

СТАТЬИ

УДК 630*22:504.054(470.57)

**КОНЦЕНТРАЦИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ
В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ ГОРОДСКИХ НАСАЖДЕНИЙ
(НА ПРИМЕРЕ Г. УФА)**

Байтурина Р.Р.

*ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет», Уфа;
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа,
e-mail: aspirant_bsau@mail.ru*

В условиях крупного города поступление мелкодисперсных частиц в атмосферу преимущественно обуславливается наличием промышленных предприятий и выбросами автотранспорта. Одними из основных и наиболее устойчивых не только в Уфе, но и во всех городах мира считаются выбросы транспортных средств. Целью работы является изучение концентрации мелкодисперсных частиц PM_{2.5}/PM₁₀ в атмосферном воздухе недалеко от автомобильных дорог и в насаждениях на территории г. Уфы. Для определения пылевых частиц на участках использовался DT-9881M Прибор экологического контроля. В ходе проведения исследований установлены зависимости между количеством автотранспорта и концентрациями взвешенных частиц PM_{2.5}/PM₁₀ около дорог. Соответствующей связи от количества автотранспорта и концентрации мелкодисперсных частиц в насаждениях не выявлено. Результаты проведенных исследований говорят о существенном снижении концентраций мелкодисперсных частиц PM_{2.5}/PM₁₀ в насаждениях, что свидетельствует о положительном влиянии на состав атмосферного воздуха и, следовательно, на самочувствие человека. Замеры по содержанию формальдегида и угарного газа на всех точках измерения дали отрицательные показатели. Зеленые насаждения, выполняя санитарно-гигиеническую роль, поглощают пыль и токсичные газы, оказывают дендротерапевтическое влияние на горожан. Они выполняют экологическую, биологическую, эстетическую и оздоровительную функции. С учетом этого нужно предельно приближать древесные насаждения к местам обывденной жизни человека. Выполненные исследования могут быть использованы для расчета рисков здоровья населения от воздействия выбросов автотранспортных средств и объективной оценки содержания PM_{2.5}/PM₁₀ на территориях свободных от древостоев.

Ключевые слова: городские насаждения, мелкодисперсные частицы PM_{2.5} и PM₁₀, автотранспорт, здоровье населения, г. Уфа

**THE CONCENTRATION OF FINE PARTICLES IN THE ATMOSPHERIC AIR
OF URBAN PLANTS (BY THE EXAMPLE OF UFA)**

Bayturina R.R.

*Bashkir State Agrarian University, Ufa;
Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, e-mail: aspirant_bsau@mail.ru*

In a large city, the entry of fine particles into the atmosphere is mainly due to the presence of industrial enterprises and vehicle emissions. Emissions from vehicles are considered to be one of the main and most sustainable not only in Ufa, but in all cities of the world. The aim of this work is to study the concentration of fine particles PM_{2.5} / PM₁₀ in the atmospheric air near highways and in plantations on the territory of Ufa. DT-9881M Environmental Monitoring Instrument was used to detect dust particles at the sites. In the course of the research, relationships were established between the number of vehicles and the concentrations of PM_{2.5} / PM₁₀ suspended particles near roads. No corresponding relationship was found between the number of vehicles and the concentration of fine particles in the plantations. The results of the studies carried out indicate a significant decrease in the concentration of fine particles PM_{2.5} / PM₁₀ in plantations. This indicates a positive effect on the composition of atmospheric air and, consequently, on human well-being. Measurements for the content of formaldehyde and carbon monoxide at all measurement points gave negative values. Green spaces, fulfilling a sanitary and hygienic role, absorb dust and toxic gases, and exhibit a dendrotherapeutic effect on townspeople. They fulfill ecological, biological, aesthetic and health-improving functions. With this in mind, it is necessary to bring tree plantations as close as possible to the places of everyday human life. The studies performed can be used to calculate the health risks of the population from the impact of vehicle emissions and to objectively assess the content of PM_{2.5}/PM₁₀ in areas free from tree stands.

