

Пылевой аэрозоль из районов Северного Прикаспия в приземном воздухе центра Европейской России

А.А. Виноградова^{✉1}, Д.П. Губанова¹, Е.А. Лезина², Ю.А. Иванова^{1*}

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

²ГПБУ «Мосэкомониторинг»
121019, г. Москва, ул. Новый Арбат, 11/1

Поступила в редакцию 16.02.2024;
после доработки 15.03.2024;
принята к печати 19.03.2024

Пылевой аэрозоль из районов песчаных бурь разносится воздушными массами на тысячи километров, влияя на оптические свойства атмосферы, климат и наземные природные объекты. Регион Северного Прикаспия – территории Калмыкии, дельты Волги, закаспийских низменностей и северо-западного Казахстана – представляет собой круглогодичный источник пылевого аэрозоля. Повышение уровня аэрозольного загрязнения приземного воздуха Москвы, связанное с дальним атмосферным переносом пыли из Прикаспия, анализируется по данным непрерывных наблюдений на станциях ГПБУ «Мосэкомониторинг» за 2011–2021 гг. Выявлено восемь месяцев (около 6%) с эпизодами, когда среднесуточная концентрация аэрозолей PM_{10} в Москве была выше ПДК. Длительность эпизодов составляет от 3 до 10 сут и в среднем за год не превосходит суммарно 9% дней. Максимальные среднесуточные концентрации приземного аэрозоля PM_{10} в городе во время таких эпизодов в $2,7 \pm 1,1$ раза выше соответствующих среднемесячных значений. Месяцы с эпизодами дальнего атмосферного переноса пыли в Москве характеризуются повышенной температурой воздуха на $1,9 \pm 2,0$ °C и пониженным количеством осадков на 9 ± 13 мм в среднем относительно нормы. Результаты работы могут быть использованы при оценках климатических и экологических сдвигов в условиях существования экосистем на европейской территории России.

Ключевые слова: городской аэрозоль, PM_{10} и $PM_{2.5}$, приземный воздух, Москва, пыль из Прикаспия, дальний атмосферный перенос, температура воздуха, количество осадков; urban aerosol, PM_{10} and $PM_{2.5}$, near-surface air, Moscow, dust from the Caspian Sea regions, long-range atmospheric transport, air temperature, precipitation.

Введение

Пылевой аэрозоль является одним из основных загрязняющих компонентов городской атмосферы. При определенных уровнях концентрации в приземном воздухе он может негативно сказываться не только на различных средах и объектах окружающей среды, но и на здоровье человека. Оказывая прямое и косвенное воздействие, пылевой аэрозоль играет активную роль в атмосферных процессах, регулирующих радиационный баланс и климат Земли [1–3]. В связи с этим в последние десятилетия ученые и исследователи многих стран уделяют особое внимание оценке радиационного воздействия пылевого аэрозоля в атмосфере, а также изучению процессов его переноса, трансформации и изменчивости [4–11].

Основные природные источники пылевого аэрозоля – засушливые и полусухие регионы земного шара, крупнейшие из которых расположены в Северной Африке, на Аравийском полуострове, Ближнем Востоке и в Центральной и Восточной Азии [12, 13]. Некоторые работы [13, 14] посвящены трансатлантическому переносу сахарской пыли, которая является самым мощным глобальным источником пылевого аэрозоля, в Северную и Южную Америку. Во многих публикациях описываются характеристики и условия переноса пылевых аэрозолей из Северной Африки в Европу [15–17].

Другие мощные глобальные источники пылевого аэрозоля расположены в Центральной и Восточной Азии (в первую очередь в пустынях Такламакан и Гоби) [5, 8, 18]. В ряде работ изучался дальний перенос в атмосфере азиатской пыли на юг Приморского края [19], а также условия и особенности трансхоокеанского переноса пыли из Азии в Америку с использованием наземных и спутниковых средств наблюдения и глобальных численных моделей [20]. Отметим также две публикации, касающиеся заноса пыли в южные регионы европейской

* Анна Александровна Виноградова (anvinograd@yandex.ru); Дина Петровна Губанова (gubanova@ifaran.ru); Елена Александровна Лезина (LezinaEA@eco.mos.ru); Юлия Алексеевна Иванова (ulia_sml@mail.ru).

территории России (далее – ЕТР): источники и параметры пылевого аэрозоля над Черным морем и Крымским полуостровом исследовались в [21], а пути переноса пыли на большие расстояния с Ближнего Востока и Северной Африки в горные районы Кавказа рассмотрены в [22].

Однако пыльные бури и перенос пыли в воздухе наблюдались и на ЕТР: в нижнем Поволжье, на Северном Кавказе, о чем знал еще В.И. Даль и очень кратко писал в своем словаре, вышедшем в середине XIX в., в заметке о слове «помоха»: «...сухая мгла, ведущая к неурожаю. Это природное явление наблюдается при юго-восточном ветре, несущем пыль и песок из пустынных, жарких и сухих районов Северного Прикаспия» [23].

Несмотря на столь давнюю историю, публикаций о регистрации и анализе условий переноса пыли из засушливых и полусушливых регионов в умеренные широты Восточной Европы и ЕТР очень мало. Исследование состава «желтого» снега, наблюдавшегося в начале весны 2008 г. в Архангельской области в результате дальнего переноса пыли из районов Астраханской области и Калмыкии, выпавшей со снежными осадками, осуществлено в работе [24]. Закономерности дальнего переноса воздушных масс из Калмыкии и анализ ионного состава аэрозоля в Подмоскovie изучены в [25, 26]. Наконец, авторами настоящей работы были зафиксированы и проанализированы эпизоды переноса пылевого аэрозоля из Прикаспия и Калмыкии в Москву в разные сезоны 2020 г. [27–29].

Проблема загрязнения и контроля качества городского воздуха очень актуальна для всех стран и регионов [30]. Смещение антропогенных газов и аэрозолей, выбрасываемых в приземный воздух различными промышленными предприятиями, транспортом и службами жизнеобеспечения, с эмиссиями от природных источников (растений, почв) создает разнообразную и очень изменчивую неоднородную пространственную структуру загрязнения воздуха в городе, которая быстро меняется из-за подвижности воздушных масс и химической активности их составляющих.

Цель работы – анализ частоты дальнего переноса воздушных масс и пылевого аэрозоля из районов Прикаспия и Западного Казахстана в центр ЕТР и влияния этих эпизодов на уровень концентрации PM_{10} и $PM_{2.5}$ в городе в масштабах среднесуточных и среднемесячных значений на базе материалов непрерывных наблюдений за аэрозольным составом приземного воздуха в Москве [31].

