

Влияние метеорологических условий и дальнего переноса воздушных масс на состав приземного аэрозоля в Москве в зимние сезоны

А.А. Виноградова[✉], Д.П. Губанова, М.А. Иорданский, А.И. Скороход*

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

Поступила в редакцию 7.02.2022 г.;
после доработки 23.03.2022 г.;
принята к печати 11.04.2022 г.

Обсуждаются результаты комплексного эксперимента по изучению состава и временной изменчивости городского аэрозоля в приземном воздухе в центре Москвы, основанные на ежедневных данных о концентрациях частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$. В дополнение к этим непрерывным наблюдениям каждый сезон (в течение 35–40 дней) ежедневно проводились измерения массовой концентрации всего аэрозоля (гравиметрическим методом) и 65 химических элементов, входящих в его состав.

Рассматриваются зимы 2019/2020 и 2020/2021 гг. Состав аэрозоля сопоставляется с метеорологическими параметрами приземной атмосферы в Москве, с направлением дальнего переноса воздушных масс в Московский регион, а также с распределением пыли в воздухе над европейской территорией России (ЕТР) (по данным реанализа MERRA-2). Подробный анализ элементного состава московского аэрозоля позволил выделить элементы глобального/локального распространения, а также природного/антропогенного генезиса. Концентрации всех составляющих аэрозоля в Москве зимой не превосходили соответствующие среднесуточные ПДК для воздуха жилых территорий. Показано, что накоплению массы аэрозолей PM_{10} и $PM_{2.5}$ в воздухе города способствуют штилевые условия. Максимальные уровни аэрозольного загрязнения наблюдались в декабре 2020 г. при ветрах юго-восточных направлений, когда происходил дальний атмосферный перенос примесей в Москву от источников, расположенных в южных районах ЕТР, на Прикаспийской низменности и в западных районах Казахстана.

Ключевые слова: приземный аэрозоль, массовая концентрация, элементный состав, метеорологические условия, дальний перенос, воздушная масса, зима, Москва; surface aerosol, mass concentration, elemental composition, meteorological conditions, long-range transport, air mass, winter, Moscow

Введение

Аэрозоль — очень изменчивая составляющая атмосферы, влияющая как на состояние окружающей среды, так и на климат разных природных зон и территорий [1–3]. Источники (дальние и локальные, природные и антропогенные) поставляют в атмосферу первичный аэрозоль, состав которого различается как по размеру частиц, так и по химическим компонентам. Кроме того, в самой атмосфере, содержащей не только аэрозольные, но и газовые составляющие, возможны образование вторичных аэрозольных частиц, а также различные физические и химические преобразования аэрозоля, благодаря которым меняются его химический состав и распределение частиц по размерам. Наличие и эффектив-

ность этих процессов зависят от интенсивности солнечного излучения, метеорологических параметров атмосферы, вариаций эмиссий локальных источников и стоков примесей, условий их дальнего распространения с воздушными массами в конкретные дни и в разные сезоны года. Таким образом, изучение аэрозоля в крупном городе — задача очень сложная, включающая в себя анализ большого числа переменных, описывающих свойства атмосферы, а также по возможности состав эмиссий и расположение природных и антропогенных источников различных атмосферных составляющих.

Изучению аэрозолей в городах пока посвящено не слишком много научных публикаций [4]. Особенно активно эти исследования проводятся в последние годы как в мире в целом [5], так и в Москве [6] в условиях ограничительных мероприятий, связанных с пандемией COVID-19, которые могут и должны влиять на состав городского воздуха. Однако природные условия в разных странах столь многообразны, что достоверно выделить общие или хотя бы похожие тенденции изменений аэрозольных

* Анна Александровна Виноградова (anvinograd@yandex.ru); Дина Петровна Губанова (gubanova@ifaran.ru); Михаил Алексеевич Иорданский (miordan@mail.ru); Андрей Иванович Скороход (askorokhod@mail.ru).

параметров на фоне их условно «фоновых» колебаний, свойственных конкретному месту и сезону, пока не получается [7].

При изучении атмосферного аэрозоля очень полезную информацию дает его элементный состав, который косвенно указывает на локальные/удаленные источники загрязнения атмосферы, что способствует определению путей поступления аэрозоля к месту наблюдений [8]. Для определения источников загрязнения атмосферы используются некоторые трассеры (концентрации ряда химических элементов и их отношения), которые характерны для состава вещества, выбрасываемого в атмосферу в ходе человеческой деятельности или природных процессов – различные производства, транспорт, вулканы, пожары, пыльные бури и т.д. [9–11]. В последние годы растет число работ, посвященных изучению элементного состава аэрозолей в разных районах России (например, на опустыненных территориях [10–13], в удаленных районах Арктики [14, 15], в городах Сибири [16, 17] и др. [18]). Что касается атмосферы Московского региона, то исследования элементного состава аэрозоля здесь проводились лишь эпизодически и публикаций на эту тему немного [7, 19–25]. В последние годы сотрудники МГУ им. М.В. Ломоносова проводят работы по сопоставлению элементного состава твердых частиц почв и дорожной пыли с составом атмосферного аэрозоля в Москве и Подмосковье [26–28].

В настоящей работе анализируются данные о составе аэрозоля в городском воздухе Москвы, полученные в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (далее – ИФА РАН) (некоторые результаты анализа этих данных представлены в [7, 25, 29, 30]). Рассматриваются зимы 2019/2020 и 2020/2021 гг. – сезоны с наименьшим аэрозольным загрязнением атмосферы за двухлетний период наблюдений. Акцент делается на анализе вариаций распределения массы аэрозоля по размерам частиц (массового состава) и элементного состава аэрозоля при сопоставлении с метеорологическими условиями и направлением дальнего переноса воздушных масс в Московский регион.

Исходные данные, методы их получения и анализа

В течение последних двух лет (с октября 2019 по октябрь 2021 г.) в ИФА РАН проводился комплексный эксперимент по исследованию физико-химических характеристик приземного аэрозоля. Пункт наблюдений (примерные координаты: 55,74° с.ш.; 37,62° в.д.) расположен во дворе ИФА РАН в центральной части Москвы, в зоне плотной городской застройки, недалеко от транспортных магистралей средней загруженности. Пробы аэрозоля отбираются ежедневно на высоте ~2 м над землей, замена фильтров производится в 09:00 по московскому времени.

Методически эксперимент организован таким образом, что за два года наблюдений были получены

непрерывные ряды ежедневных данных о функции распределения аэрозольных частиц по размерам и их счетной концентрации (в диапазоне 0,25–10 мкм) в приземном слое воздуха. Распределение массы частиц по размерам определяли по известной формуле [1, параграф 8.1.1. С. 356, формула 8.8]. В предположении, что основными компонентами городского аэрозоля являются пыль и сажевые частицы [31], при расчетах плотность частиц полагали равной 1,8 г/см³. В условиях высокой влажности для обводненных частиц плотность считали равной 1 г/см³. Кроме того, в течение 35–40 дней в каждом сезоне проводился интенсивный комплексный эксперимент, когда по ежесуточным пробам, отобранным аспирационным методом, определялись массовая концентрация всех уловленных на фильтр аэрозольных частиц (как правило, их размеры не превышают 40 мкм) и элементный состав аэрозоля. В рассматриваемые зимние сезоны такие эксперименты осуществлялись с 10 января по 14 февраля 2020 и 2021 гг.