Keywords: fine particles PM_{2.5} and PM₁₀, vehicles, urban plantings, public health, Ufa

В последние десятилетия все больше в городах становится актуальным вопрос уменьшения загрязнения воздуха мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{2.5}/PM₁₀, содержащимися в атмосферном воздухе, с диаметром менее 2,5 мкм (PM_{2.5}) и твердыми частицами с диаметром менее 10 мкм (PM₁₀). Эти частицы приносят угрозу здоровью человека, так как проникают в легкие, вызывая ряд заболе-

ваний [1, 2]. Анализ научных работ свидетельствует о негативном влиянии скопления мелкодисперсных частиц фракции PM_{2.5}, повышающих смертность людей и количество сердечно-сосудистых заболеваний [3]. N. Künzli, R. Kaiser, Medina и др. (2016 г.) провели оценку влияния загрязнения атмосферного воздуха (общего) транспортными средствами на здоровье населения в Австрии, Франции и Швейцарии, включая

случаи заболеваемости и смертности. Авторы пришли к выводу, что загрязнение воздуха стало причиной 6% смертельного исхода (более 40 тыс. случаев в год). Около 50% всей смертности, причиной которой стало загрязнение воздуха, связано с движущимся автотранспортом, на которое приходилось более 25 тыс. новых случаев хронического бронхита (взрослые); 290 тыс. эпизодов бронхита (у детей); 0,5 млн приступов астмы; 16 млн человеко-дней ограниченной деятельности. Загрязнение воздуха, связанное с дорожным движением, остается одной из основных задач общественного здравоохранения в Европе [4]. В Китае на основе спутниковых наблюдений постоянно проводят анализ концентрации PM10 от распределения населения по территориально-пространственному отношению [5].

Нормативы содержания мелкодисперсных частиц в воздухе определены в официальных документах Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) и Евросоюза [2, 3, 6]. В России стандарты мелкодисперсных фракций PM2.5/PM10 нормируют с 2010 г. Среднесуточная предельно допустимая концентрация (ПДК) составляет 0,035 мг/м³ (PM2.5) и 0,06 мг/м³ (PM10); максимальная разовая – 0,16 мг/м³ и 0,3 мг/м³; среднегодовая – 0,025 мг/м³ и 0,04 мг/м³ соответственно [1].

Отметим, что до 2016 г. определения концентраций мелкодисперсной пыли носили научно-исследовательский характер [7–9] за исключением организованного автоматизированного мониторинга в Москве, Санкт-Петербурге, Сочи, Казани [10].

В условиях крупного промышленного центра поступление мелкодисперсных частиц в атмосферу большей частью обусловлено антропогенными источниками: выбросами автотранспорта и промышленных предприятий [3]. Частицы PM2.5 формируются в результате сжигания угля и выброса выхлопных газов, в процессе сгорания топлива и работы дизельных двигателей автотранспортных средств, а также износа дорожного полотна и шин автомобилей. Мелкодисперсные частицы сажи за счет своих малых размеров, определяющих естественное выведение из атмосферы, и сорбционных свойств могут усиливать свою токсичность поглощением вредных веществ из выбросов и переносить на огромные расстояния, угрожая здоровью человека и окружающей среде [1].

Цель исследования – оценка концентрации мелкодисперсной пыли PM10 и PM2,5 в атмосферном воздухе урбанизированных территорий с учетом его влияния на состоя-

ние человека. Интерес к изучению влияния насаждений на урбанизированных территориях не теряет актуальности. Для решения вопросов улучшения комфортности и качества жизни горожан результаты исследований могут использоваться как базовые инструменты.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования выбраны участки вдоль автомагистралей с интенсивным движением (ГОСТ 17.2.3.01-86) и парки г. Уфы с учетом натурального обследования. Ассортимент представлен местной флорой и интродуцентами. Кустарниковая растительность состоит из 22 видовых представителей, 12 из которых произрастают на южных территориях Уфы и 15 – на северных. По возрастному показателю доминируют 30–60-летние деревья. Озелененная территория города составляет 38%. Для изучения содержания мелкодисперсных частиц на промышленных территориях в качестве объекта выбран участок на территории завода Kronospan.