Основные задачи настоящей работы:

- анализ многолетних закономерностей в направлениях поступления воздушных масс к Москве в разные сезоны, выделение реперной зоны (РЗ) как дальней границы, откуда воздушные массы и переносимые ими примеси могут поступать в центр ЕТР со стороны Прикаспия;

- анализ концентраций пыли и $PM_{2.5}$ (и их временных вариаций) вблизи очагов пыльных бурь – по среднемесячным данным реанализа MERRA-2;

- выявление месяцев с повышенной концентрацией PM_{10} в Москве, совпадающих с месяцами с высокими концентрациями пыли в районах Прикаспия и РЗ;

- анализ направления дальнего переноса воздушных масс для отдельных дней этих месяцев и выявление эпизодов переноса воздуха из районов Прикаспия;

- количественная оценка вкладов пылевого аэрозоля в содержание PM_{10} и $PM_{2.5}$ в приземном воздухе Москвы;

- оценка изменений температуры воздуха и количества осадков в Москве в эпизодах переноса пыли от источников в Прикаспии.

1. Материалы и методы

Преыдушие наши работы [32, 33] показали, что кроме типичных условий аэрозольного загрязнения приземного воздуха в Москве существуют дни (меньше 9%), когда концентрация PM_{10} в приземном воздухе выше ПДК_{с.с} (60 мкг/м³). Как правило, это результат заноса в Московский регион аэрозольного загрязнения от пожаров и/или источников пыли, находящихся в других более или менее удаленных регионах.

В настоящей работе анализируются данные о концентрации PM_{10} и $PM_{2.5}$ в приземном слое атмосферы в Москве, полученные на Автоматической станции контроля загрязнения атмосферы (АСКЗА) ГПБУ «Мосэкомониторинг» (МЭМ) на протяжении 11 лет – с 2011 по 2021 г. Измерения проводились непрерывно с интервалом 20 мин; в разные годы и месяцы одновременно работали от 12 до 25 станций, расположенных в разных районах города. Результаты наблюдений дают представление о загрязнении воздуха на промышленных, жилых, транспортных, парковых и других территориях города. Результаты измерений для каждого момента времени усреднялись по всем работавшим АСКЗА, и затем анализировались средние значения концентрации PM_{10} и $PM_{2.5}$ как показатели загрязнения приземного воздуха в Москве в целом.

Анализ путей переноса воздушных масс к Москве проводился по обратным траекториям их движения, рассчитанным с помощью данных ARL NOAA по модели HYSPLIT [34]. Длительность траекторий 84 ч, интервал расчета 1 ч, в исходной точке высота траектории над подстилающей поверхностью 100 м, время старта 00:00 UTC.

Среднее пространственное распределение пыли или черного углерода в приземном воздухе за месяц или сутки рассматривалось по картам реанализа MERRA-2 [35], размер пикселя 0,5 × 0,625°.

Для интерпретации и анализа использовались метеоданные московской метеорологической станции «Балчуг», расположенной в центре города, с сайтов [36, 37].

В работе для краткости введены условные названия:

1) регион Прикаспий – территории на юге Астраханской области, в дельте р. Волги, Калмыкии, Приаралье и западных районах Казахстана, для которых характерны пустынные, полупустынные, осушенные и степные поверхности;

2) реперная зона на широте 50° с.ш. в пределах от 45 до 55° в.д. – условная дальняя граница той территории, откуда могут поступать воздушные массы из районов Прикаспия в Московский регион.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Дальний перенос воздушных масс к Москве – 11-летние закономерности

Для эффективного атмосферного переноса пылевого аэрозоля из Прикаспия к Москве необходимо одновременное выполнение следующих условий: 1) циркуляция воздушных масс, способствующая переносу воздуха и примесей от источников в Прикаспии (время переноса воздуха к Москве около 3 сут); 2) повышенная эмиссия пыли в районах источников и реперной зоне.

Общие представления о пространственном распределении воздушных масс, переносимых в Московский регион в разные сезоны, дают карты на рис. 1 (цв. вкладка). Здесь представлено количество точек ежесуточных обратных траекторий движения воздушных масс к Москве, попавших в ячейку $1 \times 1^\circ$, при расчетах за 10 лет (2011–2020 гг.) для четырех месяцев, центральных для каждого сезона. Понятно, что плотность траекторий и, следовательно, вероятность переноса в центр ЕТР воздушных масс (вместе с примесями) резко уменьшается с увеличением расстояния от исходной точки.

Что касается введенной нами РЗ, то в среднем за 10 лет вероятность переноса воздушных масс от нее в Москву равна 1,0; 0,4; 0,2 и 0,5% в январе, апреле, июле и октябре соответственно (рис. 1). То есть в среднем, например, в январе воздушные массы могут приносить пыль от РЗ в Москву в течение 3–4 сут, а в остальные сезоны – еще реже.

Однако в отдельные годы и месяцы такого переноса может вообще не быть или, наоборот, его вероятность может быть больше: например 3% (март 2020 г.), 8% (октябрь 2020 г.), 9% (январь 2018 г.), 10% (октябрь 2021 г.) и даже 17% (декабрь 2020 г.).

2.2. Источники пылевого аэрозоля в Северном Прикаспии

Как показывают данные реанализа MERRA-2, в изучаемых районах Прикаспия круглый год существуют источники пылевого аэрозоля и песка из-за пыльных бурь разной интенсивности, расположенных в разных местах и занимающих разную площадь. Несколько случайно выбранных примеров пространственного распределения пыли от таких источников в среднем за месяц приведены на рис. 2 (цв. вкладка).

Максимальные среднемесячные концентрации пыли и $PM_{2.5}$ в воздухе у поверхности земли в районах источников Прикаспия по данным реанализа MERRA-2 на протяжении 11 лет (с 2011 по 2021 г.) показаны на рис. 3, а. В среднем ~20% от массы пыли составляет масса $PM_{2.5}$. Хорошо видны годовые вариации рассматриваемых составляющих аэрозоля с максимальными значениями в холодное время года, когда в этих районах очень сухо из-за малого количества осадков, и более низкими значениями летом (рис. 3, б). Сезонные вариации концентрации $PM_{2.5}$ вблизи источников качественно аналогичны графику на рис. 3, б для пыли.

Как видно из рис. 1, распространение пыли в северо-западном направлении от источников наблюдается во все месяцы, но концентрация пылевого аэрозоля в РЗ может быть разной. По оценкам MERRA-2, аэрозольное загрязнение приземной атмосферы в РЗ в среднем составляет ~14% от максимальных значений в районах источников как для концентрации пыли в целом, так и для $PM_{2.5}$.

