентрации PM_{10} и часто сопровождалась неблагоприятными метеорологическими условиями (НМУ) – повышенным атмосферным давлением, низкой относительной влажностью и слабым ветром [Кузнецова и др., 2014 (б)].

Несколько эпизодов аномального аэрозольного загрязнения 2022 г. были связаны с дальним атмосферным переносом примесей от пожаров на территориях других регионов. Например, траектории переноса примесей из районов сильных лесных пожаров в Нижегородской и Рязанской областях показаны на рис. 2б и 2в соответственно. Один раз в декабре 2022 г. зарегистрирован дальний атмосферный перенос пыли из районов песчаных бурь (рис. 2д) в западном Казахстане (аналогично октябрю [Gubanova et al., 2022b] и декабрю [Виноградова и др., 2022] 2020 г.).

Исключив аномальные эпизоды из анализируемых значений концентрации черного углерода, PM_{10} и $PM_{2.5}$, можно рассмотреть некоторые свойства типичного приземного аэрозоля в Мо-

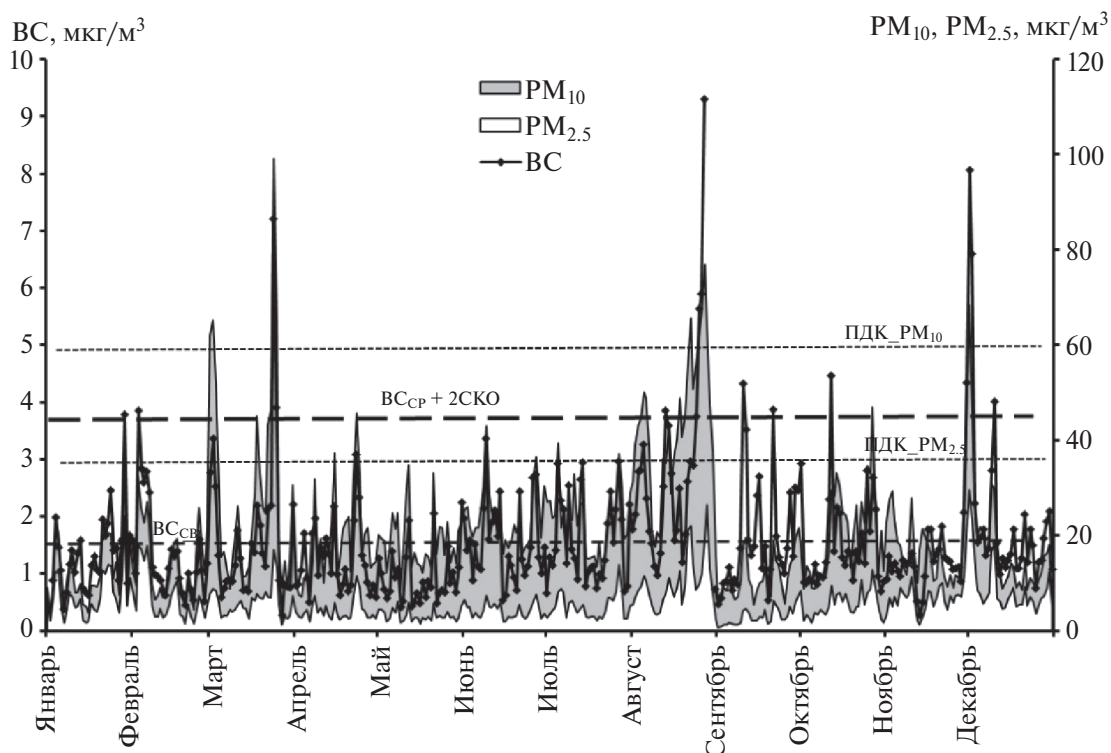


Рис. 1. Временной ход величины среднесуточной массовой концентрации черного углерода и аэрозолей PM_{10} и $PM_{2.5}$ в Москве в течение 2022 г.

ске 2022 г. (табл. 1), как это сделано в [Губанова и др., 2023а] для аэрозоля Москвы и Подмоскovie в 2020–2021 гг. (но без анализа черного углерода в воздухе). Поскольку аэрозоль PM_{10} включает и все более мелкие фракции частиц, в том числе и $PM_{2.5}$, обозначим аэрозольные частицы в диапазоне размеров от 2.5 до 10 мкм как $PM_{10-2.5}$. В состав таких частиц в основном входит минеральная компонента аэрозоля [Губанова и др., 2023а], и далее будем анализировать их характеристики в качестве

показателей для грубодисперсных аэрозолей, в отличие от частиц $PM_{2.5}$, которые представляют собой высоко- и среднелдисперсный аэрозоль.

Временные вариации величин концентрации черного углерода, аэрозолей $PM_{2.5}$ и $PM_{10-2.5}$ в приземной атмосфере Москвы

Сезонный ход. На формирование аэрозольного поля в приземной атмосфере в разные сезоны в значительной степени влияют тип и состояние

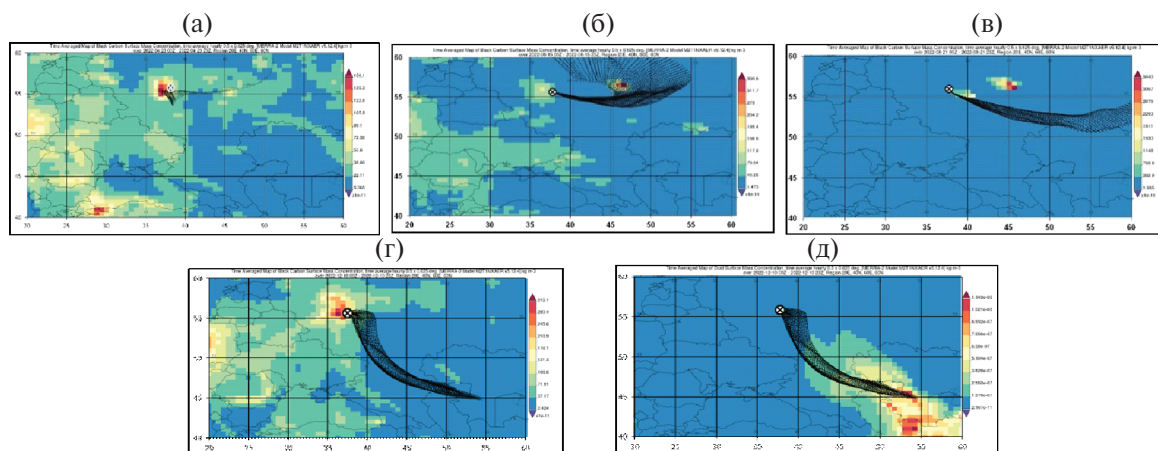


Рис. 2. Примеры траекторий (черные линии) переноса воздушных масс к Москве (круглый значок) на картах распределения концентрации черного углерода (а – 23.04.22; б – 15.08.22; в – 21.08.22; г – 10.12.22), а также на карте распределения концентрации пыли (д – 10.12.22) в приземном воздухе (по данным реанализа MERRA-2) над центром европейской части России.