Оборудование для отбора проб аэрозоля включает:

- аспирационные аэрозольные пробоотборники с аналитическими фильтрами типа АФА, изготовленными из фильтрующего полотна Петрянова, для последующего гравиметрического и химического анализа (для частиц размером (диаметром) $D = 0,1$ мкм коэффициент проскока в фильтре АФА составляет 0,1% [32]);

- шестикаскадные импакторы с гидрофобными фильтрами для определения массы аэрозоля и элементного состава в диапазонах размеров частиц: < 0,5; 0,5–1,5; 1,5–2,5; 2,5–4,0; 4,0–6,5; > 6,5 мкм;

- лазерные аэрозольные спектрометры LAS-P для определения количества аэрозольных частиц с $D = 0,15–2,0$ мкм каждые 5 мин в 10 каналах;

- оптико-электронные аэрозольные спектрометры OEAS-05 для определения количества аэрозольных частиц с $D = 0,2–10,0$ мкм каждые 5 мин в 10 каналах.

Различные параметры аэрозоля определялись и анализировались с помощью следующих методов и приборов:

- микрофизические характеристики аэрозольных частиц – методами лазерной и электронной спектроскопии;

- массовая концентрация аэрозоля – методом гравиметрии и/или численным расчетом с использованием данных о распределении частиц по размерам [1];

- элементный состав – методом атомно-эмиссионной спектроскопии (ICP-AES), масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS), с помощью рентгенофлуоресцентного анализа (XFA) [9–11, 33];

- статистика полученных данных – с помощью стандартного статистического программного обеспечения для автоматизированной числовой обработки и графического представления информации.

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

– метеорологические параметры ближайшей к ИФА РАН метеостанции Балчуг с веб-сайтов [34–36];

– обратные траектории переноса воздушных масс к точке наблюдения, рассчитанные моделью HYSPLIT на сайте ARL NOAA [37];

– пространственное распределение пыли в приземном воздухе – по данным реанализа MERRA-2 (версия 2), полученным из данных спутников и реального мониторинга [38];

– данные сети станций ГПБУ Мосэкомониторинг (МЭМ) [39].

Результаты и их обсуждение

В средних широтах Евразии зимой в большинстве материковых районов снежный покров изолирует подстилающую поверхность (почву, частично – дороги) от атмосферы. Это сильно снижает воздействие местных естественных источников почвенных и пылевых аэрозолей на состав приземной атмосферы. Кроме того, при низкой температуре воздуха ослабевают процессы образования вторичных аэрозольных частиц из газов-предшественников, а также практически блокированы эмиссии биоаэрозолей растениями. Таким образом, в приземном городском

аэрозоле зимой должны содержаться преимущественно антропогенные составляющие локального происхождения и природные/антропогенные примеси глобального распространения. Наши данные двухлетнего непрерывного мониторинга показывают, что зимние сезоны – время минимальных концентраций всех составляющих аэрозоля в приземном воздухе Москвы. При этом зимы могут быть очень разными в отношении влияния на состав воздуха погодных условий и дальнего атмосферного переноса воздушных масс.

Общие сведения о составе изучаемого зимнего аэрозоля

На рис. 1 показаны величина и изменчивость среднесуточной массовой концентрации аэрозольных частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ в приземном воздухе в центре Москвы зимой 2019/2020 и 2020/2021 гг. Все время концентрации не превышали значения среднесуточной предельно допустимой концентрации (ПДК) (60 и 35 $мкг/м^3$ для PM_{10} и $PM_{2,5}$ соответственно). Как видно из рис. 1, среднесуточные значения массовой концентрации PM_{10} и $PM_{2,5}$ изменяются синхронно в течение трех месяцев (коэффициенты корреляции 0,84 и 0,75 в 2019–2020 и 2020–2021 гг.,

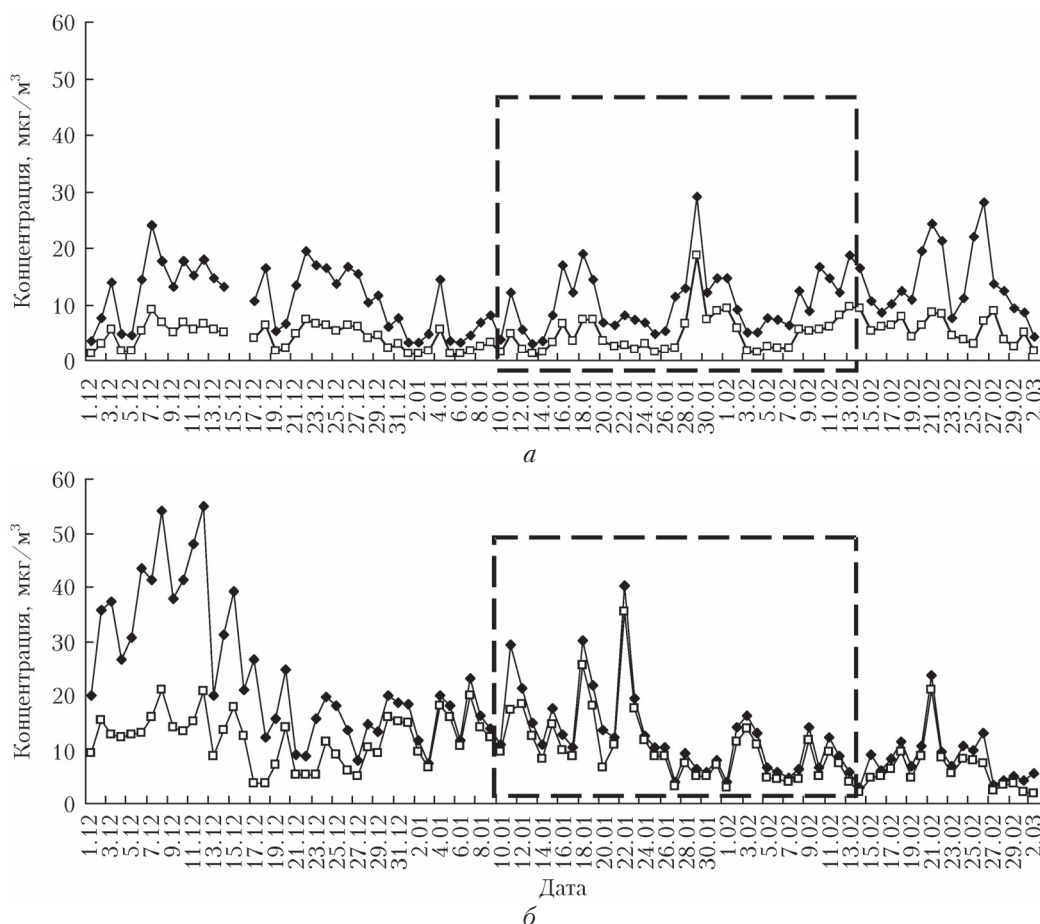


Рис. 1. Концентрация аэрозолей PM_{10} (черные символы) и $PM_{2,5}$ (белые символы) в приземном воздухе Москвы в зимние (декабрь – февраль) сезоны: *a* – 2019/2020; *б* – 2020/2021 гг.; пунктирные рамки выделяют периоды интенсивного мониторинга

что говорит об одинаковых источниках этих фракций частиц или о примерно синхронной активации/деактивации их источников.