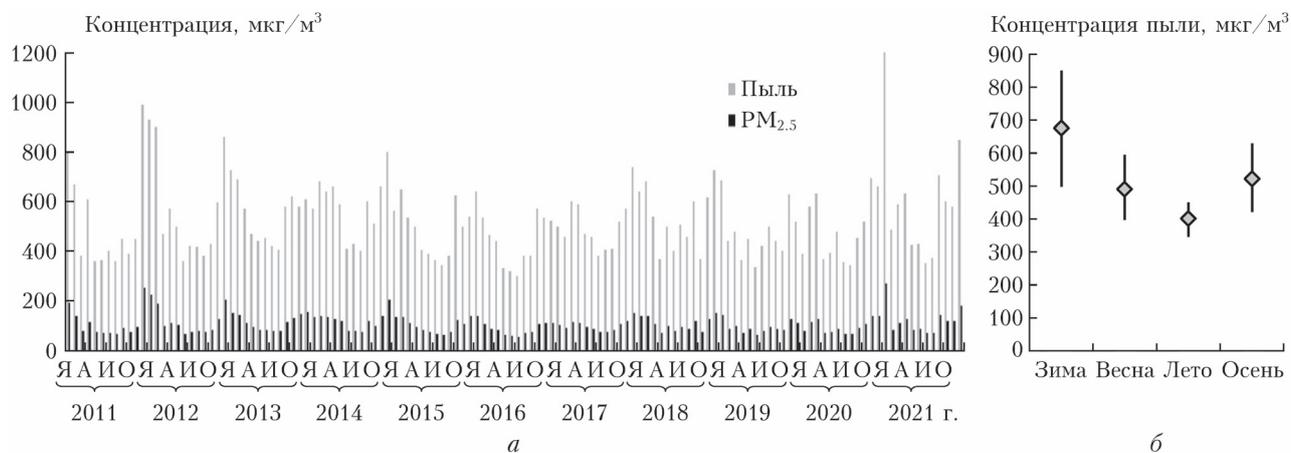


Рис. 3. Среднемесячная концентрация аэрозолей вблизи поверхности земли в районе источников в Прикаспии: а – пыль и $PM_{2.5}$; б – средняя за 11 лет среднемесячная концентрация пыли по сезонам по данным реанализа MERRA-2. Здесь и далее: Я – январь, А – апрель, И – июль, О – октябрь

2.3. Выделение месяцев с эпизодами атмосферного переноса пыли из Прикаспия в Москву

Рассмотрим временные зависимости среднемесячных концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ в приземном воздухе Москвы в течение 11 лет (рис. 4, а). Заметим, что до 2016 г. концентрация $PM_{2.5}$ измерялась службой МЭМ в тестовом режиме, нерегулярно и на небольшом числе АСКЗА, что привело к многочисленным пропускам в результатах, затрудняющим корректное сравнение с более поздними данными наблюдений. Для организации качественно однородных рядов данных мы провели коррекцию величин концентрации $PM_{2.5}$ за 2011–2015 гг. на основе более полных данных МЭМ по $PM_{2.5}$ за 2016–2021 гг. и по PM_{10} за все рассматриваемые годы. В качестве коэффициентов пересчета использовались средние за шесть лет (2016–2021 гг.) отношения среднемесячных концентраций $PM_{2.5}/PM_{10}$ для различных месяцев (рис. 4, б), поскольку этот параметр имеет четкий сезонный ход с минимальными значениями в теплое время года и максимумом зимой [32]. Слабый положительный тренд среднемесячной концентрации PM_{10} в Москве за рассматриваемые годы (рис. 4, а) может быть связан с активными строительными и ремонтными работами, проводимыми администрацией города.

Среднее число месяцев, в течение которых было несколько суток, когда среднесуточная концентрация PM_{10} превышала $ПДК_{с.с.}$, составило в Москве 14% за рассматриваемые 11 лет. При этом число дней со среднесуточной концентрацией $PM_{10} > ПДК_{с.с.}$ в среднем за год не превышает 9%, что хорошо соответствует данным [32], полученным при анализе наблюдений за аэрозолем в одной точке в центре Москвы в 2020–2022 гг. Однако экстремально высокое аэрозольное загрязнение атмосферы в Москве часто обусловлено не только пере-

носом пыли из районов Прикаспия, но одновременно и переносом аэрозолей горения от пожаров на ЕТР. К сожалению, выборки слишком малы для достоверного статистического разделения этих случаев. Анализ отношения концентрации частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ тоже не применим, поскольку этот параметр сильно зависит от мощности источников и дальности атмосферного переноса. Поэтому мы прибегли к рассмотрению ежесуточных карт распределения пыли и черного углерода над ЕТР (по данным реанализа MERRA-2) и пространственного положения траекторий переноса воздушных масс в Москву для месяцев, когда наблюдались эпизоды с $PM_{10} > ПДК$. В результате были выделены восемь месяцев (~ 6,1% за 11 лет), когда повышение уровня аэрозольного загрязнения атмосферы Москвы в целом было связано с дальним переносом именно пыли из Прикаспийских районов (рис. 5, цв. вкладка).

Статистика среднесуточных концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ в течение этих восьми месяцев показана на рис. 6. Видно, что максимальные концентрации аэрозолей превышают соответствующие среднемесячные значения плюс СКО, т.е. являются экстремальными. При этом максимальные среднесуточные в $2,7 \pm 1,1$ раза превосходят среднемесячные величины. Таким образом, в отдельные месяцы, когда центр ЕТР подвержен влиянию пылевого загрязнения из Прикаспия, окружающая среда и население в течение нескольких дней (в среднем три-пять дней в месяц) испытывают повышенную аэрозольную нагрузку.

Оценки влияния дальнего переноса пыли из Прикаспия на среднемесячные показатели аэрозольного загрязнения приземного воздуха в Москве показывают, что в те месяцы, когда отмечен перенос пыли, концентрация PM_{10} и $PM_{2.5}$ соответственно в среднем на 40 и 30% выше, чем средние за 11 лет значения для месяцев без превышения $ПДК$. Количественные показатели приведены в табл. 1.

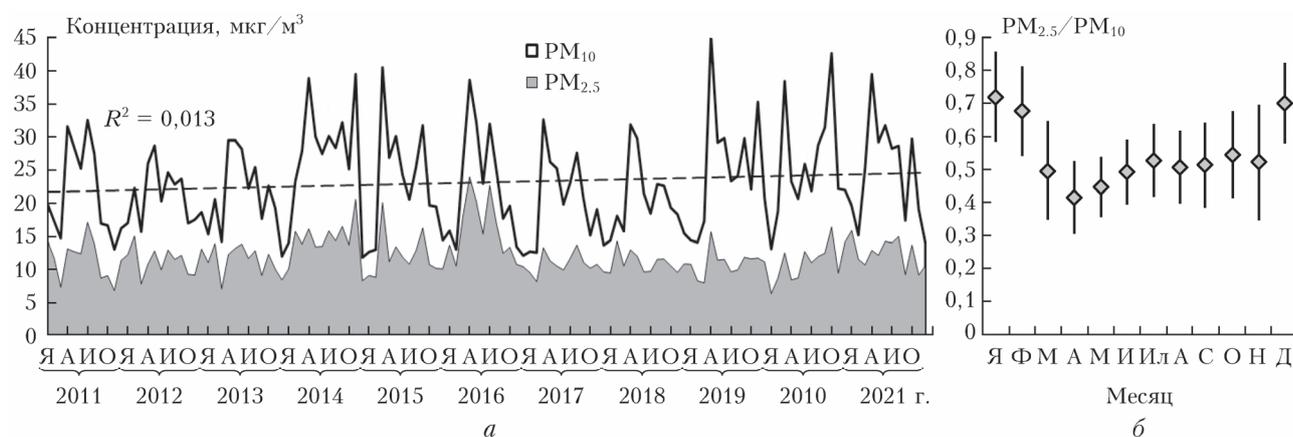


Рис. 4. Характеристики аэрозоля в приземном воздухе в Москве (по данным АСКЗА МЭМ): а – среднемесячные концентрации PM_{10} и $PM_{2.5}$ за 11 лет, пунктир – линейный тренд концентрации PM_{10} ; б – среднее за 2016–2021 гг. отношение среднемесячных концентраций $PM_{2.5}/PM_{10}$ («усы» – СКО) (буквами обозначены названия месяцев)

