

УДК 551.510.42; 551.510.411

УСЛОВНО-ФОНОВЫЙ УРОВЕНЬ АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИЗЕМНОГО ВОЗДУХА В МОСКВЕ И ПРИГОРОДЕ: СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ

© 2023 г. Д. П. Губанова^{а, *}, А. А. Виноградова^а, Е. А. Лезина^б,
М. А. Иорданский^а, А. А. Исаков^а

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

^бГПБУ “Мосэкомониторинг”, ул. Новый Арбат, 11/1, Москва, 121019 Россия

*e-mail: gubanova@ifaran.ru

Поступила в редакцию 06.04.2023 г.

После доработки 18.07.2023 г.

Принята к публикации 28.08.2023 г.

Анализируются данные непрерывных наблюдений за составом аэрозоля в приземной атмосфере в Москве (в центре города) и в Подмоскovie (вблизи г. Звенигород Московской области) в течение трех лет, с осени 2019 до конца 2022 года. Выполнено сравнение полученных данных с результатами наблюдений на московской сети станций ГПБУ “Мосэкомониторинг”. Введено понятие условно фоновое аэрозольное загрязнение приземной атмосферы в Москве для тех дней, когда значение среднесуточной массовой концентрации частиц PM_{10} ниже ПДК (60 мкг/м^3). Число таких дней составило больше 91% в Москве за три года наблюдений. Ранее авторами было установлено, что все эпизоды более высокого аэрозольного загрязнения городского воздуха (с превышением ПДК) связаны либо с наличием близкого локального источника в городе, либо с дальним переносом аэрозолей горения и/или пыли в Московскую область из других регионов. Среднесуточная концентрация $PM_{2.5}$ в городе и пригороде круглогодично ниже ПДК (35 мкг/м^3). Условно фоновое аэрозольное загрязнение приземной атмосферы формируется как природными, так и антропогенными источниками аэрозолей, причем не только локального, но и удаленного происхождения. В его уровне и составе неявно отражается влияние метеорологических параметров на источники и стоки аэрозолей, а также адвективного переноса аэрозоля воздушными массами в город и из него. Приведены результаты анализа сезонных вариаций различных показателей состава аэрозоля в приземной атмосфере при условно фоновом загрязнении: массовой концентрации частиц PM_{10} , $PM_{2.5}$ и отдельных химических элементов, распределения химических элементов по размерам аэрозольных частиц. Делается акцент на сходстве и различии этих характеристик в приземном воздухе города и пригорода в разные сезоны.

Ключевые слова: атмосфера, мегаполис, пригород, приземный аэрозоль, условно фоновое аэрозольное загрязнение, PM_{10} , $PM_{2.5}$, элементный состав, массовая концентрация, распределение химических элементов по размерам аэрозольных частиц

DOI: 10.31857/S0002351523060056, EDN: OQZOOA

ВВЕДЕНИЕ

В крупных городах природные экосистемы нарушены антропогенным воздействием [Касимов, 2013], что может отрицательно влиять на экологическое равновесие в трофических цепях городской окружающей среды и качество жизни населения. Состав приземного воздуха в городе и пригороде в значительной степени отличается не только за счет различных ландшафта, орографии, плотности застройки, ветрового режима, специфических локальных источников, но и в связи с формированием над городом так называемого “острова тепла” [Кузнецова и др., 2017; Локошенко и Енукова, 2020; Chapman et al., 2017; Loko-

shchenko and Alekseeva, 2023] и воздействием теплового загрязнения, создаваемого антропогенными потоками тепла [Гинзбург и Демченко, 2019; Гинзбург и Докукин, 2021]. В совокупности данные факторы обуславливают более сложный газовый и аэрозольный состав атмосферы мегаполисов, влияющий на химические процессы и физические свойства всех составляющих атмосферного воздуха. Повышенное содержание в воздухе монооксида углерода, оксидов азота и других газов, пониженная концентрация кислорода в летнее время, внезапные колебания концентрации, размера и состава аэрозольных частиц, температурные волны жары и холода — все

Таблица 1. Сравнение стандартов ПДК аэрозольных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ в приземном воздухе городов, принятых в России, ЕС, США, Китае и рекомендованных ВОЗ [ГН 2.1.6.3492-17, 2019; EEA Air quality standards; U.S. EPA National Ambient..., 2006; GB 3095-2012, 2012; WHO global air quality ..., 2021]

Параметр	PM_{10}					$PM_{2.5}$				
	Россия	ЕС	США	Китай	ВОЗ	Россия	ЕС	США	Китай	ВОЗ
Среднесуточная ПДК, мкг/м ³	60	50	150	150	45	35	—*	35	75	15
Среднегодовая ПДК, мкг/м ³	40	40	—*	70	15	25	25	12	35	5

* Не нормируется.

эти индикаторы качества воздуха, составляющие биоклиматические факторы комфортности среды, сказываются на самочувствии и здоровье населения [Ревич и Малеев, 2011; Ревич, 2018; Revich et al., 2016; Zhang et al., 2021].

Одним из основных критериев качества воздуха ([Ревич, 2018; Transforming our World..., 2015]) является содержание в атмосфере мелкодисперсного аэрозоля $PM_{2.5}$ (с диаметром частиц от 10 нм до 2.5 мкм) и аэрозоля PM_{10} , включающего также частицы более крупной размерности (с диаметром до 10 мкм). Стандартами разных стран и организаций для оценки качества городской окружающей среды и, в частности, степени загрязненности атмосферы, установлены количественные показатели содержания аэрозольных частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} в приземном воздухе в единицах их массовой концентрации. В табл. 1 приведены предельно допустимые концентрации (ПДК) аэрозолей $PM_{2.5}$ и PM_{10} , введенные соответствующими ведомствами России [ГН 2.1.6.3492-17, 2019], Евросоюза (ЕС) [EEA Air quality standards], США [U.S. EPA National Ambient..., 2006], Китая [GB 3095-2012, 2012] и Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) [WHO global air quality ..., 2021].

В последние годы, в связи с возрастанием числа дней с неблагоприятными метеорологическими условиями (НМУ) и опасными погодными явлениями, быстрым распространением эпидемий и опасных инфекций, влияющих на здоровье населения, больше внимания стало уделяться соответствию качества атмосферного воздуха в городах и урбанизированных районах мира утвержденным нормативам (например, [Chubarova et al., 2021; Sokhi et al., 2021; Zhang et al., 2021]). Однако наблюдений за атмосферным аэрозолем все еще недостаточно при оценке состава атмосферы и качества окружающей среды. Это связано с тем, что свойства атмосферных аэрозолей описываются множеством изменяющихся параметров, в отличие от других загрязняющих примесей, которые характеризуются, главным образом, их концентрацией.

Аэрозоль — изменчивая составляющая атмосферы, влияющая как на состояние окружающей

среды, так и на климат разных природных зон и территорий [Seinfeld and Pandis, 2006; Кондратьев и др., 2007; Гинзбург и др., 2008]. Различные источники (дальние и локальные, природные и антропогенные) поставляют в атмосферу первичный аэрозоль разного состава, как по размеру частиц, так и по химическим компонентам. Кроме того, в самой атмосфере, содержащей не только аэрозольные, но и газовые примеси, возможны образование вторичных аэрозольных частиц, а также различная трансформация физических и химических свойств аэрозоля. Все эти процессы, их наличие и эффективность, зависят как от химической активности веществ в воздухе и интенсивности солнечного излучения, так и от метеорологических параметров атмосферы, вариаций эмиссий и стоков примесей, а также от условий их дальнего распространения с воздушными массами в разные сезоны года. Таким образом, детальное исследование аэрозоля в крупном городе требует сведений о большом числе переменных, описывающих свойства атмосферы, а также, по возможности, данных о составе эмиссий и расположении как природных, так и антропогенных источников различных атмосферных составляющих.

При изучении атмосферного аэрозоля очень полезную информацию дает его элементный состав, который косвенно указывает на локальные/удаленные источники загрязнения атмосферы и пути его поступления к месту наблюдений [Rasmussen, 1998; Salvador et al., 2010; Губанова и др., 2018; Трефилова и др., 2012]. На данный момент число работ, посвященных изучению элементного состава атмосферных аэрозолей в разных районах России, растет. Обзор на эту тему можно найти, например, в публикации [Губанова и др., 2021]. В Московском регионе исследования элементного состава аэрозоля до недавнего времени проводились эпизодически, например, в работах [Волох и Журавлева, 1994; Губанова и др., 2017; Губанова и др., 2021a, 2021b; Огородников и др., 1996; Andronova et al., 2011]. В последние годы сотрудниками МГУ им. М.В. Ломоносова реализуются комплексные исследования по определению и сопоставлению элементного состава твер-

дых частиц почв и дорожной пыли с составом атмосферного аэрозоля и осадков в Москве и Подмосковье [Власов и др., 2014; Касимов и др., 2021; Кошелева и др., 2018; Vlasov et al., 2021a, 2021b; Kasimov et al., 2020].

В целом, необходимо отметить, что обобщение данных об аэрозольном загрязнении атмосферы городов — тема сложная (см., например, [Безуглая и Смирнова, 2008]), поскольку даже в одной и той же природной зоне каждый город уникален своими антропогенными нагрузками. Самый общий подход к этому вопросу — выделение антропогенной части на фоне природной, свойственной окружающим ландшафтам — мог бы позволить хотя бы качественно оценить степень влияния человека на природные экосистемы и по этому показателю сравнивать разные города. Однако атмосфера — это среда, свойства и состав которой быстро меняются благодаря циркуляции воздушных масс. Эти процессы способны перемешивать примеси в воздухе над регионами, площадь которых значительно превышает площадь отдельного города, что мешает выделению природного уровня и состава загрязнения атмосферы, соответствующего исходному окружающему ландшафту в отсутствие антропогенного воздействия. Вопросам учета таких явлений при классификации воздушных масс и их загрязнений посвящены, например, публикации [Власенко и др., 2019; Польшкин и Панченко, 2022; Ruckstuhl et al., 2012].

В настоящей работе анализируются экспериментальные данные о составе аэрозоля в приземном воздухе Москвы и одного из подмосковных районов, полученные в рамках синхронного комплексного эксперимента по изучению атмосферного аэрозоля, проводимого Институтом физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН). Рассмотрены ежесуточные значения массовой концентрации частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$, а также элементный состав аэрозоля и распределение химических элементов по размерам аэрозольных частиц для разных сезонов с осени 2019 до конца 2022 года. Акцент данной статьи делается на выявлении наиболее типичных и, наоборот, различных характеристик аэрозольного загрязнения приземного воздуха в крупном городе и в его пригороде в разные сезоны. Вводится понятие условно фоновое аэрозольное загрязнение приземного воздуха и оценены его количественные показатели.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пункты наблюдений и предмет исследований

С октября 2019 года сотрудниками ИФА РАН проводится комплексный аэрозольный эксперимент по синхронному исследованию физико-химических характеристик приземного аэрозоля в Москве и ее пригороде. Пункты наблюдений рас-

положены: 1) в центральной части Москвы, во дворе ИФА РАН (пункт ИФА), примерные координаты 55.74° с.ш.; 37.62° в.д., в зоне плотной городской застройки, недалеко от транспортных магистралей средней загруженности; 2) в пригороде, на Звенигородской научной станции ИФА РАН (пункт ЗНС), примерные координаты 55.70° с.ш.; 36° в.д., около 60 км к западу от столицы, на окраине г. Звенигород Московской области. Схема расположения пунктов наблюдений представлена на рис. 1.

