

ДАЛЬНИЙ АТМОСФЕРНЫЙ ПЕРЕНОС ПЫЛИ ИЗ ПРИКАСПИЯ В АРКТИЧЕСКУЮ ЗОНУ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ В ДЕКАБРЕ 2023 ГОДА

© 2024 г. Д. П. Губанова^{1,*}, А. А. Виноградова^{1,2}, Е. И. Котова²

Представлено академиком РАН Г.С. Голицыным 16.05.2024 г.

Поступило 27.05.2024 г.

После доработки 31.07.2024 г.

Принято к публикации 01.08.2024 г.

Редкое явление – дальний атмосферный перенос пыли из аридных и полусавановых районов Прикаспия через центр Европейской части России в ее арктические регионы – зарегистрировано в декабре 2023 года в ходе натурных наблюдений за физико-химическими характеристиками аэрозольных частиц в Москве и за составом снежного покрова в Архангельской области. Анализ траекторий движения воздушных масс, динамики пространственно-временной изменчивости массовой концентрации аэрозолей $PM_{2.5}$ и PM_{10} в Московском регионе, а также численные оценки и пространственные распределения приземной концентрации и оптических характеристик аэрозоля в Европейской части России (по данным реанализа MERRA-2) подтверждают повышение аэрозольного загрязнения воздуха на территориях от Прикаспия до Архангельской области. В пробе снега, отобранной в Государственном природном заповеднике “Пинежский” (Архангельской обл.) весной 2024 года, в толще снежного покрова на высоте 18–20 см (при общей высоте снежной толщи 65 см) обнаружен слой выпавшего в декабре 2023 года снега, имеющий желтоватую окраску. Предварительные исследования пробы этого снега показали присутствие большого количества органической взвеси и остатков растений, что зимой указывает на атмосферный перенос аэрозоля из южных регионов России.

Ключевые слова: дальний перенос, атмосфера, пыль, аэрозольные частицы $PM_{2.5}$ и PM_{10} , концентрация, проба снега, траекторный анализ, Прикаспий, Москва, Архангельская область

DOI: 10.31857/S2686739724120171

ВВЕДЕНИЕ

Пылевая компонента атмосферного аэрозоля играет ключевую роль в системе Земли. Частицы пыли прямо влияют на радиационный баланс [1, 2], взаимодействуя с излучением и, косвенно, воздействуя на динамику атмосферы и стимулируя облако- и осадкообразование [1, 3]. Процессы с участием пылевого аэрозоля изменяют параметры состояния (температура поверхности, ветер, облачность, осадки), химический состав и свойства атмосферы [2, 3]. Минеральная пыль способствует повышению биопродуктивности экосистем, доставляя в них микроэлементы и удобрения и оказывая влияние на глобальный углеродный цикл [4, 5]. В то же время пыль

в приземном слое атмосферы ухудшает качество окружающей среды и негативно сказывается на здоровье и жизнедеятельности человека [3–5].

Общее содержание пыли в атмосфере оценивается в ~26 млн тонн [1]. Вместе с морской солью она составляет более 80% от общей массы аэрозоля [1, 6]. Большая часть атмосферной пыли – природного происхождения, она обеспечивает фоновый уровень твердых частиц в атмосфере. По оценкам [2, 7], на антропогенные источники пыли может приходиться около 25%.

Обилие пылевых частиц, их взаимодействие с другими компонентами атмосферы и перенос на большие расстояния способствуют проявлению различных механизмов воздействия пылевого аэрозоля на климатическую систему Земли, обуславливающих охлаждающий или нагревающий эффект [1, 3]. Однако результатирующее радиационное воздействие пыли остается неопределенным. По последним оценкам [1] суммарный эффективный радиационный эффект

¹ Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова Российской Академии наук, Москва, Россия

² Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской Академии наук, Москва, Россия

*E-mail: gubanova@ifaran.ru

пыли равен $-0.2 \pm 0.5 \text{ Вт}/\text{м}^2$ (90%-й доверительный интервал).