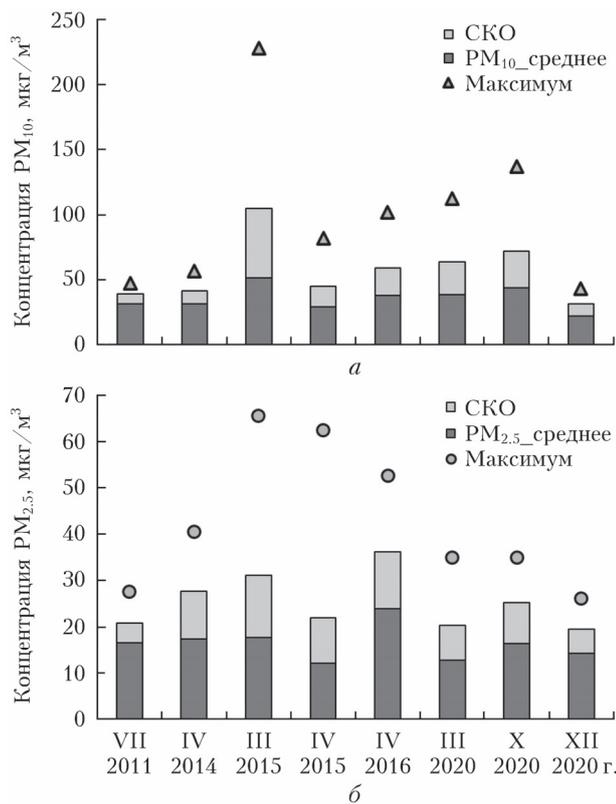


Рис. 6. Статистика концентраций PM_{10} (а) и $PM_{2.5}$ (б) в приземном воздухе в Москве в течение месяцев с эпизодами переноса пыли из Прикаспия

Таблица 1

Статистические показатели для среднемесячных концентраций PM_{10} и $PM_{2.5}$ в приземном воздухе в Москве для всех месяцев за 11 лет, для месяцев с переносом пыли из Прикаспия и для невозмущенных месяцев без превышения ПДК_{с.с.}

Период	Концентрация $PM_{2.5}$			Концентрация PM_{10}		
	средняя	СКО	медиа-на	средняя	СКО	медиа-на
Все месяцы	12,1	3,0	11,6	23,1	7,4	22,4
С переносом пыли	16,5	4,1	16,3	35,0	7,3	38,5
Без превышения ПДК _{с.с.}	11,3	2,3	11,2	21,0	5,5	20,6

Отметим, что в месяцы с эпизодами переноса воздуха из Прикаспия медиана распределения концентрации PM_{10} заметно выше средней величины, что говорит о редкости anomalно высоких концентраций PM_{10} в Москве. Это хорошо соответствует рис. 6, а с единственным anomalным максимумом в марте 2015 г. (см. рис. 5, в). Показатели для $PM_{2.5}$ изменяются менее резко.

2.4. Сопутствующие метеорологические характеристики

Поступление теплых и сухих воздушных масс из южных в центральные районы ЕТР должно сопровождаться повышенной температурой воздуха и малым количеством осадков в центре ЕТР. Оценка отклонений температуры воздуха и количества

осадков в Москве от нормы — по среднемесячным значениям этих параметров [37] — подтверждает эту гипотезу и косвенно свидетельствует о корректности выделения месяцев с эпизодами переноса пылевого аэрозоля (табл. 2).

Таблица 2

Статистические показатели для отклонений среднемесячных значений температуры воздуха ΔT и количества осадков ΔP в Москве от соответствующих месячных норм (по данным [37]) для всех месяцев за 11 лет, для месяцев с переносом пыли из Прикаспия и невозмущенных месяцев без превышения ПДК_{с.с.}

Период	ΔT , °C			ΔP , мм/мес.		
	средняя	СКО	медиа-на	средняя	СКО	медиа-на
Все месяцы	0,6	2,4	0,8	2,5	30,9	-2,0
С переносом пыли	1,9	2,0	2,0	-9,1	12,7	-13,9
Без превышения ПДК _{с.с.}	0,4	2,5	0,7	3,4	32,2	-2,0

Как видно из табл. 2, при общих небольших положительных отклонениях температуры воздуха и количества осадков от норм в течение рассматриваемых 11 лет для месяцев с эпизодами переноса пыли из Прикаспия эти показатели значительны: температура воздуха *выше* нормы почти на 2 °C в среднем (при максимальном за эти месяцы отклонении от нормы 4,5 °C в марте 2020 г.), а количество осадков *ниже* нормы в среднем на 9 мм/мес. Сравнить абсолютные значения температуры не имеет смысла из-за выраженного годового хода температуры воздуха в средних широтах. Минимальное абсолютное количество осадков в Москве за те же восемь месяцев составляло 14 мм/мес. в марте 2015 г. (при среднем количестве осадков в невозмущенные месяцы, как и за все месяцы на протяжении 11 лет, ~60 мм/мес.). Таким образом, эпизоды переноса пыли из районов Прикаспия (помоха) действительно сопровождаются сухой и жаркой погодой и грозят неурожаем.

В заключение отметим, что эпизоды переноса пыли из Прикаспия сказываются не только на всей территории Москвы, но и в Подмоскovie. По данным синхронных непрерывных наблюдений за составом аэрозоля на западе Подмоскovie (~50 км от города, недалеко от Звенигорода Московской области) и в центре Москвы, проводимых нами с 2020 г., в районе Звенигорода также были зафиксированы синхронные всплески аэрозольного загрязнения, соответствующие рассмотренным трем эпизодам 2020 г. (см. рис. 5, e-з и рис. 6).

В те дни и месяцы, когда в Москве были зарегистрированы высокие концентрации PM_{10} и $PM_{2.5}$ из-за поступления пыли из Прикаспия, значения АОТ (550 нм) в атмосфере, по данным станции международной сети AERONET, работавшей до 2021 г. в том же районе Подмоскovie вблизи Звенигорода Московской области [38], были очень высоки и достигали 1,5 и даже 2,0, что косвенно подтверждает полученные авторами результаты.