Кроме того, данные, полученные в пункте ИФА, сопоставляются с результатами наблюдений на московской сети автоматических станций контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) ГПБУ “Мосэкомониторинг” (МЭМ). Измерительная сеть МЭМ в Москве включает 58 АСКЗА, расположенных на территории мегаполиса в зонах с различной экологической нагрузкой (жилые микрорайоны, крупные автомагистрали, промышленные и строительные комплексы, ТЭЦ и предприятия теплоэнергетики, нефтеперерабатывающий комплекс, лесопарковые зоны, смешанные территории). Непрерывные измерения массовой концентрации приземного аэрозоля PM_{10} и $PM_{2.5}$ в последние годы (2019–2022) осуществляются на семнадцати—двадцати из АСКЗА МЭМ. Более подробно сеть АСКЗ МЭМ описана на официальном сайте ГПБУ “Мосэкомониторинг” [<https://mosecom.mos.ru/stations/>], а также в [Доклад..., 2023; Еланский и др., 2022]. Наиболее интересными для сравнения с нашими данными, полученными в пункте ИФА, по географическому положению представляются АСКЗА “Спиридоновка” и “Сухаревская пл.” (см. рис. 1). Они находятся в центре Москвы, в пределах Садового кольца, на расстоянии 3–4 км от пункта ИФА. По степени антропогенной нагрузки и специфики городской инфраструктуры наиболее схожи пункт ИФА и АСКЗА “Спиридоновка”.

Предметом наблюдений в проводимом в ИФА РАН комплексном эксперименте являются распределение частиц по размерам, счетная и массовая концентрация аэрозольных частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} , элементный состав и морфологическая структура приземного аэрозоля. Некоторые результаты, полученные в рамках данного эксперимента, представлены, например, в работах [Губанова и др., 2021a, 2021b, 2021v; Gubanova et al., 2022a, 2022b].

Приборы, методы получения и анализа данных

В пунктах ИФА и ЗНС проводятся синхронные наблюдения с применением идентичных приборов и оборудования. Измерение микрофизических характеристик приземного аэрозоля осуществляется круглогодично (с осени 2019 г. по

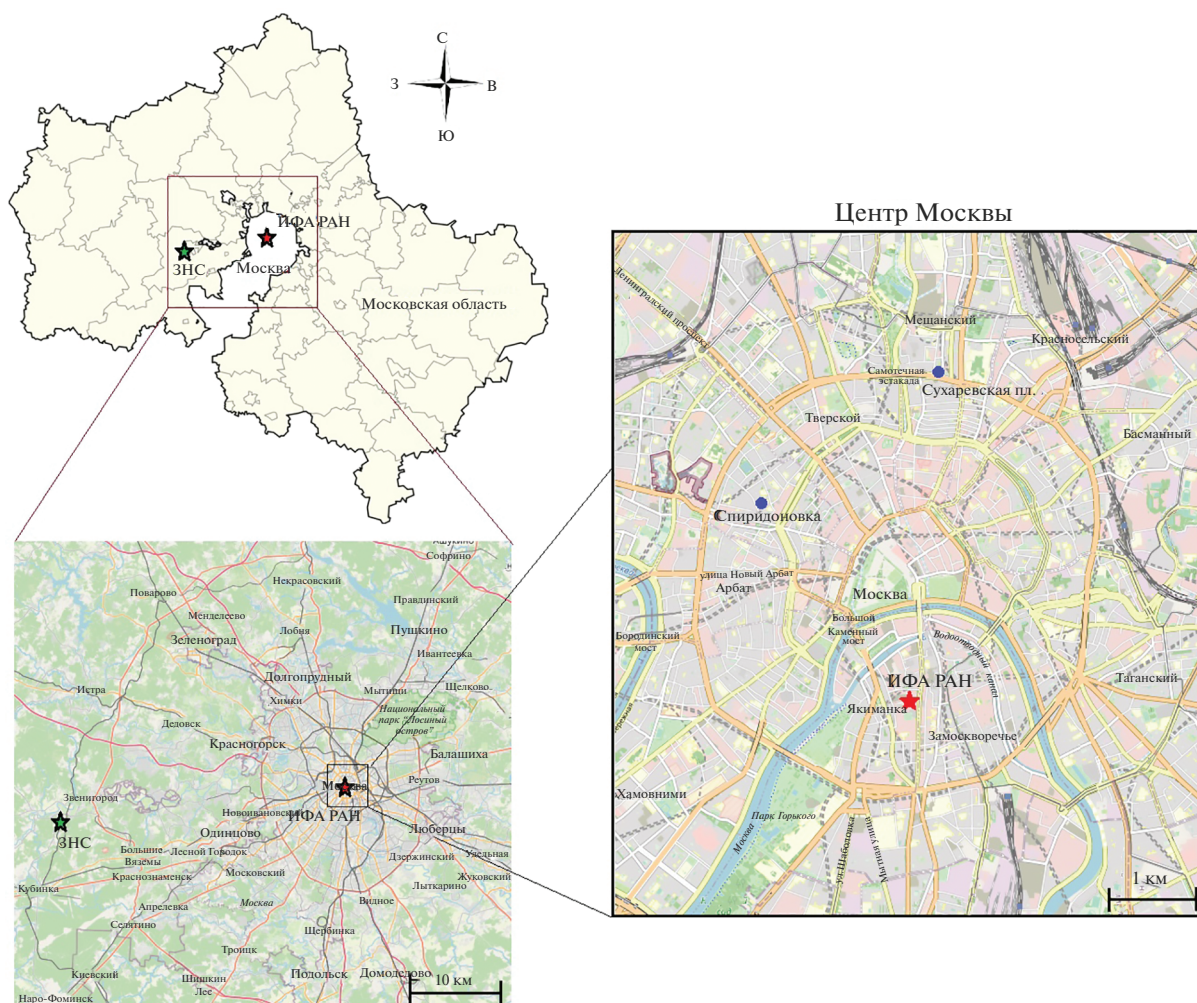


Рис. 1. Схема расположения пунктов наблюдения ИФА, ЗНС и АСКЗА МЭМ “Спиридоновка” и “Сухаревская пл.”

наст. время) в непрерывном автоматическом режиме с временным разрешением 5 мин с помощью лазерных аэрозольных спектрометров ЛАС-П (разработчик – НИФХИ им. Л.Я. Карпова, рег. № 20200-00 в Госреестре СИ) и оптико-электронных аэрозольных счетчиков ОЭАС-05 (разработчик – НИФХИ им. Л.Я. Карпова, рег. № 41182-09 в Госреестре СИ). Спектрометры ЛАС-П предназначены для регистрации частиц диаметром 0.15–1.5 мкм в 10-ти каналах, а счетчики ОЭАС-05 – для регистрации частиц диаметром 0.3–10 мкм в 10-ти каналах.

Методически эксперимент организован таким образом, что в течение 5 недель в центральном месяце каждого сезона (январь, апрель, июль, октябрь) проводится интенсивная фаза исследований с отбором аэрозольных проб на гравиметрический и элементный анализ. Забор проб осуществляется на высоте около 2 м над поверхностью земли на фильтры АФА-ВП-20 и АФА-ХА-20 соответственно с помощью аспирационных пробоотборников со

скоростью отбора 10–14 м³/ч. Смена фильтров производится в 9:00 МСК ежедневно (2019–2021 гг.) или еженедельно (начиная с 2022 г. по наст. время).

В эти же периоды (в течение всех 35 суток) производится отбор проб на шестикаскадные импакторы (разработчик – НИФХИ им. Л.Я. Карпова) [Биргер и др., 1983; Самсонов, 2016] на гидрофобные фильтры из ткани Петрянова типа ФППД и аналитические фильтры типа АФА-ВП-10 для изучения распределения общей массы и массы различных химических элементов в составе аэрозоля по различным размерным фракциям аэрозольных частиц. Импакторы имеют производительность 15 л/мин и следующие диапазоны размеров частиц по каскадам: диаметр частиц $d > 5$ мкм; $3 \text{ мкм} < d < 5 \text{ мкм}$; $2 \text{ мкм} < d < 3 \text{ мкм}$; $1 \text{ мкм} < d < 2 \text{ мкм}$; $0.5 \text{ мкм} < d < 1 \text{ мкм}$; $d < 0.5 \text{ мкм}$.

Дополнительно в пункте ИФА в интенсивные фазы эксперимента производится отбор проб на морфологический анализ на гидрофобные мембранные фильтры из политетрафторэтилена

(ПТФЭ) и волокнистые фильтры из ткани Петрянова с помощью малообъемного пробоотборника воздуха. Время отбора проб составляет от 12 до 24 ч в разные дни в зависимости от сезона, синоптической обстановки и метеорологических условий. Более подробно методика и результаты исследования морфологической структуры частиц приземного аэрозоля в Москве описаны в [Губанова и др., 2023; Gubanova et al., 2023].

Определение и анализ различных параметров аэрозоля производится с помощью следующих методов:

- микрофизические характеристики аэрозольных частиц (распределение числа частиц по размерам, счетная концентрация) — оптическим методом: регистрация аэрозольных частиц различных размеров по изменению интенсивности рассеянного света с помощью фотодетекторов;
- массовая концентрация аэрозоля — методом гравиметрии (по привесу на аэрозольных фильтрах) и/или численным расчетом с использованием данных о распределении числа частиц по размерам [Seinfeld and Pandis, 2006];
- элементный состав аэрозоля — методами атомно-эмиссионной спектроскопии (ICP-AES), масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS), рентгенофлуоресцентного анализа (XFA) [Карандашев и др., 2007; Кудряшов, 1997; Эрхардт, 1985].

Интернет-ресурсы и базы данных, используемые при анализе и интерпретации результатов:

— метеорологические параметры: данные для ИФА — с ближайшей к ИФА РАН (на расстоянии 850 м) метеостанции Балчуг, а также карты погоды в Москве (веб-сайты [http://rp5.ru; http://www.windy.com/ru; https://weatherarchive.ru/Pogoda/Moscow]) и для ЗНС — со стандартных метеоконфлюэсов, расположенных на территории ЗНС ИФА РАН;

— обратные траектории переноса воздушных масс к точке наблюдения, рассчитанные с помощью модели HYSPLIT [Stein et al., 2015] на сайте ARL NOAA [https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php];

— данные о массовой концентрации аэрозолей PM_{10} и $PM_{2.5}$ в Москве по результатам измерений на сети АСКЗА МЭМ [http://mosecom.mos.ru/].

В рамках комплексного аэрозольного эксперимента в ИФА РАН получены непрерывные ряды данных о распределении числа аэрозольных частиц по размерам (в диапазоне 0.2–10 мкм) и их счетной концентрации в приземном слое атмосферы за почти 4 года наблюдений.

С использованием этих данных по известной формуле [Seinfeld and Pandis, 2006] рассчитана массовая концентрация аэрозольных частиц различных фракций:

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

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:

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

где $n_N^0 = dN/d \lg_{10}(D_p)$ — измеренное приборами ЛАС-П и ОЭАС-05 распределение числа аэрозольных частиц по размерам.

Отметим, что значение плотности (1.8 г/см^3) выбрано для аэрозольных частиц размером 0.2–10 мкм для городских условий с учетом результатов анализа авторами многочисленных опубликованных работ по экспериментальному определению плотности частиц различных размеров и состава, а также данных собственных наблюдений о составе и морфологии аэрозольных частиц в приземном слое атмосферы в центре Москвы [Губанова и др., 2023].

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

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования показали, что все эпизоды повышенного аэрозольного загрязнения городского воздуха (рис. 2), когда зарегистрированы значения среднесуточной концентрации частиц PM_{10} выше ПДК, связаны либо с близким локальным источником (июль 2021 г.) [Губанова и др., 2021б], либо с дальним атмосферным переносом аэрозолей горения и/или пыли в Московскую область из других регионов (остальные эпизоды повышенной концентрации PM_{10} [Gubanova et al., 2022a, 2022b]). Данные измерений на АСКЗА МЭМ подтверждают этот вывод. Как видно по рис. 2, случаи резкого роста концентрации частиц PM_{10} (в городе — выше ПДК) наблюдаются в одни и те же дни на всех рассмотренных станциях (включая и пригородный пункт ЗНС). Это указывает на загрязненность приземного слоя атмосферы над большой территорией, что характерно для условий регионального переноса примесей воздушными массами.

