

Временная изменчивость и взаимосвязь приземной концентрации аэрозолей $PM_{2.5}$ и аэрозольной оптической толщи по данным измерений на Среднем Урале

А.П. Лужецкая^{✉ 1}, Е.С. Наговицына^{1,2}, Е.В. Омелькова¹, В.А. Поддубный^{1*}

¹Институт промышленной экологии УрО РАН
620990, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20

²Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Поступила в редакцию 27.05.2022 г.;
после доработки 3.08.2022 г.;
принята к печати 15.08.2022 г.

Проведен анализ данных измерений аэрозольных параметров в приземном слое с помощью комплектов оптических сенсоров Panasonic $PM_{2.5}$ и во всем атмосферном столбе фотометрическим методом в городском и фоновом пунктах наблюдений на Среднем Урале за 2016–2019 гг. Выполнено сравнение особенностей внутригодового и суточного ходов параметров аэрозоля в приземном слое и во всем атмосферном столбе, а также поиск взаимосвязи концентрации частиц $PM_{2.5}$ с АОТ и метеорологическими параметрами в двух районах. Для Среднего Урала впервые были построены статистические модели для оценки концентрации аэрозольных частиц $PM_{2.5}$. Многофакторные регрессионные модели оценки логарифма концентрации частиц $PM_{2.5}$ имеют существенно более высокое качество по сравнению с однофакторными моделями. В качестве значимых предикторов были установлены: высота пограничного слоя (blh, м), ln АОТ, нормализованный относительный индекс растительности (NDVI), относительная влажность воздуха (Hu, %), давление (P, Па).

Ключевые слова: массовая концентрация аэрозольных частиц $PM_{2.5}$, аэрозольная оптическая толщина, мониторинг атмосферы, эмпирические статистические модели, регрессионный анализ, AERONET; mass concentration of $PM_{2.5}$, aerosol optical depth, monitoring of the atmosphere, empirical statistical model, regression analysis, AERONET.

Введение

Аэрозоль — очень изменчивая составляющая атмосферы Земли, существенно влияющая на процессы формирования радиационного баланса планеты и изменения климата [1]. Кроме того, твердые частицы аэродинамическим диаметром менее 2,5 мкм ($PM_{2.5}$) представляют очень серьезную угрозу для здоровья человека. Благодаря эпидемиологическим исследованиям установлены причинно-следственные связи между долгосрочным воздействием повышенных концентраций аэрозолей $PM_{2.5}$ и преждевременной смертностью от респираторных и сердечно-сосудистых заболеваний [2–4]. Согласно имеющимся оценкам мелкодисперсные частицы $PM_{2.5}$, попадающие в воздух в результате сжигания ископаемого топлива, стали причиной 8 млн преждевременных смертей в 2018 г., что составляет почти 20% от общей смертности среди взрослого населения планеты [5].

С целью защиты здоровья населения от негативного воздействия мелкодисперсных аэрозольных частиц многие страны вводят стандарты качества воздуха для контроля превышения предельно допустимых концентраций мелкодисперсных частиц, проводят постоянные наблюдения за аэрозольными характеристиками, а также заключают межгосударственные соглашения по ограничению трансграничного переноса аэрозолей [6]. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) установила два значения предельно-допустимой концентрации (ПДК): среднесуточный уровень концентрации частиц $PM_{2.5}$ в воздухе не должен превышать 25 мкг/м³, а среднегодовой — 10 мкг/м³ [7]. Для России среднесуточная ПДК $PM_{2.5}$ составляет 35 мкг/м³, среднегодовая — 25 мкг/м³ [8].

Известно, что концентрации загрязнителей воздуха, включая $PM_{2.5}$, могут проявлять значительную пространственно-временную изменчивость в зависимости от расположения и мощности источников выбросов как естественного, так и антропогенного происхождения, метеорологических условий и топографических особенностей местности. Знания о тенденциях их изменчивости играют важную роль в определении наиболее обоснованной страте-

* Анна Павловна Лужецкая (luzhanka@mail.ru); Екатерина Сергеевна Наговицына (EkaterinaN@ecko.uran.ru); Елена Владимировна Омелькова (Omelkova.e@gmail.com); Василий Алексеевич Поддубный (Vassily.Poddubny@gmail.com).

гии контроля для снижения воздействия загрязнения воздуха на здоровье населения. Поэтому значительный интерес представляют ряды длительных многолетних наблюдений аэрозольных параметров атмосферы в различных регионах планеты и условиях.

Наземные системы мониторинга аэрозольных частиц в атмосфере были созданы во многих промышленно развитых странах. Хотя такие измерения в целом точны, они репрезентативны только для областей, расположенных в непосредственной близости от станций мониторинга. Кроме того, во многих регионах непрерывный мониторинг концентрации аэрозольных частиц $PM_{2,5}$ отсутствует.

В настоящее время контроль содержания мелкодисперсных частиц $PM_{2,5}$ в России ведется в крупных городах. Для Среднего Урала и территории России в целом пока сохраняется дефицит информации о концентрации мелкодисперсного аэрозоля в атмосфере и закономерностях ее изменчивости, поскольку исследования выполнены в небольшом числе районов и в недостаточном объеме.

Учитывая недостаток данных о содержании частиц $PM_{2,5}$ в приземном слое атмосферы, в последнее время интенсивно развиваются спутниковые наблюдения за уровнем замутненности воздуха. Спутники могут контролировать огромные пространства, включая области, где отсутствуют наземные станции мониторинга. Поставляемые с помощью спектрорадиометра среднего разрешения MODIS, установленного на спутниках Terra и Aqua, данные позволяют получать информацию об аэрозольной оптической толще (АОТ) для всей территории земного шара [9–11].

В последние десятилетия дистанционное зондирование в сочетании с моделированием и учетом имеющихся результатов измерений на поверхности стало одним из основных методов изучения и мониторинга аэрозольного состава атмосферы Земли. Во многих исследованиях изучалась статистическая взаимосвязь между спутниковыми измерениями АОТ и приземными концентрациями частиц $PM_{2,5}$. В большом количестве работ разрабатывались простые эмпирические соотношения между концентрациями частиц $PM_{2,5}$ и АОТ [9–11]. В [12] показано, что существует взаимосвязь между часовыми АОТ (по данным MODIS) и значениями приземной концентрации частиц $PM_{2,5}$ (по данным наблюдений Tapered-Element Oscillating Microbalance (ТЕОМ)), измеренными в семи точках округа Джефферсон, штат Алабама в 2002 г. (коэффициент линейной корреляции $R = 0,7$).