Основными природными источниками минеральной пыли являются пустыни и засушливые регионы Земного шара. Результаты современных модельных оценок [1] показали, что по сравнению с доиндустриальным периодом глобальная пылевая нагрузка возросла на $55 \pm 30\%$, что в значительной степени обусловлено увеличением количества пыли в Азии и Северной Африке. Несмотря на то, что большая часть минеральной пыли оседает вблизи источников, значительное ее количество переносится на большие расстояния. В последние десятилетия получены многочисленные результаты исследований трансатлантического переноса африканской пыли и транстихоокеанского переноса азиатской пыли в Северную и Южную Америку, обзор публикаций на эту тему представлен в работе [8]. Однако механизмы трансграничного переноса грубодисперсных ($d = 10\text{--}100 \text{ мкм}$) и гигантских ($d > 100 \text{ мкм}$) частиц пыли всё ещё недостаточно изучены [9].

Несмотря на удаленность Европейской части России (ЕЧР) от крупных пустынь земного шара, пыльные бури и перенос пыли в воздухе наблюдались в европейской России еще в прошлые века: в нижнем Поволжье, на Северном Кавказе. В. И. Даль очень кратко писал об этом в своем словаре, вышедшем в середине XIX века, 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 [10]. Однако публикаций о регистрации и анализе условий переноса пыли из засушливых и полузасушливых регионов в умеренные широты Восточной Европы и европейской части России очень мало.

В конце XX и начале XXI вв. на юге ЕЧР и на территориях сопредельных государств, расположенных в Прикаспии и Приаралье, стали возникать и развиваться интенсивные источники пыли, способной перемещаться на сотни километров и достигать регионов ЕЧР, расположенных в умеренных и высоких широтах. В этой связи следует упомянуть об образовании в результате высыхания Аральского моря новой пустыни Аралкум, которая является дополнительным мощным источником пыли, не только воздействующей на радиационный режим атмосферы в Центральной Азии, но и негативно влияющей на здоровье человека и окружающую среду [11], в том числе способствуя повышению

вероятности распространения минеральной пыли из Приаралья на ЕЧР [12].

В последние годы было зарегистрировано несколько случаев дальнего переноса пылевой компоненты аэрозоля в Московский и соседние с ним регионы из опустыненных и засушливых районов Прикаспия [8, 11, 13].

Однако необходимо более глубокое изучение условий и механизмов дальнего переноса минеральной пыли в северные области РФ, а также связанных с этим изменений параметров состояния атмосферы и характеристик аэрозольных частиц. Настоящая работа посвящена одному из последних и самых мощных эпизодов дальнего переноса пылевой компоненты аэрозоля из Северного Прикаспия через Московский регион в высокоширотные области РФ, в том числе в регионы Российской Арктики.

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрены данные о массовой концентрации и дисперсном составе аэрозольных частиц в приземном слое атмосферы Московского региона в декабре 2023 года, полученные в рамках проводимого в ИФА РАН комплексного аэрозольного эксперимента по синхронному исследованию физико-химических характеристик приземного аэрозоля в Москве и ее пригороде [14].

Микрофизические характеристики аэрозольных частиц (дисперсный состав, счетная концентрация) измеряли в непрерывном режиме с временным разрешением 5 мин с помощью лазерных аэрозольных спектрометров ЛАС-П и оптико-электронных аэрозольных счетчиков ОЭАС-05 (разработчик — НИФХИ им. Л. Я. Карпова) в диапазоне диаметров частиц 0.15–10 мкм.

Массовую концентрацию аэрозольных частиц различных размерных фракций рассчитывали по известной формуле [14, 15]:

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

где $\rho = 1.8 \text{ г}/\text{см}^3$ — 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:

$$N_i(D_p) = \int_{D_{p_1}}^{D_{p_2}} n_N^0 d \log_{10}(D_p), \quad (2)$$

где $n_N^0 = dN / d \log_{10}(D_p)$ – измеренное приборами ЛАС-П и ОЭАС-05 распределение числа аэрозольных частиц по размерам. Массовую концентрацию приземного аэрозоля $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} и $\text{PM}_{10-2.5}$ (диаметром меньше 2.5 мкм, меньше 10 мкм и от 2.5 до 10 мкм, соответственно) определяли суммированием значений концентрации соответствующих размерных фракций частиц, входящих в их состав.