На рис. 2б показано, как хорошо сходятся результаты наших измерений в пункте ИФА со значениями концентрации частиц PM_{10} , усредненными по 17–20 АСКЗА МЭМ, определявшими этот параметр атмосферы в городе в рассматриваемые годы. Таким образом, почти всегда можно говорить о реальном общем аэрозольном загрязнении воздуха в Москве в те дни, когда в пункте

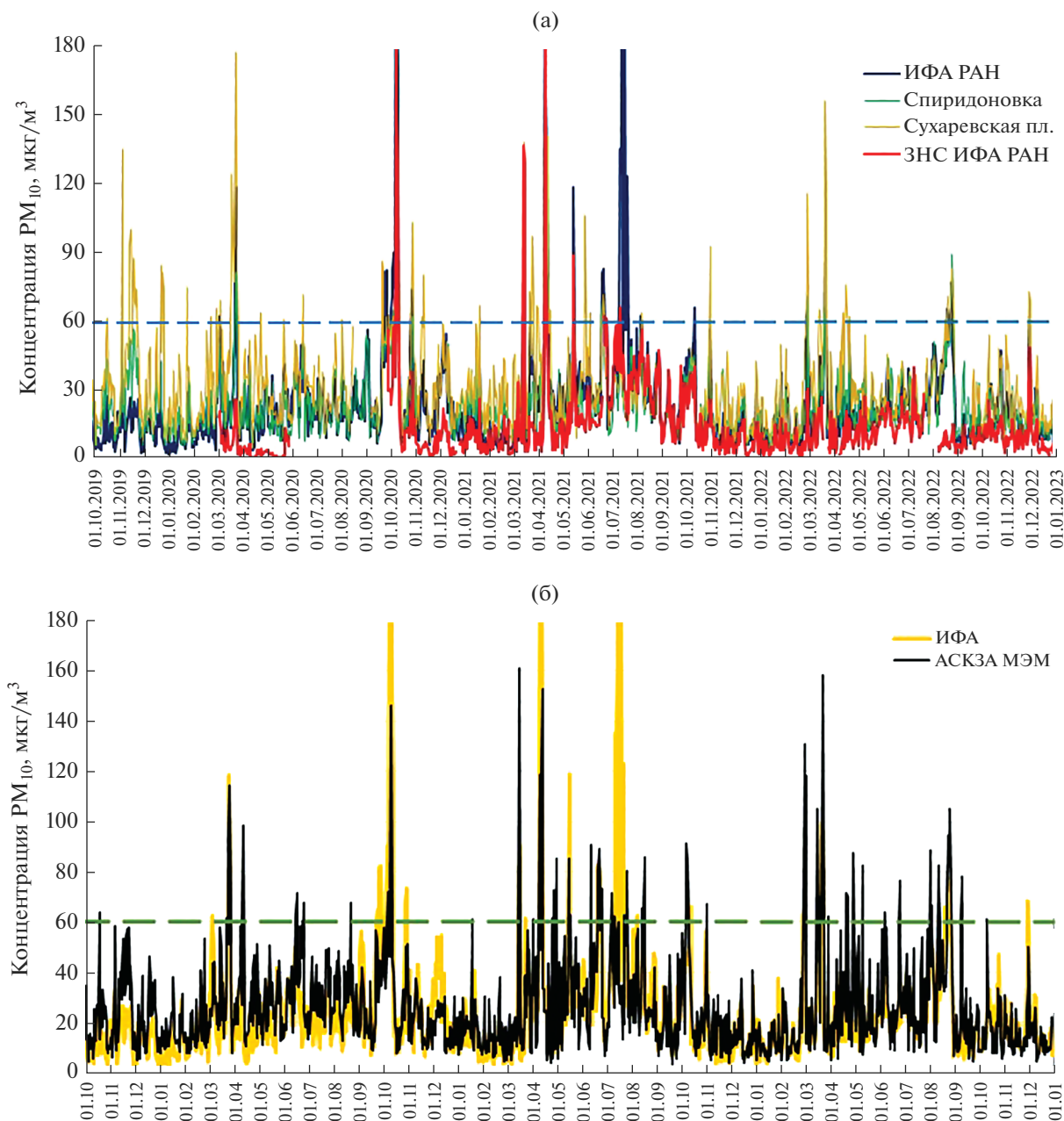


Рис. 2. Среднесуточные значения концентрации частиц PM_{10} за три года: а – наблюдения в пунктах ИФА, ЗНС и на АСКЗА МЭМ “Спиридоновка” и “Сухаревская пл.”; прямоугольники вверх отмечают периоды интенсивного комплексного эксперимента для каждого сезона (см. текст методической части); б – наблюдения в пункте ИФА и усредненные данные всех АСКЗА МЭМ, измерявших концентрацию частиц PM_{10} в Москве в 2019–2022 годах. Горизонтальный синий пунктир – уровень среднесуточной ПДК для PM_{10} в воздухе городских и сельских поселений [ГН 2.1.6.3492–17, 2019].

ИФА наблюдаются значения концентрации PM_{10} выше ПДК.

Эпизод лета 2021 года в Москве стоит особняком. В это время вблизи ИФА РАН (на расстоянии 150 м) осуществлялся интенсивный демонтаж и снос старых производственных зданий разной высотности, и концентрация частиц PM_{10}

была аномально высокой только в пункте наблюдений ИФА. Этот уникальный случай выявления атмосферного загрязнения от типичного городского источника рассмотрен подробно в [Губанова и др., 2021б]. Понятно, что на результатах измерений на станциях МЭМ, удаленных на несколько километров, и, тем более, в пункте ЗНС это событие никак не сказалось (рис. 2).

Таблица 2. Коэффициенты корреляции между концентрациями частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ в Москве (ИФА) и пригороде (ЗНС), а также между пунктами наблюдений по размерным фракциям частиц — за три года по всем среднесуточным значениям или только для дней УФАЗ

	$PM_{10} - PM_{2.5}$		ЗНС – ИФА	
	ЗНС	ИФА	PM_{10}	$PM_{2.5}$
Все данные	0.76	0.58	0.75	0.75
Дни УФАЗ	0.70	0.50	0.67	0.72

Среднесуточные значения концентрации $PM_{2.5}$ (нет на рисунке) были в эти годы практически все время ниже ПДК (35 мкг/м^3), как в городе, так и в пригороде [Gubanova et al., 2021b].

Введение понятия условно фонового уровня аэрозольного загрязнения в Москве

Анализ уровня аэрозольного загрязнения приземного воздуха в Москве и пригороде на основе почти четырехлетних непрерывных рядов данных (с учетом синоптико-метеорологических условий, сезонных особенностей и специфики городских антропогенных источников) выявил лишь несколько эпизодов аномально высокого аэрозольного загрязнения атмосферы в Московском мегаполисе (длительностью от 2 до 10 дней каждый), сопровождавшихся превышением величины ПДК среднесуточными значениями массовой концентрации аэрозоля PM_{10} и неблагоприятными метеорологическими условиями (НМУ), подробно рассмотренными в работе [Кузнецова и др., 2014].

Все остальное время в Москве средняя суточная концентрация частиц PM_{10} не превосходит ПДК. Число таких дней за три года наблюдений составляет более 94% в среднем для двух станций в центре города (ИФА и АСКЗА МЭМ “Спирidonовка”) и более 91% для более загрязненного района АСКЗА МЭМ “Сухаревская площадь”, а для средних значений массовой концентрации PM_{10} по Москве в целом (с учетом данных измерений на всех АСКЗА МЭМ) — даже больше 93%. Это позволяет ввести для Москвы понятие условно фонового аэрозольного загрязнения (УФАЗ) приземного воздуха, критерием которого являются дни, когда средняя суточная концентрация аэрозольных частиц PM_{10} не превосходит ПДК.

Необходимо отметить, что УФАЗ в городе формируется как природными, так и антропогенными источниками аэрозолей не только локального, но и удаленного происхождения. В его показателях неявно учитывается влияние метеопараметров на источники и стоки аэрозоля, а также адвективного переноса аэрозоля воздушными массами в город и из него. Мы не вводим строго

математически конкретные значения аэрозольных составляющих — как фон. Они вычисляются в данной работе по тем суткам, которые соответствуют вводимому условию, и описывают характеристики и вариации введенного условно фонового аэрозольного загрязнения. Похожее понимание городского фона для Санкт-Петербурга использовали авторы работы [Власенко и др., 2019]. Еще раз подчеркнем, что параметры вводимого таким образом УФАЗ не годятся для оценки городской нагрузки на исходные природные экосистемы, как это понимается, например, в [Полькин и Панченко, 2022] и практически всегда понималось под словом “фон” в более ранних исследованиях загрязнения городского воздуха.

По данным наших наблюдений можно оценить характерные количественные и качественные показатели УФАЗ в приземном воздухе Москвы и пригорода в разные сезоны. Рисунок 3 показывает, что, рассматривая только дни УФАЗ, мы действительно получаем ряд данных, лишенный аномально высоких значений аэрозольной концентрации. Как видно, даже сумма среднесуточного значения концентрации PM_{10} в городе и утроенной величины СКО (стандартное отклонение) лишь в редкие месяцы превышает ПДК.

Имевшие место корреляции в исходных суточных данных для концентрации частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ остались значимыми также и при расчетах по дням УФАЗ (табл. 2). Некоторое уменьшение абсолютных значений коэффициентов корреляции для условно фоновых дней связано с тем, что исходные значения отражают синхронное повышение концентрации аэрозоля в пунктах ИФА и ЗНС во время большинства эпизодов аномально высокого загрязнения атмосферы (рис. 2), но таких эпизодов немного.

Сравнивая по табл. 3 некоторые статистические показатели для полных массивов данных и массивов данных для УФАЗ (не разделяя сезоны и годы), можно сделать вывод, что при отбрасывании дней с величинами концентрации PM_{10} больше ПДК массивы значений среднесуточной концентрации PM_{10} и $PM_{2.5}$ становятся более однородными. Максимальные значения концентрации для дней УФАЗ значительно ниже, чем аномальные значения в исходных массивах, и не превышают соответствующие ПДК, средние и медианные величины ближе друг к другу для массивов УФАЗ, чем для исходных полных данных, как в городе, так и в пригороде.

Результаты сравнения этих же статистических параметров для данных, полученных на четырех станциях наблюдений (табл. 3), показывают, что в центре Москвы при УФАЗ среднегодовые значения концентрации PM_{10} и $PM_{2.5}$ более-менее однородны, их показатели не превышают не только соответствующие российские, но и евро-

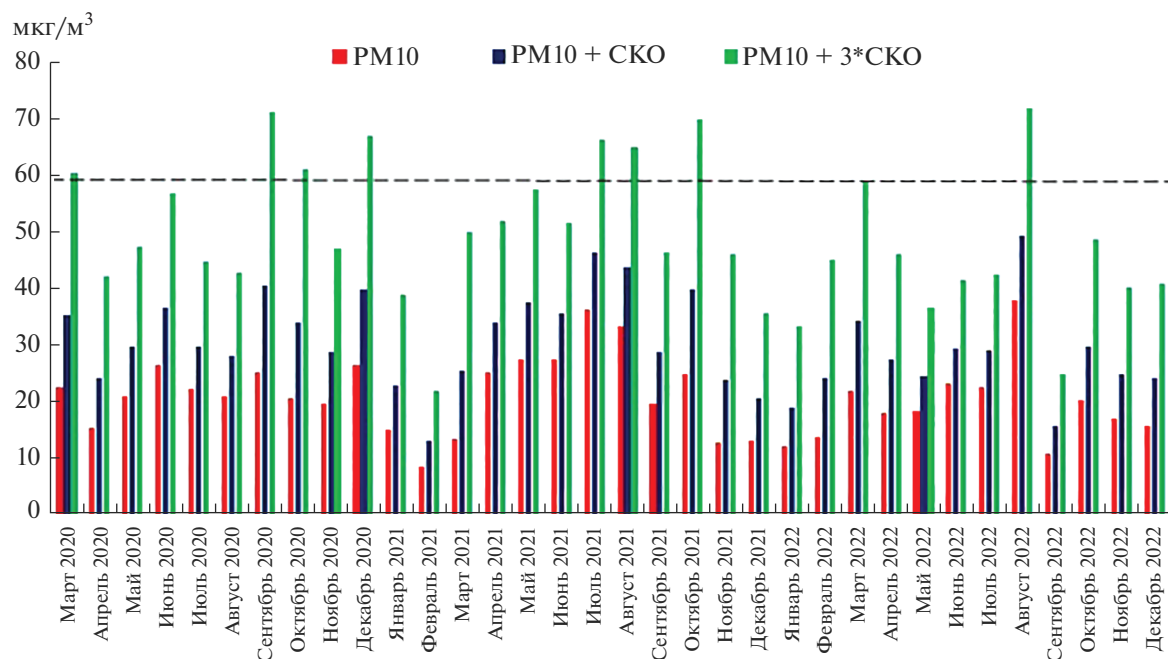


Рис. 3. Статистические показатели изменчивости концентрации частиц PM_{10} в пункте ИФА в дни УФА3: среднемесячные значения (красные столбики), плюс СКО (фиолетовые), плюс $3 \times \text{СКО}$ (зеленые). Черный горизонтальный пунктир — уровень среднесуточной ПДК для PM_{10} в воздухе городских и сельских поселений [ГН 2.1.6.3492-17, 2019].