Сравнение ежедневных величин массовой концентрации аэрозоля PM_{10} и $PM_{2,5}$, полученных в ИФА РАН и на ближайшей станции сети МЭМ (Спиридоновка) в центре города, показало хорошую сходимость абсолютных значений и изменчивости этих характеристик. Коэффициенты корреляции между данными ИФА и Спиридоновки в каждом из рассматриваемых сезонов составляют $\sim 0,8$ для PM_{10} и $> 0,9$ для $PM_{2,5}$.

Средние значения массовой концентрации различных фракций аэрозольных частиц и общей массовой концентрации аэрозоля M ($D < 40$ мкм) приведены в табл. 1. Наиболее наглядные различия зим 2020/2021 и 2019/2020 гг. состоят в значительно

от 2,5 до 10 мкм была значительно выше в феврале 2020 г., чем 2021 г. (см. табл. 1 и рис. 1). Следовательно, распределение массовой концентрации аэрозоля PM_{10} по размерным фракциям с 16 декабря 2020 г. до начала марта 2021 г. должно быть более типичным для зимнего аэрозоля в Москве, чем аналогичное распределение предыдущего аномального зимнего сезона.

Ветровые условия в Москве в рассматриваемые зимы характеризовались тихими, слабыми ветрами, штилевые условия чаще отмечались зимой 2020/2021 гг., чем предыдущей. Однако розы ветров в рассматриваемые сезоны принципиально различались (рис. 2, а и б): преимущественно западное направление ветра в 2019/2020 гг. по сравнению с большей долей ветров юго-восточных направлений в 2020/2021 гг.

Таблица 1

Средние значения массовой концентрации ($\text{мкг}/\text{м}^3$) \pm СКО аэрозоля разных размеров на разных временных отрезках рассматриваемых зим

Интервал времени	D , мкм				M
	$< 2,5$	$2,5-10$	< 10	> 10	
10.01–14.02.2020 г.	$4,7 \pm 3,7$	$5,7 \pm 2,7$	$10,4 \pm 5,6$	$10,4 \pm 6,7$	$20,6 \pm 9,0$
10.01–14.02.2021 г.	$10,7 \pm 6,8$	$2,5 \pm 2,1$	$13,1 \pm 8,0$	$18,4 \pm 10,2$	$32,0 \pm 12,6$
3 месяца 2019/2020 гг.	$4,7 \pm 2,8$	$6,7 \pm 3,9$	$11,4 \pm 5,9$		
3 месяца 2020/2021 гг.	$10,3 \pm 5,9$	$6,5 \pm 8,5$	$16,9 \pm 11,9$		
1–15.12.2020 г.	$14,4 \pm 3,5$	$23,1 \pm 7,7$	$37,5 \pm 10,6$		
16.12.2020–3.03.2021 г.	$9,5 \pm 5,9$	$3,4 \pm 3,4$	$12,9 \pm 7,6$		

большей концентрации аэрозоля в воздухе в первой половине декабря 2020 г., а также в малых значениях массовой концентрации аэрозолей размерами от 2,5 до 10 мкм (разница между фракциями PM_{10} и $PM_{2,5}$) в январе-феврале 2021 г. (см. рис. 1). Аномальные значения выделены полужирным в табл. 1.

Метеорологические особенности рассматриваемых зим в Москве и связанные с ними различия в дисперсном составе аэрозоля

Зимы 2019/2020 и 2020/2021 гг. в Москве отличались значениями основных метеопараметров: температуры T , относительной влажности воздуха U и атмосферного давления p . Это проявилось в первую очередь в аномально высокой (положительной) температуре воздуха (табл. 2) на протяжении всех трех месяцев зимы 2019/2020 гг. Давление и влажность в это время были немного ниже, чем в следующем году, когда все три показателя были близки к норме. Снежный покров зимой 2019/2020 гг. лежал всего два месяца (декабрь и январь) при средней (за 2005–2021 гг.) длительности существования снежного покрова в Москве больше четырех месяцев. В результате открывшаяся из-под снега почва уже в феврале была не замерзшей и достаточно сухой, чтобы быть источником аэрозольных частиц. Возможно, именно последнее обстоятельство привело к тому, что концентрация аэрозолей размерами

Эти различия сказывались на распределении массы аэрозоля по размерам при ветрах разных направлений. В частности, данные рис. 2, в и г показывают, что зимой в Москве массовая концентрация

Таблица 2

Среднемесячные метеорологические показатели приземного воздуха Москвы в рассматриваемые сезоны

Сезон	Месяц	T , °C	p , мм рт. ст.	U , %
2019/2020 гг.	Декабрь	1,3	747	82
	Январь	0,7	748	79
	Февраль	0,5	744	75
2020/2021 гг.	Декабрь	-3,9	760	81
	Январь	-5,0	749	83
	Февраль	-8,3	751	75

аэрозоля PM_{10} и $PM_{2,5}$ в приземном воздухе выше при ветрах южных и восточных направлений. Интересно, что именно ветры южных, восточных и юго-восточных румбов постоянно регистрировались в Москве с 1 по 15 декабря 2020 г., в период максимальных концентраций аэрозоля (см. рис. 1, б и табл. 1). Именно в эти 15 дней штилевые условия были зарегистрированы в 40% случаев, что также могло способствовать повышению концентрации аэрозоля в приземном воздухе при слабом оттоке загрязнений из города с воздушными массами. В целом статистика за два зимних сезона (без учета эпизода повышенной аэрозольной концентрации в первой половине декабря 2020 г.) показывает, что при частоте