Для региона Пекина коэффициенты корреляции R между среднедневными АОТ (по данным MODIS) и приземной концентрацией аэрозолей $PM_{2,5}$ (<http://datacenter.mep.gov.cn/index>) за период 2013–2017 гг. составили от 0,35 до 0,58. Более высокие коэффициенты корреляции наблюдались в регионах, где присутствует аэрозоль городского типа (провинция Сычуань), более низкие — в прибрежных регионах с высокой долей морского аэро-

золя (городская агломерация в дельте реки Янцзы, Шанхай) [13].

Для повышения точности такого рода аппроксимационных соотношений между двумя переменными в [14–18] учитывались метеорологические, географические и сезонные условия, а также вертикальное распределение аэрозоля.

В [15] по данным измерений в Европе строились однофакторные модели $PM_{2,5}$ — АОТ и многофакторные полуэмпирические модели, связывающие АОТ, высоту пограничного слоя и относительную влажность с концентрацией частиц $PM_{2,5}$. В работе показано, что многофакторные регрессионные модели оценки концентрации частиц $PM_{2,5}$ имеют существенно более высокое качество по сравнению с однофакторными моделями (коэффициенты корреляции многофакторных моделей $R = 0,42–0,60$, а однофакторных — $R = 0,22–0,38$).

В [17, 18] для оценки приземной концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ в Индии и Пакистане на основе метода множественной линейной регрессии показано, что учет помимо АОТ различных метеорологических параметров, таких как температура, относительная влажность, высота пограничного слоя, скорость горизонтального ветра, позволяет улучшить оценки концентрации мелкодисперсного аэрозоля (для Пакистана R увеличивается с 0,6 (однофакторная модель) до 0,7 (многофакторная модель)).

Хотя исследования такого рода становятся все более распространенными, результаты прогнозирования концентраций частиц $PM_{2,5}$ существенно различаются в зависимости от региона [12–18]. Поэтому для получения глобальных оценок концентрации частиц $PM_{2,5}$ необходимы соотношения АОТ — $PM_{2,5}$, полученные для разных регионов планеты.

Цель настоящей работы — исследование особенностей сезонного и суточного ходов параметров аэрозоля в приземном слое и во всем атмосферном столбе, а также разработка статистических моделей для оценки приземной концентрации частиц $PM_{2,5}$ по данным измерений на Среднем Урале.

1. Характеристика экспериментальных данных

Климатические особенности Среднего Урала определяются его географическим положением. Регион удален от океанов, лежит в глубине материка Евразия. Средний Урал является самой низкой частью Уральского хребта, по которому проходит часть условной границы между Европой и Азией. Климат Среднего Урала отличается умеренными температурами зимой и летом, обилием осадков, большим количеством пасмурных дней, мощным снеговым покровом. Во все сезоны года преобладают ветры западных направлений, нередко северные ветры, реже наблюдаются восточные. Среднемесячная температура января $-13,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, июля $+19,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ [19].

Екатеринбург — один из важнейших экономических центров России, четвертый по численности

населения город страны (более 1377000 чел.), расположен в центре Среднего Урала. Основные источники промышленного загрязнения атмосферы в Екатеринбурге — предприятия машиностроения и металлообработки, черной и цветной металлургии, строительной и химической отраслей промышленности, ТЭЦ, а также автомобильный и железнодорожный транспорт. Выбросы от автомобилей составляют 88% антропогенных выбросов [20].

В настоящей работе анализируются результаты измерений аэрозольных характеристик атмосферы, которые проводились на Среднем Урале в двух пунктах наблюдения: в Екатеринбурге (городской пункт мониторинга) на базе Института промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук (ИПЭ УрО РАН) (56,85° с.ш., 60,55° в.д.) и в фоновом районе на территории Коуровской астрономической обсерватории (КАО) Уральского федерального университета (УрФУ). КАО находится в лесном массиве в ~65 км к северо-западу от Екатеринбурга (57,036° с.ш., 59,546° в.д.).

Спектральные наблюдения за АОТ проводятся в Екатеринбурге при помощи солнечного фотометра SP-9 [21], в КАО — сетевым фотометром CIMEL CE-318, работающим по программе AERONET (Aerosol Robotic Network, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>) [22]. В [23] пункт мониторинга AERONET на Среднем Урале признан характерной станцией для измерений параметров фонового континентального аэрозоля согласно климатологической классификации типов аэрозоля планеты.

Для анализа использовались результаты измерений CIMEL CE-318 уровня качества 2 (согласно классификации AERONET, уровня 2.0) [22]. Сопоставимость результатов измерений фотометра SP-9 обеспечивалась регулярными интеркалибровками с фотометром CIMEL CE-318. Для исключения влияния полупрозрачной облачности результаты измерений SP-9 подвергались специальной процедуре фильтрации [24, гл. 1.].

Концентрации мелкодисперсного аэрозоля $PM_{2,5}$ в приземном слое воздуха измеряются при помощи двух комплектов миниатюрных оптических сенсоров Panasonic $PM_{2,5}$ [25], которые позволяют оценивать концентрации аэрозольных частиц в диапазоне размеров от 0,3 до 2,5 мкм. Измерения в городском и фоновом пункте мониторинга проводятся с 2016 г. на одной высоте (~9 м над поверхностью земли). На рис. 1 приведена схема размещения двух пунктов мониторинга аэрозольных характеристик на Среднем Урале.

На основе измерений в 2016–2019 гг. для каждого пункта мониторинга были сформированы выборки разовых значений АОТ и концентрации частиц $PM_{2,5}$. Общий объем данных для Екатеринбурга составил 115584 значений АОТ и 10052178 значений концентрации частиц $PM_{2,5}$; для КАО — 7456 значений АОТ и 7169346 концентраций аэрозолей $PM_{2,5}$.