Заключение

Впервые подробно рассмотрены эпизоды дальнего атмосферного переноса пыли из районов Северного Прикаспия в центр ЕТР по данным непрерывных наблюдений за составом приземного аэрозоля в Москве на сети автоматических станций контроля загрязнения атмосферы ГПБУ «Мосэкомониторинг».

Проведен анализ концентраций пыли и $PM_{2.5}$ (а также их временных вариаций) вблизи очагов пыльных бурь по среднемесячным данным реанализа MERRA-2. Показано, что максимальные концентрации приходится на холодную часть года, когда в регионах-источниках минимально количество осадков. Вблизи очагов пыльных бурь (источников пыли) доля массы аэрозольных частиц размерами менее 2,5 мкм составляет в среднем ~20% от массы всей пыли.

Выявлены восемь месяцев (6,1% за 11 лет), когда концентрации как PM_{10} в Москве, так и пыли в районах пыльных бурь на юго-востоке ЕТР были максимальны. В эти месяцы зафиксированы эпизоды (длительностью от 3 до 10 дней), когда концентрация PM_{10} была выше ПДК_{с.с} и происходил перенос в Москву воздушных масс и пылевого аэрозоля из районов Прикаспия. Максимальные среднесуточные концентрации PM_{10} во время таких эпизодов в $2,7 \pm 1,1$ раза превосходят соответствующие среднемесячные значения. При этом концентрации PM_{10} и $PM_{2.5}$ соответственно в среднем за месяц на 40 и 30% выше, чем средние значения за 11 лет для месяцев без превышения ПДК. Таким образом, в отдельные месяцы, когда центр ЕТР подвержен влиянию пылевого загрязнения из Прикаспия, окружающая среда и население этих районов в течение нескольких дней (в среднем для Москвы менее 9% дней в году) могут испытывать повышенную аэрозольную нагрузку.

Для месяцев с эпизодами переноса пыли из Прикаспия температура воздуха в среднем выше нормы почти на 2 °С (при максимальном за эти месяцы отклонении от нормы 4,5 °С в марте 2020 г.), а количество осадков ниже нормы в среднем на 9 мм. Минимальное абсолютное количество осадков в Москве за те же восемь месяцев составило 14 мм в марте 2015 г. (при среднемесячном количестве осадков на протяжении 11 лет около 60 мм).

Финансирование. Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 23-27-00063). Анализ карт MERRA-2 пространственного распределения пыли над югом ЕТР, включая опустыненные территории в Калмыкии, – при поддержке РНФ (грант № 20-17-00214-П).

Список литературы

1. Cess R.D., Potter G.L., Ghan S.J., Gates W.L. The climatic effects of large injections of atmospheric smoke and dust: A study of climate feedback mechanisms with one- and three-dimensional climate models // J. Geo-

- phys. Res. 1985. V. 90, N D7. P. 12937–12950. DOI: 10.1029/JD090iD07p12937.
2. Schepanski K. Transport of mineral dust and its impact on climate // Geosciences. 2018. V. 8, N 5. P. 151. DOI: 10.3390/geosciences8050151.
3. Chaibou A.A.S., Ma A., Sha T. Dust radiative forcing and its impact on surface energy budget over West Africa // Sci. Rep. 2020. V. 10. P. 12236. DOI: 10.1038/s41598-020-69223-4.
4. Горчакова И.А., Мохов И.И., Рублев А.Н. Радиационный и температурный эффекты мощного выноса пылевого аэрозоля в атмосферу // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2015. Т. 51, № 2. С. 131–145.
5. Hu Z., Huang J., Zhao C., Jin Q., Ma Y., Yang B. Modeling dust sources, transport, and radiative effects at different altitudes over the Tibetan Plateau // Atmos. Chem. Phys. 2020. V. 20, N 3. P. 1507–1529. DOI: 10.5194/acp-20-1507-2020.
6. Yang L., Shi Z., Sun H., Xie X., Liu X., An Z. Distinct effects of winter monsoon and westerly circulation on dust aerosol transport over East Asia // Theor. Appl. Climatol. 2021. V. 144, N 3. P. 1031–1042. DOI: 10.1007/s00704-021-03579-z.
7. Vijayakumara K., Devara P.C.S., Vijaya Bhaskara Rao S., Jayasankar C.K. Dust aerosol characterization and transport features based on combined ground-based. Satellite and model-simulated data // Aeolian Res. 2016. V. 21, N 6. P. 75–85. DOI: 10.1016/j.aeolia.2016.03.003.
8. Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Нагулаев С.А., Цыдыпов В.В., Аюржанаев А.А., Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Аззая Д., Оюнчиев Д. Пространственно-временные характеристики АОТ атмосферы в пустыне Гоби по данным наземных наблюдений // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 4. С. 327–334.
9. Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И., Мадвалев У., Давлатшоев Т. Элементарный состав почв и пылевого аэрозоля юго-центральной части Таджикистана // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 3. С. 246–255.
10. Xiong J., Zhao T., Bai Y., Liu Y., Han Y., Guo C. Climate characteristics of dust aerosol and its transport in major global dust source regions // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2020. V. 209: 105415. DOI: 10.1016/j.jastp.2020.
11. Prospero J. Long-range transport of mineral dust in the global atmosphere: Impact of African dust on the environment of the southeastern United States // PNAS. 1999. V. 96, N 7. P. 3396–3403. DOI: 10.1073/pnas.96.7.3396.
12. Zhang Y., Cai Y.J., Yu F., Luo G., Chou C.C.K. Seasonal variations and long-term trend of mineral dust aerosols over the Taiwan region // Aerosol Air Qual. Res. 2021. V. 21, N 5: 200433. DOI: 10.4209/aaqr.2020.07.0433.
13. Guedes A., Landulfo E., Montilla-Rosero E., Lopes F.J.S., Hoelzemann J.J., Fernandez J.H., Silva M.P.A., Santos R.S.S., Guerrero-Rascado J.L., Alados-Arboledas L. Detection of Saharan mineral dust aerosol transport over Brazilian northeast through a depolarization lidar // EPJ Web Conf. 2018. V. 176: 05036. DOI: 10.1051/epjconf/201817605036.
14. Asher E.C., Christensen J.N., Post A., Perry K., Cliff S.S., Zhao Y., Trousdell J., Faloon I. The transport of Asian dust and combustion aerosols and associated ozone to North America as observed from a mountaintop monitoring site in the California coast range // JGR Atmospheres. 2018. V. 123, N 10. P. 5667–5680. DOI: 10.1029/2017JD028075.