В зимний период 2023–2024 гг. учеными Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (ИО РАН) в рамках экспедиционных исследований геохимических характеристик снежного покрова западного сектора Российской Арктики выполнен отбор проб снега на территории Кольского полуострова, Архангельской обл. и Ненецкого Автономного округа. В настоящей работе рассмотрены результаты предварительного анализа талой воды пробы снежного покрова, отобранный в Государственном природном заповеднике “Пинежский” (далее – Пинежский заповедник), Архангельская обл. С помощью биологического стереоскопического микроскопа МБС-10 пробы исследована на присутствие биоорганических веществ.

Анализ дальнего переноса воздушных масс к Московскому региону проводился с использованием 3-суточных обратных траекторий переноса воздушных масс к точке наблюдения (модель HYSPLIT 4 [16] на сайте ARL NOAA [<https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>]) ежесуточно, каждые 3 часа, на высотах 100, 250 и 500 м над подстилающей поверхностью.

По данным реанализа MERRA-2 [17] анализировали пространственное распределение над ЕЧР массовой концентрации пыли в приземном слое атмосферы и оптической толщины пыли (АОТ на длине волны $\lambda = 550$ нм), размер пикселя 0.5×0.625 градусов. Численные оценки MERRA-2 также применялись для сопоставления значений массовой концентрации пыли в приземном слое атмосферы Московского региона и в районе Пинежского заповедника (Архангельская обл.).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Непрерывные наблюдения за микрофизическими характеристиками и массовой концентрацией аэрозолей в приземном слое атмосферы

московского мегаполиса и загородной зоны способствуют выявлению нетипичных случаев аномального изменения аэрозольных параметров [14]. 13–16 декабря 2023 года в пунктах наблюдений ИФА РАН в Москве (далее ИФА) и пригороде, примерно в 50 км к западу от города, на Звенигородской научной станции ИФА РАН (далее – ЗНС), а также на московской городской сети автоматических станций контроля загрязнения атмосферы (ACKЗА) ГПБУ “МосэкоМониторинг” (МЭМ) [<http://mosecom.mos.ru/>] наблюдался рост концентрации аэрозольных частиц различных размерных фракций, нехарактерный для этого региона в зимний сезон (рис. 1). В этот период величина массовой концентрации частиц PM_{10} в некоторые сутки превышала среднесуточную предельно-допустимую концентрацию ($\text{ПДК} = 60 \text{ мкг}/\text{м}^3$) как в городе, так и в пригороде. Рост массовой концентрации более мелкой фракции частиц $\text{PM}_{2.5}$ по амplitude был менее значительным и ее уровень не превышал соответствующее значение ПДК для $\text{PM}_{2.5}$ ($35 \text{ мкг}/\text{м}^3$). Представленные на рис. 1 зависимости показывают синхронное (по суткам) развитие эпизода на трех станциях наблюдения в Московском регионе – в переулках центра

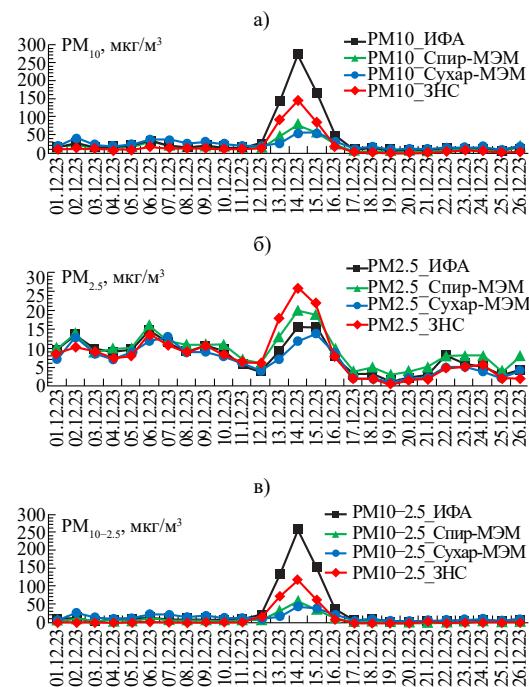


Рис. 1. Временной ход среднесуточной концентрации аэрозольных частиц разных размерных фракций в декабре 2023 года: (а) – PM_{10} ; (б) – $\text{PM}_{2.5}$; (в) – $\text{PM}_{10-2.5}$ (по данным наблюдений в пунктах ИФА, ЗНС и на двух ACKЗА МЭМ).

