СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ В МОСКВЕ С ДАННЫМИ РЕАНАЛИЗА MERRA-2

Д.П. Губанова, А.А. Виноградова, Ю.А. Иванова

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия
gubanova@ifaran.ru; anvinograd@yandex.ru; ulia_sml@mail.ru

Аннотация. Рассматриваются первые результаты комплексного эксперимента по изучению состава атмосферы Московского мегаполиса в разные сезоны. Анализируются массовая концентрация аэрозольных частиц PM₁₀ и PM_{2.5}, а также общая концентрация аэрозоля в приземном воздухе центра города за восемь месяцев (октябрь 2019 – май 2020). Полученные среднемесячные значения концентраций аэрозолей хорошо соответствуют результатам измерений на нескольких станциях ФПБУ «Мосэкомониторинг». Однако они заметно выше данных, полученных в базе реанализа MERRA-2. Обсуждаются возможности и ограничения использования данных дистанционных измерений для различных климатических, экологических, экономических и других исследований и оценок.

Ключевые слова: атмосфера, приземный слой, аэрозоль, массовая концентрация, мегаполис, реанализ MERRA-2

Введение

Воздействие антропогенных аэрозолей на окружающую среду и жизнедеятельность человека наиболее заметно проявляется в урбанизированных и промышленно развитых районах. Первичные антропогенные аэрозоли выбрасываются в атмосферу предприятиями промышленности, тепло- и электроэнергетики, транспортом. Основными источниками аэрозолей природного происхождения в городах и промышленных районах является почва и, в меньшей степени, горение биомассы. Вторичные аэрозоли, представляющие собой аэрозольные частицы мелкодисперсной фракции, образуются в ходе микрофизических и фотохимических процессов с участием водяного пара, органических соединений и различных газов-предшественников [1,2]. В результате городские аэрозоли весьма изменчивы по их фракционному и химическому составу – как в пространстве, так и во времени.

Мониторинг атмосферного аэрозоля в Москве проводится регулярно на сети станций ФПБУ «Мосэкомониторинг» (<https://mosecom.mos.ru/>) в рамках изучения состава воздуха города, а также на отдельных инициативных площадках нескольких научных учреждений (ИФА им. А.М. Обухова РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, НИФХИ им. Л.Я. Карпова). Однако, для ряда задач, в том числе для климатических и экологических исследований, могут быть полезны результаты реанализа дистанционных спутниковых измерений с достаточно грубым временным и пространственным разрешением. В последние годы активно разрабатываются и применяются информационные базы данных о составе и свойствах атмосферы, формируемые путем объединения результатов моделирования и натурных измерений с использова-

нием приемов усвоения (ассимиляции) данных. Этот подход интенсивно развивается в крупных мировых центрах прогноза погоды и исследований климата (например, [3]).

Одной из популярных версий реанализа является MERRA-2 (The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2), разработанная в NASA GMAO (Global Modelling and Assimilation Office) для периода современной космической эры (с 1980-ых годов) [4]. Содержащиеся на сайте [5] данные весьма многообразны и полезны, но, несомненно, требуются усилия по верификации имеющихся там материалов путем сравнения с результатами наземных измерений (где они есть). Одними из первых работ, касающихся верификации данных реанализа MERRA-2 о содержании черного углерода в атмосфере вдали от источников эмиссий, можно считать публикации [6,7].

В настоящей работе делается попытка сравнения реальных данных измерений массового содержания приземного аэрозоля в крупном мегаполисе с данными реанализа MERRA-2 – для территории Москвы.

Исходные материалы и методические подходы

Рассматриваются предварительные данные о массовой концентрации аэрозоля, полученные в ходе комплексного московского эксперимента на территории Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН в центре Москвы (далее – пункт наблюдений ИФА РАН).

Массовую концентрацию аэрозольных частиц PM₁₀ и PM_{2.5} определяли численным методом с использованием счетной концентрации микро-

частиц, измеряемой в непрерывном автоматическом режиме с помощью лазерного и оптико-электронного аэрозольных спектрометров ЛАС-П и ОЭАС-05 разработки НИФХИ им. Л.Я. Карпова.