Далее были рассчитаны массивы совместных среднечасовых и среднедневных значений АОТ и концентрации частиц $PM_{2,5}$ для обоих пунктов наблюдений. Общий объем полученных таким об-

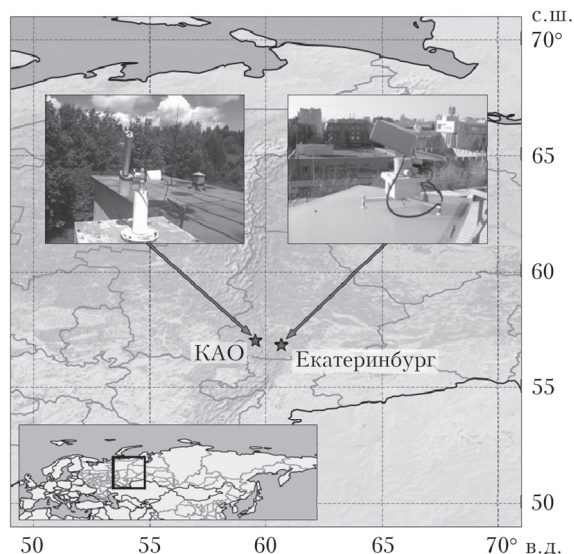


Рис. 1. Схема размещения городского (Екатеринбург) и фонового (КАО) пунктов мониторинга на Среднем Урале

разом данных составил 2948 среднечасовых значений (499 дней) для Екатеринбурга и 2021 (381 день) для КАО.

Метеорологическая информация извлекалась из баз реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF — European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, <http://ecmwf.int>). Метеоданные из базы реанализа ERA 5 доступны на регулярной координатной сетке с пространственным разрешением $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ и временным разрешением 1 ч. Были использованы следующие параметры: давление (P , Па); приземная температура (T , К); температура точки росы (d_{2m} , К), горизонтальные компоненты скорости ветра на высоте 10 м (V_x , V_y , м/с); высота пограничного слоя (blh , м); скорость трения (z_{ust} , м/с); индексы поверхности листьев для низкорослой и высокой растительности (lai_{lv} , lai_{hv}). Температура точки росы использовалась для расчета относительной влажности воздуха (Hu , %). Скорость w_s (м/с) и направление w_d (град) горизонтального ветра рассчитывались на основе горизонтальных компонент ветра. Также для точек мониторинга на основе измерений MODIS (www.search.earthdata.nasa.gov/search) были извлечены среднечасовые значения нормализованного относительного индекса растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) с пространственным разрешением $0,05^\circ \times 0,05^\circ$.

Результаты и их обсуждение

2.1. Временная изменчивость концентрации $PM_{2,5}$

На рис. 2 показаны временные вариации среднечасовых (точки) и среднесуточных значений (линии) АОТ на длине волны 0,5 мкм ($\tau_{0,5}$) и приземных концентраций аэрозолей $PM_{2,5}$, измеренных на станциях мониторинга на Среднем Урале.

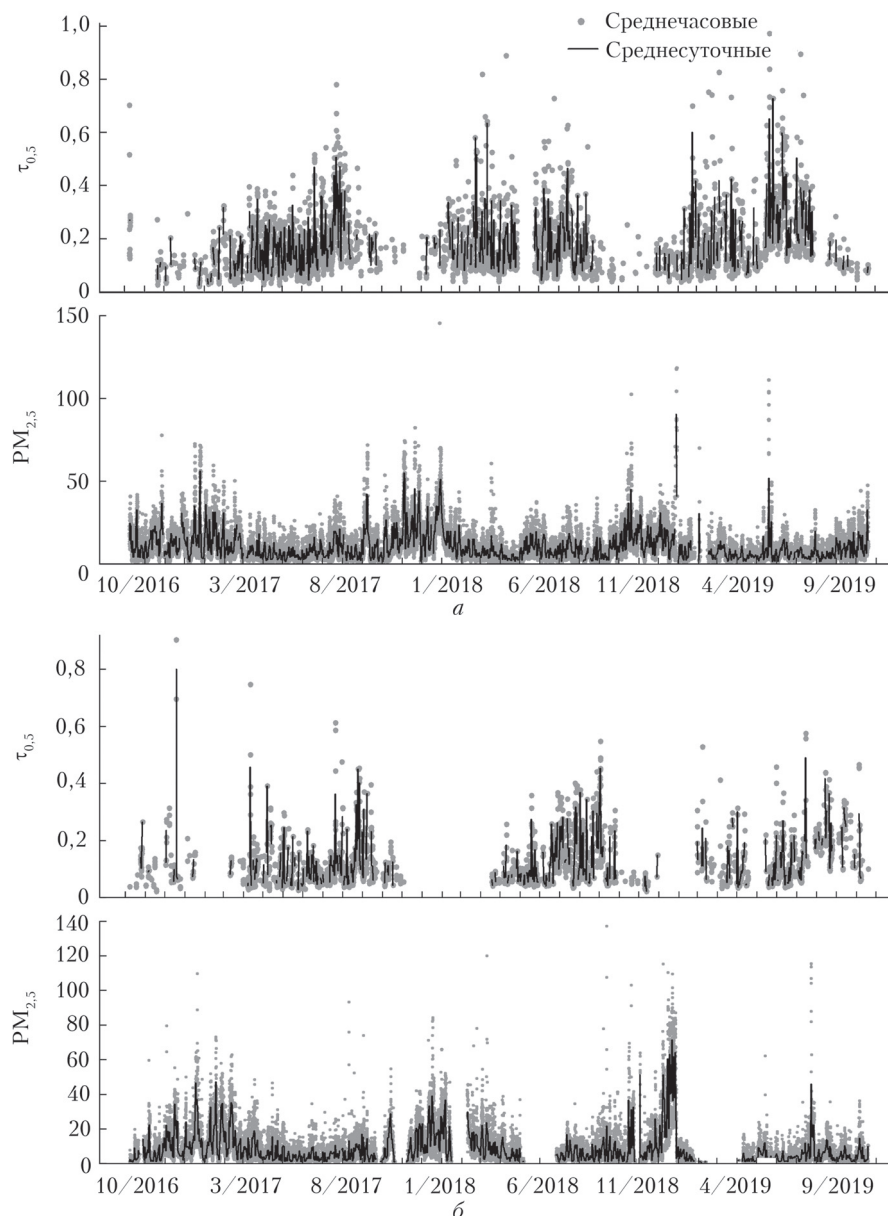


Рис. 2. Временной ход $\tau_{0,5}$ и массовой концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ на станциях мониторинга в г. Екатеринбурге (а) и КАО (б)

Как видно из рис. 2, в отличие от характеристик приземного аэрозоля, измеряемых непрерывно, количество измерений аэрозольных характеристик в столбе атмосферы гораздо меньше. Это объясняется тем, что измерения АОТ проводятся только в условиях безоблачной или малооблачной погоды.

На рис. 2 наблюдается сильная изменчивость среднесуточных значений аэрозольных характеристик в приземном слое и во всем атмосферном столбе, что может указывать на сложное совместное влияние локальных источников выбросов аэрозоля и метеорологических факторов.