Москвы в зоне плотной офисной застройки (ИФА) и на двух станциях МЭМ – в жилом (“Спиридовонка” – Спир-МЭМ) и транспортном (“Сухаревская площадь” – Сухар-МЭМ) районах, а также в пригороде (ЗНС). Во время эпизода превышение средней декабрьской концентрации вне эпизода для концентрации аэрозолей размерности PM_{10} , $PM_{2.5}$ и $PM_{10-2.5}$ было в 8, 2 и 19 раз, соответственно (в среднем по этим четырём станциям).

Анализ синоптической обстановки и траекторий движения воздушных масс над ЕЧР позволил установить связь высокого аэрозольного загрязнения приземного воздуха московского региона с дальним переносом загрязняющих примесей из аридных и semi-аридных районов Прикаспия и Приаралья. На рис. 2 и 3 приведены карты среднего за каждые сутки пространственного распределения над ЕЧР приземной массовой концентрации и АОТ ($\lambda = 550$ нм) пыли во время рассматриваемого эпизода. Сложившиеся в этот период метеорологические условия в районах Нижнего Поволжья и Западного Казахстана – сильные морозы, крепкий и очень крепкий (по шкале Бофорта) ветер восточного и юго-восточного направлений со скоростью 15–20 м/с, отсутствие снежного покрова и вымороженный верхний слой

почвы – способствовали возникновению там очагов мощных пыльных бурь. Адвекция пыли в центр и на северо-запад ЕЧР в течение нескольких суток была обусловлена влиянием мощного сибирского антициклона, на периферии которого в зонах сгущения изобар оказались территории Прикаспия и Приаралья.

Наблюданное явление (рис. 2) аномально для центральных и северных районов ЕЧР как по длительности, так и по площади распространения пылевого аэрозоля в нижнем слое атмосферы. По-видимому, этому еще способствовала высокая стабильность приземного слоя атмосферы (слабое конвективное перемешивание, характерное для зимы по сравнению с более теплыми сезонами [18]). По данным [12, 13, 19], частота такого переноса воздушных масс к Москве в январе составляет около 3–5%, а в более северные регионы ЕЧР еще меньше. Вблизи Москвы шлейф пыли широк (рис. 2), что приводит к синхронному загрязнению большой территории, охватывающей как сам город, так и его пригорода и другие ближайшие области и регионы.

Необходимо подчеркнуть, что сведений о подобных явлениях дальнего переноса пыли из semi-аридных и аридных регионов Прикаспия и Приаралья в арктические районы России очень

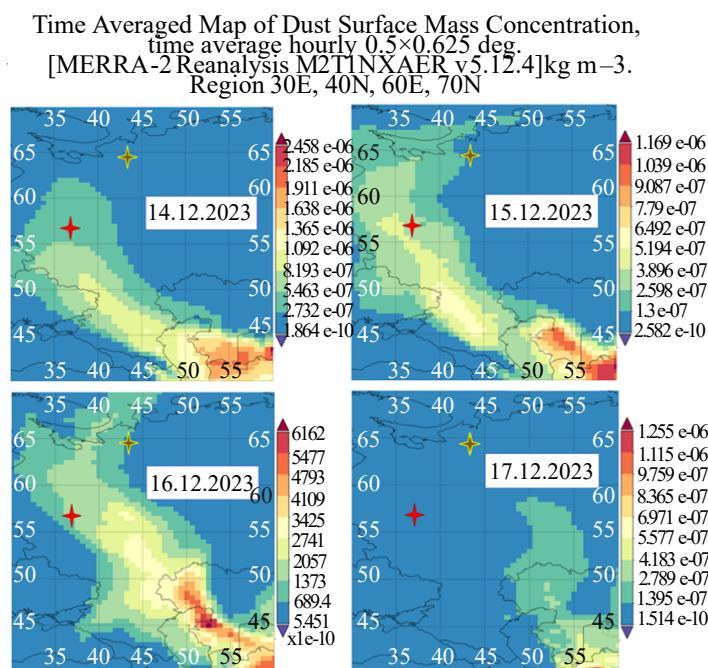


Рис. 2. Среднее за сутки пространственное распределение над ЕЧР приземной массовой концентрации пыли – по данным реанализа MERRA-2. Красной звездочкой на картах обозначено расположение г. Москвы, желтой звездочкой – расположение пос. Пинега Архангельской обл.