Массовую концентрацию всего осаждаемого на фильтрах приземного аэрозоля определяли гравиметрическим методом. Забор аэрозольных проб для последующего гравиметрического и химического анализа осуществляется на аналитические фильтры типа АФА с помощью аспирационных пробоотборников, по 1–1,5 месяца в каждый сезон. Время отбора одной пробы составляет 24 часа.

Для сравнения и обобщения данных по территории Москвы нами использовались результаты измерений массовой концентрации аэрозоля PM_{10} и $PM_{2.5}$ в приземном слое атмосферы на станциях наблюдений ФПБУ «Мосэкомониторинг» (МЭМ) (<https://mosecom.mos.ru/>) «Спиридоновка», «Сухаревская площадь» и «Троицк-2». Станции «Спиридоновка» и «Сухаревская площадь» так же, как и пункт наблюдений в ИФА РАН, расположены в центре города в зоне плотной застройки. Станция «Троицк-2» расположена на окраине г. Троицк, вошедшего в состав «Новой Москвы» в 2012 году (<https://tinao.mos.ru/>). Рассматриваемые пункты наблюдений отличаются потенциальными источниками аэрозолей. «Спиридоновка» и «Троицк-2» находятся в жилом секторе, «Сухаревская площадь» расположена вблизи автомагистрали с интенсивным движением, пункт наблюдений ИФА РАН – в административном районе, но в стороне от крупных автомагистралей.

Координаты станций и их описание приведены на сайте МЭМ, где данные об интересующих нас параметрах представлены частично в виде почасовых, среднесуточных или среднемесячных величин.

В течение последних нескольких лет для научных целей стали активно использоваться материалы сайта <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>, содержащего данные дистанционных наблюдений за атмосферой Земли за годы спутниковой эры, адаптированные для научных и учебных приложений. В основе реанализа MERRA-2 лежит модель GEOS-5 (Goddard Earth Observing System, версия 5), содержащая блоки моделирования циркуляции атмосферы и океана, состава атмосферы, биогеохимии, процессов на поверхности Земли и т.д. Модель имеет 72 атмосферных σ -уровня вплоть до 0,01 гПа (~ 85 км); пространственное разрешение составляет $0,5^\circ \times 0,625^\circ$ (широта $\times$ долгота). Модель GEOS-5 основана на ассимиляции данных, обеспечивающей совместное усвоение результатов наблюдений метеорологических полей и аэрозольной оптической толщины (АОТ), полученной по спутниковым измерениям спектрорадиометрами MODIS (Moderate

Resolution Imaging Spectroradiometer, Terra и Aqua), AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), MISR (Multiangle Imaging Spectro Radiometer), а также по наземным измерениям прямого излучения фотометрами CE 318 сети AERONET. В основе аэрозольного модуля учитывается 15 аэрозольных компонент в предположении внешней смеси: пыль и морская соль (по 5 непересекающихся по размерам фракций), гидрофобный и гидрофильный углерод (черный и органический) и сульфаты. Детальное описание аэрозольного модуля, блоков моделирования эмиссий различных типов аэрозоля и системы усвоения аэрозольных данных приведено в [8,9]. Полное множество данных реанализа находится в открытом доступе на сайте GES DISC (Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center; <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/mdisc/>); коллекции отдельных аэрозольных характеристик представлены также на сайте <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>. В частности, там приводится информация о массовой концентрации аэрозоля размерности $PM_{2.5}$ и общей концентрации пыли в приземном слое воздуха помесечно, которая и была использована нами для сравнения с полученными результатами измерений в Москве.

В работе анализ данных проводится по среднемесячным значениям соответствующих показателей – в соответствии с материалами сравнения на сайтах <https://mosecom.mos.ru/> и <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>. Рассматриваются данные за восемь месяцев с октября 2019 года по май 2020 года.

