

УДК 692.433

Е. Л. Безбородов, Е. В. Сысоева

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ МЕЛКОДИСПЕРСНЫМИ ЧАСТИЦАМИ PM2.5 И PM10

Введение. Статья включает анализ загрязнения воздуха мелкодисперсными частицами основных населенных территорий планеты. Представлены результаты научных исследований ученых, занимающихся данной тематикой. Их анализ опирается на натурные обследования, связанные с отбором проб воздуха и изучением атмосферы с использованием данных спутниковых мониторингов. Представлены общие причины возникновения смертельных болезней дыхательных путей и кровеносной системы у жителей крупных городов. Названы причины ухудшения экологического состояния городской среды.

Материалы и методы. В работе применялись статистические методы обработки данных Росстата, анализ полученных результатов.

Результаты. Описаны выявленные причины возникновения загрязняющих веществ и события, влияющие на их концентрацию. Проанализировано образовавшееся количество мелкодисперсных частиц в воздухе в течение суток с определением пиков превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) для нескольких городов, расположенных на разных континентах. Выявлена зависимость распределения концентрации от интенсивности дорожного движения в различные промежутки дня. Указана взаимосвязь уровня загрязнения воздуха и количества преждевременных смертей. При помощи открытых данных проанализированы основные мегаполисы планеты с выявлением уровня загрязнения мелкодисперсными частицами, рассчитано превышение ПДК по каждой из рассматриваемых территорий.

Выводы. Определены города с наиболее критической обстановкой в части загрязнения воздуха по состоянию на ноябрь 2023 г. Произведен анализ, связывающий плотность населения городов, коэффициент озеленения и уровень загрязнения воздуха частицами PM2.5 и PM10. По результатам проведенного анализа составлена карта мира с указанием мест с наибольшим уровнем загрязнения воздуха.

Ключевые слова: мелкодисперсные частицы, плотность населения, пылевые массы, экологическая безопасность, коэффициент озеленения, лесные пожары, сжигание биомассы, интенсивность транспортного потока, концентрация загрязняющих веществ.

Введение

В соответствии с Указом Президента РФ «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года»¹ целями государственной политики в сфере обеспечения экологической безопасности являются: внедрение инновационных и экологически чистых технологий, развитие экологически безопасных производств, предотвращение дальнейшего загрязнения и уменьшение уровня загрязнения атмосферного воздуха в городах и иных населенных пунктах, ликвидация негативных последствий воздействия антропогенных факторов на окружающую среду.

По данным ЮНЕП загрязнение воздуха мелкодисперсными частицами является причиной порядка 25 % заболеваний людей в мире, среди которых наибольшее распространения получили нарушения работы желудочно-

¹ О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года. Указ Президента Российской Федерации от 19.04.2017 г. № 176. URL: <http://government.ru/docs/all/111285>.

кишечного тракта (ЖКТ) и острые респираторные заболевания. Причиной 7 % смертей и заболеваний (для Москвы, к примеру, это более 1 млн жителей) служит низкое качество воды и неудовлетворительный уровень санитарии, около 5 % смертей (т. е. более 655 000 человек) связаны с загрязнением воздуха.

В резолюции Генеральной Ассамблеи ООН 75/224² описывается новая программа развития городов. В ней предусмотрены мероприятия до 2030 г. Основным акцентом программы является ее адаптация к местным условиям на основе глобальных, региональных, национальных, субнациональных и местных уровней с участием всех заинтересованных сторон.

Очевидно, что урбанизация оказывает прямое или косвенное влияние на цели в области устойчивого развития, т. к. до 65 % задач зависят от мер, принимаемых в городах.

В мире, стремительно стремящемся к урбанизации, крайне важно уделять внимание новой программе развития городов. Она тесно связана с другими глобальными программами, такими как:

- Парижское соглашение по борьбе с изменением климата;
- Сендайская рамочная программа по уменьшению опасности бедствий, рассчитанная на 2015—2030 гг.;
- Аддис-Абебская программа действий по созданию благоприятных условий для финансирования устойчивого развития и укрепления партнерства между государствами и международными организациями с целью искоренения бедности.

В 2019 г. 99 % жителей планеты дышали воздухом с уровнем загрязнения, превышающим допустимые концентрации, рекомендованные Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ). Атмосферу загрязняют сернистый и угарный газы, оксиды азота, приземный озон и другие вещества. Но главный загрязнитель — мелкодисперсная пыль.