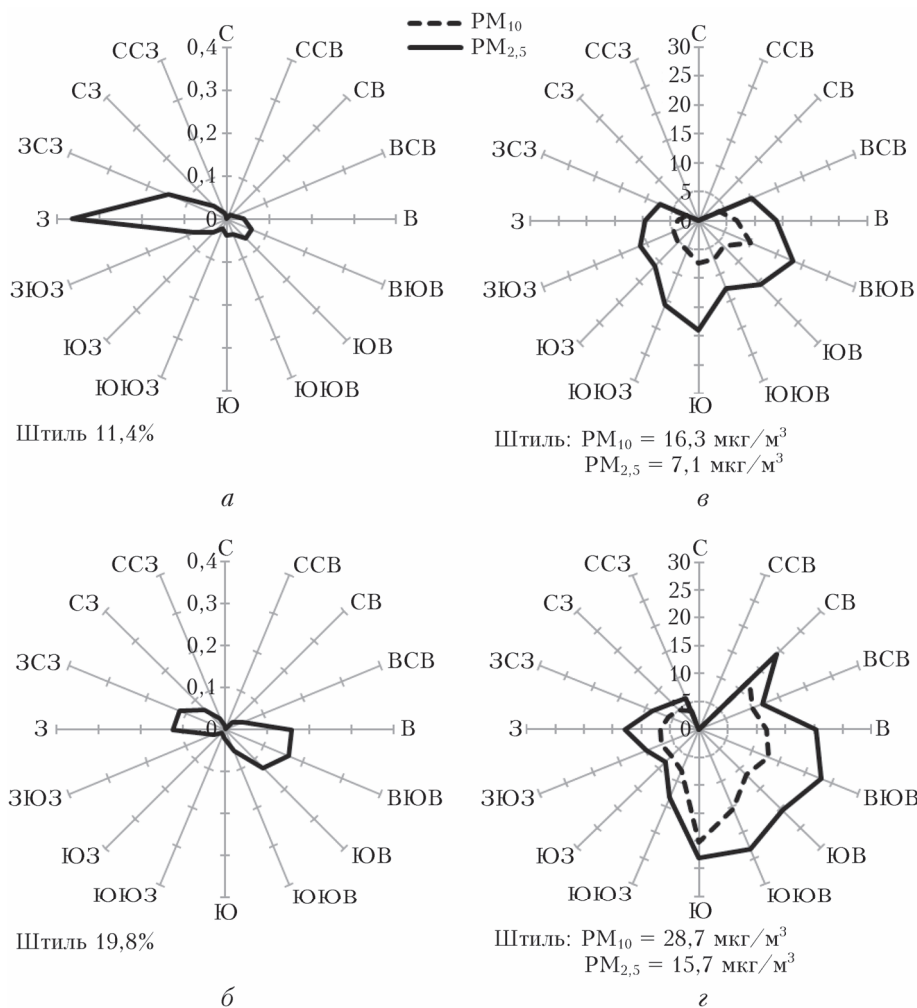


Рис. 2. Розы ветров (а, б) и розы массовых концентраций частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ в Москве за три зимних месяца: а, в – сезон 2019/2020; б, г – сезон 2020/2021 гг., а также показатели штилевых условий: частота, % (а, б) и средние концентрации при штиле, мкг/м^3 (в, г)

штилевых условий 12–18% происходит повышение массовых концентраций PM_{10} и $PM_{2,5}$ на 4–11 и 7–13% соответственно.

Дальний атмосферный перенос воздушных масс и аэрозоля в Москву зимой

Зимой, когда подстилающая поверхность частично заснежена, растительность лишена листьев, а температура воздуха часто отрицательная, процессы выведения примесей из атмосферы на подстилающую поверхность замедлены по сравнению с более теплым временем года, и аэрозоль переносится на большие расстояния [40–42]. Воздушные массы, проходящие южнее Москвы, где в это время вовсе нет снежного покрова или он очень небольшой, должны содержать природные аэрозоли (пылевые, почвенные) с поверхности этих территорий. Кроме того, в атмосферу этих районов могут быть принесены и затем захвачены в поток, движущийся к Москве, частицы, образовавшиеся на других территориях и сохра-

няющие в определенной степени свойства исходного аэрозоля. Благодаря большому времени жизни субмикронных и микронных примесей в воздухе зимой такие процессы формирования состава аэрозоля в Москве вполне вероятны.

Анализ дальнего переноса воздушных масс для каждого зимнего дня в рассматриваемые сезоны показал, что при ветрах юго-восточных направлений воздушные массы и аэрозоль поступают в Москву с юга ЕТР, из районов Прикаспийской низменности и Западного Казахстана. Это важно для идентификации таких дней, поскольку стандартные метеоданные включают именно данные о направлении ветра.

На рис. 3 (цв. вкладка) приведены распределения траекторий переноса воздушных масс к Москве и пыли в приземной атмосфере столицы (по данным реанализа MERRA-2 [38]) для двух суток, типичных для интервала с 1 по 15 декабря 2020 г. с повышенным содержанием аэрозоля в городе. Обратные траектории движения воздушных масс к пункту наблюдений в ИФА РАН были рассчитаны на сайте Лаборатории воздушных ресурсов ARLNOAA [37]

(8 траекторий длительностью 72 ч в сутки с интервалом 3 ч на высоте 100 м над поверхностью).

Все 15 суток ветры в городе были юго-восточных румбов. По рис. 3 видно, что в этот период за трое суток (длительность траекторий) в Москву могли поступать воздушные массы, несущие песок и пыль с юго-востока ЕТР, из Калмыкии, а также из пустыни Рын-пески [43], расположенной в Прикаспийской низменности и на западе Казахстана. На этих территориях, где выпадает ~ 230 мм осадков в год, зимой при отрицательной температуре воздуха снежный покров очень незначительный и пыльные бури случаются довольно часто. Видно, что в начале декабря 2020 г. воздушные массы могли нести пыль и песок из Калмыкии (северо-запад Каспийского побережья), где в эти дни развивалась пыльная буря (рис. 3, а). Похожую ситуацию (но при более значительном аэрозольном загрязнении) мы наблюдали и регистрировали в Москве осенью 2020 г. [30]. К 15 декабря траектории переноса воздушных масс в Москву немного сместились, и перенос аэрозолей уже происходил с Прикаспийской низменности и с более восточных территорий пустыни Рын-пески. В целом же вероятность переноса воздуха из этих районов в Московский регион в зимнее время оценена в пределах 5% [44]. Таким образом, было зарегистрировано довольно редкое для Москвы явление поступления аридного аэрозоля зимой из юго-восточных районов ЕТР и Западного Казахстана.

На протяжении двух рассматриваемых зим были и другие дни, когда перенос аэрозоля в регион происходил примерно из тех же районов, что и в первой половине декабря 2020 г. Однако это были кратковременные эпизоды, не повлиявшие принципиально на концентрацию аэрозоля в столице. Как отмечалось выше, аэрозольное загрязнение в городе с 16–17 декабря 2020 г. и по конец зимы 2021 гг. было примерно одинаковым (см. табл. 1) в отноше-

нии средних значений массовой концентрации частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ и их изменчивости. Видимо, эти параметры можно считать условно «фоновыми» для зимнего воздуха в Москве.

Элементный состав аэрозоля в приземном воздухе Москвы зимой

Эксперимент в Москве построен таким образом, что элементный состав аэрозоля каждый сезон определяется только во время интенсивного мониторинга, т.е. в периоды, отмеченные на рис. 1. На нем видно, что по общим показателям состава аэрозоля периоды с 10 января по 14 февраля 2020 и 2021 гг. не слишком различались. Из всех измеряемых 65 химических элементов для более детального анализа были выбраны 33 элемента (рис. 4), представляющие как терригенные и/или не терригенные элементы, так и элементы глобального и/или локального происхождения.

На рис. 4 показаны геохимические профили средних значений концентрации (С) и коэффициента обогащения (КО) химических элементов в составе приземного аэрозоля в Москве зимой 2020/2021 гг. Сходство соответствующих кривых за разные годы очевидно. Коэффициент обогащения рассчитывался в сравнении со средним составом земной коры (данные из [45]) по формуле $КО = (C_x/C_{La})^{aer}/(C_x/C_{La})^{cr}$, где C_x и C_{La} – концентрации элемента X и лантана La (опорный элемент преимущественно терригенного происхождения), верхние индексы указывают на среду – аэрозоль (aer) или земную кору (cr). Обычно разделяют все рассматриваемые элементы на преимущественно терригенные ($КО < 10$) и не терригенные ($КО > 10$). По этому признаку в Москве к не терригенным элементам в приземном аэрозоле можно отнести W, Cu, Mo, Hg, As, Zn, Sn, Pb, S, Cd, Sb, Se, Bi, причем эта группа одинакова для обеих зим