Средние концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ за весь период наблюдений составляют $8,4 \text{ мкг/м}^3$ для КАО и $10,3 \text{ мкг/м}^3$ для Екатеринбурга; среднее $\tau_{0,5} = 0,13$ для КАО и $0,18$ для Екатеринбурга.

На рис. 3 представлены гистограммы распределений и теоретические функции плотности концентрации частиц $PM_{2,5}$ и $\tau_{0,5}$. Как видно из графиков, законы распределения массовой концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ и АОТ близки к лог-нормальному.

На рис. 4 приведено сравнение внутригодового хода аэрозольных характеристик, построенного по средним значениям за четырехлетний период наблюдений на Среднем Урале. Анализировалась относительная динамика внутригодового хода концентрации аэрозолей $[PM_{2,5}]_{NM}$ и $[\tau_{0,5}]_{NM}$: средние месячные величины нормировались на среднегодовые значения соответствующего параметра ($[PM_{2,5}]_{NM} = [PM_{2,5}]_i^M / [PM_{2,5}]_j^Y$; $[\tau_{0,5}]_{NM} = [\tau_{0,5}]_i^M / [\tau_{0,5}]_j^Y$) и затем усреднялись по массиву данных. Точки на рисунке соответствуют нормированным средним значениям

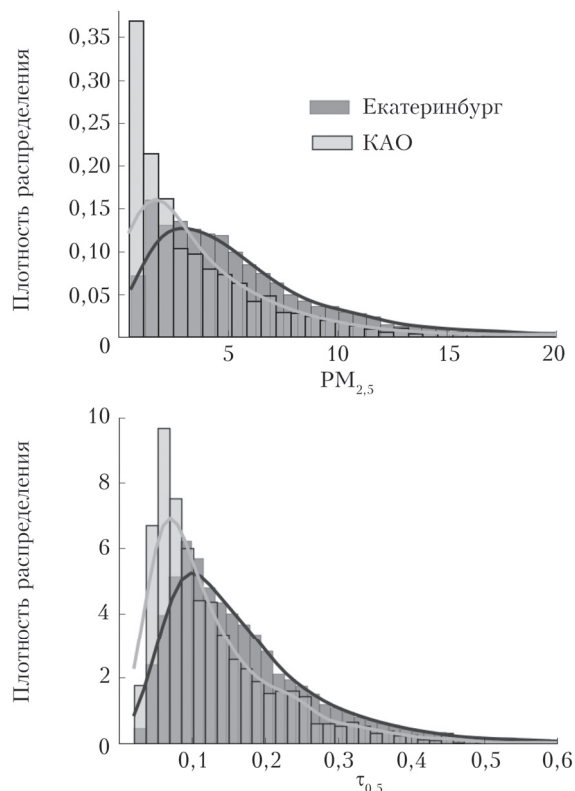


Рис. 3. Гистограммы распределений и теоретические функции плотности вероятности распределений массовой концентрации аэрозолей $PM_{2.5}$ и $\tau_{0.5}$

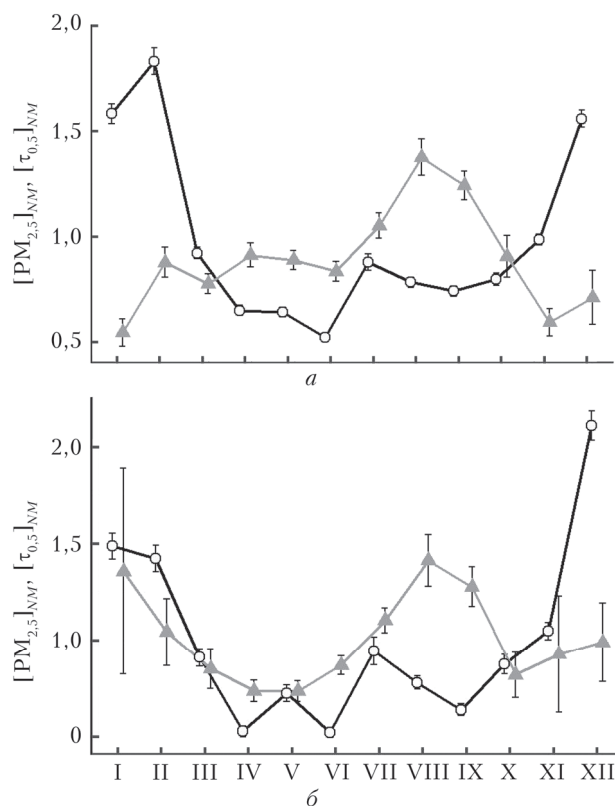


Рис. 4. Внутригодовой ход массовой концентрации аэрозолей $[PM_{2.5}]_{NM}$ (круги) и $[\tau_{0.5}]_{NM}$ (треугольники) для Екатеринбурга (а) и КАО (б)

значениям, усы — оценке 95% доверительного интервала для нормированных среднемесячных значений.

Как видно из рис. 4, в обоих пунктах мониторинга максимальные значения $[PM_{2.5}]_{NM}$ наблюдаются в зимний период, а минимальные — в летний. Средние значения приземных концентраций аэрозольных частиц превышают среднегодовые только зимой. Ослабление конвекции в холодное время года и минимальная высота пограничного слоя способствуют интенсивному накоплению аэрозоля в приземном слое атмосферы, что приводит к увеличению $[PM_{2.5}]_{NM}$ в зимнее время в 2,0–4,5 раза по сравнению с летним периодом. Весной и летом, когда высота пограничного слоя максимальна, происходит эффективное рассеивание частиц аэрозоля в более высокие слои атмосферы за счет вертикального перемешивания. Обращают на себя внимание кардинальные изменения концентрации аэрозолей $[PM_{2.5}]_{NM}$ при переходе от февраля к марту и от ноября к декабрю в обоих пунктах мониторинга.

Внутригодовой ход $[\tau_{0.5}]_{NM}$ имеет принципиальные отличия от поведения $[PM_{2.5}]_{NM}$: наибольшие значения фиксируются в летние месяцы. В городе наименьшие значения фиксируются в зимний период, в фоновом районе — весной и осенью. Однако в силу малой обеспеченности измерениями АОТ в фоновом районе в декабре и январе данные за эти зимние месяцы следует рассматривать как оценочные.