Результаты измерений и сравнения

Рис. 1 показывает исходные данные, анализируемые в данной работе, включая данные МЭМ, и позволяет сравнить результаты измерений и реанализа MERRA-2 (M-2) для территории Москвы. Мы не будем акцентировать внимание на возможные причины различий между определёнными величинами на разных станциях ФПБУ «Мосэкомониторинг» и в пункте наблюдений ИФА РАН, которые обусловлены, в том числе, различной степенью урбанизации и интенсивностью локальных антропогенных источников аэрозолей, а, наоборот, ввиду их неплохого соответствия для каждого месяца (рис. 1), рассмотрим эти значения как единый массив данных для Москвы.

Концентрация аэрозоля PM_{10} , по данным для разных районов Москвы (четыре пункта), составила (за 8 месяцев) в среднем 24 мкг/м^3 при относительном стандартном отклонении (ОСО) около 35 % (без вычитания сезонного тренда). Те же показатели для $PM_{2.5}$ за 8 месяцев: 11 мкг/м^3 при ОСО около 22 %. Полученные результаты хорошо согласуются с данными ранее выполненными в Москве наблюдений

приземного аэрозоля, например, [10–13].

Сравнить абсолютные и относительные соотношения концентраций аэрозолей разных фракций в разные месяцы можно по рис. 2. Зимой среднее содержание аэрозоля PM_{10} в городе (около 16 мкг/м^3)

почти вдвое меньше, чем осенью и весной (около 28 и 30 мкг/м^3 соответственно) /или чем в тёплое время года ($28\text{--}30 \text{ мкг/м}^3$). Такая качественная закономерность отмечалась в публикациях [10,12].

Рис. 1. Среднемесечные массовые концентрации аэрозоля PM_{10} и общей пыли (а), а также аэрозоля $PM_{2.5}$ (б), измеренные в Москве (ИФА РАН и три станции МЭМ) и определенные по данным MERRA-2

Рис. 2. Содержание аэрозоля $PM_{2.5}$ в массе аэрозоля PM_{10} : а – абсолютное; б – относительное. $PM_{10}-PM_{2.5}$ – разница концентраций аэрозоля соответствующих размерных фракций

Следует отметить, что значения массовой концентрации субмикронного и микронного аэрозоля в приземном слое воздуха Московского мегаполиса составляют величины одного порядка со значениями массовой концентрации аэрозольных частиц в атмосфере крупных европейских городов [14,15] и ниже значений массовой концентрации аэрозоля в крупных городах Восточной Азии (Индия, Китай) [16,17].

Доля массы аэрозоля $PM_{2.5}$ в массе частиц PM_{10} в реальных измерениях также различается в разные сезоны: около 45 % осенью, 57 % зимой и 37 % весной (рис. 2б). Сезонные вариации связаны, в первую очередь, с преобладанием в разное время года источников аэрозоля различной природы. Зимой большой вклад вносят промышленные источники, транспорт и дальний перенос мелкодисперсного аэрозоля, тогда как в теплое время года, при ослаблении влияния дальнего переноса аэрозоля, к ним добавляется

вынос с поверхности более крупных почвенных и пылевых частиц. Эффективность химических превращений в воздухе также меняется в течение года с изменением температуры окружающей среды. В весенне-летней атмосфере могут быть обнаружены составляющие аэрозоля биологического происхождения (растительная пыльца, споры и др., как правило, на частицах микронного размера). Все эти и другие процессы проявляются в химическом и дисперсионном составе атмосферного аэрозоля.

Сравнивая данные реанализа М-2 с результатами измерений, можно утверждать, что реанализ неплохо качественно описывает вариации содержания аэрозоля в приземном воздухе от месяца к месяцу (рис. 1). Однако общая концентрация пыли, определенная гравиметрическим способом в ИФА РАН, в $8,2 \pm 3,2$ раза (по 5 среднемесечным значениям) превосходит данные М-2 (рис. 1а), а для частиц $PM_{2.5}$ этот показатель (по 8 значениям) составил $6,7 \pm 4,0$

(рис. 1а, 1б). Таким образом, реанализ MERRA-2 недооценивает уровень аэрозольного загрязнения городской атмосферы. Кроме того, расчеты показывают, что по данным М-2 массовая доля мелкодисперсных частиц $PM_{2.5}$ в массе аэрозоля PM_{10} составляет около $32 \pm 3 \%$, т.е. различия между сезонами не выражены, тогда как в измеренных характеристиках четко прослеживаются сезонные различия этого показателя (рис. 2б).