15. Silva H.G., Lopes F.M., Pereira S., Nicoll K., Barbosa S.M., Conceição R., Neves S., Harrison R.G., Pereira M.C. Saharan dust electrification perceived by a triangle of atmospheric electricity stations in Southern Portugal // *J. Electrostat.* 2016. V. 84, N 12. P. 106–120. DOI: 10.1016/j.elstat.2016.10.002.
16. Provençal S., Kishcha P., da Silva A.M., Elhacham E., Alpert P. AOD distributions and trends of major aerosol species over a selection of the world's most populated cities based on the 1st version of NASA's MERRA Aerosol Reanalysis // *Urban Clim.* 2017. V. 20, N 4. P. 168–191. DOI: 10.1016/j.uclim.2017.04.001.
17. Pey J., Querol X., Alastuey A., Forastiere F., Stafoglia M. African dust outbreaks over the Mediterranean Basin during 2001–2011: PM₁₀ concentrations. Phenomenology and trends, and its relation with synoptic and mesoscale meteorology // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, N 3. P. 1395–1410. DOI: 10.5194/acp-13-1395-2013.
18. Filonchik M. Characteristics of the severe March 2021 Gobi Desert dust storm and its impact on air pollution in China // *Chemosphere.* 2022. V. 287, N 3. P. 132219. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.132219.
19. Кондратьев И.И., Качура А.Н., Юрченко С.Г., Мезенцева Л.И., Рошупкин Г.Т., Семькина Г.И. Синоптические и геохимические аспекты аномального выноса пыли на юге Приморского Края // *Вестн. ДО РАН.* 2005. Т. 121, № 3. С. 55–65.
20. Guo J., Lou M., Miao Y., Wang Y., Zeng Z., Liu H., He J., Xu H., Wang F., Min M., Zhai P. Trans-Pacific transport of dust aerosols from East Asia: Insights gained from multiple observations and modeling // *Environ. Poll.* 2017. V. 230. P. 1030–1039. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.07.062.
21. Калинин Д.В., Папкова А.С., Вареник А.В. Аномальный перенос поглощающего аэрозоля над Черным морем за весенний период 2020 г. // *Соврем. пробл. дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2021. Т. 18, № 2. С. 287–298. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-287-298.
22. Кутузов С.С., Михаленко В.Н., Шахгеданова М., Жино П., Козачек А.В., Лаврентьев И.И., Кудерина Т.М., Попов Г.В. Пути дальнего переноса пыли на ледники Кавказа и химический состав снега на Западном плато Эльбруса // *Лед и Снег.* 2014. Т. 127, № 3. С. 5–15. DOI: 10.15356/2076-6734-2014-3-5-15.
23. Сельскохозяйственный словарь-справочник / под ред. А.И. Гайстера. М.; Л.: Сельхозгиз, 1934. 1280 с.
24. Шевченко В.П., Коробов В.Б., Лисицын А.П., Аleshинская А.С., Богданова О.Ю., Горюнова Н.В., Грищенко И.В., Дара О.М., Завершина Н.Н., Куртеева Е.И., Новичкова Е.А., Покровский О.С., Сапожников Ф.В. Первые данные о составе пыли, окрасившей снег на европейском севере России в желтый цвет (март 2008 г.) // *Докл. РАН.* 2010. Т. 431, № 5. С. 675–679.
25. Shukurov K.A., Chkhetiani O.G. Probability of transport of air parcels from the arid lands in the Southern Russia to Moscow region // *Proc. SPIE.* 2017. DOI: 10.1117/12.2287932.
26. Шукуров К.А., Шукурова Л.М. Регионы-источники нитрата аммония, сульфата аммония и природных силикатов в приземном аэрозоле Западного Подмосковья // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2017. Т. 53, № 3. С. 360–369. DOI: 10.7868/s0002351517030142.
27. Губанова Д.П., Виноградова А.А., Иорданский М.А., Скороход А.И. Временные вариации состава атмосферного аэрозоля в Москве весной 2020 г. // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2021. Т. 57, № 3. С. 334–348. DOI: 10.31857/s0002351521030056.
28. 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 Geosci.* 2022. V. 8, N 2. P. 277–302. DOI: 10.3934/geosci.2022017.
29. Виноградова А.А., Губанова Д.П., Иорданский М.А., Скороход А.И. Влияние метеорологических условий и дальнего переноса воздушных масс на состав приземного аэрозоля в Москве в зимние сезоны // *Оптика атмосфер. и океана.* 2022. Т. 35, № 6. С. 436–446; Vinogradova A.A., Gubanova D.P., Iordanskii M.A., Skorokhod A.I. Effect of meteorological conditions and long-range air mass transport on surface aerosol composition in winter Moscow // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N 6. P. 758–768. DOI: 10.1134/S1024856022060276.
30. 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., Lu Ren, Tarasova O., Carmichael G., Peuch V.-H., Anand V., Arbilla G., Badali K., Beig G., Belcazar L.C., Bolignano A., Brimblecombe P., Camacho P., Casallas 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 Yu.A., Guevara-Luna M., Haque Sk.M., Havenga H., Herod D., Hörrak U., Hussein T., Ibarra S., Jaimes M., Kaasik M., Khaiwal R., Kim J., Kousa A., Kukkonen Ja., Kulmala M., Kuula J., La Violette N., Lanzani G., Xi Liu, MacDougall S., Manseau P.M., Marchegiani G., McDonald B., Mishra S.V., Molina L.T., Mooibroek D., Mor S., Moussiopoulos N., Murena F., Niemi Ja.V., Noe S., Nogueira T., Norman M., Pérez-Camacho Ju.L., Petäjä T., Piketh S., Rathod A., Reid K., Retama A., Rivera O., Rojas N.Y., Rojas-Quincho J.P., José R.S., Sánchez O., Seguel R.J., Sillanpää S., Su Yu., Tapper N., Terrazas A., Timonen H., Toscano D., Tsegas G., Velders G.J.M., Vlachokostas Ch., von Schneidemesser E., Vpm R., Yadav R., Zalakeviciute R., Zavalala M. A global observational analysis to understand changes in air quality during exceptionally low anthropogenic emission conditions // *Environ. Intern.* 2021. V. 157. P. 106818. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106818.
31. *Мосэкомониторинг.* [М.], 2018–2024. URL: <https://mosecom.mos.ru/stations/> (дата обращения: 24.07.2023).
32. Губанова Д.П., Виноградова А.А., Лезина Е.А., Иорданский М.А., Исаков А.А. Условно фоновый уровень аэрозольного загрязнения приземного воздуха в Москве и пригороде: сезонные вариации // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2023. Т. 59, № 6. С. 754–773. DOI: 10.31857/S0002351523060056.
33. 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. V. 13, N 4. P. 574–599. DOI: 10.3390/atmos13040574.
34. NOAA Air Resources Laboratory. HYSPLIT. URL: <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php> (last access: 24.01.2024).
35. NASA's Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS). URL: <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni> (last access: 02.02.2024).
36. *Архив погоды.* [М.], 2004–2024. URL: <http://rp5.ru> (дата обращения: 17.12.2023).

37. *Погода* и климат. Архив фактической погоды [Б.м.], 2004–2024. URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php> (дата обращения 28.12.2023).
38. NASA: AERONET Data. URL: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/data_display_aod_v3 (дата обращения: 08.02.2024).