Различия в специфике внутригодовой изменчивости $[\tau_{0.5}]_{NM}$ и $[PM_{2.5}]_{NM}$ можно объяснить более слабым влиянием колебаний высоты пограничного слоя и конвективных процессов, которыми обусловлено вертикальное перемешивание, на величину АОТ. Поскольку АОТ характеризует содержание аэрозоля во всем атмосферном столбе, на ее вариации большее влияние оказывают процессы дальнего переноса аэрозольных примесей, интенсивнее реализующиеся выше пограничного слоя атмосферы. Максимальные значения $[\tau_{0.5}]_{NM}$ в двух пунктах мониторинга наблюдаются в августе, что может быть связано с влиянием летних природных пожаров на территории Урала и других регионов России.

На рис. 5 представлен суточный ход аэрозольных характеристик в приземном слое и во всем атмосферном столбе по результатам наблюдений в двух пунктах мониторинга на Среднем Урале. Для сравнения регулярной составляющей суточного хода аэрозольных характеристик использовались нормированные значения концентрации частиц $[PM_{2.5}]_{ND}$ и $[\tau_{0.5}]_{ND}$: среднее за час значение нормировались на величину текущего среднедневного.

Из результатов, представленных на рис. 5, видно, что суточный ход $[PM_{2.5}]_{ND}$ как в городе, так и в фоновом пункте мониторинга во все сезоны года характеризуется наличием двух максимумов в утренние и вечерние часы. Минимальные значения приземной концентрации мелкодисперсного аэрозоля наблюдаются во второй половине дня.

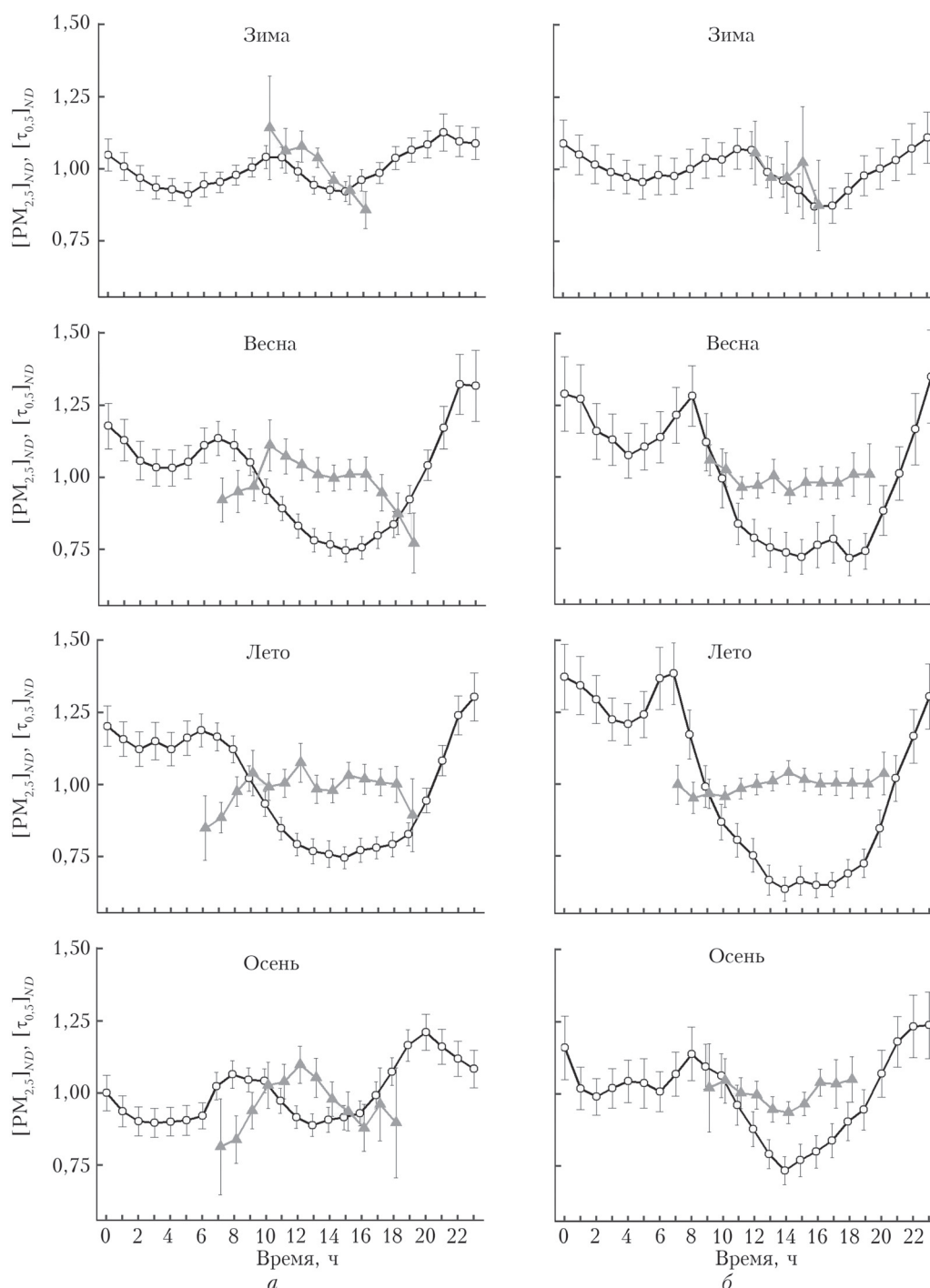


Рис. 5. Суточный ход массовой концентрации аэрозолей $[PM_{2.5}]_{ND}$ (круги) и $[\tau_{0.5}]_{ND}$ (треугольники) в различные сезоны года для Екатеринбурга (а) и КАО (б)

Во все сезоны года также фиксируются пониженные значения $[PM_{2.5}]_{ND}$ в предутреннее время, причем в городе зимой и осенью эти значения снижаются до дневных минимальных величин.

Максимум в вечерние и утренние часы, наблюдаемый не только в городе, но и на фоновой территории, обусловлен развитием температурной инверсии в приземном слое атмосферы. В дневное время в теплый период (весной и летом) инверсия, как

правило, исчезает, развивается интенсивный вертикальный обмен, тем самым ускоряется рассеивание аэрозольных частиц в атмосфере, что проявляется в минимальных концентрациях частиц $[PM_{2.5}]_{ND}$. Зимой земная поверхность под влиянием излучения охлаждается, конвективное перемешивание ослаблено, что способствует сохранению инверсии в дневное время и приводит к меньшим вариациям $[PM_{2.5}]_{ND}$ в дневные часы по сравнению с летним периодом.