пейские стандарты ПДК (табл. 1). Высокое значение максимума концентрации частиц PM_{10} в пункте наблюдений ИФА связано с влиянием близкого интенсивного локального антропогенного источника летом 2021 года [Губанова и др., 2021б], о котором упоминалось выше.

Здесь уместно привести статистические показатели, аналогичные табл. 3, рассчитанные по значениям ежесуточной концентрации частиц PM_{10} , усредненным по всем данным московских АСКЗА МЭМ за 2020–2022 годы. Максимальное, среднегодовое ($\pm \text{СКО}$) значения и медиана составляют 161, 27 (± 21) и 20 $\text{мкг}/\text{м}^3$. Сравнение с табл. 3 показывает хорошее приближение средних данных по Москве к результатам измерений в пункте ИФА.

Отметим, что в пригороде (пункт ЗНС) УФА3 приземного воздуха соответствует рекомендациям ВОЗ по среднегодовым показателям для ча-

стиц PM_{10} и $PM_{2.5}$. Несколько кратковременных эпизодов повышения концентрации частиц PM_{10} в воздухе ЗНС обусловлены мощной волной дальнего атмосферного переноса загрязнений из Прикаспия и Калмыкии осенью 2020 [Gubanova et al., 2021a] и краткими воздействиями локальных весенних пожаров в 2021 году [Gubanova et al., 2021b] (рис. 2).

Сезонные вариации массовой концентрации частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ при УФА3 атмосферы в городе

Рисунки 4 и 5 показывают вариации среднесезонных величин массовой концентрации частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ при УФА3 атмосферы в течение трех лет наблюдений в городе (ИФА) и в пригороде (ЗНС). Отметим значительную изменчивость аэрозольного загрязнения атмосферы в разные сезоны и годы (рис. 4а), что связано со спецификой его источников и стоков в городе и

Таблица 3. Максимальное, среднее и медианное значения среднесуточной массовой концентрации частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ в приземной атмосфере в районах ИФА, ЗНС, АСКЗА МЭМ “Спиридоновка” и “Сухаревская пл.”, рассчитанные за все 3 года наблюдений без разделения на сезоны: полный массив данных/дни УФА3

Пункт	PM_{10} , $\text{мкг}/\text{м}^3$			$PM_{2.5}$, $\text{мкг}/\text{м}^3$		
	максимум	среднее	медиана	максимум	среднее	медиана
ИФА	305/57	24/21	20/19	35/35	6.8/6.3	5.4/5.1
ЗНС	229/58	14/12	11/10	35/23	4.9/4.6	3.9/3.6
“Спиридоновка”	141/109	23/21	19/19	44/32	10/9.3	9/8
“Сухаревская пл.”	178/138	32/29	27/27	49/49	11/9.8	8/8

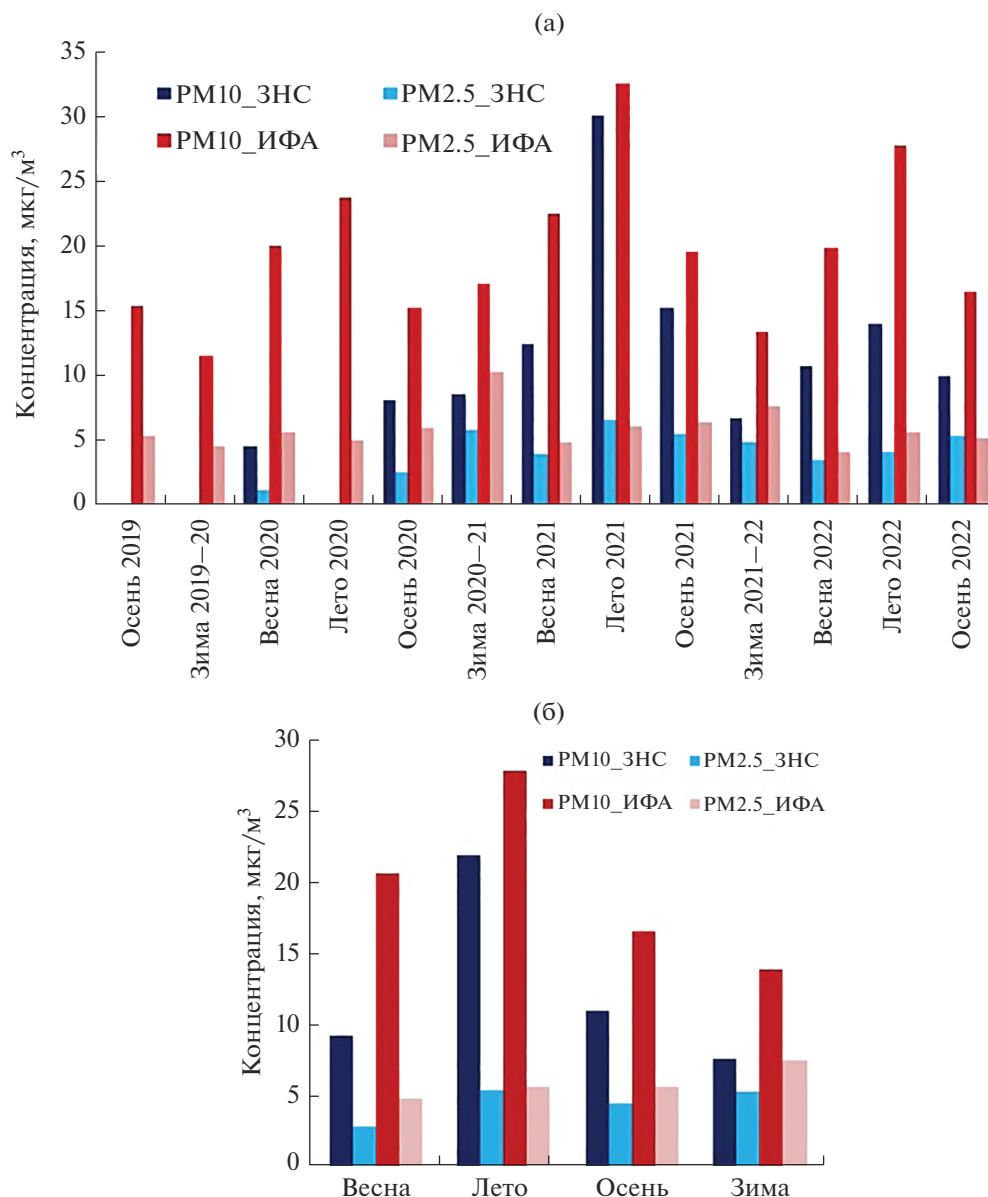


Рис. 4. Средние за сезоны значения концентрации частиц PM_{10} и $\text{PM}_{2.5}$ в ИФА (красные тона) и на ЗНС (синие тона) в течение трех лет: а — за каждый сезон последовательно; б — в среднем по четырем сезонам.

пригороде, а также с метеорологическими особенностями разных сезонов и годов. Пропуски данных для ЗНС в начальный период эксперимента обусловлены техническими проблемами организации синхронных наблюдений в двух точках.

Качественно картину формирования состава приземного аэрозоля в городе и пригороде можно представить следующим образом. Источники аэрозоля грубо делятся на природные (почва, растительность, атмосферный перенос) и антропогенные (транспорт, объекты жизнеобеспечения и т.д.). Наиболее важные пути стока аэрозоля из приземного воздуха — это влажное и сухое осаждение на поверхность, включая растительность, крыши и т.д., перенос атмосферными массами. В

городе, при наличии в воздухе многочисленных антропогенных газовых составляющих, на состав и свойства аэрозоля (особенно мелких частиц $\text{PM}_{2.5}$) воздействуют химические процессы в атмосфере [Seinfeld and Pandis, 2006; Губанова и др., 2017], реакционная способность которых может быть также усилена (по сравнению с пригородными районами) так называемым городским “островом тепла” [Кузнецова и др., 2017; Локощенко и Енукова, 2020; Chapman et al., 2017; Lokoshchenko and Alekseeva, 2023]. Разницу в формировании аэрозольного поля в приземной атмосфере города и пригорода в значительной степени определяет качество и состояние подстилающей поверхности: естественная почва, пыль, растения

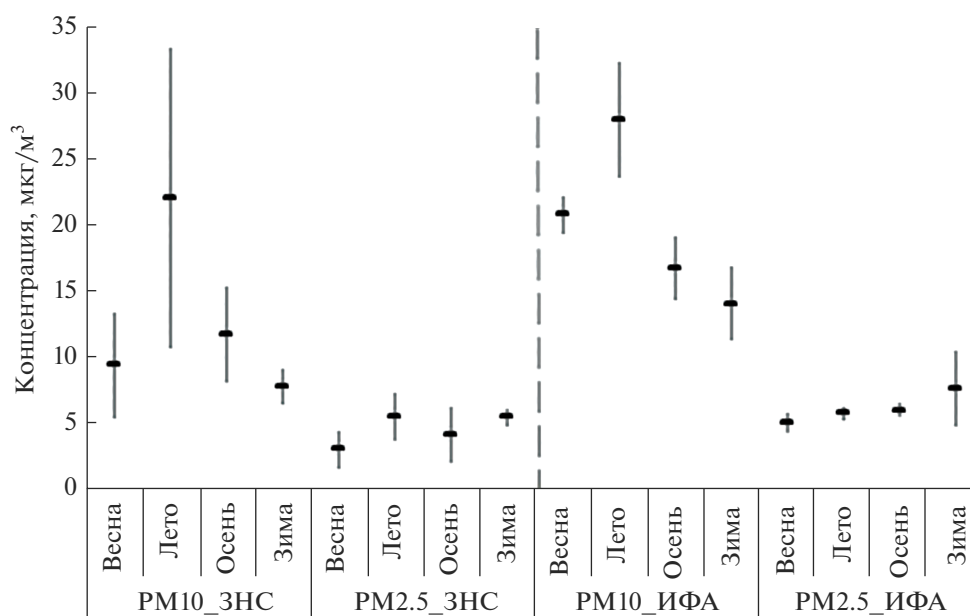


Рис. 5. Различия сезонных вариаций массовой концентрации частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ в городе (ИФА — справа от пунктирной вертикали) и в пригороде (ЗНС — слева): средние за три года сезонные значения и их межгодовые вариации ($\pm$ СКО).

и снег — в пригороде, запечатанные асфальтом и плиткой улицы, небольшие по площади парки и дворы с растительностью, грязный снег с химическими реагентами — в городе. Важным фактором, ведущим к повышению аэрозольного загрязнения приземного воздуха, является формирование комплекса НМУ, включающих повышенное атмосферное давление, отсутствие осадков, штиль или слабый ветер, температурные инверсии разной интенсивности в разные сезоны и т.п. [Кузнецова и др., 2014].