A.A. Vinogradova, D.P. Gubanova, E.A. Lezina, Yu.A. Ivanova. **Dust aerosol from the Northern Caspian Sea regions in the near-surface air of the center of European Russia.**

Dust aerosol from the areas of sandstorms is transported by air masses for thousands of kilometers, affecting the optical properties of the atmosphere, climate, and terrestrial natural objects. The northern Caspian region – the territories of Kalmykia, the Volga Delta, the Transcaspian lowlands and northwestern Kazakhstan – is a year-round source of dust aerosol. The increase in the level of aerosol pollution in the near-surface Moscow air, associated with long-range atmospheric transport of dust from the Caspian regions, is analyzed according to continuous observation data at the stations of the State Budgetary Institution Mosecomonitoring during 2011–2021. We have revealed eight months (about 6%) with episodes where the daily PM₁₀ concentration in Moscow was higher than the MPC. Their duration ranges from 3 to 10 days and on average does not exceed 9% of the total number of days per year. The maximal values of daily PM₁₀ concentration in the near-surface city air during such episodes are 2.7 ± 1.1 times higher than the corresponding monthly average ones. The months with episodes of long-range atmospheric dust transport to Moscow are characterized by increased air temperature by 1.9 ± 2.0 °C and reduced precipitation by 9 ± 13 mm on average relative to the corresponding norm values for Moscow.

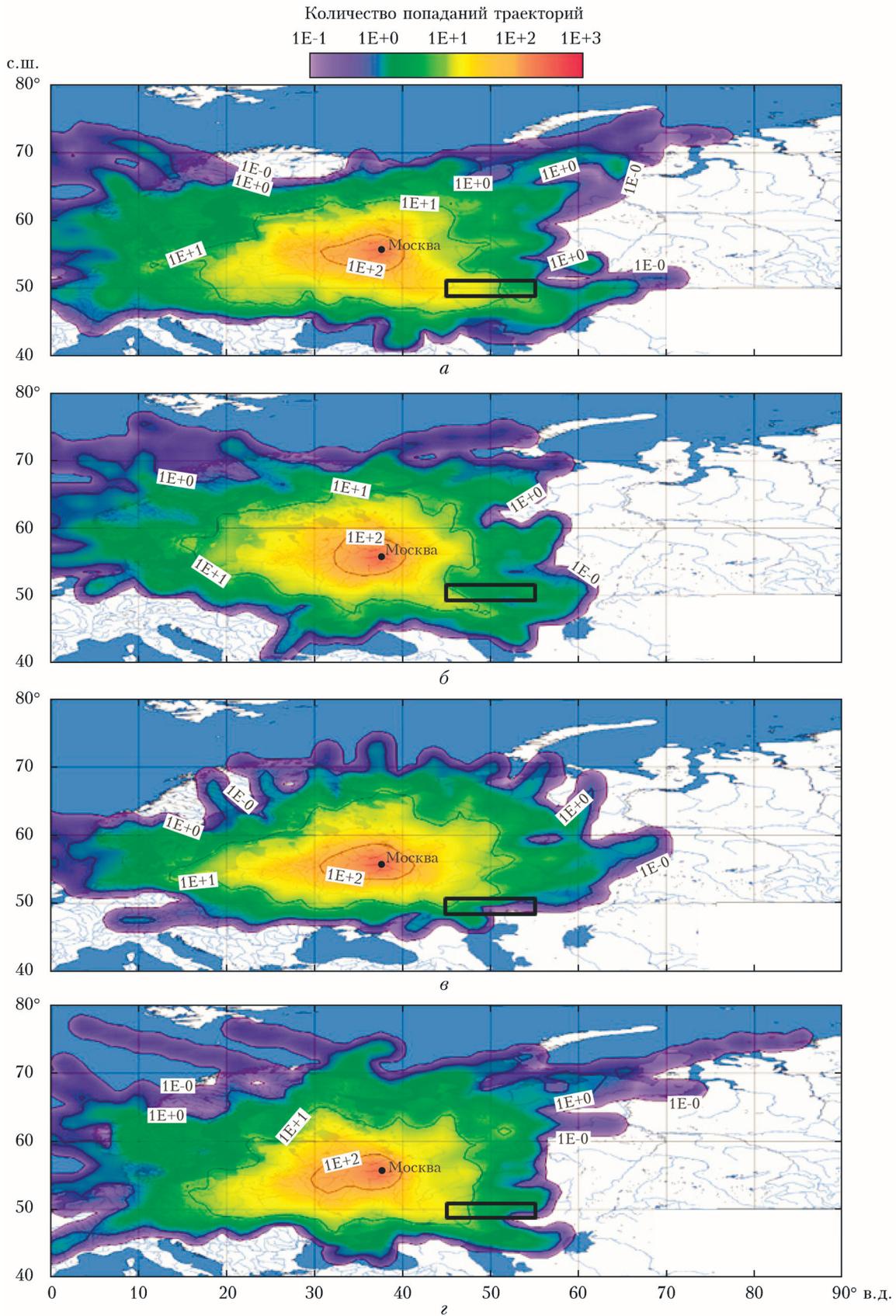


Рис. 1. Средние за 10 лет (2011–2020 гг.) распределения точек обратных траекторий переноса воздушных масс к Москве в январе (*a*), апреле (*б*), июле (*в*) и октябре (*г*). Цветовая шкала логарифмическая; черная рамка – РЗ вблизи 50° с.ш. (от 45 до 55° в.д.)