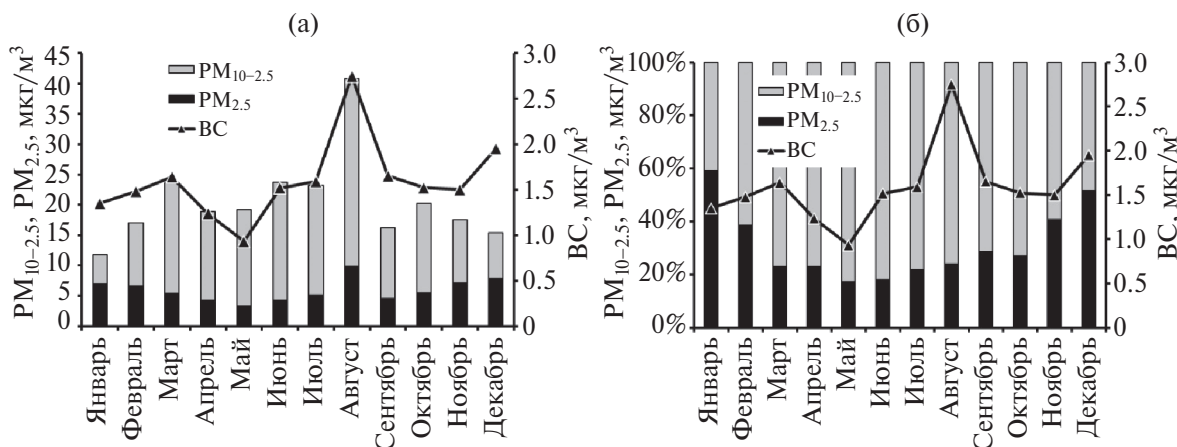


Рис. 3. Сезонный ход среднемесячных величин массовой концентрации черного углерода, а также грубодисперсных ($PM_{10-2.5}$) и высоко- и среднedisперсных ($PM_{2.5}$) аэрозольных частиц в центре Москвы в 2022 г.: а – абсолютные значения; б – абсолютные значения для ВС на фоне процентного соотношения массы частиц разной дисперсности.

подстилающей поверхности: естественные почва, пыль, растения, снег, а в городе часто вместо них – запечатанные асфальтом и плиткой улицы, небольшие по площади парки и дворы с растениями и открытой почвой, грязный снег с химическими реагентами. На рис. 3 показаны внутригодовые вариации среднемесячных значений концентрации черного углерода, аэрозолей грубодисперсной фракции $PM_{10-2.5}$ и фракции $PM_{2.5}$.

Зимой в Москве повышены эмиссии антропогенных атмосферных примесей (в основном, фракция частиц $PM_{2.5}$), а вклад поверхности в генерацию грубодисперсных частиц снижен в связи с наличием снежного покрова. Поэтому отношение концентраций $PM_{2.5}/PM_{10-2.5}$ зимой максимально (рис. 3б). Летом картина обратная, и доля массы частиц $PM_{2.5}$ минимальна при большой массе частиц $PM_{10-2.5}$. Повышение концентрации всех рассматриваемых составляющих аэрозоля в августе (рис. 3а) было связано с лесными пожарами в ближайших областях и региональным атмосферным переносом аэрозолей горения отсюда в Москву, о чем далее пойдет речь более подробно. Весна и осень – переходные сезоны, когда источники и стоки, формирующие аэрозольное

поле в приземной атмосфере, могут сказываться по-разному при постепенном повышении/понижении температуры (весной/осенью). Сезонный ход концентрации черного углерода качественно хорошо соответствует изменениям в течение года среднемесячного значения концентрации аэрозолей $PM_{2.5}$ (рис. 3а) (коэффициент корреляции среднемесячных значений 0.78), что указывает на то, что черный углерод в атмосфере находится преимущественно на высоко- и среднedisперсных частицах, в частности, из-за общности некоторых источников этих составляющих аэрозоля (ТЭЦ, эмиссии транспорта и др.).

Суточный ход значений концентрации черного углерода, частиц фракций $PM_{2.5}$ и $PM_{10-2.5}$ (рис. 4) отражает влияние на эти составляющие аэрозоля изменений метеоусловий и активности человеческой деятельности в течение суток. Характер суточного хода меняется от сезона к сезону в соответствии с направлением и масштабом этих воздействий. Кроме того, суточную изменчивость концентрации аэрозольных частиц обуславливают стабильность и пространственно-временная изменчивость атмосферного пограничного слоя [Popovicheva et al., 2022].

Таблица 2. Значения коэффициента корреляции (R) между величинами концентрации аэрозольных составляющих черного углерода (BC), $PM_{2.5}$, $PM_{10-2.5}$ и метеорологических параметров – давление (p), относительная влажность (RH), частота штилевых условий (Ш) и скорость ветра (WS) в приземном воздухе. Расчеты за весь 2022 г. для разных масштабов временных вариаций. Выделены значения, достоверные на уровне 95%

Вариации значений	Среднемесячные		Среднесуточные			Среднечасовые		
	p	Ш	p	WS	RH	p	WS	RH
BC	0.70	0.47	0.25	-0.50	-0.08	0.17	-0.31	0.01
$PM_{2.5}$	0.48	-0.02	0.22	-0.16	0.20	0.22	-0.29	0.11
$PM_{10-2.5}$	0.43	0.66	0.32	-0.39	-0.65	0.27	-0.27	-0.46
	R(p-Ш)= 0.21					R(p-WS)= -0.31		