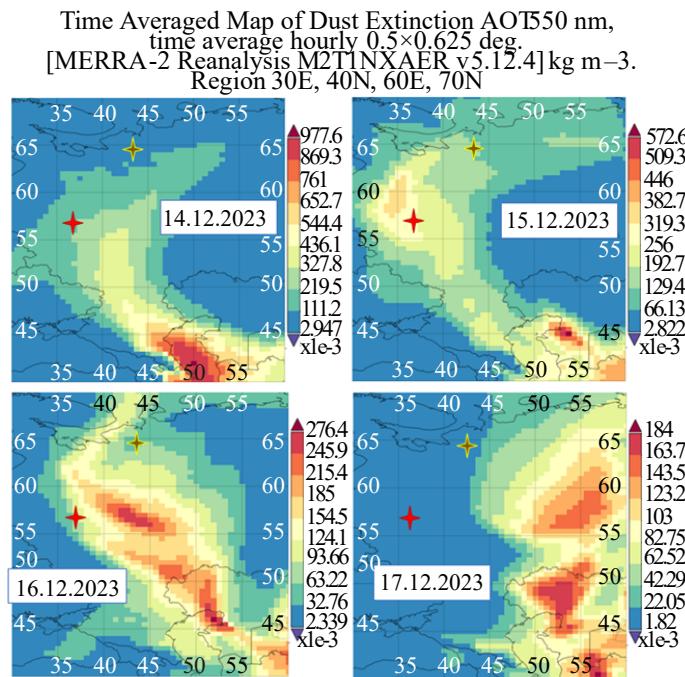


Рис. 3. Среднее за сутки пространственное распределение над ЕЧР АОТ (550 нм) пыли по данным реанализа MERRA-2. Красной звездочкой на картах обозначено расположение г. Москвы, желтой звездочкой – расположение пос. Пинега Архангельской обл.

мало, и авторам известна только одна работа, посвященная выпадению снега желтого и оранжевого цвета на территории Архангельской области, республики Коми и Ненецкого автономного округа в марте 2008 г. в результате дальнего переноса атмосферной пыли из засушливых пустынных, полупустынных и степных районов Северо-Западного Казахстана, Волгоградской и Астраханской областей, Калмыкии [20].

Фактическое подтверждение события дальнего переноса загрязняющих аэрозольных

примесей из semiаридных и аридных регионов Прикаспия в середине декабря 2023 г. было получено также при предварительном исследовании пробы снега (вертикальный шурф за весь зимний период), отобранный на территории Пинежского заповедника в Архангельской области. В толще снежного покрова на высоте 18–20 см (при общей высоте снежной толщи в пробе 65 см) был обнаружен слой снега, имеющий желтоватую окраску (рис. 4) и выпавший, по сведениям наблюдателей, в декабре 2023 года.

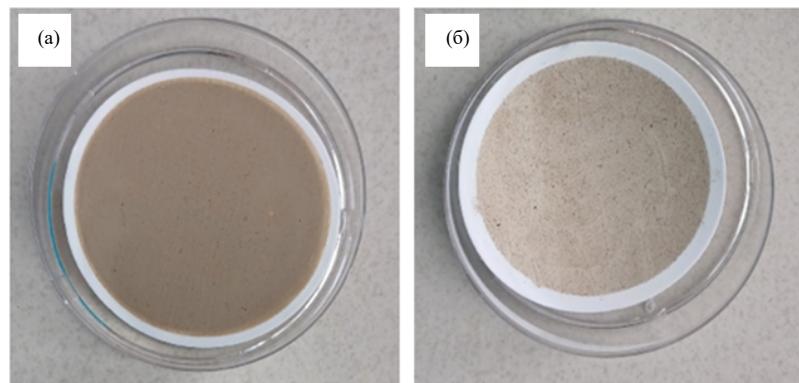


Рис. 4. Общий вид фильтров с пробами снега, отобранного на территории Пинежского заповедника: (а) – после фильтрации прослойки желтого снега (250 мл); (б) – после фильтрации усредненной пробы снежной толщи (1250 мл). Диаметр фильтра – 47 мм.