При усреднении за месяц, а тем более — за сезон, значимые корреляции с метеорологическими параметрами, которые обсуждались, например, для весны в [Губанова и др., 2021], практически отсутствуют, поскольку давление, влажность, скорость и направление ветра имеют свои характерные периоды вариаций в 4–7 суток, определяемые синоптической изменчивостью нижнего слоя атмосферы. При изучении сезонных различий значимы только высокие корреляции концентрации частиц PM_{10} и частиц размерности $PM_{10-2.5}$ (от 2.5 до 10 мкм) с величиной температуры (0.81 и 0.88, соответственно, в городе, и 0.72 и 0.80 — в пригороде), которая является самым общим показателем сезонных изменений всех условий жизни в средних широтах. Понятно, что эти корреляции отражают изменение в течение года эффективности всех процессов, формирующих состав приземного аэрозоля.

В целом, анализ рис. 4 и 5 показал следующее. Об абсолютных значениях массовой концентрации PM_{10} и $PM_{2.5}$ — выводы достаточно очевидны:

1) в Москве аэрозольное загрязнение воздуха всегда больше, чем в пригороде; 2) в течение года максимальный уровень УФАЗ приземного воздуха наблюдается летом в обоих пунктах, когда пыль и почва на поверхности вносят наибольший вклад в содержание аэрозоля более крупной размерности. Что касается изменчивости концентрации аэрозоля в разные сезоны, то летом она наибольшая, особенно в пригороде (рис. 5), что, скорее всего, связано с многообразием природных источников и стоков аэрозоля. Этим же, видимо, определяется и более высокая изменчивость концентрации аэрозоля в пункте ЗНС по сравнению с ИФА во все сезоны, кроме зимы. Зимой, даже при заснеженной поверхности, в городе значительно больше источников аэрозоля, чем в пригородной зоне, что и увеличивает изменчивость значений его концентрации. А по абсолютной величине содержания аэрозоля — зимой воздух наиболее чистый, как в городе, так и в пригороде.

Зимой повышены эмиссии антропогенных источников аэрозоля (в основном, мелкодисперсная фракция частиц), а вклад поверхности в генерацию более крупных, микронных, частиц снижен в связи с наличием снежного покрова, особенно в пригороде. Поэтому отношение значений концентрации $PM_{2.5}/PM_{10}$ зимой максимально в обоих пунктах в течение года, особенно в пригороде (табл. 4). Летом картина обратная, и доля массы частиц $PM_{2.5}$ минимальна при большой массе более крупных частиц. Весна и осень — переходные сезоны, когда источники и стоки, формирующие аэрозольное поле в приземном

Таблица 4. Доля массы частиц $PM_{2.5}$ в массе аэрозолей PM_{10} в разные сезоны (отношение концентраций $PM_{2.5}/PM_{10}$) в приземном воздухе города (ИФА) и пригорода (ЗНС) – для дней УФАЗ атмосферы

	ИФА	ЗНС
Весна	0.24 ± 0.04	0.32 ± 0.02
Лето	0.20 ± 0.01	0.25 ± 0.04
Осень	0.35 ± 0.04	0.41 ± 0.11
Зима	0.54 ± 0.10	0.70 ± 0.02

воздухе города и пригорода, работают по-разному при постепенном повышении/понижении температуры, соответственно, весной/осенью.

Элементный состав приземного аэрозоля при условно фоновом аэрозольном загрязнении атмосферы

Как было упомянуто выше, эксперимент в пунктах ИФА и ЗНС организован таким образом, что элементный состав аэрозоля определяется каждый сезон, но только во время интенсивного мониторинга, в течение примерно 35 суток в середине каждого сезона (периоды отмечены в верхней части рис. 2). При изучении УФАЗ атмосферы из набора анализируемых проб были исключены те пробы, которые приходились на дни повышенного аэрозольного загрязнения, когда среднесуточная концентрация частиц PM_{10} в пункте ИФА была выше ПДК. Это справедливо и для периодов интенсивного эксперимента. Применяемые методы анализа позволяют определять на каждом фильтре содержание 65 химических элементов. Для Москвы и пригорода эти данные об элементном составе приземного аэрозоля, полученные в разные сезоны в течение более трех лет, уникальны.

Далее будем более детально исследовать содержание 33-х элементов (табл. 5), масса которых со-

ставляет в среднем 27 и 18% от массы частиц фракции PM_{10} в городе и в пригороде, соответственно. Исключены из анализа редкоземельные элементы, кроме лантана, поскольку их поведение в атмосфере очень похоже. Также исключены из рассмотрения несколько химических элементов, концентрация которых была мала (на пределе чувствительности аналитических приборов), что привело к многочисленным пропускам в массиве данных.

Грубое разделение элементов по их происхождению на преимущественно терригенные и нетерригенные проводилось традиционно – по величине коэффициента обогащения (КО) в сравнении со средним составом земной коры [Rudnick and Gao, 2003], вычисляемого по формуле $КО = (C_x/C_{La})^{aer}/(C_x/C_{La})^{crust}$. Здесь C_x и C_{La} – концентрации элемента X и лантана La (опорный элемент преимущественно терригенного происхождения, мало меняющий свою концентрацию от пробы к пробе в каждый сезон), верхние индексы указывают на среду – аэрозоль (aer) или земную кору (crust). Обычно химический элемент в составе атмосферного аэрозоля считается преимущественно терригенным при значении КО, близком к единице, и нетерригенным при $КО > 10$ [Добровольский, 2009; Иванов, 1994]. Элементы, для которых $1 < КО < 10$, часто имеют смешанное происхождение и связаны с эмиссией почвенных составляющих во время человеческой деятельности (стройки, транспорт, производство строительных и других материалов, сельскохозяйственные работы и т.д.).

По результатам анализа КО выделены две группы элементов – терригенные (Th, Al, U, La, V, Li, Sr, Ba, Mg, Fe, Cs, Co, Mn, Cr, K, Ca) и нетерригенные (Mo, Cu, Zn, Pb, Sn, S, Sb, Cd, Se, Bi) – состав которых не меняется от сезона к сезону для города и пригорода. По-видимому, эта общность элементного состава аэрозоля в Москве и в пригороде для всех сезонов обусловлена достаточно близким взаимным расположением пунктов на-

Таблица 5. Средняя (за три года) массовая концентрация выбранных 33 химических элементов в составе приземного аэрозоля в Москве (ИФА) и пригороде (ЗНС), нг/м³

	Li	Na	Mg	Al	P	S	K	Ca	Fe	Cs	Ba
ИФА	0.40	209	258	451	35	576	204	2385	1000	0.057	16
ЗНС	0.14	157	89	167	28	411	143	517	310	0.032	7.7
	Sr	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Cd	W
ИФА	6.3	2.3	3.1	20	0.40	2.5	14	40	0.48	0.20	0.42
ЗНС	1.7	0.8	1.1	7.8	0.12	1.5	4.2	44	0.18	0.28	0.13
	Hg	Pb	Hf	As	Se	Sn	Sb	Bi	La	Th	U
ИФА	0.019	9.4	0.032	0.43	0.26	2.2	2.0	0.15	0.50	0.10	0.042
ЗНС	0.008	5.4	0.012	0.22	0.24	0.58	0.82	0.056	0.16	0.036	0.013

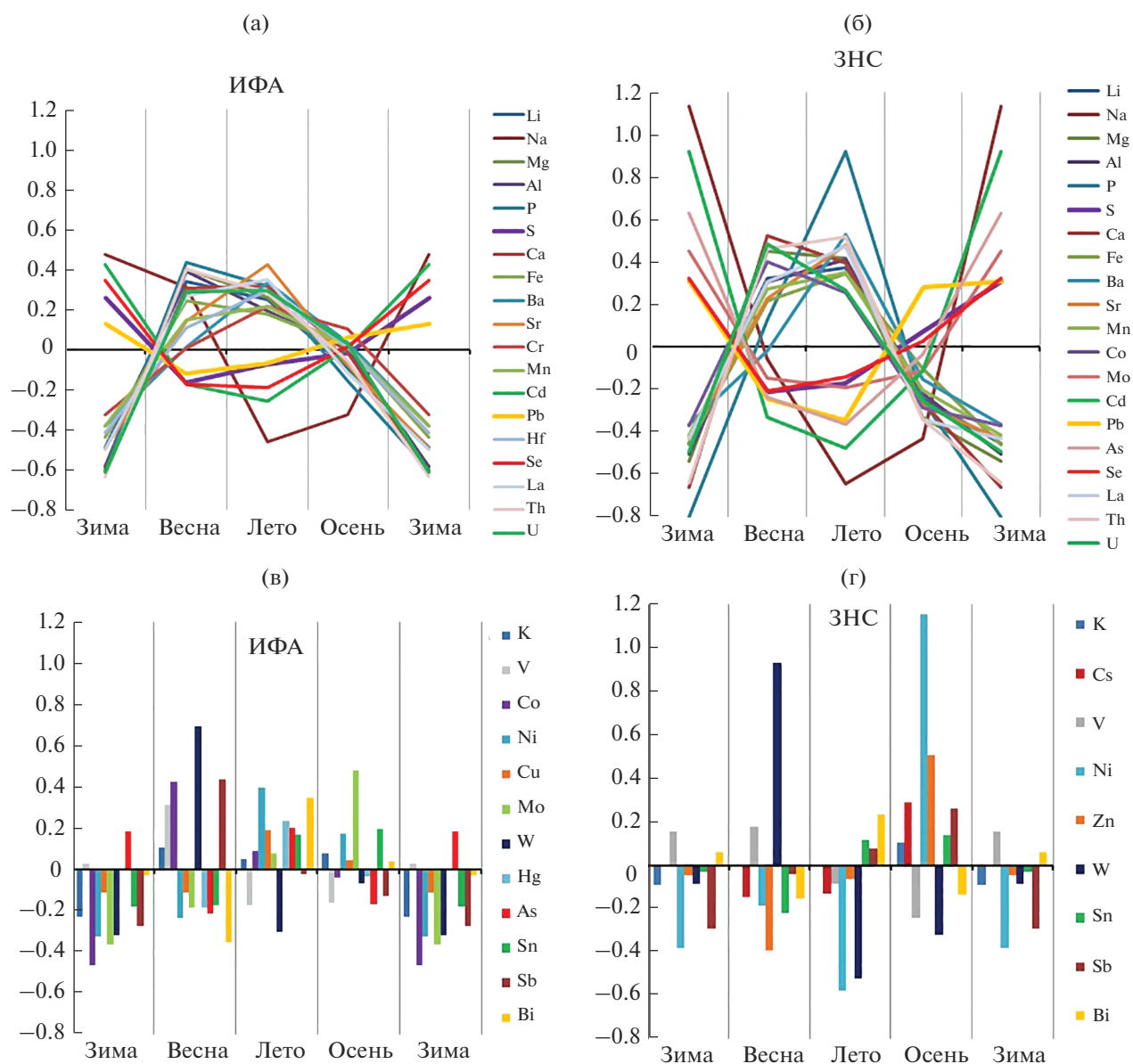


Рис. 6. Сезонные вариации концентрации рассматриваемых химических элементов в составе УФА3 приземной атмосферы, относительное отклонение средних сезонных величин от средней годовой концентрации: а) и в) — в городе (ИФА); б) и г) — в пригороде (ЗНС); а) и б) — преимущественно терригенные и нетерригенные элементы (см. текст); в) и г) — элементы смешанного происхождения.

блюдения в пределах одного природно-территориального комплекса.