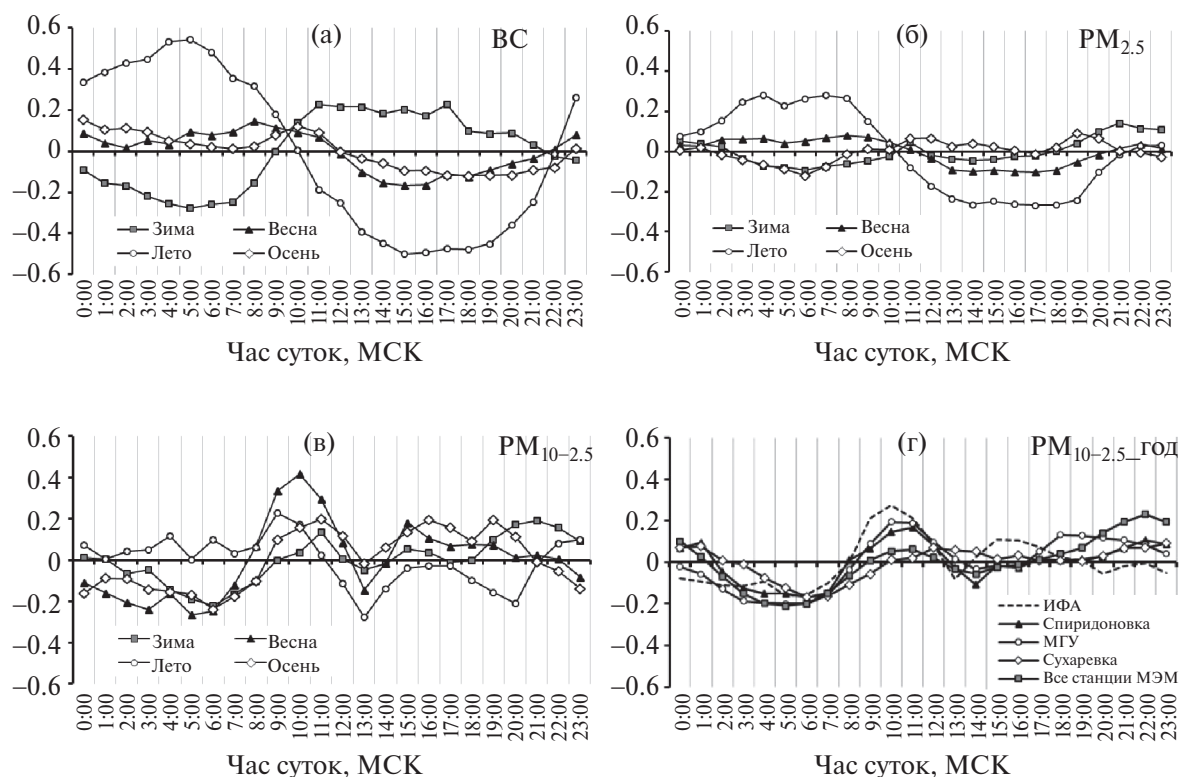


Рис. 4. Суточный ход значения концентрации черного углерода (BC), аэрозольных частиц $PM_{2.5}$ и $PM_{10-2.5}$: а–в – усредненный по сезонам; г – усредненный за весь год только для $PM_{10-2.5}$ – для разных станций наблюдения в Москве (ИФА, станции МЭМ Спиридоновка, МГУ, Сухаревская площадь и усреднение по всем измеряющим аэрозоль станциям МЭМ). Относительное отклонение от среднегодового значения.

Зависимости суточного хода концентрации черного углерода (рис. 4а) и частиц $PM_{2.5}$ (рис. 4б) качественно очень похожи, хотя относительная амплитуда изменений концентрации черного углерода в течение суток примерно вдвое больше. Это подтверждает, с одной стороны, что черный углерод в значительной степени сосредоточен на частицах высоко- и среднedisперсного аэрозоля, а с другой стороны, указывает на отмеченную ранее общность многих источников черного углерода и этих аэрозольных частиц. Также на рис. 4а и 4б хорошо видна противоположность зимнего и летнего внутрисуточного хода значений концентрации как BC, так и аэрозоля $PM_{2.5}$, наиболее выраженная у черного углерода. Для них характерны максимальные летние и минимальные зимние значения в ночные и ранние утренние часы (что отмечалось также авторами [Chubarova et al., 2022; 2024; Porovichcheva et al., 2022]). Зимний характер внутрисуточных вариаций черного углерода и частиц $PM_{2.5}$, видимо, определяется активностью антропогенных источников, в частности, транспорта. На летних зависимостях сильно сказывается такой природный фактор, как температурные инверсии в приземном слое атмосферы

[Локощенко и др., 2021], максимально ограничивающие процессы вертикальной конвекции как раз в ночные и утренние часы. В промежуточные сезоны (весной и осенью) суточный ход концентрации BC и $PM_{2.5}$ минимален.

Совсем другой характер имеет в приземном воздухе города суточный ход концентрации грубодисперсных аэрозольных частиц $PM_{10-2.5}$ (рис. 4в и 4г) с максимальными значениями в дневное время суток. Он отражает активность человеческой деятельности (интенсивность движения транспорта, стройки, ремонты). В центре города (рис. 4в) максимальная амплитуда относительной величины внутрисуточных колебаний концентрации таких аэрозолей наблюдается зимой, а минимальная – летом, что, скорее всего, объясняется просто низким зимним и высоким летним абсолютным значением концентрации частиц $PM_{10-2.5}$. Обращает на себя внимание снижение концентрации грубодисперсного аэрозоля в середине дня во все сезоны (рис. 4в), что может соответствовать перерыву в работе учреждений, предприятий, градостроительных организаций, а также времени максимально эффективной вертикальной конвекции в нижнем слое атмосферы

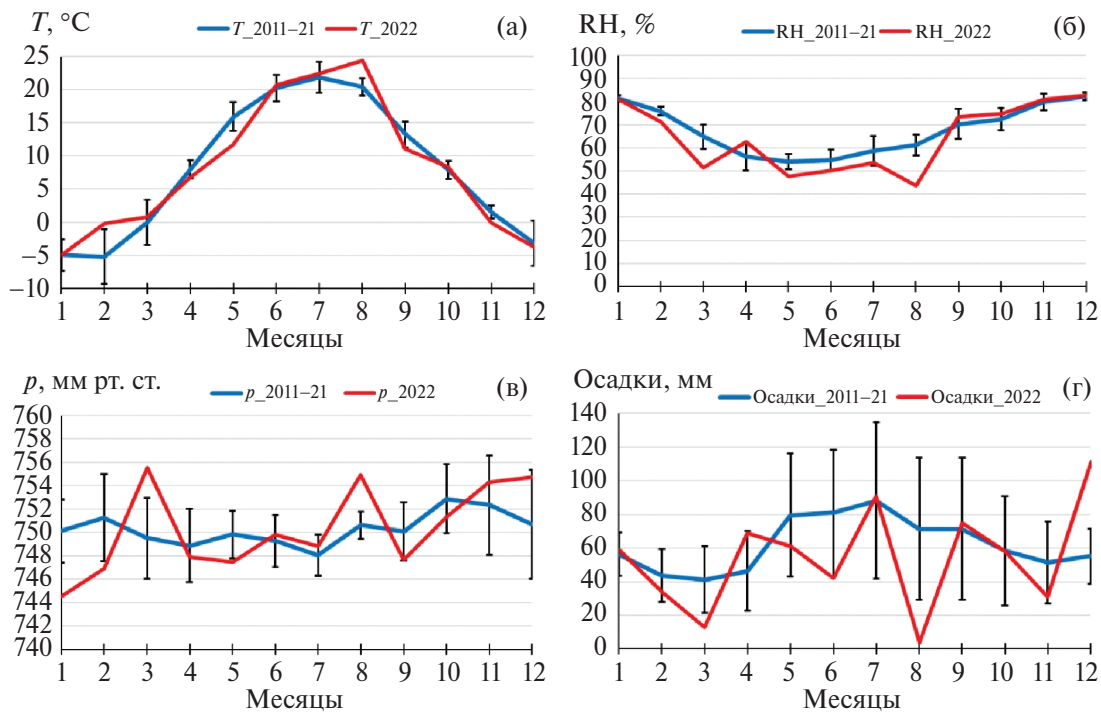


Рис. 5. Сезонный ход метеорологических параметров в Москве по данным наблюдений в 2022 г. в сравнении с многолетними средними (2011–2021 гг.): а – температура воздуха; б – относительная влажность; в – атмосферное давление на высоте 2 м; г – месячное количество осадков.

в городе. Для сравнения и подтверждения этого эффекта для всего города в целом на рис. 4г показаны среднегодовые вариации величины концентрации аэрозолей $PM_{10-2.5}$ в течение суток, полученные не только по нашим наблюдениям в ИФА РАН, но и на некоторых автоматических станциях контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) наблюдательной сети ГПБУ “Мосэкомониторинг” (МЭМ), а также при усреднении данных всех АСКЗА МЭМ, измерявших в 2022 г. массовую концентрацию аэрозольных частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} . Дневной минимум в этих зависимостях наблюдается в Москве повсеместно, но при усреднении по всем АСКЗА МЭМ он несколько сглаживается и размывается за счет разнообразия условий формирования аэрозольного поля в воздухе разных районов огромного мегаполиса. Качественно эти различия видны на рис. 4г, где данные в пункте наблюдений ИФА РАН представляют центральный административный район Москвы, АСКЗА “Спиридоновка” МЭМ – центральный жилой район, АСКЗА “Сухаревская площадь” МЭМ – район круглосуточно активной крупной автомагистрали Садового кольца, АСКЗА “МГУ” МЭМ – парковую зону на Воробьевых Горах.