У нее много названий: мелкие частицы (*fine particles*), частицы PM2.5, PM10 и т. д. Мелкодисперсная пыль представляет собой мелкие твердые частицы размером не более 2,5 и 10 мкм (соответственно), образующиеся при разрушении вещества или эрозии поверхности и хаотично перемещающиеся в воздухе. Их можно увидеть невооруженным глазом лишь в самых больших концентрациях, например, в виде дыма или смога. В обычном воздухе мелкодисперсная пыль невидима, но вовсе не безвредна для людей, вдыхающих ее всю жизнь.

Пыль присутствует в воздухе повсюду и везде, имеет различный химический, морфологический, дисперсный состав, различные источники и различную плотность скопления. Именно эти характеристики могут уменьшать или увеличивать риски не только заболеваний, но и возможности летального исхода при постоянном проживании.

Мелкодисперсная пыль оседает в дыхательных путях, повреждает легкие и проникает в кровь. Это увеличивает риск ишемической болезни сердца, ин-

² Осуществление решений Конференции Организации Объединенных Наций по населенным пунктам и Конференции Организации Объединенных Наций по жилью и устойчивому городскому развитию и укрепление Программы Организации Объединенных Наций по населенным пунктам (ООН-Хабитат) // 75-я сессия: резолюция 75/224 от 21.12.2020. 8 с. URL: <https://www.refworld.org/ru/legal/resolution/unga/2009/ru/66312>.

сульта, хронической обструктивной болезни легких и инфекций нижних дыхательных путей. Это четверка самых распространенных в мире причин смерти. На шестом месте этого печального рейтинга рак трахеи, бронхов и легких, к которому тоже может привести загрязнение воздуха.

В 2013 г. ВОЗ отнесла мелкодисперсные твердые частицы PM_{2.5} и PM₁₀ к канцерогенам первой группы. Это означает, что они могут повышать риск развития рака, изменяя клеточный метаболизм или повреждая ДНК внутри клеток, нарушая биологические процессы и вызывая неконтролируемое злокачественное деление клеток, приводящее к образованию опухолей. С этого момента мировой интерес к определению влияния загрязняющих веществ на здоровье человека значительно вырос. Недавние исследования показали, что 8,8 млн человек во всем мире умерло из-за проблем, связанных с загрязнением воздуха.

Увеличение концентрации мелкодисперсных твердых частиц связано с общемировым трендом — изменением площади городов и увеличением численности населения в них. Как первый, так и второй факторы способствуют сокращению зеленых насаждений, увеличению площадей с «твердым» покрытием, повышению концентрации загрязняющих веществ от выбросов, связанных с ростом интенсивности дорожного движения и сжиганием топлива для обогрева зданий. Это приводит к нарушению экосистем и влияет на экологическое состояние городов.

Общемировой тенденцией является распределение жителей по агломерациям в следующих пропорциях: 3/4 от всего населения проживают в городах и только 1/3 — в населенных пунктах с малой численностью жителей (поселки, села, деревни и т. д.). Число жителей городов увеличивается только из-за внутренней миграции, т. к. повышения рождаемости по данным Росстата не наблюдается, а смертность увеличивается [1]. Как следствие, возникает потребность в возведении дополнительных жилых площадей, административных, торговых, культурно-просветительских, образовательных, медицинских и иных зданий и сооружений, необходимых для обеспечения нормальной жизнедеятельности человека. На придомовых территориях размещают плоскостные парковки, площадки для сбора твердых бытовых отходов (ТБО) и т. д. Таким образом, город увеличивается по площади и поглощает территории с зелеными насаждениями и плодородным слоем земли. Уменьшаются выработка кислорода, влажность воздуха, и увеличивается плотность пылевых масс, усложняется работа канализационных систем городов.

К основным районам с ярко выраженными факторами, влияющими на повышение концентрации мелкодисперсных твердых частиц, относятся Индия и Китай. К зонам с более благоприятным уровнем экологической обстановки относят Европу и восточную часть США. Общее направление по уменьшению площади зеленых насаждений коснулось всех регионов мира.