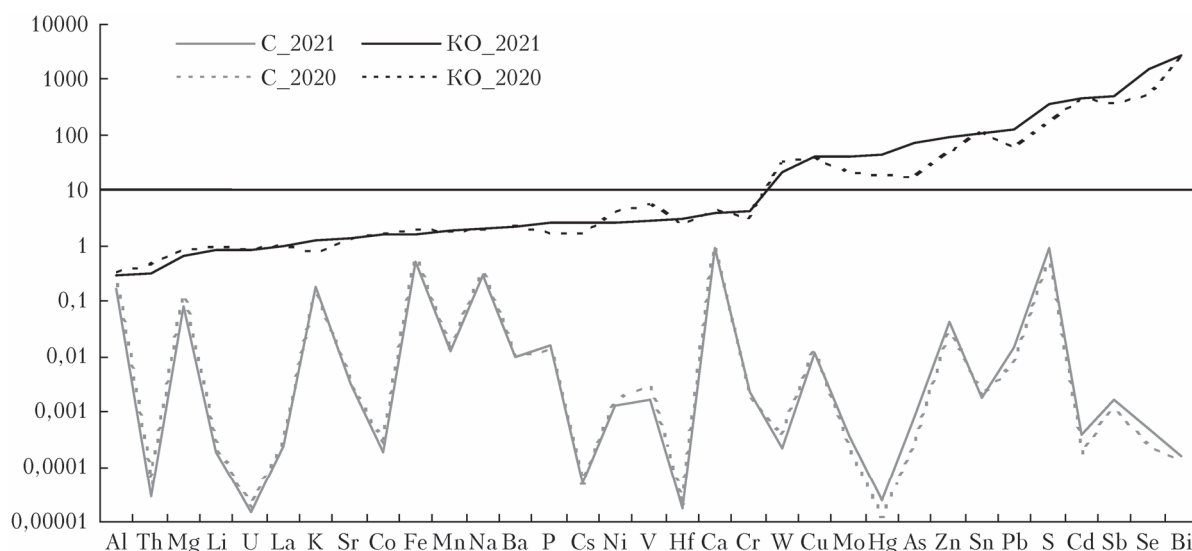


Рис. 4. Средние значения массовой концентрации ($мкг/м^3$) и коэффициентов обогащения химических элементов в приземном аэрозоле в Москве в январе-феврале 2020 и 2021 гг. Шкала логарифмическая; элементы на горизонтальной шкале выстроены в порядке возрастания $КО_{2021}$

и совпадает по составу с группой не терригенных элементов, которые были выделены весной 2020 г. [7]. Элементы с $1 < КО < 10$ часто, особенно в городе, имеют смешанное происхождение и связаны с сельскохозяйственной деятельностью или использованием в производстве почвенных составляющих (стройки, транспорт, производство строительных материалов и т.д.).

Анализ изменчивости концентраций разных элементов позволил выделить несколько групп, концентрации элементов в которых менялись почти синхронно в течение рассматриваемых зимних месяцев. Парные коэффициенты корреляции концентраций элементов преимущественно терригенного происхождения (Mg, Al, P, Ca, Fe, Ba, Sr, Mn, Co, Hf, La, Th, U) составляли $> 0,8$ в оба зимних сезона. К этой группе примыкают (с коэффициентами корреляции от 0,7 до 0,8) элементы смешанного локального происхождения: Cr, Cu, Mo, W, Sn, Sb. Кроме того, можно выделить высокие корреляции изменчивости среднесуточных значений концентрации для нескольких групп элементов, условно названных нами группами серы (S, K, Cs, Se, Bi), железа (Fe, Mn, Cr, Co, Zn, Sn) и свинца (Pb, Cd, Sn, Sb). В группу серы вошли элементы глобального распространения, в группу железа – металлы и металлоиды локального антропогенного происхождения, в группу свинца – элементы, связанные в основном с выбросами в атмосферу от транспорта [46]. Эти

закономерности справедливы в целом для обоих зимних сезонов.

Различия в элементном составе приземного аэрозоля между рассматриваемыми зимами в Москве проявляются в изменении концентраций элементов в зависимости от направления ветра (и, следовательно, направления дальнего переноса воздуха и загрязнений в Московский регион). К сожалению, направление ветра очень редко указывает на возможные дальние территории, откуда поступают воздушные массы, в силу завихренности воздушных потоков. Например, как видно на рис. 3, б, 15 декабря 2020 г. при западном направлении ветра в городе дальний перенос воздушных масс происходил из юго-восточных районов (такие ситуации редки, но возможны). Сами ветры в периоды интенсивного мониторинга были распределены по направлениям почти так же, как и за три месяца соответствующего сезона (см. рис. 2, а и б). Поскольку розы ветров в эти зимы дополняли друг друга по направлениям, мы объединили два сезона и построили так называемые «розы концентраций» некоторых элементов для «невозмущенного» среднего зимнего сезона в Москве (периоды интенсивного мониторинга не включали эпизод дальнего переноса пыли из юго-восточных районов в начале декабря 2020 г.). Эти средние для двух невозмущенных зимних сезонов диаграммы (рис. 5, а–г) для каждого элемента показывают, как изменяется его

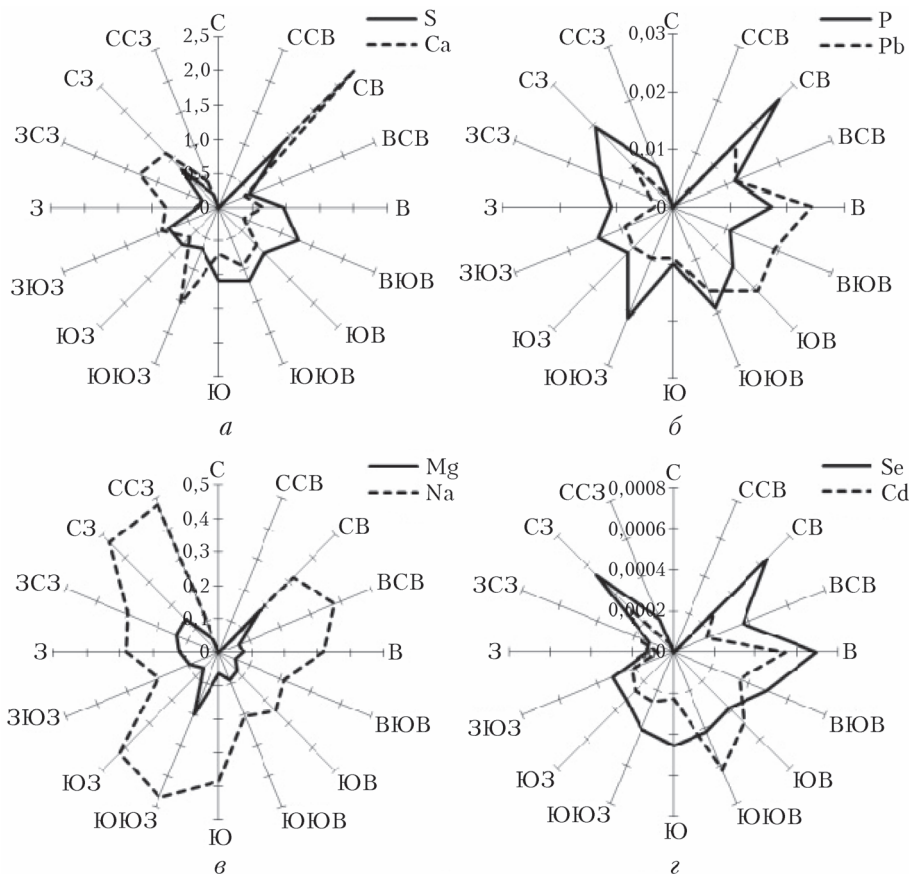
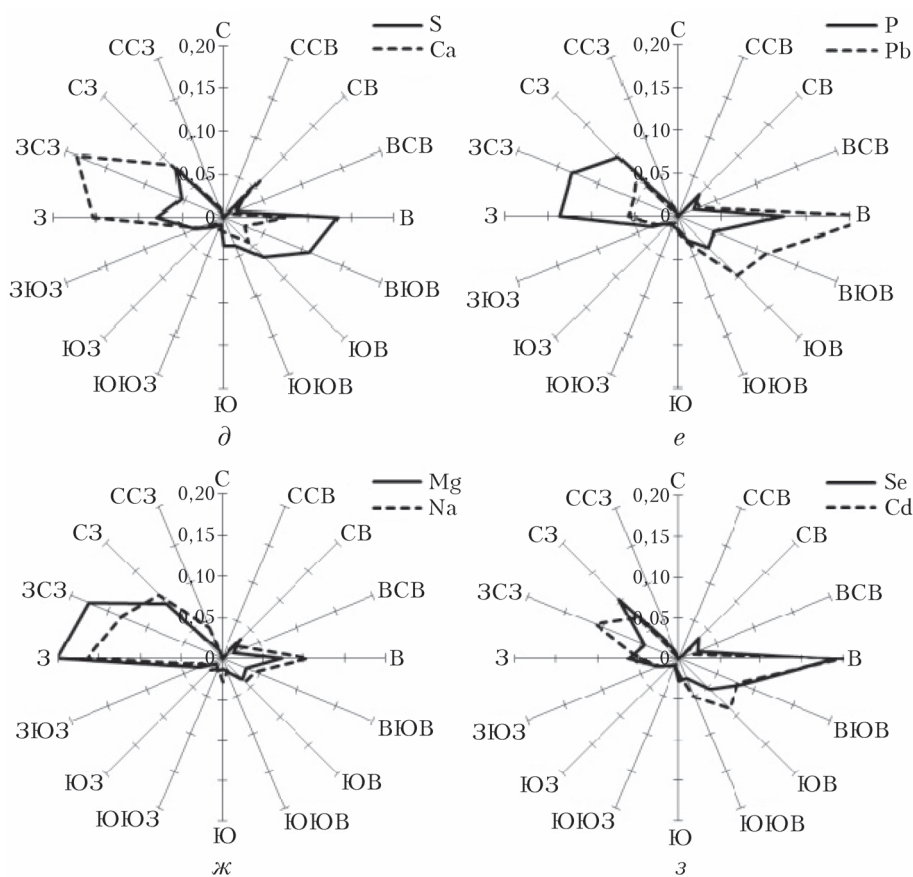