Связи с метеоусловиями. Важным фактором, ведущим к повышению аэрозольного загрязнения приземного воздуха, является образование в отдельные дни и периоды комплекса метеоусловий, способствующих значительному увеличению уровня аэрозольного загрязнения воздуха – неблагоприятных метеорологических условий (НМУ). Это дни с повышенным атмосферным давлением, пониженной относительной влажностью воздуха и отсутствием осадков, при штиле или слабом ветре и температурных инверсиях разной интенсивности [Кузнецова и др., 2014 (б)]. Оценим наличие или отсутствие связей между концентрацией рассматриваемых составляющих аэрозоля и метеорологическими характеристиками – по величине парных коэффициентов корреляции R значений, представленных в табл. 2, – по расчетам на массивах с разным периодом временных вариаций (месяц, сутки, час). Так мы пытаемся учесть и отделить процессы разной инерционности во временной изменчивости рассматриваемых характеристик и параметров.

Как видно из таблицы, относительная влажность воздуха практически не оказывает влияние на аэрозоли $PM_{2.5}$ и черный углерод, но концентрация грубодисперсных частиц $PM_{10-2.5}$ досто-

Таблица 3. Массовая концентрация аэрозольных частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} в некоторых крупных городах мира [Sokhi et al., 2021; <https://www.iqair.com/world-most-polluted-cities>]

Город	2018 ¹⁾		2019 ¹⁾		2020 ¹⁾		2021 ²⁾		2022 ²⁾	
	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}
Хельсинки	10	32	10	32	5.4	14	5.9	—	5.5	—
Берлин	—	28	—	25	—	22	12.5	—	12.6	—
Москва ³⁾	11.6	22.1	11.1	25.1	9.7/7.9	23.2/25.4	12.3/9.4	24.5/28.1	10.5/8.0	22.6/20.9
Амстердам	17	25	15	24	10	20	10.3	—	10.1	—
Париж	13	25	15	27	13	23	13.7	—	12.7	—
Лондон	15	24	19	30	14	24	9.8	—	9.6	—
Рим	14	27	12	25	13	23	11.1	—	12.6	—
Мадрид	5.1	8.6	6.5	11	7.5	9.6	9.4	—	9.5	—
Афины	17	39	16	32	13	19	19.2	—	19.2	—
Нью-Йорк	6.7	—	5.7	—	4.9	—	10	—	9.9	—
Оттава	5.3	—	5.1	—	5.4	—	8.2	—	6.8	—
Мехико	22	37	26	44	21	36	21.7	—	22.1	—
Сан-Пауло	17	28	17	29	13	24	14.2	—	13.5	—
Сидней	11	22	7.9	17	7.7	14	5.3	—	3.1	—
Пекин	24	53	46	88	76	83	34.4	—	29.8	—
Дели	91	263	88	240	48	112	85	—	89.1	—
Сеул	31	60	25	48	22	46	19.7	—	18.3	—

Примечания: ¹⁾ Средние значения за первое полугодие; ²⁾ среднегодовые значения; ³⁾ средние значения по данным всех станций МЭМ/наблюдений в ИФА РАН. Прочерк означает отсутствие данных.

верно уменьшается с повышением относительной влажности — при всех трех рассмотренных периодах временных вариаций. Остальные коэффициенты корреляции и их знаки указывают (хотя и не всегда с высокой достоверностью) на накопление аэрозоля в приземном воздухе в условиях НМУ (положительные корреляции с давлением и количеством регистрации штилевых условий для среднемесячных величин, отрицательные — со скоростью ветра для среднесуточных). Особенно регулярно значения концентрации всех рассматриваемых аэрозольных составляющих откликаются на изменения скорости ветра с высокой частотой (среднечасовые вариации величин), которые столь же достоверно соответствуют повышению давления воздуха.

В дополнение к табл. 2 отметим также достоверно высокий коэффициент корреляции между значениями концентрации частиц $PM_{10-2.5}$ и температуры воздуха ($R = 0.88$), рассчитанный по всем данным за год. Это является следствием годового хода температуры воздуха и состояния подстилающей поверхности, когда в более теплые месяцы максимально поступление в приземный

слой атмосферы более крупных частиц аэрозоля в виде минеральных частиц пыли и почвы с поверхности.

Сравнение сезонного хода метеорологических параметров в 2022 г. с многолетними средними показало их небольшое отличие. Рисунок 5 иллюстрирует различия температуры воздуха, давления, влажности и количества осадков в 2022 г. по сравнению со средними показателями за 11 лет (2011–2021 гг.).

Как видно из рисунка, в 2022 г. были аномально теплые февраль и август (на 5 и 4.3 градуса выше нормы соответственно), сумма осадков за весь год была на 100 мм меньше, чем в среднем в предыдущие 11 лет. В частности, в августе выпало всего 4 мм осадков, что, видимо, и способствовало формированию в этом месяце пожарной обстановки в ряде областей центра ЕТР. Отметим также повышенное атмосферное давление, низкую влажность и малое количество осадков в марте и в августе, характерные для НМУ, способствовавшие повышению в эти месяцы аэрозольного загрязнения воздуха в городе (см. далее рис. 6).

Таблица 4. Средние значения (Ср) массовой концентрации черного углерода (мкг/м³) в различных регионах мира

Место наблюдений	Период наблюдений	Концентрация ВС, мкг/м ³ , Ср + СКО (медиана)					Ссылка	
		Весь период	Осень	Зима	Весна	Лето		
Европа								
ИФА РАН, Москва, Россия	01.01.2022–31.12.2022	1.6 ± 1.1	1.6 ± 0.1	1.6 ± 0.3	1.3 ± 0.4	2.0 ± 0.7	Наст. работа	
МГУ, Москва, Россия	2018	–	–	–	1.0 ± 0.2	–	[Popovicheva et al., 2020; Popovicheva et al., 2022]	
	2019	–	1.09 ± 0.1	–	–	1.03 ± 0.2		
	2019–2020	–	–	1.3 ± 0.2	–	–		
София, Болгария	10.2020, 01.2021	–	2.4	3.6	–	–	[Hristova et al., 2022]	
Бургас, Болгария	01.2021	–	1.6	1.8	–	–		
Забже (Zabrze), Польша	2020	2.9	–	–	–	–		
Хельсинки, Финляндия	31.12.201–31.12.2019	0.74 ± 1.3	0.99	1.24	1.02	0.60	[Savadkoohi et al., 2023]	
Бирмингем, Великобритания	19.03.201–23.02.2022	0.76 ± 0.82	0.9	0.87	0.75	0.59		
Северный Кенсингтон, Лондон, Великобритания	01.01.202–01.01.2022	0.84 ± 0.92	0.92	1.16	0.71	0.60		
Эндховен, Нидерланды	28.04.201–31.12.2021	1.37 ± 1.30	1.57	1.64	1.23	1.06		
Париж, Франция	01.01.2016–31.12.2019	1.46±1.43	1.72	1.71	1.25	1.14		
Марсель, Франция	01.01.2017–31.12.2019	1.61 ± 1.46	1.72	2.15	1.22	1.38		
Барселона, Испания	03.04.2015–20.09.2020.	1.51 ± 1.53	1.62	1.68	1.34	1.37		
Мадрид, Испания	14.01.2013–31.12.2019	1.35 ± 1.83	1.47	2.40	0.89	0.82		
Афины, Греция	01.01.2017–31.12.2019	1.76 ± 2.29	1.81	2.50	1.49	1.24		
Бухарест, Румыния	27.02.2014–11.01.2022	2.13 ± 3.05	1.91	2.54	2.99	1.25		
Дрезден, Германия	01.01.2017–31.12.2019	0.68 ± 0.66	0.78	0.89	0.62	0.43		
Берн, Швейцария	01.01.2015–31.12.2021	1.07 ± 0.79	1.12	1.35	0.93	0.88		
Милан, Италия	12.06.2019–22.11.2021	2.02 ± 1.47	2.48	3.47	–	1.33		
Азия								
Нью-Дели, Индия (городской фон/вблизи автомагистрали)	09.2019–08.2020	5.02 ± 4.40	2.49 ± 0.89/ 7.63 ± 3.87	–	–	–		[Malik et al., 2022]
Мегаполис Метро Манила, Филиппины	01.04.2015–10.06.2015 (сухой сезон)	6.9 ± 4.8 (5.9)	–	–	6.9 ± 4.8 (5.9)	–	[Alas et al., 2018]	
Пекин, Китай	2010		5.41 ± 0.42	5.97 ± 0.51	3.71 ± 0.25	4.66 ± 0.15	[Liu et al., 2016]	
	2011		4.16 ± 0.26	3.74 ± 0.37	3.09 ± 0.22	4.1 ± 0.14		
	2012		4.21 ± 0.3	3.5 ± 0.32	3.5 ± 0.19	3.63 ± 0.2		
	2013		3.2 ± 0.21	5.74 ± 0.74	2.13 ± 0.11	2.36 ± 0.1		
	2014		2.8 ± 0.16	3.62 ± 0.28	2.47 ± 0.15	3.11 ± 0.3		