Как указано выше, увеличение численности населения в городах приводит к техногенным загрязнениям, увеличению плотности транспортной системы, увеличению площади теплового острова на территории городов, что также влияет на концентрацию PM_{2.5} и PM₁₀ в воздухе. Наиболее ярко данная тенденция проявляется в Китае, во многих частях Центральной Азии, северной Индии, в Африке к югу от Сахары и в южных штатах США [2].

В этих регионах выросла как концентрация твердых загрязняющих веществ в окружающей среде, так и численность населения.

Изменить негативный сценарий влияния площади городов и увеличения численности населения на качество воздуха возможно. Так, при формировании городов значимую роль играет экономический и социальный уровни развития региона. Обратным примером могут служить крупные города Германии и некоторых штатов США [3]. При исследовании экологической обстановки этих регионов с учетом увеличения городов, концентрация PM_{2.5} и PM₁₀ не только не увеличилась, но в отдельных случаях даже уменьшилась. Данное явление связывают с увеличенным коэффициентом озеленения территорий городов. Многочисленные исследования выявили благоприятное влияние зеленых насаждений на состояние окружающей среды, в т. ч. и на снижение концентрации мелкодисперсных частиц в воздухе [4].

При прогнозе изменения загрязнения воздуха крупных городов необходимо учитывать, как минимум, три фактора: численность населения города (коэффициент урбанизации) и плотность населения на исследуемой территории; площадь зеленых насаждений (коэффициент озеленения); процент заболеваний легких (в т. ч. онкологических заболеваний) и ОРВИ за год.

Основная часть

Проблема загрязнения воздуха частицами PM_{2.5} и PM₁₀ актуальна для всей планеты. Если исключить вещества, попадающие в атмосферу вследствие выбросов промышленных производств (поскольку по тенденции последних десятилетий промышленные территории выносятся далеко за пределы городских систем), то основными факторами, влияющими на качество окружающей среды крупных городов, будут:

- увеличение интенсивности движения автотранспорта;
- мелкодисперсные вещества, попадающие в атмосферу от сжигания топлива для обогрева зданий;
- лесные пожары.

Данная проблематика исследуется и описывается в многочисленных статьях ученых всего мира [5—8]. Рассмотрим несколько примеров.

Первое исследование проводилось в г. Боготе — столице и крупнейшем городе республики Колумбия. По данным ВОЗ уровень смертности, связанный с загрязнением окружающей среды, в Латинской Америке (рис. 1) составляет 7 смертей на каждые 100 000 жителей [5]. При этом твердые частицы размером 2,5 и 10 мкм являются одним из основных влияющих факторов.

Установлено, что в районах города, где проводились исследования (рис. 2), более 80 % жителей подвергалось постоянному воздействию загрязняющих веществ PM_{2.5} и PM₁₀ с превышением ПДК [6]. Учеными ВОЗ произведен расчет, согласно которому в Боготе мелкодисперсные частицы стали причиной более 10 % от всего количества зафиксированных смертей [7]. PM_{2.5} и PM₁₀ оказывают негативное влияние на здоровье жителей города, создавая избыточную нагрузку на систему здравоохранения. Данная ситуация приводит к избыточным социальным и экономическим издержкам, связанными с увеличением затрат на систему здравоохранения, уменьшением трудоспособного возраста и снижением производительности труда, увеличением количества преждевременных смертей.

Характерным показателем является изменение концентрации загрязняющих веществ в течение суток. Так, увеличение количества твердых веществ в воздухе наблюдалось с 04:00 и в 08:00, которые достигали максимального значения. Далее, до 12:00 концентрация уменьшалась. В период с 12:00 до 22:00 показания были стабильны, а с 22:00 до 04:00 происходило уменьшение количества PM2.5 и PM10 в воздушных массах.

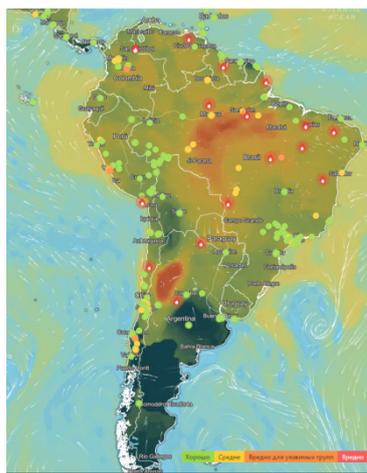


Рис. 1. Южная Америка:
уровни загрязнения воздуха
(ноябрь 2023 г.)³



Рис. 2. Богота: уровни загрязнения воздуха
(ноябрь 2023 г.)⁴

Приведенные выше данные свидетельствуют о том, что пиковые значения концентрации загрязняющих веществ возможно связаны с переездом жителей города к рабочим местам и с работы на личном и общественном автотранспорте. Корреляционный анализ выявил сильную взаимосвязь между количеством поездок на работу и почасовой концентрацией PM2.5 и PM10. При анализе выявлена двухчасовая задержка между изменением количества автотранспорта и концентрацией загрязняющих веществ.