Понижение концентраций мелкодисперсного аэрозоля в ночное время может быть обусловлено процессами сухого осаждения взвешенных веществ на земную поверхность. Весной и осенью происходит переход особенностей суточного хода от зимнего к летнему и наоборот. Схожая суточная изменчивость характерна для концентраций взвешенных частиц в Москве летом [26]. Для зимы вариации концентрации мелкодисперсного аэрозоля в течение суток в Москве больше, чем на Среднем Урале.

Согласно рис. 5, наибольшие суточные вариации концентрации частиц $[PM_{2,5}]_{ND}$ наблюдаются летом в фоновом районе. В летний период изменение от минимального до максимального значения концентрации мелкодисперсного аэрозоля в КАО составляет ~217%, в Екатеринбурге — ~169%. Меньшая изменчивость $[PM_{2,5}]_{ND}$ в Екатеринбурге, вероятно, связана с образованием городского острова тепла, уменьшающего колебания высоты приземного слоя атмосферы.

Как видно из рис. 5, дневной ход нормированных значений $[\tau_{0,5}]_{ND}$ в КАО выражен незначительно. В Екатеринбурге в течение светового дня кривые временного хода $[PM_{2,5}]_{ND}$ и $[\tau_{0,5}]_{ND}$ оказались противоположными по фазе: в утренние часы фиксируется рост $[\tau_{0,5}]_{ND}$ и снижение $[PM_{2,5}]_{ND}$, в вечерние часы наблюдается снижение $[\tau_{0,5}]_{ND}$ и увеличение $[PM_{2,5}]_{ND}$. В дневное время обнаруживаются максимальные $[\tau_{0,5}]_{ND}$ и минимальные $[PM_{2,5}]_{ND}$. Различие в характере дневного хода АОТ в двух пунктах мониторинга позволяет говорить о значимом влиянии Екатеринбурга на величину АОТ атмосферы, ранее установленном в [27]. Вероятная причина этого различия — увеличение аэрозольной нагрузки за счет роста индустриального загрязнения над городом. Рост концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ в дневное время не наблюдается из-за интенсивного действия конкурирующего процесса вертикального конвективного перемешивания атмосферы.

2.2. Регрессионные модели

В регрессионном анализе использовались массивы среднесуточных концентраций аэрозолей $PM_{2,5}$, фотометрических измерений АОТ, метеорологических и географических параметров, приведенные в разд. 1 настоящей работы, для двух пунктов измерений на Среднем Урале.

Простейшей статистической моделью для оценки концентрации частиц $PM_{2,5}$ является уравнение линейной регрессии, в котором единственным предиктором служит величина АОТ на длине волны 0,5 мкм. На множестве исходных данных методом наименьших квадратов были найдены значения коэффициентов этих линейных зависимостей. В результате были получены следующие соотношения: Екатеринбург —

$$PM_{2,5} = 7,74 + 7,32\tau_{0,5}; R = 0,10; R^2 = 0,01; \quad (1)$$

КАО —

$$PM_{2,5} = 3,94 + 13,33\tau_{0,5}; R = 0,27; R^2 = 0,07. \quad (2)$$

Хотя уравнения регрессии статистически значимы ($p < 0,05$), качество регрессии невысоко ($R^2 < 0,05$). Применение моделей (1), (2) для восстановления концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ представляется малообоснованным, но они могут быть использованы для сравнения с аналогичными моделями, разработанными для других регионов планеты [9–11].

Качество модели можно повысить путем учета дополнительных предикторов.

Для создания прогностической модели оценки приземной концентрации частиц $PM_{2,5}$ использовался метод множественной линейной регрессии. В качестве дополнительных предикторов рассматривались метеорологические и географические параметры.

Концентрации частиц $PM_{2,5}$ и АОТ имеют сильно асимметричные распределения (рис. 3). Логарифмическое преобразование этих параметров позволило получить приблизительно нормальные распределения характеристик и существенно улучшить качество прогноза.

Расчет коэффициентов парных корреляций между аэрозольными, метеорологическими и географическими параметрами позволил отбросить статистически незначимые предикторы, исключить зависимые переменные (модули парных корреляций между которыми превышают 0,5) и ранжировать все значимые предикторы по степени их статистической связи.

Для построения многофакторных моделей применялась пошаговая процедура присоединения/удаления переменных. Прежде всего, выбиралась переменная, наиболее сильно коррелированная с $\ln PM_{2,5}$, и находилось соответствующее линейное регрессионное уравнение первого порядка. Далее в уравнение добавлялась вторая переменная и определялись частные коэффициенты корреляции для переменных. Полученное второе регрессионное уравнение проверялось на статистическую значимость, и отмечалась степень изменения коэффициентов корреляции и детерминации. Соответствующая переменная сохранялась в уравнении или исключалась из него в зависимости от результатов проверки.

Такая проверка целесообразности использования переменной в параметрической формуле проводилась на каждом этапе присоединения нового предиктора к уравнению. Параметрическое соотношение считалось сформированным, когда вновь включаемые переменные не приводили к значимому улучшению качества модели — увеличению R^2 .

В результате были получены следующие ранжированные списки возможных предикторов для статистических моделей для оценки значений $\ln PM_{2,5}$ (в скобках указаны значения парных коэффициентов корреляции соответствующей величины с $\ln PM_{2,5}$):

Екатеринбург: $\ln h$ (–0,51), $\ln \tau_{0,5}$ (0,31), P (0,31), Hu (0,29), $NDVI$ (–0,27);

КАО: $\ln h$ (–0,48), $\ln \tau_{0,5}$ (0,44), $NDVI$ (–0,29), Hu (0,26), P (0,25).

В результате на проанализированном множестве исходных данных получены следующие статистические уравнения для оценки логарифма концентрации частиц $PM_{2,5}$:

Екатеринбург —

$$\ln PM_{2,5} = -7,8 + 0,19 \ln \tau_{0,5} - 0,0015 blh + 0,0001P - 0,006Hu - 0,145NDVI; \\ R = 0,77; R^2 = 0,60; \quad (3)$$

КАО —

$$\ln PM_{2,5} = -10,01 + 0,45 \ln \tau_{0,5} - 0,002 blh + 0,0001P - 0,011Hu - 0,663NDVI; \\ R = 0,78; R^2 = 0,61. \quad (4)$$

Полученные уравнения содержат только статистически значимые независимые предикторы.

На рис. 6 представлены диаграммы рассеяния значений $\ln PM_{2,5}$, рассчитанных на основе измеренных приземных концентраций аэрозоля и регрессионных моделей (3) и (4).