Таблица 4. Окончание

Место наблюдений	Период наблюдений	Концентрация ВС, мкг/м ³ , Ср + СКО (медиана)					Ссылка
		Весь период	Осень	Зима	Весна	Лето	
Северная Америка							
Штат Миссисипи, США Большие города: Галфпорт (Gulfport) Хаттисбург (Hattiesburg) Джексон (Jackson)	09.2013–12.2014	1.55 ± 1.04 (1.45) 2.00 ± 1.26 (1.85) 2.04 ± 1.43 (1.90)	–	–	–	–	[Nguyen, Roper, 2023]
Штат Миссисипи, США Малые города: Grenada (Гренада) Hernando (Эрнандо) Паскагула (Pascagoula)	09.2013–12.2014	1.01 ± 0.72 (0.81) 1.50 ± 0.82 (1.44) 1.73 ± 0.88 (1.65)	–	–	–	–	
Южная Америка							
Бразилия: Сан-Паулу Рио-де-Жанейро Белу-Оризонти Куриitiba Порту-Аллегри Ресифи	01.06.2007– 31.08.2008	10.6 ± 6.4 3.4 ± 2.5 4.5 ± 3.3 4.4 ± 4.0 3.9 ± 4.3 1.9 ± 1.1	10.8 ± 6.5 3.6 ± 2.3 5.1 ± 3.2 5.2 ± 4.9 5.2 ± 4.7 2.1 ± 1.0	12.2 ± 6.4 4.0 ± 2.5 5.7 ± 3.9 5.0 ± 4.1 5.7 ± 5.4 2.4 ± 1.1	8.1 ± 4.6 2.4 ± 1.5 3.5 ± 2.0 3.3 ± 1.8 3.4 ± 3.5 1.5 ± 0.9	7.8 ± 3.3 2.1 ± 1.2 2.9 ± 1.7 2.1 ± 1.2 1.8 ± 0.8 1.4 ± 0.6	[de Miranda et al., 2012]
Африка							
г. Алжир, Алжир	01.06.2014– 31.05.2015	1.11 ± 2.03	1.21 ± 1.15	1.02 ± 1.18	0.97 ± 0.96	1.28 ± 1.35	[Merabet et al., 2019]
Каир, Египет	Осень 2004, Весна 2005	9.9 ± 6.6 6.9 ± 4.8	–	–	–	–	[Mahmoud et al., 2008]

Уровень загрязнения приземного воздуха крупных городов мира черным углеродом и аэрозольными частицами $PM_{2.5}$ и PM_{10}

В табл. 3 и 4 приведены данные о средних значениях массовой концентрации аэрозольных частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} и черного углерода в приземном воздухе различных крупных городов мира.

Как видно из табл. 3 и 4, уровень аэрозольного загрязнения приземного воздуха урбанизированных районов, расположенных в разных регионах Земного шара, несмотря на особенности географического расположения, рельефа местности, синоптических и метеорологических условий и регионального климата, схож. Это обусловлено спецификой локальных городских источников, численностью и плотностью населения. Уровень аэрозольного загрязнения воздуха Московского мегаполиса соизмерим с уровнем загрязнения большинства крупных городов Европы и Северной Америки, несколько выше, чем в городах Северной Европы, и ниже, чем в городах Южной Европы, Латинской и Южной Америки и Азии. Причем такая тенденция справедлива как для пылевой компоненты атмосферного аэрозоля, так и для черного углерода. Сезонный ход концен-

трации черного углерода и пылевой компоненты приземного аэрозоля в большинстве городов мира подобен сезонному ходу этих аэрозольных составляющих в Московском мегаполисе. Это свидетельствует о схожих механизмах формирования атмосферного аэрозольного поля (источниках эмиссии аэрозольных частиц и путей их вывода из атмосферы) и качественно указывает на общность воздействия этих механизмов на состав аэрозоля в городах в разные сезоны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Специфика изменчивости концентрации черного углерода и аэрозольных частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} в приземном воздухе центра Москвы свидетельствует о том, что основной вклад в загрязнение пылью и углеродсодержащими аэрозолями вносят локальные антропогенные источники: транспорт, теплоэнергетика и другая деятельность населения с учетом внутригодовых особенностей.

Сезонные вариации концентрации каждой из рассмотренных аэрозольных составляющих связаны с изменчивостью их специфических источников и стоков, а также синоптических условий и метеорологических параметров.

БЛАГОДАРНОСТИ

Суточные вариации концентрации аэрозольных компонент, главным образом, отражают активность и специфику человеческой деятельности, а также изменения условий осаждения аэрозолей на поверхность и вертикальной конвекции в нижнем слое атмосферы в течение суток.

Воздействие источников, связанных с региональным и дальним атмосферным переносом в Московский регион аэрозолей горения и/или пыли, на общий фон аэрозольного загрязнения Московского мегаполиса кратковременно, но может приводить к значительному росту (с превышением ПДК) среднесуточных значений массовой концентрации аэрозольных частиц PM_{10} . В 2022 г. аномально высокие значения концентрации аэрозольных составляющих (черный углерод, PM_{10} и $PM_{2.5}$) в приземном воздухе Москвы наблюдались при дальнем переносе загрязнений из районов горения биомассы и/или пыльных бурь. Количество таких дней за год составило менее 9%, что подтверждает аналогичные статистические показатели 2020 и 2021 гг., полученные по данным наблюдений в ИФА РАН и в целом по Москве. Большинство этих дней было связано с неблагоприятными метеорологическими условиями, при которых происходило накопление примесей в нижнем слое атмосферы.