О сопоставлении результатов измерений в точке и реанализа спутниковых данных для площадки

Заметим, что результаты измерений какого-либо показателя атмосферы в точке и данные реанализа этой же характеристики для ячейки формата $0,5^\circ \times 0,625^\circ$, содержащей эту точку, в общем случае не должны в точности совпадать. На широте Москвы размер ячейки примерно $55 \text{ км} \times 32 \text{ км}$. Таким образом, в ячейке есть множество точек, в которых, если бы в них велись измерения, в общем случае, результаты могли бы не совпадать. Они могут различаться как по величине измеряемой характеристики, так и по ее изменчивости и фазе этих изменений. Особенно в крупном мегаполисе, на территории которого расположены различные предприятия промышленности, развиты все виды наземного транспорта

и жилищная застройка различной плотности.

На рис. 3 схематически показано расположение территории Москвы (без последних расширений его территории в южном-юго-восточном направлении) в географических координатах и относительно сетки системы MERRA-2, прорисованной в градациях серого на подложке карты. Основа карты – конкретное распределение количества общей пыли в приземном воздухе в октябре 2019 года, представленное на сайте <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>. Размеры ячейки М-2 были бы хороши для анализа воздушной акватории над городом. Однако смещение координатных сеток приводит к тому, что Москва описывается по крайней мере четырьмя ячейками реанализа MERRA-2. При этом существенно, что каждая из ячеек включает в себя частично как территории города, так и территории, находящиеся вне городской черты, где плотность населения и застройки, а также интенсивность и состав антропогенных и природных эмиссий примесей в атмосферу существенно отличаются от городских. Всё это качественно объясняет низкий уровень аэрозольного загрязнения воздуха, полученный по данным М-2 для соответствующего квадрата сетки, по сравнению с измерениями для координат точки наблюдения на станции ИФА РАН ($55,74 \text{ с.ш.}$, $37,62 \text{ в.д.}$), расположенной практически в центре города (рис. 1).

Рис. 3. Схема расположения основной территории Москвы (черная кривая) и точки наблюдений ИФА РАН (кружок внутри) относительно географических координат и сетки расчетов реанализа MERRA-2 (градации серого)

Кроме того, процедуры реанализа, в том числе подходы к модельным расчетам состава приземной атмосферы, весьма сложны и могут использовать разнообразную информацию (параметры модельных расчетов), присвоенную конкретным ячейкам сетки,

но не соответствующую всем точкам внутри этих ячеек. Поэтому можно предположить, что явление, масштаб которого больше размеров ячейки (например, вариации атмосферного параметра от месяца к месяцу, распространение примеси на большие рас-

стояния), будет лучше отображаться в данных реанализа, на масштабах нескольких ячеек и на достаточно длительном временном отрезке. Наоборот, явление, масштаб которого меньше размеров ячейки (например, эмиссии в атмосферу конкретного завода в городе или отдельного поселка [7]), вообще может не проявляться в данных реанализа на географической сетке используемого формата.

Выводы

Измерения массовой концентрации аэрозольных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ в приземном воздухе Москвы в пункте наблюдений ИФА РАН и на трех станциях ФПБУ «Мосэкомониторинг» показали различия в среднемесячных величинах около 35–40 % и 20–25 %, соответственно, от средних значений. Это обусловлено, прежде всего, различной степенью урбанизации, спецификой и интенсивностью локальных антропогенных аэрозольных источников в разных районах города, а также особенностями циркуляционного режима Московского мегаполиса.