С помощью прибора экологического контроля DT-9881M на различных расстояниях от автотранспортных магистралей измерялось содержание взвешенных твердых частиц с точностью 50% при 0,3 мкм и 100% для частиц > 0,45 мкм при базовой точности детектора содержания HCHO и CO ±5% на уровне 1,3 м от поверхности почвы. Учитывались значения температуры и относительной влажности воздуха. При видеофиксации интенсивности движения автотранспорта учитывались двустороннее движение и все проходящие транспортные средства, от легковых до грузовых автомобилей, автобусов и мотоциклов, при усреднении показателей в течение часа. Методом смыва определяли количество адсорбированной пыли листьями древесных растений. Проведена статистическая обработка полученных результатов.

Результаты исследования и их обсуждение

Концентрация автотранспортных выбросов в мегаполисах достигает 60–90%, в составе которых преобладают PM2.5/PM10 и сажа [11]. В Лондоне проводились исследования по прогнозированию придорожных концентраций PM10/PM2,5, протестировав наиболее эффективные модели, в том числе для их уменьшения. PM2.5 выбросы от автотранспортных средств перемещаются на короткие расстояния и под-

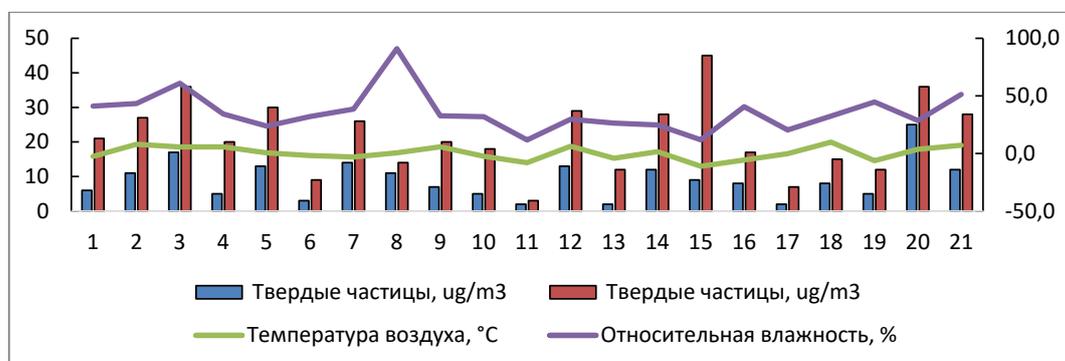
вергаются гравитационному осаждению [12], где скорость ветра снижается в результате блокирующего эффекта растений [13]. Об этом свидетельствуют полученные результаты исследований: существенное уменьшение содержания PM_{2.5}/PM₁₀ в насаждениях, независимое от интенсивности движения автотранспорта.

Несмотря на то, что охват наземными станциями мониторинга воздуха в мире продолжает расти, все еще есть большие части мира, которые не имеют доступа к измерениям качества воздуха в реальном времени. Одним из инструментов для устранения некоторых из этих пробелов может стать AirVisual, который предоставляет некоторые **оценочные** данные AQI для мест с отсутствием наземных измерений. Оценки AQI рассчитываются на основе спутниковых данных PM_{2.5}. Ежедневный анализ со спутниковых данных по г. Уфе выявляет различные результаты, в зависимости от климатических условий и наличия в атмосферном воздухе загрязняющих веществ (рисунок). К примеру, 30 апреля 2021 г. зафиксирована концентрация 4,1 µg/m³ загрязнителя PM_{2,5} с оценкой индекса 17 AQI США **Хорошо** при погодных условиях: Температура 8 °С, Влажность 49%, Ветер 18 km/h, Давление 1022 mb. Прогноз на ближайшую неделю также положителен – индекс AQI **Хорошо**. Качество воздуха находится удовлетворительным, и загрязнение воздуха незначительное – находится в пределах нормы (согласно нормативам). Оценочные показатели AQI веб-сайта AirVisual в дни проведения измерений на изучаемых участках отвечали данным прибора экологического контроля DT-9881M по общему состоянию загрязнения воздуха в городе. Замеры выявили, что в условиях непрерывных измерений разовые концентрации взвешенных частиц