В целом результаты наблюдений за составом приземного аэрозоля в Москве в 2022 г. показали, что по уровню аэрозольного загрязнения Московский мегаполис сопоставим с другими крупными городами Европы и Северной Америки, характеризуется более чистым воздухом по сравнению с урбанизированными районами Азии, Латинской и Южной Америки и не является сильным источником загрязняющих аэрозольных веществ в Европе.

Полученные в данной работе численные значения концентрации ВС и аэрозолей разной дисперсности, их изменчивости в приземном воздухе Москвы могут быть полезными не только для уточнения уровня и пространственного распределения аэрозольного загрязнения приземного воздуха в Москве, но и для исследований роли сажевой и пылевой компонент аэрозоля в процессах изменения регионального климата и состояния городских экосистем, а также при оценках радиационных эффектов в атмосфере, например, при изучении формирования над Московской «острова тепла» в разные сезоны.

Авторы выражают большую признательность руководству ГПБУ «Мосэкомониторинг» за предоставленную возможность доступа к базе данных измерений на наблюдательной сети АСКЗА в Москве.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (полевые наблюдения за составом приземного аэрозоля и экспериментальное измерение концентрации сажевой и пылевой компонент атмосферного аэрозоля) и при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант № 23–27–00063 (тематическая обработка и анализ экспериментальных данных, исследование изменчивости концентрации черного углерода и пыли на основе данных измерений).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Будыко М. И. Изменения климата. Л.: Гидрометеиздат, 1974, 280 с.
- Ван Ген Чен, Гречко Е. И., Емиленко А. С., Копейкин В. М., Фокеева Е. В. Результаты совместных измерений окиси углерода в толще атмосферы и субмикронного аэрозоля в приземном слое в Пекине // Опт. атмосфер. океана. 2003. Т. 16. № 1. С. 45–51.
- Виноградова А. А., Губанова Д. П., Иорданский М. А., Скороход А. И. Влияние метеорологических условий и дальнего переноса воздушных масс на состав приземного аэрозоля в Москве в зимние сезоны // Опт. атмосфер. океана. 2022. Т. 35. № 06. С. 436–446. <https://doi.org/10.15372/AOO20220602>
- Гинзбург А. С., Докукин С. А. Влияние теплового загрязнения атмосферы на климат города (оценки с помощью модели COSMO-CLM) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 1. С. 53–66.
- Глазкова А. А., Кузнецова И. Н., Шалыгина И. Ю., Семутникова Е. Г. Суточный ход концентрации аэрозоля (PM_{10}) летом в Московском регионе // Опт. атмосфер. океана. 2012. Т. 25. № 6. С. 495–500.
- Горчаков Г. И., Аникин П. П., Волох А. А., Емиленко А. С., Исаков А. А., Копейкин В. М., Пономарева Т. Я., Семутникова Е. Г., Свириденков М. А., Шукуров К. А. Исследование состава задымленной атмосферы Москвы во время пожаров торфяников летом-осенью 2002 г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40. № 3. С. 366–380.
- Горчаков Г. И., Ситнов С. А., Семутникова Е. Г., Копейкин В. М., Карпов А. В., 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. // Исследование Земли из космоса. 2018. № 1. С. 27–42.
- Губанова Д. П., Беликов И. Б., Еланский Н. Ф., Скороход А. И., Чубарова Н. Е. Изменчивость приземной концентрации аэрозолей $PM_{2.5}$ в г. Москве по наблюдениям

- в Метеорологической обсерватории МГУ // Опт. атм. океана. 2017. Т. 30. № 12. С. 1033–1042.
- Губанова Д. П., Виноградова А. А., Лезина Е. А., Иорданский М. А., Исаков А. А. Условно-фоновый уровень аэрозольного загрязнения приземного воздуха в Москве и пригороде: сезонные вариации // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023 (а). Т. 59, № 6. С. 754–773.
<https://doi.org/10.31857/S0002351523060056>
- Губанова Д. П., Иорданский М. А., Виноградова А. А., Беликов И. Б., Белоусов В. А. Проблема выбора значений плотности частиц для численной оценки массовой концентрации субмикронного и микронного аэрозоля // Опт. атм. океана. 2023 (б). Т. 36, № 6. С. 469–481.
<https://doi.org/10.15372/AOO20230607>
- Емиленко А. С., Копейкин В. М. Сравнение синхронных измерений концентрации сажи и субмикронного аэрозоля в регионах с различной степенью антропогенной нагрузки // Опт. атм. океана. 2009. Т. 22. № 6. С. 535–540.
- Кобелев В. О., Поповичева О. Б., Синицкий А. И. Климатический трассер – черный углерод на Полярном круге // Науч. вестн. Ямало-Ненецкого автономного округа. 2020. № 1(106). С. 47–53.
<https://doi.org/10.26110/ARCTIC.2020.106.1.004>
- Кондратьев К. Я., Ивлев Л. С., Крапивин В. Ф. Атмосферные аэрозоли: Свойства, процессы образования и воздействия. От нано- до глобальных масштабов. СПб.: ВВМ, 2007. 858 с.
- Копейкин В. М. Наблюдение содержания субмикронного аэрозоля в атмосфере над Россией в международных экспедициях TROICA // Опт. атм. океана. 2008. Т. 21. № 11. С. 970–976.
- Копейкин В. М. Сажевый аэрозоль в атмосфере города Москвы // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34. № 1. С. 104–110.
- Копейкин В. М., Голицын Г. С., Ван Гэнчэнь, Ван Пуцэй, Пономарева Т. Я. Вариации концентрации сажи в мегаполисах Пекине и Москве // Опт. атм. океана. 2019. Т. 32. № 6. С. 453–457.
<https://doi.org/10.15372/AOO20190606>
- Копейкин В. М., Емиленко А. С., Исаков А. А., Лоскутова О. В., Пономарева Т. Я. Изменчивость сажевого и субмикронного аэрозоля в Московском регионе в 2014–2016 гг. // Опт. атм. океана. 2018. Т. 31. № 1. С. 5–10.
<https://doi.org/10.15372/AOO20180101>
- Копейкин В. М., Капустин В. Н., Пекур М. С. Контроль сажевого аэрозоля в атмосфере города Москвы // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1993. Т. 29. № 2. С. 213–217.
- Копейкин В. М., Пономарева Т. Я. Зависимость вариаций содержания сажи в атмосфере Москвы от направления переноса воздушных масс // Опт. атм. океана. 2020. Т. 33. № 10. С. 811–817.
- Кузнецова И. Н., Бруслова Н. Е., Нахаев М. И. Городской остров тепла в Москве: определение, границы, изменчивость // Ми Г. 2017. № 5. С. 49–61.
- 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 // Опт. атм. океана. 2014 (а). Т. 27. № 6. С. 473–482.
- Кузнецова И. Н., Шалыгина И. Ю., Нахаев М. И., Глазкова А. А., Захарова П. В., Лезина Е. А., Звягинцев А. М. Неблагоприятные для качества воздуха метеорологические факторы // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2014 (б). № 351. С. 154–172.
- Локощенко М. А., Богданович А. Ю., Еланский Н. Ф., Лезина Е. А. Температурные инверсии в Москве и их влияние на состав приземного воздуха // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. № 6. С. 641–650.
<https://doi.org/10.31857/S0002351521060080>
- СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 г. № 2.
- Свириденков М. А., Емиленко А. С., Копейкин В. М., Ван Г. Ч. Трансформация оптических свойств и микроструктуры аэрозоля во время смогового эпизода в Пекине // Опт. атм. океана. 2006. Т. 19. № 6. С. 522–525.
- Шевченко В. П., Копейкин В. М., Новигатский А. Н., Малафеев Г. В. Черный углерод в приводном слое атмосферы над северной Атлантикой и морями российской Арктики в июне-сентябре 2017 г. // Океанология. 2019. Т. 59. № 5. С. 771–776.
- Air quality in the world. World's most polluted cities. 2017–2022. <https://www.iqair.com/world-most-polluted-cities>.
- Alas H. D., Müller T., Birmili W., Kecorius S., Cambaliza M. O., Simpas J. B. B., Cayetano M., Weinhold K., Vallar E., Galvez M. C. and Wiedensohler A. Spatial Characterization of Black Carbon Mass Concentration in the Atmosphere of a Southeast Asian Megacity: An Air Quality Case Study for Metro Manila, Philippines // Aerosol Air Qual. Res. 2018. V. 18. P. 2301–2317.
<https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.08.0281>
- Bond T. C., et al. (31 authors). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment // J. Geophys. Res. Atmos. 2013. V. 118. P. 5380–5552.
<https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>
- Briggs N. L., & Long C. M. Critical review of black carbon and elemental carbon source apportionment in Europe and the United States // Atmos. Environ. 2016. V. 144. P. 409–427.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.00/>
- Brinkman A., McGregor J. Solar radiation in dense Saharan aerosol in northern Nigeria // J. Quart. J. Roy. Met. Soc. 1983. V. 109. P. 831–847.
<https://doi.org/10.1256/smsqj.46209>
- Cess R., Potter G., Ghan S., et al. The climatic effects of large injections of atmospheric smoke and dust: A study of climate feedback mechanisms with one- and three-dimensional climate models // J. Geophys. Res. 1980. V. 90. P. 12937–12950.
- Chaibou S., Ma A., and Sha T. Dust radiative forcing and its impact on surface energy budget over West Africa // Sci