За три последовательных сезона (осень, зима и весна 2019/2020 года) соответствующие среднемесячные значения массовой концентрации составили около 24 и 11 $мкг/м^3$ для аэрозоля PM_{10} и $PM_{2.5}$, что очень близко к соответствующим значениям массовой концентрации в атмосфере ряда крупных европейских городов и ниже значений массовой концентрации субмикронных и микронных приземных аэрозолей в мегаполисах Восточной Азии.

Данные реанализа MERRA-2 качественно отражают внутrigодовые вариации массовой концентрации аэрозоля в приземном воздухе города. Однако реанализ сильно недооценивает уровень аэрозольного загрязнения в Москве (от 2 до 12 раз в разные месяцы по общей массе аэрозоля или частиц $PM_{2.5}$).

Исследование выполнено по Программе РАН № АААА-А18-118112690083-8 (0129-2019-0002) при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-05-00352 и № 19-05-50088.

Литература

1. Кондратьев К.Я., Ивлев Л.С., Крапивин В.Ф. Свойства, процессы образования и последствия воздействий атмосферного аэрозоля: от нано- до глобальных масштабов. СПб.: BBM, 2007. 860 с.
2. Seinfeld J.H. and Pandis S.N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. 2nd Edition. New York: Wiley, 2006. 1232 p.
3. Benedetti A., Morsette J.-J., Boucher O., Dethof A., Engelen R.J., Fisher M., Flentje H., Huneus N., Jones L., Kaiser J.W., Kinne S., Mangold A., Razinger M., Simmons A.J., Suttie M. Aerosol analysis and forecast in the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Integrated Forecast System: 2. Data assimilation // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. D13205. doi:10.1029/2008JD011115
4. Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A.M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2) // J. Climate. 2017. V. 30. N 14. P. 5419–5454. doi:10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
5. Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015), MERRA-2 tavg1_2d_aer_Nx: 2d,1- Hourly,Time-averaged,Single-Level,Assimilation,Aerosol Diagnostics V5.12.4, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) [Электронный ресурс]. URL: https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2T1NXAER_5.12.4/summary
6. Журавлева Т.Б., Артюшина А.В., Виноградова А.А., Воронина Ю.В. Черный углерод в приземной атмосфере вдали от источников эмиссий: сравнение результатов измерений и реанализа MERRA-2 // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 4. С. 250–260.
7. Виноградова А.А., Копейкин В.М., Смирнов Н.С. Мониторинг концентрации черного углерода в приземном воздухе в районе Печоро-Илычского биосферного заповедника // Успехи современного естествознания. 2019. №11. С. 64–69. doi: 10.17513/use.37241 [Электронный ресурс]. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37241>
8. Buchard V., Randles C.A., da Silva A.M., Darmenov A., Colarco P. R., Govindaraju R., Ferrare R., Hair J., Beyersdorf A. J., Ziemba L. D., Yu H. The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part II: Evaluation and case studies // J. Climate. 2017. V. 30. N 17. P. 6851–6872. doi:10.1175/JCLI-D-16-0613.1.
9. Randles C.A., Da Silva A.M., Buchard V., Colarco P.R., Darmenov A., Govindaraju R., Smirnov A., Holben B., Ferrare R., Hair J., Shinozuka Y., Flynn C.J. The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward, Part I: System description and data assimilation evaluation // J. Climate. 2017. V.30. N 17. P. 6823–6850. doi:10.1175/JCLI-D-16-0609.1.
10. Глазкова А.А., Кузнецова И.Н., Шалыгина И.Ю., Семутникова Е.Г. Суточный ход концентрации аэрозоля (PM_{10}) летом в Московском регионе // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 6. С. 495–500.
11. Кузнецова И.Н., Глазкова А.А., Шалыгина И.Ю. и др. Сезонная и суточная изменчивость концентраций взвешенных частиц в приземном воздухе жилых районов Москвы // Оптика атмосферы и океана. 2014 Т. 27. № 6. С. 473–482.