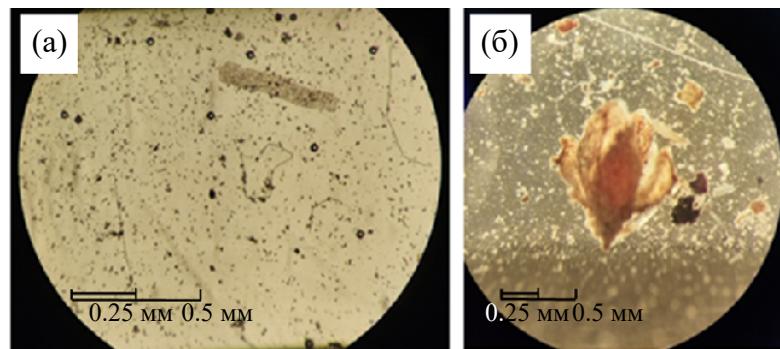


Рис. 5. Растительные остатки в пробе снега, отобранный на территории Пинежского заповедника: (а) – мелкий детрит, растительные волокна; (б) – остатки высшего растения.

Предварительный анализ талой воды этого снега под микроскопом позволил установить присутствие в снеге большого количества органической взвеси биологического происхождения, включая растительные волокна, ткани растений разной стадии разложения и фрагменты высших растений (рис. 5). Наличие аэрозольных частиц с биоорганическими остатками в высокотемпературных областях ЕЧР в зимний период было обусловлено транспортом из южных регионов России, что является косвенным свидетельством дальнего переноса загрязняющих примесей из засушливых зон Прикаспия.

На рис. 6 представлена диаграмма временной изменчивости среднесуточных значений концентрации пыли, определенной по результатам численных оценок реанализа MERRA-2 в сравнении с данными измерений концентрации аэрозольных частиц PM_{10} в Москве и пригороде до, во время и после эпизода аномально высокого роста аэрозольного загрязнения в декабре 2023 г. Как видно из рисунка 6, численные оценки концентрации пыли в приземном воздухе в районе Пинежского заповедника (вблизи пос. Пинега) качественно хорошо соответствуют наблюдаемым изменениям концентрации частиц PM_{10} в Московском регионе с временным запаздыванием примерно на сутки за счет более дальнего переноса. Следует отметить, что в Москве приземная массовая концентрация пылевых частиц (всех размеров), по оценкам в рамках реанализа MERRA-2, во время эпизода значительно превосходит измеренные величины концентрации аэрозоля PM_{10} . После эпизода она становится практически не отличима от средних зимних значений концентрации всех аэрозольных частиц в приземном воздухе Москвы зимой [15]. Из этого следует, что во время таких эпизодов

дальнего атмосферного переноса пыли наиболее крупные частицы приносятся в город извне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе непрерывных наблюдений за характеристиками приземного аэрозоля в московском мегаполисе и пригороде, проводимых в ИФА РАН, выявлен и подтвержден экспериментальными данными очень редкий случай дальнего переноса пылевого аэрозоля из semiаридных и аридных районов Прикаспия и Приаралья через всю территорию Европейской части России в регионы умеренных и высоких широт, включая зону Российской Арктики. Одновременно зарегистрированы эпизоды аномального роста массовой концентрации аэрозолей разных размерных фракций в Московском регионе

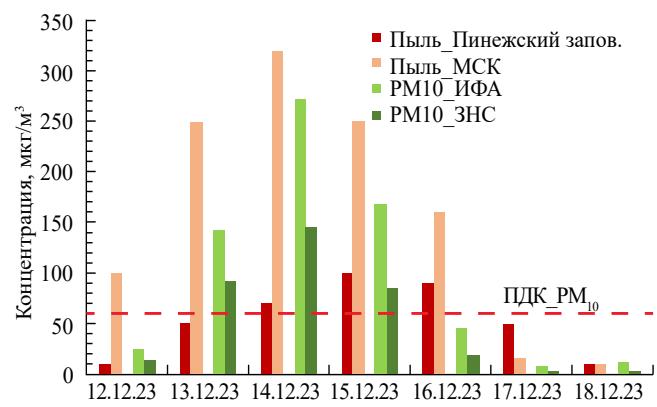


Рис. 6. Временная изменчивость в период 12–18 декабря 2023 г. среднесуточной концентрации пыли (по оценкам MERRA-2) – в районе пос. Пинега (Архангельская обл.) и в Московском регионе (МСК); аэрозолей PM_{10} – по измерениям в Москве (ИФА) и в пригороде (ЗНС).