Рисунок 6 иллюстрирует сезонные изменения концентрации разных элементов в приземном воздухе города и пригорода. По нему также можно сравнивать размах сезонных колебаний концентрации отдельных элементов, масштаб вертикальной шкалы на всех диаграммах одинаков. Естественно, терригенным элементам (см. рис. 6а, 6б) свойственны максимальные значения концентрации в аэрозоле в теплое время года (весна–лето) при свободной от снега поверхности. На

этих же диаграммах приведены зависимости концентрации элементов, сезонный ход которых имеет обратный вид — с максимальными значениями в холодное время года. Как в городе, так и в пригороде, это четыре нетерригенных элемента (S, Cd, Pb, Se), к которым в пригороде добавляются еще три (As, Mo, Hg). Имея в виду, что подстилающая поверхность играет важную роль при формировании поля концентраций химических элементов в приземном воздухе, можно предположить, что для последних трех элементов в воздухе пригородной зоны (ЗНС) в теплое время го-

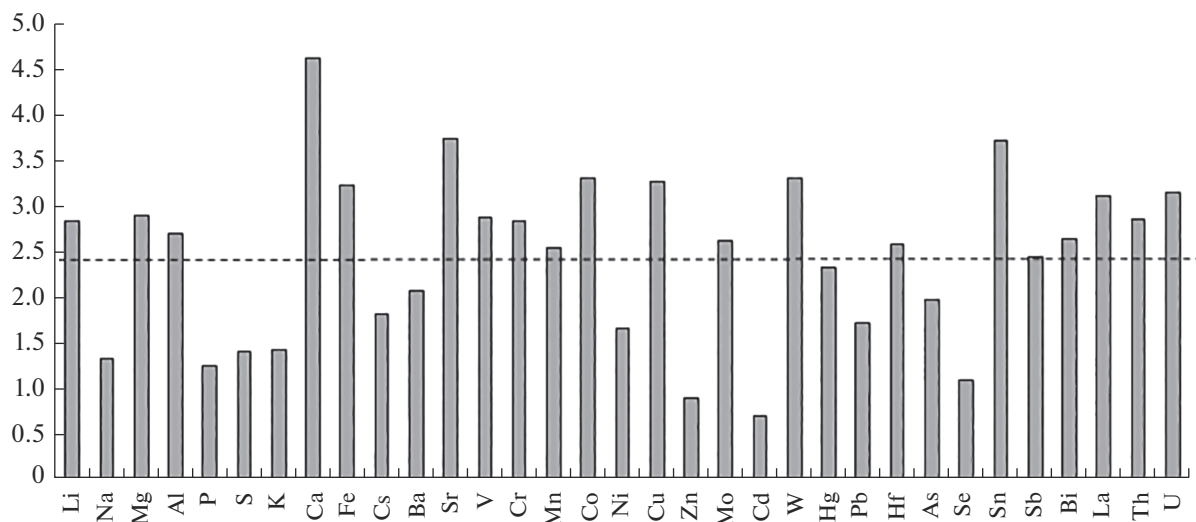


Рис. 7. Отношение среднегодовых значений концентрации каждого элемента в городе и пригороде (ИФА/ЗНС) при УФАЗ воздуха. Пунктир – среднее отношение для 33 элементов.

да важно их взаимодействие с природной поверхностью (водные объекты, растительность, почва).

Значения концентрации остальных элементов (рис. 6в, 6г) изменяются в течение года не так однозначно, что определяется индивидуальной для каждого элемента совокупностью вкладов источников и стоков разного генезиса в различные сезоны. Размах сезонных колебаний концентрации большинства элементов (особенно терригенного происхождения) в пригороде больше, чем в городе, что уже было отмечено для массы аэрозольных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ в целом. В этом отношении выделяется фосфор (рис. 6б) с максимальной концентрацией в пункте ЗНС летом, почти в 2 раза превышающей среднегодовую величину, что может быть связано с сельскохозяйственной деятельностью в пригороде. В пригороде заметны также (рис. 6г) высокие значения концентрации никеля (осенью) и вольфрама (весной). Отметим натрий (рис. 6а, 6б), концентрация которого в приземном воздухе, как в городе, так и в пригороде, максимальна в зимнее время года. Можно предположить, что так проявляется применение на дорогах в зимнее время химических реагентов, в состав которых входят соли Na. В пригороде этот процесс менее интенсивен, чем в городе, что может объяснять более резкое уменьшение концентрации Na в пригороде весной и далее до летнего уровня. При этом среднегодовые значения концентрации натрия в городе и пригороде различаются мало (табл. 5, рис. 7).

По рис. 7 можно выделить три элемента (S, K и Se), отношение значений средней концентрации которых в городе и пригороде близко к единице (от 1 до 1.5) с минимальным внутригодовым разбросом в 5–10%. Для всех рассмотренных 33-х

элементов среднее значение такого отношения составило 2.5 ± 0.9 со средним разбросом 25%. Можно предположить, что сера, калий и селен являются элементами глобального распространения, поле концентрации которых в приземном аэрозоле достаточно однородно в течение года и мало меняется в пространстве, по крайней мере, на масштабах расстояния между пунктами наблюдений ИФА и ЗНС.

Распределение химических элементов по размерам аэрозольных частиц при условно фоновом аэрозольном загрязнении атмосферы

Интересную информацию можно получить, анализируя распределение массы отдельных химических элементов по размерам аэрозольных частиц, на которых они сосредоточены в воздухе города или пригорода. К сожалению, применяемые методы анализа элементного состава аэрозольных проб не позволяют определять содержание кремния, формирующего основную массу крупных частиц пыли, находящейся в воздухе, а также сажи (черного углерода), представляющей значительную часть массы мелких аэрозольных частиц [Bond et al., 2013], что подтверждается результатами наших исследований морфологической структуры основных типов аэрозольных частиц в приземном воздухе в центре Москвы в разные сезоны.

Поэтому в настоящей работе уделяется внимание идентифицированным в аэрозольных пробах 33-м химическим элементам, вносящим основной вклад в общую массу исследуемых аэрозольных частиц. На рис. 8 представлены диаграммы относительного содержания ряда элементов в об-

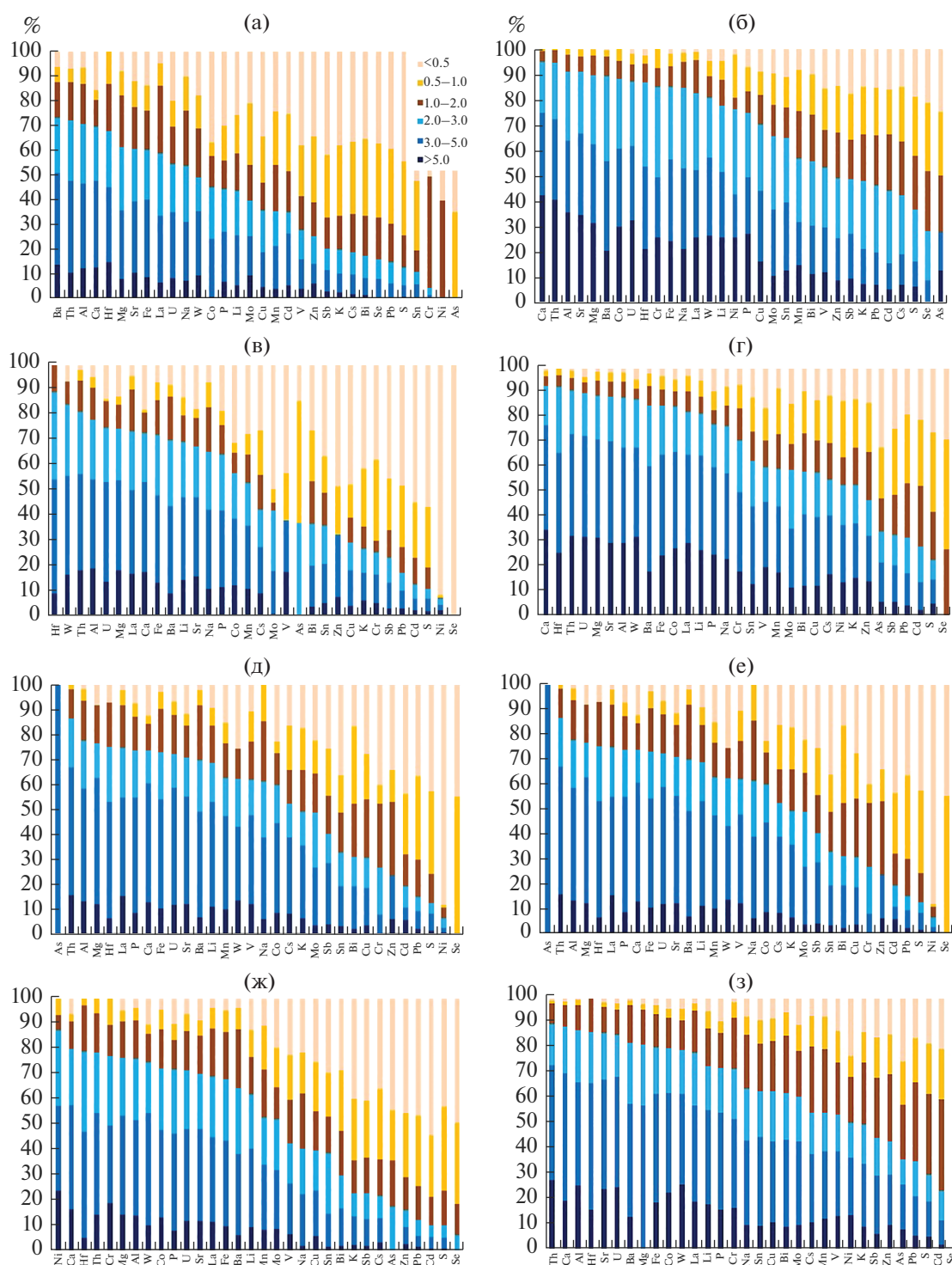


Рис. 8. Распределение массы выбранных элементов по размерам аэрозольных частиц в городе и пригороде в 2022 году (диапазоны размеров частиц – в легенде, мкм): слева – пригород (ЗНС); справа – Москва (ИФА). Сверху вниз – разные сезоны года: а, б – зима; в, г – весна; д, е – лето; ж, з – осень.

шей массе рассматриваемых 33 элементов на аэрозольных частицах разных размеров. Основные черты таких распределений похожи в каждом сезоне для разных годов. Для иллюстрации приведены данные 2022 года.

На диаграммах рис. 8 порядок элементов по горизонтали несколько отличается: он соответствует увеличению доли массы элемента на частицах $PM_{2.5}$ (три каскада импактора – коричневые тона на диаграммах). Хорошо видно, что в го-