могут достигать уровня 1,5 ПДК. Во время исследований вдоль дорог с интенсивным передвижением транспорта установлена взаимосвязь содержания PM_{2.5}/PM₁₀. Достоверность аппроксимации и адекватность зависимости подтверждена подсчитанными величинами коэффициента корреляции. Сила связи прямая, заметная и соответствует 0,601 (R), F (число степеней свободы) равен 12, T (критерий Стьюдента) – 2,607. Данное число степеней свободы соответствует критическому значению T-критерия Стьюдента – 2,179, выражена статистически значимая зависимость признаков (p < 0,05). Коэффициент детерминации R² равен 0,362 при $y = -5,89805 + 0,01534 * x$.

Выявлено значительное уменьшение содержания PM_{2.5}/PM₁₀ в древостоях, которое не зависит от интенсивности движения автотранспорта на расстоянии 500 м полотна дороги. Об этом свидетельствуют полученные значения: R = 0,352. Наблюдается умеренная теснота связи (по шкале Чеддока) при прямой связи, F = 1,301, T (критическое значение) = 2,179. При статистически незначимой зависимости признаков p > 0,05 ($t_{набл} < t_{крит}$; $y = 2,01553 + 0,00194 * x$. R² = 0,124.

Завод Kronospan – одно из крупнейших в мире промышленных предприятий по производству древесных плит находится вплотную к Уфе, рядом с микрорайоном Шакша. На территории измерения по содержанию мелкодисперсных частиц с октября по декабрь 2021 г. не выявили отклонений от норм стандарта, вне зависимости от колебаний – в пределах от 2 до 25 мкг/м³ (PM_{2.5}) и от 3 до 45 мкг/м³ (PM₁₀). Тесная связь между метеоданными и твердыми частицами не обнаружена ни на территории города, ни на территории завода. Коэффициент корреляции содержания PM_{2.5}/PM₁₀ от температуры воздуха составил 0,5, а от относительной влажности воздуха – 0,26.



Концентрация мелкодисперсных частиц в зависимости от метеорологических условий

Придерживаясь нормативов качества воздушной среды WHO и стандартов качества воздуха по концентрации мелкодисперсных частиц PM_{2.5} состояние воздуха оценивается в пределах 0–35 мкг/м³ как **хорошее** в насаждениях и относительно **среднее** (35–75 мкг/м³) или **среднезагрязненное** (75–150 мкг/м³), **высокозагрязненное** (150–200 мкг/м³) на участках скопления людей вдоль интенсивного видения автотранспорта.

Большой поток автомобилей, например во время утренних и вечерних пиковых нагрузок, вызывает увеличение накопления антропогенных выбросов твердых частиц от источников движения. Исследования также подтвердили, что обычно 1–2 часа в утренние часы PM_{2.5} после часа пик; это представляет собой образование и накопление вторичных загрязнителей в результате фотохимической реакции. Затем дисперсия PM_{2.5} была ускорена, а преобразование вторичных загрязнителей было ограничено из-за увеличения солнечной радиации, температуры и толщины пограничного слоя, а также снижения относительной влажности. Таким образом, концентрация PM_{2.5} постепенно снижалась в полдень, достигая минимума в течение дня.

Движение сильно нагретого воздуха ускорило распространение PM_{2.5}/PM₁₀ в условиях высоких температур. Исследования показали, что в результате низкой температуры поверхности зимой повышение температуры может привести к образованию инверсионного слоя; это уменьшает вертикальный поток воздуха и может увеличить концентрацию PM_{2.5}/PM₁₀ у земли. Широко распространена отрицательная корреляция между скоростью ветра и концентрацией PM_{2.5}/PM₁₀. Влияние направления ветра на концентрацию PM_{2.5} в городе во многом зависит от распределения местных географических условий. На городских дорогах направление ветра параллельно дороге способствовало рассеиванию загрязняющих веществ, в результате чего концентрация загрязняющих веществ на улице была низкой. Направление ветра перпендикулярно улице вызывает накопление загрязняющих веществ на улице из-за препятствий со стороны зданий. Наличие осадков отрицательно коррелирует с концентрацией PM_{2.5}/PM₁₀ из-за значительной способности их уменьшать, так как дождь смывает взвешенные в воздухе частицы на землю.