и изменения цвета (а, следовательно, и состава) снега в Архангельской области (территория Пинежского заповедника). Предварительные результаты исследования талой воды этого снега показали наличие в нем большого количества органических остатков биологического происхождения, принесенных в зимний период на Российский Север из южных регионов ЕЧР.

Более глубокий анализ таких событий позволит повысить достоверность статистики их появления в Московском регионе. Анализ химического состава снега за этот период покажет отличия и сходства вещества, выпавшего на поверхность при похожих эпизодах 2008 [20] и 2023 годов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят академика РАН Г. С. Голицына за интерес к работе и полезные советы.

Большое спасибо М. И. Зметной за предоставленные результаты микроскопического анализа проб талого снега, без которых работа была бы неполной.

Авторы выражают глубокую признательность руководству ГПБУ “Мосэкомониторинг” за предоставленную возможность доступа к данным измерений на московской сети АСКЗА.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН “Моделирование изменений газового и аэрозольного состава атмосферы на основе наземных и спутниковых методов его мониторинга” (FMWR-2022-0010) – в части экспериментальных исследований характеристик и источников приземного аэрозоля в Московском регионе, а также при поддержке РНФ (проект № 22-77-10074) – в части отбора проб и изучения состава снега в арктических районах Российской Арктики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kok J. F., Storelvmo T., Karydis V. A. et al. Mineral dust aerosol impacts on global climate and climate change // Nat. Rev. Earth Environ. 2023. V. 4. P. 71–86. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00379-5>
2. Klingmüller K., Lelieveld J., Karydis V.A., Stenchikov G.L. Direct radiative effect of dust–pollution interactions // Atmos. Chem. Phys. 2019. V. 19. P. 7397–7408. <https://doi.org/10.5194/acp-19-7397-2019>
3. Schepanski K. Transport of mineral dust and its impact on climate // Geosciences. 2018. V. 8. 151. <https://doi.org/10.3390/geosciences8050151>
4. Mahowald N. M., Kloster S., Engelstaedter S. et al. Observed 20th century desert dust variability: impact on climate and biogeochemistry // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10. P. 10875–10893. <https://doi.org/10.5194/acp-10-10875-2010>
5. Zhang X., Zhao L., Tong D. Q. et al. Systematic review of global desert dust and associated human health effects // Atmosphere. 2016. V. 7. 158. <https://doi.org/10.3390/atmos7120158>
6. Gliss J., Mortier A., Schulz M. et al. AeroCom phase III multi-model evaluation of the aerosol life cycle and optical properties using ground- and space-based remote sensing as well as surface in situ observations // Atmos. Chem. Phys. 2021. V. 21. P. 87–128. <https://doi.org/10.5194/acp-21-87-2021>
7. Ginoux P., Prospero J. M., Gil T. E. et al. Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products // Rev. Geophys. 2012. V. 50. RG3005. <https://doi.org/10.1029/2012RG000388>
8. Gubanova D., Chkhetiani O., Vinogradova A. et al. Atmospheric transport of dust aerosol from arid zones to the Moscow region during fall 2020 // AIMS Geosciences. 2022. V. 8. № 2. P. 277–302. <https://doi.org/10.3934/geosci.2022017>
9. van der Doe M., Knippertz P., Zschenderlein P. et al. The mysterious long-range transport of giant mineral dust particles // Science Advances. 2018. V. 4. Iss. 12. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau2768>
10. Сельскохозяйственный словарь-справочник / Гл. ред. А. И. Гайстер. М.—Л.: Государственное издательство колхозной и совхозной литературы “Сельхозгиз”, 1934. 1280 с.
11. Banks J. R., Heinold B., Schepanski K. Radiative cooling and atmospheric perturbation effects of dust aerosol from the Aralkum Desert in Central Asia // EGUsphere [preprint]. 2023. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2772>
12. Shukurov K. A., Simonenkov D. V., Nevzorov A. V. et al. CALIOP-based evaluation of dust emissions and long-range transport of the dust from the Aral–Caspian arid region by 3D-source potential impact (3D-SPI) method // Remote Sens. 2023. V. 15. 2819. <https://doi.org/10.3390/rs15112819>
13. Виноградова А. А., Губанова Д. П., Лезина Е. А., Иванова Ю. А. Пылевой аэрозоль из районов Северного Прикаспия в приземном воздухе центра европейской России // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37. № 6. С. 453–460. <https://doi.org/10.15372/AOO20240602>.
14. Губанова Д. П., Виноградова А. А., Лезина Е. А. и др. Условно-фоновый уровень аэрозольного загрязнения