Рис. 5. Распределение по направлениям ветра для некоторых элементов в приземном воздухе Москвы зимой 2020/2021 гг.: а–г – концентрации, $\text{мкг}/\text{м}^3$; д–з – вклад в среднее значение концентрации, $\text{мкг}/\text{м}^3$ (окончание см. на с. 443)



Окончание рис. 5 (начало см. на с. 442)

среднесуточная концентрация зимой в приземном воздухе в пункте наблюдений в зависимости от направления ветра. Видно, что концентрация таких элементов, как S, Ca, Na, Mg и P, в целом не сильно зависит от направления ветра зимой в центре Москвы. Наоборот, концентрация Pb, Cd и Se в воздухе центра Москвы зимой выше при южных и юго-восточных ветрах. Понятно, что при таком рассмотрении не разделяется влияние локальных и удаленных источников.

Если учесть частоты ветров определенных направлений (розу ветров) для рассматриваемого отрезка времени (весовые коэффициенты направления ветра), можно рассчитать вклады в среднюю (за рассматриваемые зимы) концентрацию элемента в те дни, когда ветер имел соответствующие направления. Такие «розы вкладов» показаны на рис. 5, д–з. Видно, что зимой в атмосферу Москвы при западных ветрах поступает больше Ca, P, Mg и Na, тогда как при ветрах восточных и юго-восточных направлений – больше S, Pb, Cd и Se.

Заключение

Зима – это сезон с минимальным аэрозольным загрязнением в Москве. Средние значения общей массовой концентрации аэрозоля составляли 20,8

и 32,0 мкг/м³ в зимние сезоны 2019/2020 и 2020/2021 гг. соответственно. Для сравнения: средние (за 2020 и 2021 гг.) значения общей массовой концентрации аэрозоля весной, летом и осенью составляли ~ 57, 75 и 46 мкг/м³. Зимой концентрации всех измеренных компонентов в приземном воздухе не превышали среднесуточной ПДК для жилых районов в течение обеих зим. Зима 2019/2020 гг. в Москве была аномально теплой, с самой короткой продолжительностью снежного покрова за все годы наблюдений, что, возможно, привело к более высокой концентрации частиц микронных размеров (по сравнению со следующей зимой). Наоборот, зима 2020/2021 гг. была близка к норме по основным метеорологическим параметрам, хотя роза ветров характеризовалась повышенной частотой юго-восточных направлений ветра.

В первой половине декабря 2020 г. при восточных и юго-восточных ветрах концентрация аэрозоля, особенно PM₁₀, в городе была повышенной относительно средней величины. Анализ траекторий переноса воздушных масс к Москве, а также результаты реанализа MERRA-2 в отношении пространственного распределения пыли в приземной атмосфере показали, что источники аэрозоля в этих случаях были расположены в южных районах ЕТР, в Калмыкии, Северо-Восточном Прикаспии и в Западном Казахстане.

Показано, что накоплению массы аэрозолей PM_{10} и $PM_{2.5}$ до максимальных значений в воздухе города способствуют штилевые условия. При отсутствии аномального атмосферного переноса загрязнений частота штилевых условий в Москве зимой 12–18%, при этом массовые концентрации PM_{10} и $PM_{2.5}$ повышаются на 4–11 и 7–13% соответственно.

Изучение изменчивости коэффициента обогащения (относительно состава земной коры) выявило одинаковые для обоих зимних сезонов элементы преимущественно не терригенного происхождения: W, Cu, Mo, Hg, As, Zn, Sn, Pb, S, Cd, Sb, Se, Bi. Корреляционный анализ концентраций разных элементов позволяет выделить еще несколько групп. Это терригенные элементы (Mg, Al, P, Ca, Fe, Ba, Sr, Mn, Co, Hf, La, Th, U), элементы глобального распространения (S, K, Cs, Se, Bi), а также две группы элементов локального антропогенного происхождения (Fe, Mn, Cr, Co, Zn, Sn) и (Pb, Cd, Sn, Sb), связанные, видимо, с эмиссиями аэрозолей производственными предприятиями и транспортом.

Совместный анализ направления ветра и элементного состава аэрозоля показал, что зимой в атмосферу Москвы западные ветры вносят больше Ca, P, Mg, Na и элементов, концентрации которых меняются с ними синхронно. Ветры восточных и юго-восточных направлений несут больше S, Pb, Cd, Se и, следовательно, элементов, концентрации которых меняются синхронно с этими элементами.

Таким образом, изучение процессов формирования аэрозольного загрязнения атмосферы в Москве зимой, несмотря на низкий уровень этого загрязнения, позволяет обнаружить важные связи абсолютного содержания и изменчивости различных компонент аэрозоля с природными метеорологическими и синоптическими условиями конкретных зим.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-05-50088).