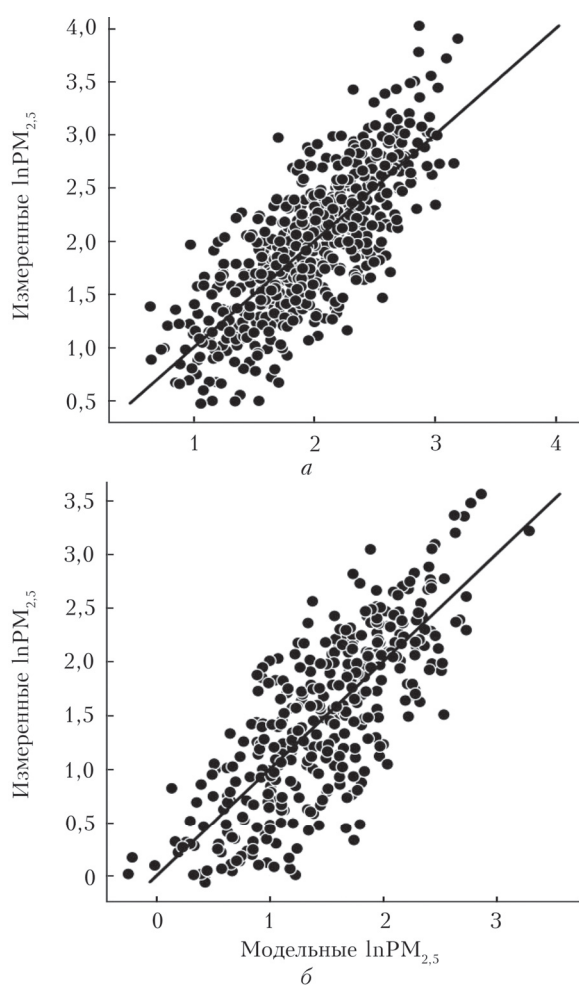


Рис. 6. Диаграмма рассеяния для значений $\ln PM_{2,5}$, рассчитанных на основе измеренных приземных концентраций аэрозоля и регрессионных моделей (3) для г. Екатеринбурга (а) и (4) для КАО (б)

Качество построенных многофакторных моделей удовлетворительное (коэффициент детерминации $R^2 = 0,60$ для Екатеринбурга и $0,61$ для КАО). Распределения абсолютных невязок регрессионных моделей существенно не отличаются от нормального распределения. Средняя величина абсолютных ошибок составляет для Екатеринбурга $0,09$ (18% от среднего значения), для КАО — $0,11$ (22% от среднего значения), средние относительные ошибки составляют 23% для Екатеринбурга и 15% для КАО.

Таким образом многофакторные регрессионные модели имеют более высокое качество по сравнению с однофакторными моделями.

Заключение

Проведен анализ данных измерений аэрозольных параметров в приземном слое с помощью комплектов оптических сенсоров Panasonic $PM_{2,5}$ и во всем атмосферном столбе фотометрическим методом в городском и фоновом пунктах наблюдений на Среднем Урале за 2016–2019 гг. На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы.

Внутригодовой ход нормированных среднемесячных аэрозольных характеристик в приземном слое и во всем атмосферном столбе носит ярко выраженный сезонный характер. Максимальные значения нормированных $\tau_{0,5}$ наблюдаются в летние месяцы. Напротив, наибольшая приземная концентрация аэрозолей $PM_{2,5}$ наблюдается в холодный период (в 2,0–4,5 раза выше, чем в теплый).

Суточный ход нормированных среднечасовых концентраций частиц $[PM_{2,5}]_{ND}$ характеризуется наличием двух максимумов в утренние и вечерние часы, обусловленных развитием температурной инверсии в приземном слое атмосферы. Наибольшая амплитуда суточного хода концентрации мелкодисперсного аэрозоля наблюдается летом в фоновом пункте наблюдения. Меньшая изменчивость концентрации частиц $[PM_{2,5}]_{ND}$ в Екатеринбурге, вероятно, связана с образованием городского острова тепла, уменьшающего колебания высоты приземного слоя.

Для Среднего Урала впервые были построены статистические модели для оценки концентрации аэрозольных частиц $PM_{2,5}$. Многофакторные регрессионные модели оценки значений логарифма концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ имеют существенно более высокое качество по сравнению с однофакторными моделями. В качестве значимых предикторов были установлены: высота пограничного слоя (blh , м), $\ln \tau_{0,5}$, нормализованный относительный индекс растительности ($NDVI$), относительная влажность воздуха (Hu , %), давление (P , Па). Эти предикторы в рамках линейных регрессионных моделей объясняют ~60% вариаций логарифма среднесуточных концентраций приземного аэрозоля; оставшаяся доля не может быть объяснена параметрами, рассмотренными в рамках настоящей работы.

Полученные статистические многофакторные модели могут быть использованы для оценки пространственной структуры концентрации приземного аэрозоля для региона Среднего Урала на основе спутниковых измерений и данных реанализа.

Благодарности. Авторы работы выражают благодарность коллегам: Панченко М.В., Сакерину С.М., Горде С.Ю., Бересневу С.А., Маркелову Ю.И., Holben B.N., Smirnov A.V., Matsumi Y., Imasu R. за содействие в проведении измерений.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-05-50138.