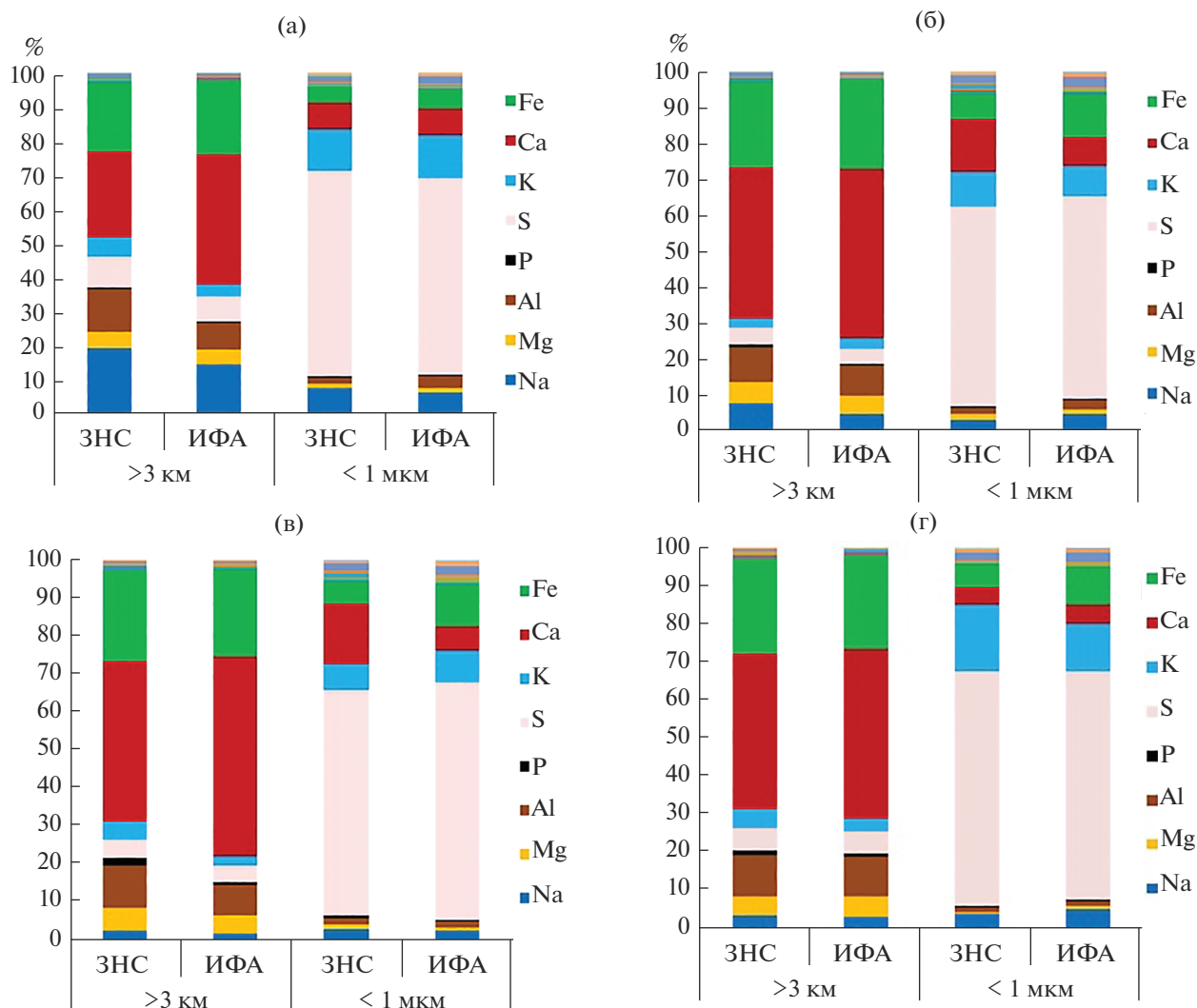


Рис. 9. Среднее распределение массы рассматриваемых элементов по размерам аэрозольных частиц в городе (ИФА) и пригороде (ЗНС) в разные сезоны: а – зима; б – весна; в – лето; г – осень.

роде, как и в пригороде, терригенные элементы и элементы смешанного происхождения переносятся в основном на более крупных частицах, а мелкие частицы содержат большую часть массы нетерригенных элементов. В пригороде относительная масса элементов на мелких частицах больше, чем в городе. Более тонкие особенности этих распределений еще предстоит подробно анализировать не только в среднем по сезонам, а посуточно с учетом метеоусловий и информации о пространственном расположении источников (в частности, антропогенных) в городе и пригороде.

На множестве рассматриваемых элементов семь из них (Fe, Ca, K, S, Al, Mg, Na) круглый год определяют более 95% массы как в крупных (>3 мкм), так и в мелких (<1 мкм) частицах (рис. 9). Причем, во все сезоны масса этих элементов на крупных частицах определяется в основном тре-

мя терригенными элементами (Ca, Fe, Al) с добавлением Na зимой, а на мелких частицах – двумя нетерригенными элементами (S и K). Как видно, эти закономерности справедливы для всех сезонов, как в городе, так и в пригороде, и, в целом, являются следствием общего биогеохимического распределения элементов на Земле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований непрерывного ряда (с осени 2019 по конец 2022 года) данных о массовой концентрации аэрозольных частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} в приземном слое атмосферы в центре Москвы и пригороде (около 60 км в западном направлении от Москвы), полученных в рамках комплексного эксперимента по изучению состава аэрозоля, проводимого ИФА РАН, позволили

выявить ряд особенностей изменчивости уровня аэрозольного загрязнения воздуха Московского региона. Установлено, что непродолжительные эпизоды (2–10 дней) экстремально высокого роста массовой концентрации аэрозольных частиц PM_{10} с превышением ПДК (60 мкг/м^3) наблюдались при неблагоприятных метеорологических условиях, были обусловлены региональным или дальним переносом аэрозолей горения и пыли и за исследуемый период составили не более 9% дней в году. В остальное время года как в мегаполисе, так и в пригороде уровень аэрозольного загрязнения приземной атмосферы не превышает ПДК. Среднесуточная концентрация более мелких частиц $PM_{2.5}$ в течение всего года изменяется мало, и ее величина лишь в отдельные дни превосходит среднесуточную ПДК (35 мкг/м^3).

С учетом выявленной специфики изменчивости аэрозольного загрязнения для Москвы введено понятие условно фоновое аэрозольное загрязнение приземной атмосферы, критерием которого является значение среднесуточной массовой концентрации аэрозольных частиц $PM_{10} < \text{ПДК}$ (60 мкг/м^3). Такие дни составили более 91% за три года наблюдений в центре Москвы. Сравнение со средними по Москве (по данным измерений всех АСКЗА ГПБУ “Мосэкомониторинг”) значениями суточной концентрации PM_{10} позволяет распространить эту оценку и на весь мегаполис в среднем. Условно фоновое аэрозольное загрязнение воздуха формируется как природными, так и антропогенными источниками не только локального, но и удаленного происхождения. В нем проявляется влияние метеорологических параметров на источники и стоки аэрозолей, а также адвективного переноса аэрозоля воздушными массами к пунктам наблюдений и от них.

Такой критерий выделения условно фоновое уровня аэрозольного загрязнения можно вводить при оценке качества воздуха и в других городах. Однако он применим, по мнению авторов, только в том случае, если среднесуточная концентрация частиц $PM_{10} < \text{ПДК}$ будет характеризовать значимую большую часть дней в году.

Исследована изменчивость массовой концентрации и элементного состава приземного аэрозоля в центре Москвы и пригороде при условно фоновом аэрозольном загрязнении атмосферы. В течение года максимальный уровень концентрации частиц PM_{10} наблюдается летом в обоих пунктах наблюдений (ИФА и ЗНС), когда пыль и почва на поверхности вносят наибольший вклад в содержание аэрозоля более крупной размерности. В Москве аэрозольное загрязнение воздуха всегда больше, чем в пригороде. Отношение значений концентрации частиц $PM_{2.5}/PM_{10}$ зимой максимально в обоих пунктах, в пригороде в полтора раза выше, чем в городе. Летом картина об-

ратная: доля массы частиц $PM_{2.5}$ минимальна при большой массе более крупных частиц PM_{10} . Изменчивость концентрации аэрозоля в разные сезоны наибольшая летом, особенно в пригороде, что, скорее всего, связано с многообразием природных источников и стоков аэрозоля. Этим же, видимо, определяется и повышенная изменчивость концентрации аэрозоля в пригороде, по сравнению с городом, во все сезоны, кроме зимы.

Представлены результаты анализа уникального трехлетнего ряда элементного состава приземного аэрозоля в центре Москвы и в пригороде. Элементный состав аэрозоля при условно фоновом аэрозольном загрязнении атмосферы подробно анализировался по величинам концентрации 33 химических элементов, масса которых составляла в среднем 27% и 18% от массовой концентрации аэрозольных частиц PM_{10} в городе и в пригороде, соответственно. По результатам анализа величины коэффициента обогащения (КО) элементов в аэрозоле по сравнению с составом земной коры выделены две группы – терригенные элементы (Th, Al, U, La, V, Li, Sr, Ba, Mg, Fe, Cs, Co, Mn, Cr, K, Ca) с $КО \approx 1$ и нетерригенные элементы (Mo, Cu, Zn, Pb, Sn, S, Sb, Cd, Se, Bi) с $КО > 10$. Состав этих групп не меняется от сезона к сезону для города и пригорода, что, по-видимому, обусловлено достаточно близким взаимным расположением пунктов наблюдения в пределах одного природно-территориального комплекса.

Выделены три элемента (S, K и Se), для которых отношение значений средней концентрации в городе и пригороде близко к единице (от 1 до 1.5) с минимальным из всех элементов внутригодовым разбросом в 5–10%. По-видимому, поле концентрации этих элементов в атмосферном аэрозоле мало меняется в течение года и в пространстве, по крайней мере, на масштабах, сравнимых с расстоянием между пунктами наблюдений.

Изучение распределения массы рассматриваемых элементов по размерам аэрозольных частиц показало, что терригенные элементы и элементы смешанного происхождения переносятся на более крупных частицах, а мелкие частицы содержат преимущественно нетерригенные элементы. Это подтверждается и полученными ранее результатами морфологического анализа различных типов аэрозольных частиц в составе приземного аэрозоля в центре Москвы. И в городе, и в пригороде семь элементов (Fe, Ca, K, S, Al, Mg, Na) из рассматриваемых тридцати трех круглый год определяют более 95% массы рассматриваемых 33 элементов как на крупных ($>4 \text{ мкм}$), так и на мелких ($<1.5 \text{ мкм}$) частицах. При этом, во все сезоны масса крупных частиц определяется в основном тремя терригенными элементами (Ca, Fe, Al), с добавлением Na зимой, а мелких – двумя

нетерригенными (S и K) элементами глобального распространения.

С точки зрения качества приземного воздуха в Москве — основной вывод такой: среднегодовое значение концентрации частиц PM_{10} составляет в центре Москвы 24 ± 20 мкг/м³, а в среднем по всем АСКЗА ГПБУ “Мосэкомониторинг” 27 ± 21 мкг/м³, не превышая соответствующий российский стандарт ПДК (40 мкг/м³).

Авторы благодарят за неоценимую помощь в подготовке и проведении экспериментальных наблюдений за составом приземного аэрозоля в ИФА РАН и на ЗНС ИФА РАН В.А. Лебедева, Ю.В. Жуланова, А.П. Медведева, А.А. Хапаева (ИФА РАН) и Е.В. Ромашову (ЗНС ИФА РАН).

Большое спасибо заведующему лабораторией ядерно-физических и масс-спектральных методов анализа ИПТМ РАН В.К. Карандашеву и его коллегам за обеспечение аналитических лабораторных исследований элементного состава аэрозольных проб, без результатов которых изучение состава приземного аэрозоля в Московском регионе (в рамках данной работы) было бы неполным.

Авторы выражают признательность рецензентам за свежий взгляд, конструктивные замечания и рекомендации, которые, несомненно, позволили улучшить представление результатов исследований в данной работе.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-27-00063).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безуглая Э.Ю., Смирнова И.В. Воздух городов и его изменения. СПб.: Астерион, 2008. 254 с.
- Биргер М.И., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., В.Ю. Падва, А.А. Русанов. Справочник по пыли- и золоулавливанию. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с. (С. 14).
- Власенко С.С., Волкова К.А., Ионов Д.В., Рышкевич Т.И., Иванова О.А., Михайлов Е.Ф. Изменчивость углеродсодержащей фракции атмосферного аэрозоля вблизи Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 147–156.
- Власов Д.В., Касимов Н.С., Кошелева Н.Е. Геохимия дорожной пыли (Восточный округ Москвы) // Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 5. География. 2014. № 3. С. 23–33.
- Волох А.А., Журавлева М.Г. Оценка техногенного загрязнения воздуха в г. Москве // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1994. Т. 30. № 2. С. 182–188.
- Гинзбург А.С., Губанова Д.П., Минашкин В.М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Рос. хим. журнал. 2008. Т. LI. № 5. С. 112–119.
- Гинзбург А.С., Демченко П.Ф. Антропогенные мезо-метеорологические обратные связи: обзор современных исследований // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 6. С. 94–113.
- 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.
- ГН 2.1.6.3492-17. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений: Гигиенические нормативы, с изменениями, утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации 31.05.2018 № 37. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2019. 55 с.
- 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. атмосфер. океана. 2017. Т. 30. № 12. С. 1033–1042.
- Губанова Д.П., Виноградова А.А., Иорданский М.А., Скороход А.И. Временные вариации состава атмосферного аэрозоля в Москве весной 2020 года // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021а. Т. 57. № 3. С. 334–348.
- Губанова Д.П., Виноградова А.А., Скороход А.И., Иорданский М.А. Аномальное аэрозольное загрязнение воздуха в Москве вблизи локального антропогенного источника в июле 2021 года // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021б. № 4. С. 133–147.
<https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-4-133-147>
- 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. атмосфер. океана. 2023. Т. 36. № 06. С. 469–481.
<https://doi.org/10.15372/AOO20230607>
- Губанова Д.П., Иорданский М.А., Кудерина Т.М., Скороход А.И., Еланский Н.Ф., Минашкин В.М. Элементный состав аэрозолей в приземном воздухе Москвы: сезонные изменения в 2019 и 2020 гг. // Опт. атмосфер. океана. 2021в. Т. 34. № 6. С. 441–450.
<https://doi.org/10.15372/AOO202106>
- Губанова Д.П., Кудерина Т.М., Чхетиани О.Г., Иорданский М.А., Обвинцев Ю.И., Артамонова М.С. Экспериментальные исследования аэрозолей в атмосфере семиаридных ландшафтов Калмыкии. 2. Ландшафтно-геохимический состав аэрозольных частиц // Геофизические процессы и биосфера. 2018. Т. 17. № 3. С. 18–44.
- Губанова Д.П., Садовская Н.В., Иорданский М.А., Авилов А.С., Минашкин В.М. Морфология частиц приземного аэрозоля в Москве по результатам анализа методом растровой электронной микроскопии // Изв. РАН. Сер. Физическая. 2023. Т. 87. № 10. (принято в печать).
- Добровольский В.В. Биогеохимия мировой суши // Избр. Труды. Т. III. М.: Научный мир, 2009. 440 с.