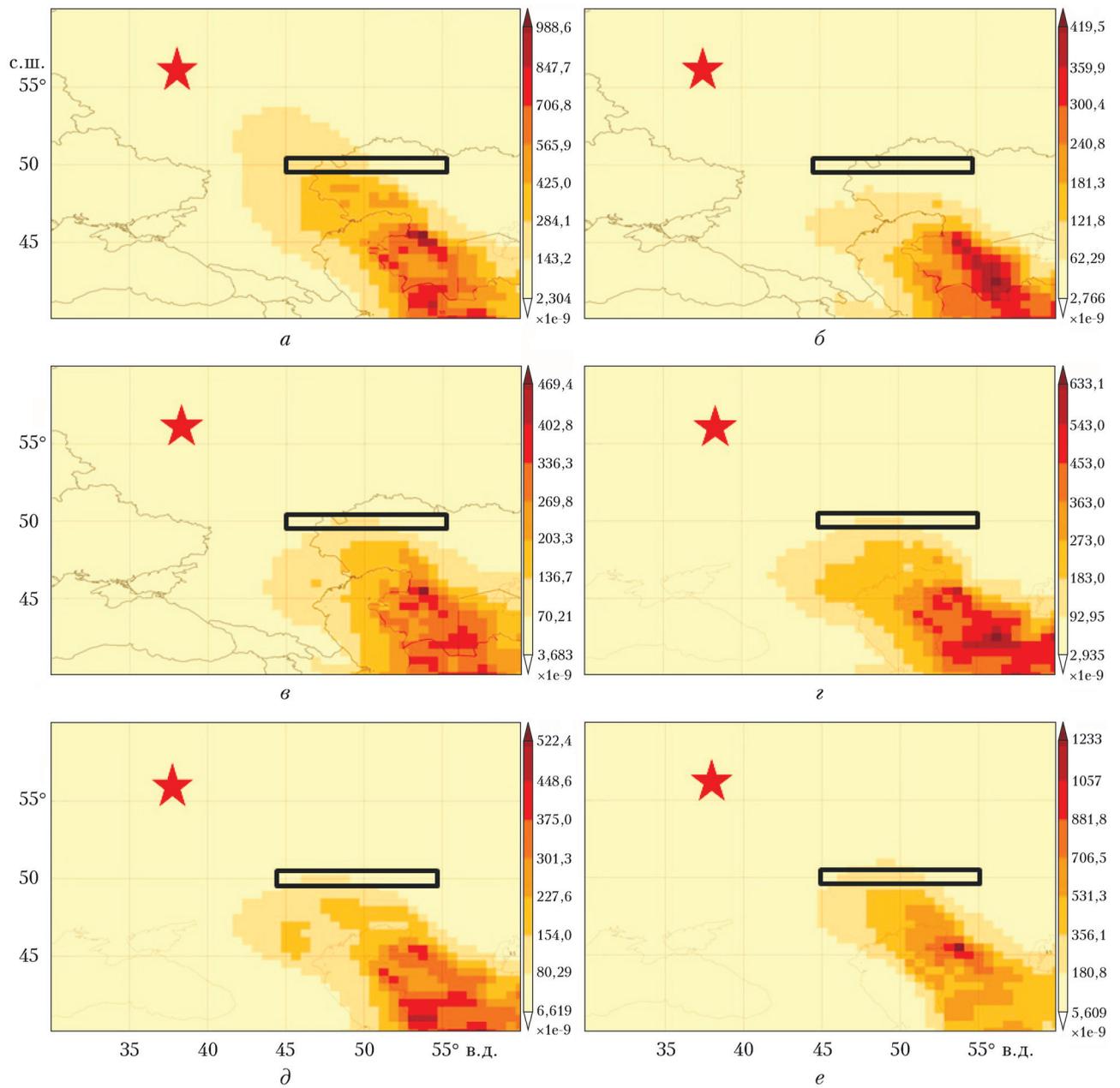


Рис. 2. Примеры пространственного распределения концентрации пыли (kg/m^3) в приземном воздухе в среднем за месяц по данным MERRA-2: *a* – октябрь 2011 г.; *б* – июль 2012 г.; *в* – апрель 2013 г.; *г* – март 2020 г.; *д* – октябрь 2020 г.; *е* – январь 2021 г. Масштаб цветовой шкалы на рисунках различен; звездочка – Москва, черная рамка – РЗ

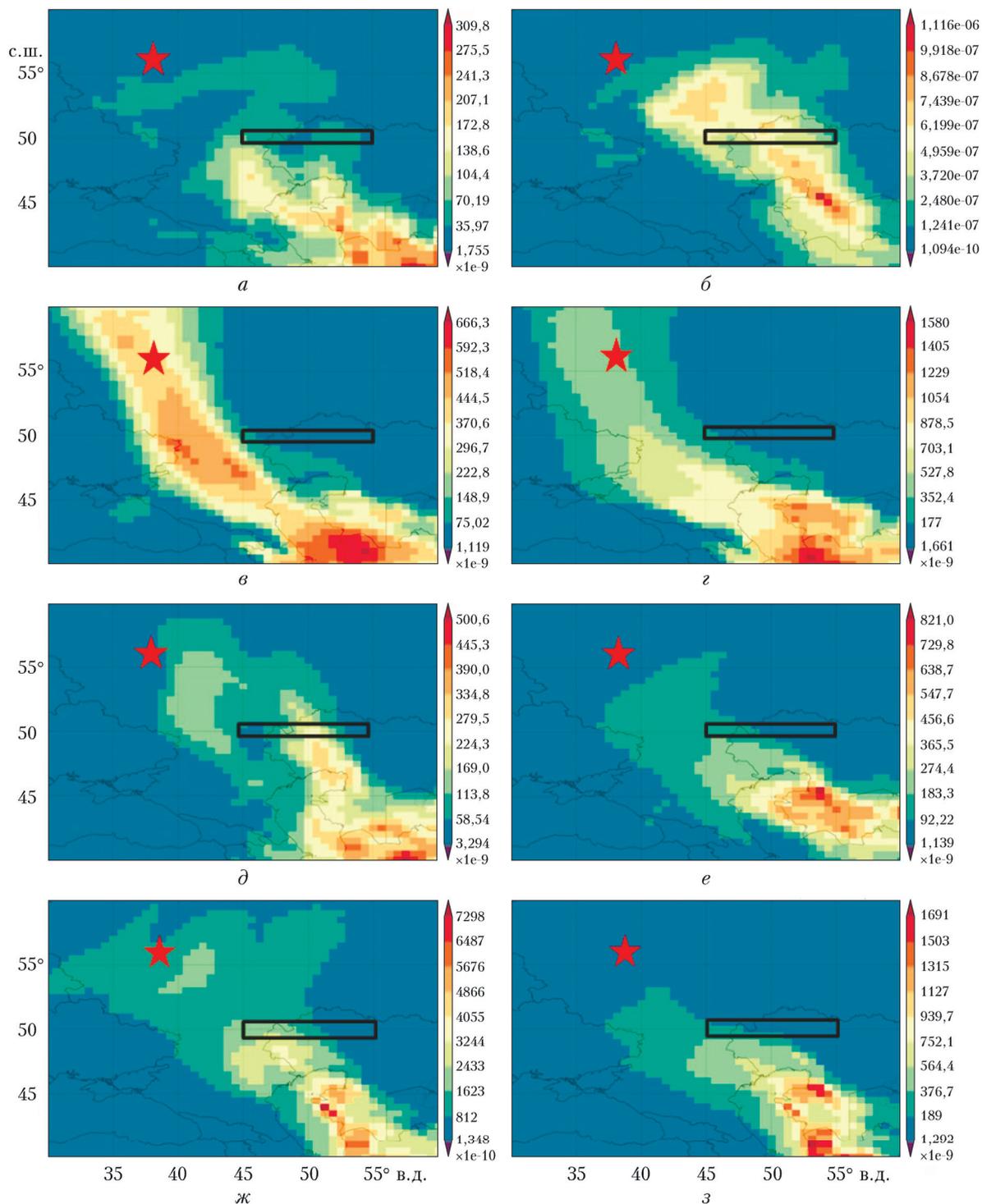


Рис. 5. Пространственное распределение концентрации пыли ($\text{кг}/\text{м}^3$) в приземном воздухе в Москве в среднем за конкретные сутки во время восьми эпизодов выноса воздушными массами пылевого аэрозоля из Прикаспия: 28.07.2011 (*a*); 30.04.2014 (*б*); 31.03.2015 (*в*); 04.04.2015 (*г*); 14.04.2016 (*д*); 30.03.2020 (*е*); 12.10.2020 (*ж*); 15.12.2020 гг. (*з*)