- нения приземного воздуха в Москве и пригороде: сезонные вариации // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2023. Т. 59. № 6. С. 754–773. <https://doi.org/10.31857/S0002351523060056>
15. Seinfeld J. H., Pandis S. N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change, 2nd Edition. New York: Wiley, USA, 2006. 1232 p.
 16. Stein A. F., Draxler R. R., Rolph G. D. et al. 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>
 17. Gelaro R., McCarty W., Suárez M. J. et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) // J Clim. 2017. V. 30. Iss. 13. P. 5419–5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
 18. Одинцов С. Л., Гладких В. А., Камардин А. П., Невзорова И. В. Высота слоя перемешивания в условиях температурных инверсий: экспериментальные данные и модельные оценки // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 7. С. 549–558. <https://doi.org/10.15372/AOO20220705>
 19. Шукров К. А., Шукрова Л. М. Регионы-источники нитрата аммония, сульфата аммония и природных силикатов в приземном аэрозоле Западного Подмосковья // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 3. С. 360–369. <https://doi.org/10.7868/s0002351517030142>
 20. Шевченко В. П., Коробов В. Б., Лисицын А. П. и др. Первые данные о составе пыли, окрасившей снег на европейском севере России в желтый цвет (март 2008 г.) // ДАН. 2010. Т. 431. № 5. С. 675–679.

LONG-RANGE ATMOSPHERIC TRANSPORT OF DUST FROM THE CASPIAN SEA REGION TO THE RUSSIAN ARCTIC IN DECEMBER 2023

D. P. Gubanova^{a, #}, A. A. Vinogradova^{a,b}, E. I. Kotova^b

Presented by Academician of the RAS G.S. Golitsyn on May 16, 2024.

^a*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics,*

Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^b*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,*

Moscow, Russian Federation

[#]*E-mail: gubanova@ifaran.ru*

A rare phenomenon – the long-range atmospheric transport of dust from the arid and semiarid territories of the Caspian Sea region through the center of European part of Russia to its Arctic areas – was registered in December 2023 during field study of aerosol composition aerosol in Moscow air and the snow composition in the Arkhangelsk region. The trajectories of air mass transport, dynamics of spatial and temporal variability of mass PM_{2.5} and PM₁₀ concentration values in the Moscow region, as well as numerical estimates and spatial distributions of near-surface aerosol concentration and atmospheric optical characteristics over the European part of Russia (according to the MERRA-2 reanalysis) confirm an increase in aerosol air pollution due to long-rang air transport from the territories of the Caspian Sea to the Arkhangelsk region. In the snow sample taken in the area of Pinega (Pinezhsky Nature Reserve), Arkhangelsk region in the spring of 2024, in the thickness of the snow cover at an altitude of 18–20 cm (with a total snow thickness of 65 cm), a layer of snow that fell in December 2023 having a yellowish color was found. Preliminary studies of the sample of this snow showed the presence of a large amount of organic suspension and plant residues, which in winter indicates atmospheric aerosol transport from the southern regions of Russia.

Keywords: long-range transport, atmosphere, dust, aerosols PM_{2.5} and PM₁₀, concentration, snow sample, trajectory analysis, MERRA-2 reanalysis, Caspian Sea, Moscow, Arkhangelsk region