- Доклад “О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2022 году” / Под ред. А. О. Кульбачевско-го. М.: 2023. 276 с.
- Еланский Н.Ф., Шилкин А.В., Пономарев Н.А., Захарова П.В., Качко М.Д., Поляков Т.И. Пространственно-временные вариации содержания загрязняющих примесей в воздушном бассейне Москвы и их эмиссии // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2022. Т. 58. № 1. С. 92–108.
<https://doi.org/10.31857/S0002351522010023>
- Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: Справочник в 6 кн. М.: Недра, 1994. Кн. 2: Главные р-элементы. 303 с.
- Карандашев В.К., Туранов А.Н., Орлова Т.А., Лежнев А.Е., Носенко С.В., Золотарева Н.И., Москвина И.Р. Использование метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в элементном анализе объектов окружающей среды // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 1. С. 12–22.
- Касимов Н., Власов Д., Кошелева Н. Химический состав дорожной пыли и ее фракции PM10 как индикатор загрязнения городской среды // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 10. С. 43–49.
<https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-10-43-49>
- Касимов Н.С. Экогеохимия ландшафтов. М.: ИП Филимонов М.В., 2013. 208 с.
- 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.
- Кошелева Н.Е., Дорохова М.Ф., Кузьминская Н.Ю., Рыжов А.В., Касимов Н.С. Влияние автотранспорта на экологическое состояние почв в западном административном округе Москвы // Вестн. Моск. Унта. Сер. 5. География. 2018. № 2. С. 16–27.
- Кудряшов В.И. Анализ элементного состава атмосферных аэрозолей физическими методами // Межвузовский сб. Проблемы физики атмосферы. Вып. 20. Физика и химия атмосферных аэрозолей. СПб.: Изд-во СПбГУ. 1997. С. 97–130.
- Кузнецова И.Н., Бруслова Н.Е., Нахаев М.И. Городской остров тепла в Москве: определение, границы, изменчивость // МиГ. 2017. № 5. С. 49–61.
- 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. № 351. С. 154–172.
- Локощенко М.А., Енукова Е.А. Остров тепла в Московском регионе по спутниковым данным // МиГ. 2020. № 7. С. 50–63.
- Мосэкомониторинг. URL: <http://mosecom.mos.ru/>
- Огородников Б.И., Будыка А.К., Скитович В.И., Бродовой А.В. Характеристики аэрозолей пограничного слоя атмосферы над Москвой // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1996. Т. 32. № 2. С. 163–171.
- Полькин В.В., Панченко М.В. Временная изменчивость концентраций субмикронных и крупнодисперсных частиц в приземном слое атмосферы на Аэрозольной станции ИОА СО РАН г. Томска (2000–2020 гг.) // Опт. атмос. океана. 2022. Т. 35. № 6. С. 471–476.
- Ревич Б.А. Приоритетные факторы городской среды, влияющие на качество жизни населения мегаполисов // Проблемы прогнозирования. 2018. № 3(168). С. 58–66.
- Ревич Б.А., Малеев В.В. Изменения климата и здоровье населения России: анализ ситуаций и прогнозные оценки. М.: ЛЕНАНД, 2011. 208 с.
- Самсонов В.Т. Обеспыливание воздуха в промышленности. Методы и средства. М.: Инфра-М, 2016. 234 с. (С. 161–163).
- 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.
- Эрхардт Х. Рентгенофлуоресцентный анализ. Применение в заводских лабораториях. М.: Металлургия. 1985. 256 с.
- Andronova A.V., Iordanskii M.A., Trefilova A.V., Lebedev V.A., Minashkin V.M., Obvintsev Yu.I., Artamonova M.S., Granberg I.G. Comparative Analysis of Pollution of the Surface Atmospheric Layer in Such Megalopolises as Moscow and Beijing // Izv., Atmos. Ocean. Phys. 2011. V. 47. № 7. P. 25–33.
- Bond T.C., Doherty S.J., Fahey D.W., Forster P.M., Berntsen T., DeAngelo B.J., Flanner M.G., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P.K., Sarofim M.C., Schultz M.G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S.K., Hopke P.K., Jacobson M.Z., Kaiser J. W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J.P., Shindell D., Storelvmo T., Warren S.G., Zender C.S. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment // J. Geophys. Res. Atmos. 2013. V. 118. P. 5380–5552.
- 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.Ye., Androsova Ye.Ye., Lezina Ye.A. The dynamics of the atmospheric pollutants during the Covid-19 pandemic 2020 and their relationship with meteorological conditions in Moscow // Geography, Environment, Sustainability. 2021.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-012>
- Gubanova D., Chkhetiani O., Vinogradova A., Skorokhod A., Iordanskii M. Atmospheric transport of dust aerosol from arid zones to the Moscow region in the fall 2020 // AIMS Geosciences. 2022(a). 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. 2022(b). V. 13. № 4. P. 574–599.
<https://doi.org/10.3390/atmos13040574>

- Gubanova D.P., Vinogradova A.A., Sadovskaya N.V. Bioaerosols and Other Bioaerosols in the Surface Layer of the Atmosphere of Moscow Metropolis // *Atmosphere*. 2023. V. 14. P. 504–519.
<https://doi.org/10.3390/atmos14030504>
<http://tp5.ru>.
<http://www.windy.com/ru>.
https://english.mee.gov.cn/Resources/standards/Air_Environment/quality_standard1/201605/t20160511_337502.shtml.
<https://mosecom.mos.ru/stations>.
<https://weatherarchive.ru/Pogoda/Moscow>.
<https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality-concentrations/air-quality-standards>.
https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/jcffbz/201203/t20120302_224166.shtml.
<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>.
- Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E. Enrichment of road dust particles and adjacent environments with metals and metalloids in eastern Moscow // *Urban Climate*. 2020. V. 32. 100638.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100638>
- Lokoshchenko M.A., Alekseeva L.I. Influence of Meteorological Parameters on the Urban Heat Island in Moscow // *Atmosphere*. 2023. V. 14. 507.
<https://doi.org/10.3390/atmos14030507>
- Rasmussen P.E. Long-range atmospheric transport of trace metals: the need for geoscience perspectives // *Environ. Geology*. 1998. V. 33. № 2/3. P. 96–108.
- Revich B.A., Avaliani S.L., Simons G.J. Air pollution and public health in a megalopolis: a case study of Moscow // *Ekonomika regiona [Economy of Region]*. 2016. V. 12. № 4. P. 1069–1078.
<https://doi.org/10.17059/2016-4-9>
- Ruckstuhl A.F., Henne S., Reimann S., Steinbacher M., Volmer M.K., O'Doherty S., Buchmann B., and Hueglin C. Robust extraction of baseline signal of atmospheric trace species using local regression // *Atmos. Meas. Tech*. 2012. V. 5. 2613–2624.
<https://doi.org/10.17059/2016-4-9>
- Rudnick R.L., Gao S. Composition of the Continental Crust // *Treatise Geochem*. 2003. V. 3. P. 1–64.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>
- Salvador P., Artíñano B., Pio C., Afonso J., Legrand M., Puxbaum H., Hammer S. Evaluation of aerosol sources at European high altitude background sites with trajectory statistical methods // *Atmos. Environ*. 2010. V. 44. P. 2316–2329.
- Seinfeld J.H., Pandis S.N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, 2nd Edition. N.Y.: 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.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development. N.Y.: United Nations. 2015. 35 p.
- U.S. Environmental Protection Agency. National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter; Final rule. Federal Register. 2006. V. 71. 94 p.
- Vlasov D., Kosheleva N., Kasimov N. Spatial distribution and sources of potentially toxic elements in road dust and its PM10 fraction of Moscow megacity // *Science of the total environment*. 2021(b). V. 761. 143267.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143267>
- Vlasov D.V., Eremina I.D., Shinkareva G.L., Chubarova N.E., Kasimov N.S. Daily variations in wet deposition and washout rates of potentially toxic elements in Moscow during spring season // *Geography, Environment Sustainability*. 2021(a). V. 14. № 1. P. 219–233.
<https://doi.org/10.24057/2071-9388-2020-162>
- WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. 2021. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>.
- Zhang H., You S., Zhang M., Liu D., Wang X., Ren J., Yu C. The Impact of Atmospheric Pollutants on Human Health and Economic Loss Assessment // *Atmosphere*. 2021. V. 12. 1628.
<https://doi.org/10.3390/atmos12121628>

Conditionally Background Level of Aerosol Pollution of Near-Surface Air in Moscow and One of Its Suburbs: Seasonal Variations

D. P. Gubanova^{1, *}, A. A. Vinogradova¹, E. A. Lezina², M. A. Iordanskii¹, and A. A. Isakov¹

¹Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, 3 Pyzhevsky Lane, Moscow, 119017 Russia

²Mosecomonitoring, 11/1 Novy Arbat str., Moscow, 121019 Russia

*e-mail: gubanova@ifaran.ru

The data of continuous observations of aerosol composition in the near-surface atmosphere in Moscow (in the city center) and in Moscow region (near Zvenigorod, Moscow region) for three years, from autumn 2019 to the end of 2022, are analyzed. The obtained data were compared with the results of observations on the Moscow network stations “Mosecomonitoring”. The concept of conditionally background aerosol pollution of the atmosphere in Moscow is introduced for those days when the average daily concentration of PM₁₀ is less than the MPC value (60 µg/m³). Previously, the authors found that all episodes of increased aerosol pol-

lution in Moscow with daily average PM_{10} concentration higher than the MPC value, are associated either with the presence of a close local source in the city itself, or with the long-range transport of fire aerosols and/or dust from other territories to the Moscow region. The average daily $PM_{2.5}$ concentration in the city and the suburb is lower than the MPC ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) all year round. The days corresponding to the introduced conditional background make up more than 91% over three years in the center of Moscow. Such a conditional background is formed by both natural and anthropogenic sources of aerosols, and not only of local, but also of remote origin. It implicitly takes into account the influence of meteorological conditions on sources and sinks of aerosols, as well as advective air mass transport of aerosol to and from the city. Seasonal variations in mass concentration of PM_{10} , $PM_{2.5}$ particles and individual chemical elements, as well as in the distribution of chemical elements by the size of aerosol particles in near-surface atmosphere under conditionally background pollution are analyzed. The emphasis is placed on the similarity and difference in the conditionally background near-surface aerosol for the city and the suburb in different seasons.

Keywords: atmosphere, megapolis, suburb, near-surface aerosol, conditionally background aerosol pollution, PM_{10} , $PM_{2.5}$, elemental composition, mass concentration, distribution of chemical elements by aerosol particle size