Список литературы

1. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. New York: Wiley, 2006. 1232 p.
2. Кондратьев К.Я., Излев Л.С., Крапивин В.Ф. Атмосферные аэрозоли: Свойства, процессы образования и воздействия. От нано- до глобальных масштабов. СПб.: ВВМ, 2007. 858 с.
3. Гинзбург А.С., Губанова Д.П., Минашкин В.М. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Рос. хим. журнал. 2008. Т. LII, № 5. С. 112–119.
4. Безуглая Э.Ю., Смирнова И.В. Воздух городов и его изменения. СПб.: Астерион, 2008. 253 с.
5. Sokhi R.S., Singh V., Querol X., Finardi S., Targino A.C., de Fatima Andrade M., Pavlovic R., Garland R.M., Massagué J., Kong Sh., Baklanov A., Ren L., Tarasova O., Carmichael G., Peuch V.-H., Anand V., Arbil-la G., Badali K., Beig G., Belalcazar L.C., Bolignano A., Brimblecombe P., Camacho P., Casallás A., Charland J.-P., Choi J., Chourdakis E., Coll I., Collins M., Cyrus J., da Silva C.M., Di Giosa A.D., Di Leo A., Ferro C., Gavidia-Calderon M., Gayen A., Ginzburg A., Godefroy F., Gonzalez Y.A., Guevara-Luna M., Haque Sk M., Havenga H., Herod D., Hörrak U., Hussein T., Ibarra S., Jaimes M., Kaasik M., Khaïwal R., Kim J., Kousa A., Kukkonen J., Kulmala M., Kuula J., La Violette N., Lanzani G., Liu X., MacDougall S., Manseau P.M., Marchegiani G., McDonald B., Mishra S.V., Molina L.T., Mooibroek D., Mor S., Moussopoulos N., Murena F., Niemi J.V., Noe S., Nogueira T., Norman M., Pérez-Camaño J.L., Petäjä T., Piketh S., Rathod A., Reid K., Retama A., Rivera O., Rojas N.Y., Rojas-Quincho J.P., San José R., Sánchez O., Seguel R.J., Sillanpää S., Su Y., Tapper N., Terrazas A., Timonen H., Toscano D., Tsegas G., Velders G.J.M., Vlachokostas C., von Schneidmesser E., Vpm R., Yadav R., Zalakeviciute R., Zavala M. A global observational analysis to understand changes in air quality during exceptionally low anthropogenic emission conditions // Environ. Intern. 2021. V. 157, N 12. P. 106818. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106818.
6. 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. V. 14, N 5. DOI: 10.24057/2071-9388-2021-012.
7. Губанова Д.П., Виноградова А.А., Иорданский М.А., Скороход А.И. Временные вариации состава атмосферного аэрозоля в Москве весной 2020 года // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2021. Т. 57, № 3. С. 334–348. DOI: 10.31857/S0002351521030056.
8. Rasmussen P.E. Long-range atmospheric transport of trace metals: The need for geoscience perspectives // Environ. Geology. 1998. V. 33, N 2/3. P. 96–108.
9. Salvador P., Artiscano 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.
10. 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.
11. 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.
12. Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И., Мадвалиев У., Давлатшоев Т. Содержание элементов в пробах почв и пылевого аэрозоля в Таджикистане // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 2. С. 143–152; Abdullaev S.F., Maslov V.A., Nazarov B.I., Madvaliev U., Davlatshoev T. The elemental composition of soils and dust aerosol in the south-central part of Tajikistan // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 4. P. 347–358.
13. Артамонова М.С., Губанова Д.П., Иорданский М.А., Лебедев В.А., Максименков Л.О., Минашкин В.М., Обвинцев Ю.И., Чхетиани О.Г. Вариации массовой концентрации и состава приземного аэрозоля степной зоны юга России в летний период // Геофизические процессы и биосфера. 2016. Т. 15, № 1. С. 5–24.
14. Shevchenko V., Lisitzin A., Vinogradova A., Stein R. Heavy metals in aerosols over the seas of the Russian Arctic // Sci. Total Environ. 2003. V. 306. P. 11–25.
15. Стародымова Д.П., Виноградова А.А., Шевченко В.П., Захарова Е.В., Сивонен В.В., Сивонен В.П. Элемент-

- ный состав приземного аэрозоля у северо-западного побережья Кандалакшского залива Белого моря // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 11. С. 956–961; *Starodymova D.P., Vinogradova A.A., Shevchenko V.P., Zakharova E.V., Sivonen V.V., Sivonen V.P.* Elemental composition of near-ground aerosol near the north-western coast of Kandalaksha Bay of the White Sea // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 2. P. 181–186.
16. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В.* Влияние города Томска на химический и дисперсный состав атмосферного аэрозоля в приземном слое // Оптика атмосф. океана. 2008. Т. 21, № 6. С. 487–491.
 17. *Бортников В.Ю., Букатый В.И., Рябинин И.В., Семенов Г.А.* Микрофизические параметры и элементный состав атмосферного аэрозоля в г. Барнауле в 2006–2008 гг. // Изв. Алтай. гос. ун-та. 2009. Т. 61, № 1. С. 106–110.
 18. *Лукашин В.Н., Новигатский А.Н.* О химическом составе аэрозолей в приземном слое атмосферы Среднего Каспия зимой и осенью 2005 г. // Океанология. 2013. Т. 53, № 6. С. 813–824.
 19. *Волох А.А., Журавлева М.Г.* Оценка техногенного загрязнения воздуха в г. Москве // Изв. АН. Физ. атмосф. и океана. 1994. Т. 30, № 2. С. 182–188.
 20. *Огородников Б.И.* Характеристики аэрозолей пограничного слоя атмосферы над Москвой // Изв. АН. Физ. атмосф. и океана. 1996. Т. 32, № 2. С. 163–171.
 21. *Андропова А.В., Иорданский М.А., Трефилова А.В., Лебедев В.А., Минашкин В.М., Обвинцев Ю.И., Артамонова М.С., Гранберг И.Г.* Сравнительный анализ загрязнения приземного слоя атмосферы мегаполисов на примере Москвы и Пекина // Геофизические процессы и биосфера. 2010. Т. 9, № 3. С. 42–54.
 22. *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 // Оптика атмосф. океана. 2017. Т. 30, № 12. С. 1033–1042; *Gubanova D.P., Belikov I.B., Elansky N.F., Skorokhod A.I., Chubarova N.E.* Variations in $PM_{2.5}$ surface concentration in Moscow according to observations at MSU meteorological observatory // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 3. P. 290–299.
 23. *Gubanova D.P., Iordanskii M.A., Anikin P.P., Kudrina T.M., Skorokhod A.I., Elansky N.F.* Elemental composition and mass concentration of near surface aerosols in Moscow region during unusual weather conditions in the fall 2019 // Proc. SPIE. 2020. DOI: 10.1117/12.2575578.
 24. *Gubanova D.P., Elansky N.F., Skorokhod A.I., Kudrina T.M., Iordansky M.A., Sadovskaya N.V., Anikin P.P.* Physical and chemical properties of atmospheric aerosols in Moscow and its suburb for climate assessments // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2020. V. 606. DOI: 10.1088/1755-1315/606/1/012019.
 25. *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. // Оптика атмосф. океана. 2021. Т. 34, № 6. С. 441–450; *Gubanova D.P., Iordanskii M.A., Kudrina T.M., Skorokhod A.I., Elansky N.F., Minashkin V.M.* Elemental composition of aerosols in the near-surface air of Moscow: Seasonal changes in 2019 and 2020 // Atmos. Ocean. Opt. 2021. V. 34, N 5. P. 475–482.
 26. *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.
 27. *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. ун-та. Сер. 5. География. 2018. № 2. С. 16–27.
 28. *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 Clime. 2020. V. 32. P. 100638. DOI: 10.1016/j.uclim.2020.100638.
 29. *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. 2021. № 4. С. 133–147. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-4-133-147.
 30. *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. 2022. V. 8, N 2. P. 277–302. DOI: 10.3934/geosci.2022017.
 31. *Самуленков Д.А., Мельникова И.Н., Донченко В.К., Сапунов М.В.* Исследование загрязнений атмосферы с помощью лидарного мониторинга // Ученые записки Рос. гос. гидрометеорол. ун-та. 2017. Вып. 48. С. 266–280.
 32. *Фильтры АФА.* URL: <https://niki-mlt.ru/article/filtry-afa-analiticheskie-aerazolnye.html> (дата обращения: 7.12.2021).
 33. *Карандашев В.К., Туранов А.Н., Орлова Т.А., Лещнев 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.
 34. *Расписание погоды.* URL: <http://rp5.ru> (дата обращения: 7.12.2021).
 35. *Windy.* URL: <http://www.windy.com/ru> (last access: 7.12.2021).
 36. *WeatherArchive.* URL: <https://weatherarchive.ru/Pogoda/Moscow> (last access: 7.12.2021).
 37. *ARL NOAA.* URL: <http://www.arl.noaa.gov> (last access: 7.12.2021).
 38. *MERRA-2.* URL: <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni> (last access: 7.12.2021).
 39. *Мосэкомониторинг.* URL: <http://mosecom.mos.ru/> (дата обращения: 7.12.2021).
 40. *Климатические характеристики условий распространения примесей в атмосфере / под ред. Э.Ю. Безуглой и М.Е. Берлянда.* Л.: Гидрометеонздат, 1983. 328 с.
 41. *Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н.* Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примесей. Л.: Гидрометеонздат, 1991. 278 с.
 42. *Виноградова А.А.* Дистанционная оценка влияния загрязнения атмосферы на удаленные территории // Геофизические процессы и биосфера. 2014. Т. 13, № 4. С. 5–20.
 43. *Пустыни России.* URL: <https://www.karatu.ru/pustyni-rossii/#i-5> (дата обращения: 7.12.2021).
 44. *Шукуров К.А., Шукурова Л.М.* Регионы-источники нитрата аммония, сульфата аммония и природных силикатов в приземном аэрозоле западного Подмосковья // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2017. Т. 53, № 3. С. 360–369. DOI: 10.7868/S0002351517030142.