12. 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 атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 12. С.1033–1042.
13. 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.
14. Chlebowska-Styś A., Sówka I., Kobus D., Pachurka Ł. Analysis of concentrations trends and origins of PM₁₀ in selected European cities // E3S Web of Conferences 17, 00013 (2017). EKO-DOK 2017. DOI: 10.1051/e3sconf/20171700013
15. Querola X., Alastuey A., Rodriguez S., Plana F., Ruiza C.R., Cots N., Massague G., Puig O. PM₁₀ and PM_{2.5} source apportionment in the Barcelona Metropolitan area, Catalonia, Spain // Atmospheric Environment. 2001. V. 35. P. 6407–6419.
16. Gangulya R., Sharma D., Kumarb. Trend analysis of observational PM₁₀ concentrations in Shimla city, India // Sustainable Cities and Society. 2019. V. 51. 101719. /https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101719
17. Sun Y., Zhuang G., Tang A., Wang Y. and An Z. Chemical Characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in Haze-Fog Episodes in Beijing // Environ. Sci. Technol. 2006. V.40. P. 3148–3155.

COMPARISON OF SOME ATMOSPHERIC AEROSOL PARAMETERS MEASURED IN MOSCOW WITH MERRA-2 REANALYSIS DATA

D.P. Gubanova, A.A. Vinogradova, Yu.A. Ivanova

A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
gubanova@ifaran.ru; anvinograd@yandex.ru; ulia_sml@mail.ru

Abstract. The first results of the complicated experiment for studying atmospheric composition in Moscow metropolis in different seasons are considered. The mass concentrations of aerosol particles PM10 and PM2.5, as well as the total aerosol concentration in the surface air of the city center were analyzed for the period of eight months (October 2019 – May 2020). The obtained monthly average values of aerosol concentrations show good correlation with the results of measurements at several stations of Mosecomonitoring system, differences in monthly average values are about 35–40 % and 20–25 %, respectively, from the average values. This is primarily due to various degrees of urbanization, the specifics and intensity of local anthropogenic aerosol sources in different areas of the city, as well as the peculiarities of the circulation regime of the Moscow metropolis. For three consecutive seasons (autumn, winter and spring 2019/2020), the corresponding monthly average mass concentrations were about 24 and 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM10 and PM2.5 aerosols, which is very close to corresponding mass concentrations in the atmosphere of a number of major European cities and lower than the mass concentrations of submicron and micron surface aerosols in the megacities of East Asia. The measurement results are noticeably higher than MERRA-2 reanalysis data. Reanalysis data qualitatively reflect intra-annual variations in the mass concentration of aerosol in the city's surface air. However, MERRA-2 reanalysis greatly underestimates the level of aerosol pollution in Moscow, from 2 to 12 times in different months for the total aerosol mass or PM2.5 particles.

Keywords: atmosphere, surface layer, aerosol, mass concentration, metropolis, MERRA-2 reanalysis

References:

1. Kondrat'ev K.Ya., Ivlev L.S., Krapivin V.F. *Atmosfernye aeroli: Svoystva, protsessy obrazovaniya i vozdeystviya. Ot nano- do global'nykh masshtabov* (Atmospheric Aerosol: Properties, Formation, and Impacts. Nano- to-Global Scale Processes), St. Petersburg: VVM, 2007. 860 p.
2. Seinfeld J.H. and Pandis S.N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. 2nd Edition. New York: Wiley, 2006. 1232 p.
3. Benedetti A., Morsette J.-J., Boucher O., Dethof A., Engelen R.J., Fisher M., Flentje H., Huneeus N., Jones L., Kaiser J.W., Kinne S., Mangold A., Razingier M., Simmons A.J., Suttie M. Aerosol analysis and forecast in the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Integrated Forecast System: 2. Data assimilation // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. D13205. doi:10.1029/2008JD011115
4. Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A.M., Gu W., Kim G.-K., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, version 2 (MERRA-2) // *J. Climate*. 2017. V. 30. N 14. P. 5419–5454. doi:10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
5. Global Modeling and Assimilation Office (GMAO) (2015), MERRA-2 tavg1_2d_aer_Nx: 2d,1- Hourly,Time-averaged,Single-Level,Assimilation,Aerosol Diagnostics V5.12.4, Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC) [Электронный ресурс]. URL: https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2T1NXAER_5.12.4/summary
6. Журавлева Т.Б., Артюшина А.В., Виноградова А.А., Воронина Ю.В. Черный углерод в приземной атмосфере вдали от источников эмиссий: сравнение результатов измерений и реанализа MERRA-2 // *Оптика атмосферы и океана*. 2020. Т. 33. № 4. С. 250–260.
7. Vinogradova A.A., Kopeikin V.M., Smirnov N.S. Black carbon concentration in near surface atmosphere in the Pechora-Ilych nature reserve: measurements and MERRA-2 reanalysis // *Uspekhi sovremennogo yestesvoznaniya*. 2019. N 11. P. 64–69. DOI: 10.17513/use.37241 URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37241> (In Russian).
8. Buchard V., Randles C.A., da Silva A.M., Darmenov A., Colarco P.R., Govindaraju R., Ferrare R., Hair J., Beyersdorf A.J., Ziemba L.D., Yu H. The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part II: Evaluation and case studies // *J. Climate*. 2017. V. 30. N 17. P. 6851–6872. doi:10.1175/JCLI-D-16-0613.1.
9. Randles C.A., Da Silva A.M., Buchard V., Colarco P.R., Darmenov A., Govindaraju R., Smirnov A., Holben B., Ferrare R., Hair J., Shinzuka Y., Flynn C.J. The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward, Part I: System description and data assimilation evaluation // *J. Climate*. 2017. V.30. N 17. P. 6823–6850. doi:10.1175/JCLI-D-16-0609.1.
10. Glazkova A., Kuznetsova I., Shalygina I., Semutnikova E. The diurnal variation of aerosol concentration (PM10) in Summer in the Moscow region // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2012. 25 (6), P. 495–500.

11. Kuznetsova I.N., Glazkova A.A., Shalygina I.Yu., Nakhaev M.I., Arkhangelskaya A.A., Zvyagintsev A.M., Semutnikova E.G., Zakharova P.V., Lezina E.A. Seasonal and diurnal variability of particulate matter PM10 in surface air of Moscow habitable districts //
12. Gubanova D.P., Belikov I.B., Elansky N.F., Skorokhod A.I., Chubarova N.E. Variations in PM2.5 surface concentration in Moscow according to observations at MSU Meteorological observatory // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2018, 31(3). P. 290–299.
13. Trefilova A.V., Gubanova D.P., Davydov K.A., Iordanskii M.A., Minashkin V.M., Artamonova M.S., Grechko E.I., Kuderina T.M. Chemical composition and microphysical characteristics of atmospheric aerosol over Moscow and its vicinity in June 2009 and during the fire peak of 2010 // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013. 49 (7). P. 765–778.
14. Chlebowska-Styś A., Sówka I., Kobus D., Pachurka Ł. Analysis of concentrations trends and origins of PM10 in selected European cities // *E3S Web of Conferences* 17, 00013 (2017). EKO-DOK 2017. DOI: 10.1051/e3sconf/20171700013
15. Querola X, Alastuey A., Rodriguez S., Plana F., Ruiza C.R., Cots N., Massague G., Puig O. PM10 and PM2.5 source apportionment in the Barcelona Metropolitan area, Catalonia, Spain // *Atmospheric Environment*. 2001. V. 35. P. 6407–6419.
16. Gangulya R., Sharma D., Kumarb. Trend analysis of observational PM10 concentrations in Shimla city, India // *Sustainable Cities and Society*. 2019. 51, 101719. /<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101719>
17. Sun Y., Zhuang G., Tang A., Wang Y., and An Z. Chemical Characteristics of PM2.5 and PM10 in Haze-Fog Episodes in Beijing // *Environ. Sci. Technol.* 2006. V.40. P. 3148–3155.