- Rep. 2020. V. 10. P. 12236.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-69223-4>
- Chapman S., Watson J.E.M., Salazar A., Thatcher M., McAlpine C.A.* The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review // *Landscape Ecol.* 2017. V. 32. P. 1921–1935.
- Chubarova N., Androsova E., Kirsanov A., Varentsov M., Rivin G.* Urban aerosol, its radiative and temperature response in comparison with urban canopy effects in megacity based on COSMO-ART modeling // *Urban Climate.* 2024. V. 53. P. 101762.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101762>
- Chubarova N.E., Vogel H., Androsova E.E., Kirsanov A.A., Popovicheva O.B., Vogel B., and Rivin G.S.* Columnar and surface urban aerosol in the Moscow megacity according to measurements and simulations with the COSMO-ART model // *Atmos. Chem. Phys.* 2022. V. 22. P. 10443–10466.
<https://doi.org/10.5194/acp-22-10443-2022>
- De Miranda R.M., de Fatima Andrade M., Fornaro A. et al.* Urban air pollution: a representative survey of PM_{2.5} mass concentrations in six Brazilian cities // *Air Qual Atmos Health.* 2012. Vol. 5. P. 63–77.
<https://doi.org/10.1007/s11869-010-0124-1>
- Diapouli E., Kalogridis A.-C., Markantonaki C., Vratolis S., Fetfatzis P., Colombi C., Eleftheriadis K.* Annual Variability of Black Carbon Concentrations Originating from Biomass and Fossil Fuel Combustion for the Suburban Aerosol in Athens, Greece // *Atmosphere.* 2017. V. 8. P. 234.
<https://doi.org/10.3390/atmos8120234>
- Drinovec, L., Močnik, G., Zotter, P., Prévôt, A. S. H., Ruckstuhl, C., Coz, E., Rupakheti, M., Sciare, J., Müller, T., Wiedensohler, A., and Hansen, A. D. A.* The “dual-spot” Aethalometer: an improved measurement of aerosol black carbon with real-time loading compensation // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. V. 8. P. 1965–1979.
<https://doi.org/10.5194/amt-8-1965-2015>
- Gelaro R., et al. (32 authors).* The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // *Journal of Climate.* 2017. V. 30(14). P. 5419–5454.
<https://doi.org/10.1175/jcli-d-16-0758.1>
- Gubanova D., Chkhetiani O., Vinogradova A., Skorokhod A., Iordanskii M.* Atmospheric transport of dust aerosol from arid zones to the Moscow region during fall 2020 // *AIMS Geosciences.* 2022a. V. 8. № 2. P. 277–302.
<https://doi.org/10.3934/geosci.2022017>
- Gubanova D.P., Vinogradova A.A., Iordanskii M.A., Skorokhod A.I.* Variability of Near-Surface Aerosol Composition in Moscow in 2020–2021: Episodes of Extreme Air Pollution of Different Genesis // *Atmosphere.* 2022b. V. 13. P. 574.
<https://doi.org/10.3390/atmos13040574>
- Hansen A.D.A., Rosen H., and Novakov T.* The aethalometer – an instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles // *Sci. Total Environ.* 1984. V. 36. P. 191–196.
- Hristova E., Georgieva E., Veleva B., Neykova N., Naydenova S., Gonsalvesh-Musakova L., Neykova R., Petrov A.* Black Carbon in Bulgaria – Observed and Modelled Concentrations in Two Cities for Two Months // *Atmosphere.* 2022. V. 13. P. 213.
<https://doi.org/10.3390/atmos13020213>
<http://rp5.ru>
<http://www.windy.com/ru>
<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
<https://mosecom.mos.ru/stations>
<https://weatherarchive.ru/Pogoda/Moscow>
<https://www.arl.noaa.gov>
- Jacobson M.Z.* Short-term effects of controlling fossil-fuel soot, biofuel soot and gases, and methane on climate, Arctic ice, and air pollution health // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. D14209.
<https://doi.org/10.1029/2009JD013795>
- Janssen N., Gerlofs-Nijland M.E., Lanki T., Salonen R.O., Cassee F. et al.* Health effects of black carbon / World Health Organization. Regional Office for Europe. 2012.
<https://apps.who.int/iris/handle/10665/352615>
- Liu Q., Ma T., Olson M.R., Liu Y., Zhang T., Wu Y. & Schauer J.J.* Temporal variations of black carbon during haze and non-haze days in Beijing // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. P. 33331. 10.1038/srep33331 (2016).
- Lokoshchenko M.A., Alekseeva L.I.* Influence of Meteorological Parameters on the Urban Heat Island in Moscow // *Atmosphere.* 2023. V. 14. P. 507.
<https://doi.org/10.3390/atmos14030507>
- Mahmoud K.F., Alfaro S.C., Favez O., Abdel Wahab M.M., Sciare J.* Origin of black carbon concentration peaks in Cairo (Egypt) // *Atmos. Res.* 2008. V. 89. P. 161–169.
- Mahowald N., Albani S., Kok J.F., Engelstaeder S., Scanza R., Ward D.S., Flanner M.G.* The size distribution of desert dust aerosols and its impact on the Earth system // *Aeolian Research.* 2014. V. 15. P. 53–71.
<https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2013.09.002>
- Malik A., Aggarwal S.G., Ohata A., Mori T., Kondo Y., Sinha P.R., Patel P., Kumar B., Singh K., Soni D., Koike M.* Measurement of Black Carbon in Delhi: Evidences of Regional Transport, Meteorology and Local Sources for Pollution Episodes // *Aerosol Air Qual. Res.* 2022. V. 22. P. 220128.
<https://doi.org/10.4209/aaqr.220128>
- Merabet H., Kerbachi R., Mihalopoulos N., Stavroulas I., Kanakidou M., & Yassaa N.* Measurement of atmospheric black carbon in some South Mediterranean cities: Seasonal variations and source apportionment // *Clean Air Journal.* 2019. V. 29 (2).
<https://doi.org/10.17159/caj/2019/29/2.7500>
- Mousavi A., Sowlat M.H., Hasheminassab S., Polidori A., Sioutas C.* Spatio-temporal trends and source apportionment of fossil fuel and biomass burning black carbon (BC) in the Los Angeles Basin // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 640. P. 1231–1240.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.022>
- Nguyen H.T., Roper C.* Black carbon concentrations, sources, and health risks at six cities in Mississippi, USA // *Air Qual Atmos Health.* 2023.
<https://doi.org/10.1007/s11869-023-01433-x>
- Popovicheva O., Chichaeva M., Kovach R., Zhdanova E., Kasimov N.* Seasonal, Weekly, and Diurnal Black Carbon in Moscow Megacity Background under Impact of Urban and Regional Sources // *Atmosphere.* 2022. V. 13. P. 563.
<https://doi.org/10.3390/atmos13040563>