45. Добровольский В.В. Биогеохимия мировой суши / Избранные труды. М.: Научный мир, 2009. Т. III. 440 с.

46. Касимов Н.С. Экогеохимия ландшафтов. М.: ИП Филимонов М.В., 2013. 208 с.

A.A. Vinogradova, D.P. Gubanova, M.A. Iordanskii, A.I. Skorokhod. **The influence of meteorological conditions and long-range air mass transport on the winter near-surface aerosol composition in Moscow.**

The results of the complex study of the composition and temporal variability of urban aerosol in near-surface air in the center of Moscow during two winter seasons (2019/2020 and 2020/2021) are discussed. Daily data on PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations and the total aerosol mass concentration (by gravimetric method) and 65 chemical elements included in its composition measured for 35–40 days every season are considered. The aerosol composition is compared with the meteorological parameters in near surface air in Moscow, the direction of long-range air mass transport to the Moscow region, and the distribution of dust in near-surface air over the European Russia (according to the MERRA-2 reanalysis). The detailed study of the aerosol elemental composition in Moscow allowed us to identify the elements of global/local distribution and of natural/anthropogenic genesis. Concentrations of all aerosol components under study in Moscow in winter did not exceed the corresponding daily average MPC values for the air of residential areas. It is shown that PM₁₀ and PM_{2.5} are accumulated in the near-surface air of the city in calm conditions. The maximal levels of aerosol pollution were observed in the first part of December 2020 with south-easterly winds, when long-range atmospheric transport of impurities to Moscow took place from sources located in the arid south zones of European Russia, in the Caspian Lowland, and in western Kazakhstan.

Time Averaged Map of Dust Surface Mass Concentration,
 time average hourly 0.5×0.625 deg.
 [MERRA-2 Model M2T1NXAER v5.12.4] kg m^{-3}
 over 2020-12-02 OOO - 2020-12-02 12Z

Time Averaged Map of Dust Surface Mass Concentration,
 time average hourly 0.5×0.625 deg.
 [MERRA-2 Model M2T1NXAER v5.12.4] kg m^{-3}
 over 2020-12-15 OOO - 2020-12-15 23Z

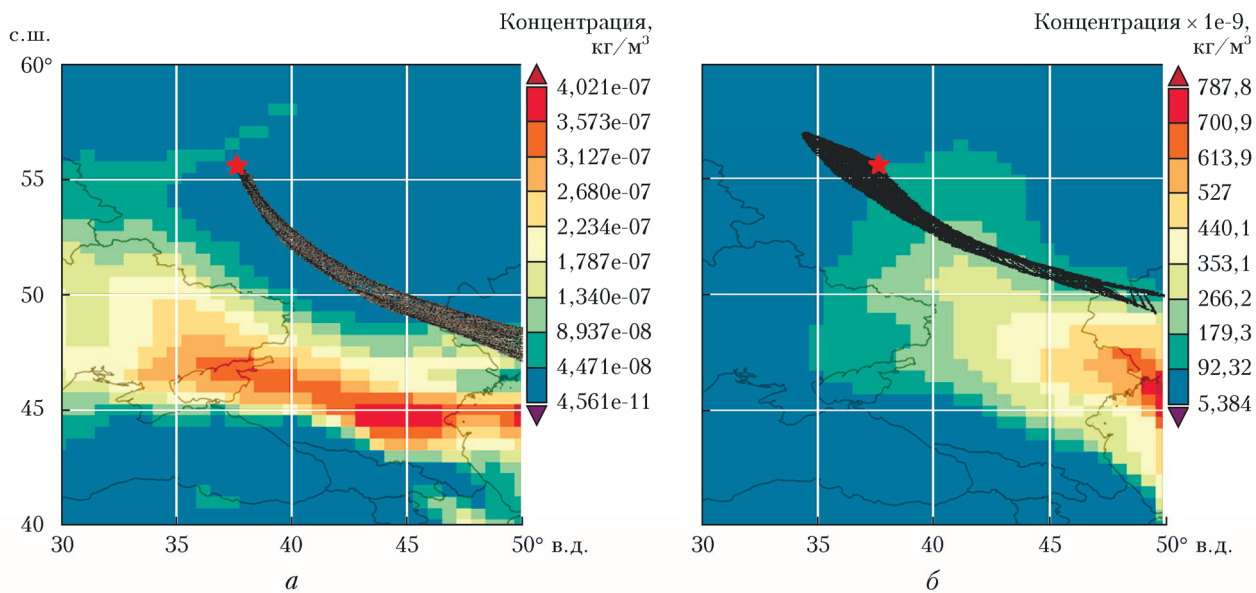


Рис. 3. Карты распределения пыли в приземном воздухе и траекторий переноса воздушных масс (черные точки) к Москве (красная звездочка): а – 2 декабря 2020 г.; б – 15 декабря 2020 г.