Выявлено снижение запыленности воздуха в летний период на озелененных участках в пределах 30–40% по сравнению с открытыми и в два-три раза в парковых зонах. В зимние месяцы пылефильтрующий эффект снижается в 1,5–10,0 раз по сравнению с вегетационным периодом. Повышенная абсорбционная способность листовой поверхности выявлена у *Acer negundo* L. Для проведения исследований в качестве образцов собраны листья по 100 шт. вдоль автомагистрали (условно зона сильного загрязнения) и в насаждениях (зона слабого загрязнения). Масса мелкодисперсной пыли на площади листа клена в соответствующих зонах в среднем 1,5 и 0,3 г/м². Весовые показатели абсорбированной пыли *Ulmus laevis* Pall., находящихся вблизи автомагистралей, различались в пределах 8,2 г/м² и в насаждениях на расстоянии более 50 м от дороги – 5 г/м². В зоне сильного загрязнения *Betula pendula* Roth. и *Populus balsamifera* L. удерживают листовой поверхностью от 0,4 до 12,0 г/м², в зоне слабого загрязнения – от 0,9 до 6,0 г/м² пылевых фракций. Лист *Tilia cordata* Mill. абсорбирует пылевые частицы в зоне загрязнения в среднем 8,0 г/м², на расстоянии 50–100 м от интенсивного движения транспорта – 5,0 г/м². Исследования И.Л. Бухариной и А.А. Двоглазовой [14] объясняют неспособность удерживать пыль насаждениями вдоль автомагистралей увеличением движения воздуха. В сравнении по показателям пылефильтрующего эффекта листья *Betula pendula* значительно удерживают пылевые фракции, чем листья *Acer negundo*, на 13 г/м² [15].

Наиболее важным вопросом в целях повышения устойчивости лесных экосистем зеленых зон урбанизированных территорий остается определение нормативов по регулированию степени загрязнения воздуха и почвы. Необходимо принимать во внимание накопление химических веществ в основных элементах лесного биогеоценоза при минимальных количествах выбросов в атмосферу. С помощью прибора DT-9881M возможно определить наличие токсичных веществ канцерогенного и тератогенного характера, возникающих в том числе в результате работы топливных двигателей, износа дорожного полотна и шин автомобилей. Содержание их в атмосфере не должно быть выше 0,1 частей на 1 млн. В сравнении с нормативами в закрытых помещениях согласно постановлению департамента Министерства здравоохранения,

труда и занятости США (OSHA) концентрация CO не должна превосходить 50 PPM (0,005%). В пределах нормы установлен уровень 0–1 PPM. Замеры по содержанию HCHO и CO на всех точках измерения в проведенных исследованиях по г. Уфе дали отрицательные показатели (содержание 0 PPM).

Заключение

В случае отклонения от установленных нормативов существуют некоторые риски для здоровья человека, которые провоцируются в результате наличия загрязнителей в атмосферном воздухе от автотранспорта и промышленных предприятий. В ходе проведенного анализа концентраций мелкодисперсных фракций, HCHO и CO на участках вдоль дорог г. Уфа с движением транспорта свыше 2 тыс. шт/час содержание веществ на участках не превышали предельно допустимых концентраций. Выявлена зависимость содержания взвешенных твердых частиц PM_{2.5}/PM₁₀ от интенсивности движения автотранспорта. Примечательно, что тесной связи между количеством автотранспорта и концентрацией мелкодисперсных пылевых частиц в насаждениях не выявлено. Следовательно, древесные посадки служат мощным фильтрующим барьером для загрязнителей вдоль автомагистралей, в том числе вследствие значительного уменьшения содержания PM_{2.5}/PM₁₀ в составе атмосферного воздуха.