- Popovicheva O., Diapouli E., Chichaeva M., Kosheleva N., Kovach R., Bitukova V., Eleftheriadis K., Kasimov N. Aerosol characterization and peculiarities of source apportionment in Moscow, the largest and northernmost European megacity // *Sci. Total Environ.* 2024. V. 918. P. 170315.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170315>
- Popovicheva O., Kireeva E., Persiantseva N., Timofeev M., Kistler M., Kasper-Giebl A., Kopeikin V. Physicochemical characterization of smoke aerosol during large-scale wildfires: extreme event of August 2010 in Moscow // *Atmos. Environ.* 2014 (a). V. 96. P. 405–414.
- Popovicheva O. B., Kireeva E. D., Steiner S., Rothen-Rutishauser B., Persiantseva N. M., Timofeev M. A., Shonija N. K., Comte P., Czerwinski J. Microstructure and chemical composition of diesel and biodiesel particle exhaust // *Aerosol Air Qual. Res.* 2014b. V. 14. P. 1392–1401.
- Popovicheva O. B., Volpert E., Sitnikov N. M., Chichaeva M. A., Padoan S. Black Carbon in spring aerosols of Moscow urban background // *Geography, Environment, Sustainability.* 2020. V. 13. № 1. P. 233–143
<https://doi.org/10.24057/2071–9388–2019–90>
- Ramachandran S., Rajesh T. Black carbon aerosol mass concentrations over Ahmedabad, an urban location in western India: Comparison with urban sites in Asia, Europe, Canada, and the United States // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2007. V. 112. D06211.
- Salvador P., na Artñano B., Molero F. et al. African dust contribution to ambient aerosol levels across central Spain: characterization of long-range transport episodes of desert dust // *Atmos. Res.* 2013. V. 127. P. 117–129.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.12.011>
- Savdkoohi M., Pandolfi M., Reche C. et al. (50 authors). The variability of mass concentrations and source apportionment analysis of equivalent black carbon across urban Europe // *Environment International.* 2023. V. 178. 108081. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108081>
- Schepanski K. Transport of mineral dust and its impact on climate // *Geosciences.* 2018. V. 8. № 5. P. 151.
<https://doi.org/10.3390/geosciences8050151>
- Seinfeld J. H., Pandis S. N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change, 2nd Edition. New York: Wiley, USA, 2006. 1232 p.
- Sokhi R. S. et al. (97 authors). A global observational analysis to understand changes in air quality during exceptionally low anthropogenic emission conditions // *Environ. Intern.* 2021. V. 157. № 12. P. 106818.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106818>
- Stein A. F., Draxler R. R., Rolph G. D., Stunder B. J. B., Cohen M. D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 2015. V. 96. P. 2059–2077.
<http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14–00110.1>
- Steiner S., Czerwinski J., Comte P., Popovicheva O., Kireeva E., Müller L., Heeb N., Mayer A., Fink A., Rothen-Rutishauser B. Comparison of the toxicity of diesel exhaust produced by bio- and fossil diesel combustion in human lung cells in vitro // *Atmos. Environ.* 2013. V. 81. P. 380–388.
- Tiwari S., Srivastava A. K., Bisht D. S., Parmita P., Srivastava M. K., Attri S. Diurnal and seasonal variations of black carbon and PM_{2.5} over New Delhi, India: Influence of meteorology // *Atmos. Res.* 2013. V. 125. P. 50–62.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.01.011>
- Varentsov M., Samsonov T., Demuzere M. Impact of Urban Canopy Parameters on a Megacity's Modelled Thermal Environment // *Atmosphere.* 2020. V. 11. P. 1349.
<https://doi.org/10.3390/atmos11121349>
- Vinogradova A. A., Kopeikin V. M., Vasileva A. V., Smirnov N. S., Ivanova Yu. A. Concentration of Black Carbon in the Near-Surface Atmosphere in the Pechora-Ilych Natural Reserve: Measurements and Merra-2 Reanalysis // *Izv., Atmos. Ocean. Phys.* 2020. V. 56. № 10. P. 1191–1201.
<https://doi.org/10.1134/S0001433820100084>

VARIABILITY OF BLACK CARBON AND AEROSOLS PM₁₀ AND PM_{2.5} IN THE NEAR-SURFACE AIR OF THE MEGALOPOLIS

A. A. Vinogradova^{1,*}, D. P. Gubanova¹, V. M. Kopeikin¹

¹Obukhov Institute of Atmospheric Physics, RAS, Pyzhevsky Lane, 3, Moscow, 119017 Russia

*e-mail: anvinograd@yandex.ru

The results of continuous observations of mass concentration of black carbon and aerosols PM₁₀, PM_{2.5} in the near-surface layer of the atmosphere in the center of Moscow metropolis in 2022 are considered. The interpretation of the results was carried out applying the meteorological data, backward trajectories of air mass transport to Moscow and MERRA-2 reanalysis data on the spatial distribution of dust and black carbon in near-surface air of the center of the European part of Russia. The days (less than 9%) of an extreme increase in black carbon and PM₁₀ concentrations due to atmospheric transport of fire aerosols or dust to Moscow from other regions are highlighted. The variability of a typical aerosol (outside of such episodes) in the megalopolis has been studied at different time scales – from daily to monthly and seasonal ones. The main contribution of dust and carbon-containing aerosols to megalopolis atmosphere is made by local anthropogenic sources (transport, thermal energy, industrial enterprises, construction facilities). A high correlation has been established between the concentrations of black carbon and PM_{2.5} particles in daily and seasonal changes. The data on air pollution with black carbon and aerosols PM_{2.5} and PM₁₀ in large cities of the world show that the Moscow metropolis does not exceed the major cities of Europe and North America in terms of aerosol pollution.

Keywords: atmosphere, Moscow megalopolis, near-surface aerosol, PM₁₀, PM_{2.5}, black carbon, mass concentration, atmospheric transport, meteorological conditions