Список литературы

1. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B. (eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom; New York, USA. In press. DOI: 10.1017/9781009157896.
2. Arden Pope C., Coleman N., Pond Z.A., Burnett R.T. Fine particulate air pollution and human mortality: 25+ years of cohort studies // Environ. Res. 2020. V. 183. P. 108924. DOI: 10.1016/j.envres.2019.108924.
3. Hoek G., Krishnan R.M., Beelen R., Peters A., Ostro B., Brunekreef B., Kaufman J.D. Long-term air pollution exposure and cardio-respiratory mortality: A review // Environ. Health. 2013. V. 12. Art. N 43.
4. Xing Y.F., Xu Y.H., Shi M.H., Lian Y.X. The impact of PM2.5 on the human respiratory system // J. Thorac. Dis. 2016. V. 8, N 1. P. E69–E74. DOI: 10.3978/j.issn.2072-1439.2016.01.19.
5. Vohra K., Vodonos A., Schwartz J., Marais E.A., Sulprizio M.P., Mickley L.J. Global mortality from outdoor fine particle pollution generated by fossil fuel combustion: Results from GEOS Chem // Environ. Res. 2021. V. 195. P. 110754. DOI: 10.1016/j.envres.2021.110754.
6. Конвенция о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния. [Электронный ресурс]. URL: https://un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/transboundary.shtml/ (дата обращения: 19.06.2022).
7. Air Quality Guidelines: Global Update 2005: Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide, and Sulfur Dioxide. World Health Organization, 2006. 484 p.
8. Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» I. Гигиенические нормативы содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений.
9. Kaufman Y.J., Tanre D. Algorithm for Remote Sensing of Tropospheric Aerosol from MODIS, Product ID MOD04. 1998. [Электронный ресурс]. URL: https://modis-imaes.gsfc.nasa.gov/_docs/MOD04:MYD04_ATBD_C005_rev1.pdf (дата обращения: 20.06.2022).
10. Remer L.A., Kaufman Y.J., Tanre D., Mattoo S., Chu D.A., Martins J.V., Li R.-R., Ichoku C., Levy R.C., Kleidman R.G., Eck T.F., Vermote E., Holben B.N. The MODIS aerosol algorithm, products, and validation // J. Atmos. Sci. 2005. V. 62. P. 947–973.
11. Engel-Cox J.A., Holloman C.H., Coutant B.W., Hoff R.M. Qualitative and quantitative evaluation of MODIS satellite sensor data for regional and urban scale air quality // Atmos. Environ. 2004. V. 38, iss. 16. P. 2495–2509. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2004.01.039.
12. Wang J. Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM2.5 mass: Implications for air quality studies // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 21, N 30. DOI: 10.1029/2003GL018174.
13. Yang Q., Yuan Q., Yue L., Li T., Shen H., Zhang L. The relationships between PM2.5 and aerosol optical depth (AOD) in mainland China: About and behind the spatio-temporal variations // Environ Pollut. 2019. P. 248:526–535. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.02.071.
14. Schaap M., Apituley A., Timmermans R.M.A., Koelemeijer R.B.A., de Leeuw G. Exploring the relation between aerosol optical depth and PM2.5 at Cabauw, the Netherlands // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9, iss. 3. P. 909–925. DOI: 10.5194/acp-9-909-2009.
15. Koelemeijer R., Homan C.D., Matthijsen J. Comparison of spatial and temporal variations of aerosol optical thickness and particulate matter over Europe // Atmos. Environ. 2006. V. 40. P. 5304–5315. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.04.044.
16. Liu Y., Sarnat J.A., Kilaru A., Jacob D.J., Koutrakis P. Estimating ground-level PM2.5 in the eastern United States using satellite remote sensing // Environ. Sci. Technol. 2005. V. 39, N 9. P. 3269–3278. DOI: 10.1021/es049352m.
17. Ahmad M., Alam K., Tariq S., Anwar S., Nasir J., Mansha M. Estimating fine particulate concentration using a combined approach of linear regression and artificial neural network // Atmos. Environ. 2019. V. 219. P. 117050. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117050.
18. Gupta P., Christopher S.A. Particulate matter air quality assessment using integrated surface, satellite, and meteorological products: Multiple regression approach // J. Geophys. Res. Atmos. 2009. N 114. P. 1–13. DOI: 10.1029/2008JD011496.
19. Архив климатических данных Climatebase.ru [Электронный ресурс]. URL: <http://climatebase.ru/station/23256> (дата обращения: 1.07.2022).
20. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2019 году». [Электронный ресурс]. Официальный сайт Министерства природных ресурсов и экологии Свердловской области. URL: <https://mprso.midural.ru/article/show/id/1126> (дата обращения: 28.06.2022).
21. Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович С.А. Солнечный фотометр для научного мониторинга (аппаратура, методики, алгоритмы) // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14, № 12. С. 1162–1169.
22. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET – a federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Rem. Sens. Env. 1998. V. 66, N 1. P. 1–16.
23. Garcia O.E., Diaz J.P., Exposito F.J., Diaz A.M., Dubovik O., Dermin Y., Dubuisson P., Roger J.C. Shortwave radiative forcing and efficiency of key aerosol types using AERONET data // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12. P. 5129–5145.
24. Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России / С.М. Сакерин (ред.). Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012. 484 с.

25. Nakayama T., Matsumi Y., Kawahito K., Watabe Y. Development and evaluation of a palm-sized optical PM_{2.5} sensor // *Aerosol Sci. Technol.* 2018. V. 52, iss. 1. P. 2–12. DOI: 10.1080/02786826.2017.1375078.
26. Губанова Д.П., Беликов И.Б., Еланский Н.Ф., Скороход А.И., Чубарова Н.Е. Изменчивость приземной концентрации аэрозолей PM_{2,5} в г. Москве по наблюдениям в Метеорологической обсерватории МГУ // *Оптика атмосф. и океана*. 2017. Т. 30, № 12. С. 1033–1042; Gubanova D.P., Belikov I.B., Elansky N.F., Skorokhod A.I., Chubarova N.E. Variations in PM_{2.5} surface concentration in Moscow according to observations at MSU Meteorological Observatory // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 3. P. 290–299.
27. Поддубный В.А., Лужецкая А.П., Маркелов Ю.И., Кабанов Д.М. Оценка влияния города на аэрозольное замутнение атмосферы по данным двухточечных измерений «фон–промышленный город» // *Оптика атмосф. и океана*. 2012. Т. 25, № 4. С. 319–326; Poddubny V.A., Luzhetskaya A.P., Markelov Yu.I., Kabanov D.M. Estimate of the urban effect on aerosol turbidity of the atmosphere according to data of two-point “background–industrial city” measurements // *Atmos. Ocean. Opt.* 2012. V. 25, N 5. P. 364–371.

A.P. Luzhetskaya, E.S. Nagovitsyna, E.V. Omelkova, V.A. Poddubny. Temporal variability and relationship between the surface concentration of PM_{2.5} and the aerosol optical depth according to measurements in the Middle Urals.

Measurements of aerosol parameters in the surface air layer with sets of Panasonic PM_{2.5} optical sensors and throughout the atmospheric column by the photometric method at urban and background observation sites in the Middle Urals for 2016–2019 are analyzed. The features of the intraannual and diurnal variations in aerosol parameters in the surface air layer and in the atmospheric column are compared. Correlations between the PM_{2.5} concentration, AOD, and meteorological parameters in the two regions are also studied. Multivariate regression models for estimating the logarithm of PM_{2.5} concentration ensure much higher quality than single-factor models. The significant predictors are determined: boundary layer height (blh, m), ln AOD, normalized relative vegetation index (NDVI), relative air humidity (Hu, %), and air pressure (P, Pa).