Рекомендуется уделять пристальное внимание городским древесным видам, как основному фактору улучшения окружающей среды и здоровья жителей. Зеленые насаждения, выполняя санитарно-гигиеническую роль, поглощают пыль и токсичные газы, оказывают дендротерапевтическое влияние на жителей. Они выполняют экологическую, биологическую, эстетическую и оздоровительную функции. С учетом этого нужно предельно приближать древесные насаждения к местам обывденной жизни человека. Проведенные исследования рекомендуются для применения при определении рисков здоровью людей от существенных загрязняющих выбросов автотранспортными средствами в воздушную среду и осуществления независимой оценки согласно принятым нормативам концентраций загрязнителей на урбанизированных территориях.

Список литературы

1. Официальный сайт государственного природоохранного бюджетного учреждения «Мосэкомониторинг» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mosecom.ru> (дата обращения: 27.05.2022).
2. Environmental Protection Agency. National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter; Final rule. Federal Register. 2006. Vol. 71. 94 p.
3. Prosviryakova I.A., Shevchuk L.M. Hygienic assessment of Pm10 and Pm2.5 contents in the atmosphere and population health risk in zones influenced by emissions from stationary sources located at industrial enterprises. Health Risk Analysis. 2018. Vol. 2. P. 14–22.
4. Künzli N., Kaiser R., Medina S., Studnicka M., Chanel O., Filliger P., Herry M., Sommer H. Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: A European assessment. Lancet. 2000. Vol. 356 (9232). P. 795–801.
5. Cheng M., Chui C. Yang. The effect of coarse particles on daily mortality: a case – crossover study in a subtropical city, Taipei, Taiwan. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2016. № 13. P. 347. DOI: 10.3390/ijerph13030347.
6. Дрозд В.А., Кичу П.Ф., Ананьев В.Ю., Жигаев Д.С., Лисицкая И.Г., Олесик С.М., Холодов А.С., Иванов В.В., Чайка В.В., Голохваст К.С. Годовые колебания частиц PM₁₀ в воздухе Владивостока // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 5 (2). С. 646–651.
7. Доклад об экологической ситуации на территории республики Башкортостан в 2018 году: доклад Министерства природопользования и экологии Республики Башкортостан. Уфа, 2018. 165 с.
8. Гилева О.В., Волкова М.В. Инструментальные исследования мелкодисперсных частиц в атмосферном воздухе // Фундаментальные и прикладные аспекты анализа риска здоровью населения: материалы Всероссийской научно-практической интернет-конференции молодых ученых и специалистов Роспотребнадзора. Пермь. 2015. С. 213–216.
9. Боровлев А.Э., Кунгурцев С.А., Мигаль Л.В., Соловьев В.И. Загрязнение атмосферного воздуха города Белгорода частицами пыли малых размеров // Ученые записки: электронный научный журнал Курского государственного университета. 2013. № 1 (25). С. 269–272.
10. Предприятия Башкирии в 2020 году оштрафованы на 1 млн рублей за загрязнение воздуха // Коммерсантъ. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4722003> (дата обращения: 15.05.2022).
11. Боровлев А.Э., Кунгурцев С.А., Мигаль Л.В., Соловьев В.И. Загрязнение атмосферного воздуха города Белгорода частицами пыли малых размеров // Ученые записки: электронный научный журнал Курского государственного университета. 2013. № 1 (25). С. 269–272.
12. Chiam Z., Song X.P., Lai H.R., Tan H.T.W. Particulate matter mitigation via plants: Understanding complex relationships with leaf traits. Sci. Total Environ. 2019. Vol. 688. P. 398–408. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.263.
13. Tomson M., Kumar P., Barwise Y., Perez P., Forehead H., French K., Morawska L., Watts J.F. 2021. Green infrastructure for air quality improvement in street canyons. Environ. Int. 2021. Vol. 146. P. 106288.
14. Бухарина И.Л., Двоглазова А.А. Биоэкологические особенности травянистых и древесных растений в городских насаждениях: монография. Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2010. 184 с.
15. Габдрахимов К.М., Байтурина Р.Р. Влияние лесистости территории на здоровье населения // Экобиотех. 2020. Т. 3. № 3. С. 435–443.