В исследовании определено, что в 06:00 наблюдался пик рабочих поездок (642 369 поездок), а 2 часа спустя, в 08:00 — наблюдался пик концентрации PM10. Вероятно, данное явление связано с перемешиванием частиц в результате броуновского движения [8].

В результате разработки модели линейной регрессии обнаружено, что в среднем на каждые 100 000 поездок наблюдалось увеличение часовой концентрации загрязняющих веществ на 4,0 г/м³.

Также наблюдались 2 дополнительных пика числа поездок в 12:00 и 17:00, однако они не были связаны с увеличением часовой концентрации PM10. Это явление, возможно, связано с изменением высоты слоя смешивания. Исследования, проведенные в мегаполисе, показали, что высота смешивания изменяется от 722 до 1085 м во время часовых пиков концентрации в

³ IQAir — Карта загрязнения атмосферы и индекса качества воздуха.
URL: <https://www.iqair.com/ru/air-quality-map>.

⁴ Там же.

08:00 и наоборот, в интервале от 12:00 до 17:00 высота слоя смешивания превышала 2500 м. Таким образом, высота слоя смешивания влияет на концентрацию PM_{2.5} и PM₁₀.

В исследовании проведен анализ распределения концентрации мелко-дисперсных частиц по месяцам года. Наиболее критичным периодом зафиксирован интервал с января по март, среднее значение PM₁₀ = 57,7 мкг/м³. Интервал с наименьшей концентрацией с июня по август, среднее значение PM₁₀ = 42,6 мкг/м³ [8].

В качестве следующего примера рассмотрим исследования, проведенные учеными на целом континенте — Австралии (рис. 3, 4).

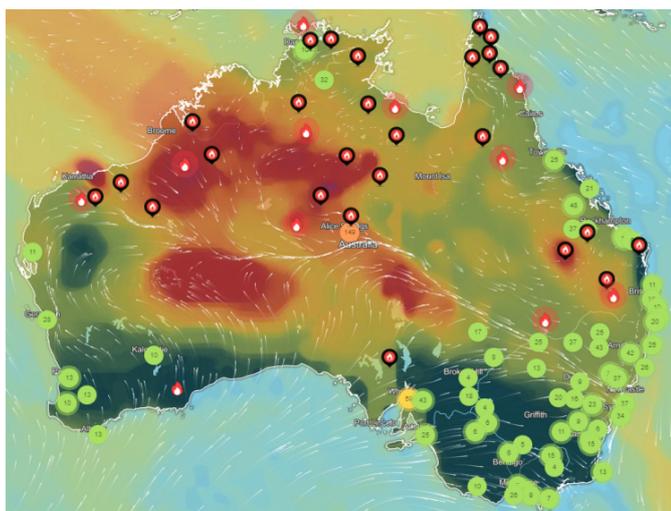


Рис. 3. Австралия: уровни загрязнения воздуха (ноябрь 2023 г.)



Рис. 4. Центральная часть Австралии:
уровни загрязнения воздуха (ноябрь 2023 г.)⁵

⁵ Там же.

Основной проблемой, влияющей на качество воздуха в Австралии и Новой Зеландии, являются лесные пожары. Большое количество биомассы и недостаток осадков приводит к возгоранию зеленых насаждений, в результате чего в атмосферу попадают аммиак и мелкодисперсные твердые частицы. За 2019—2020 гг. в результате пожаров утрачено более 23 % лесов средней полосы [9].

Выбросы загрязняющих веществ рассчитаны с использованием спутниковых данных, указывающих на площадь горения, классификацию земель, а также коэффициенты выбросов, принятые на основании нормативной документации. Результаты расчета показывают, что в период с 29 декабря 2019 по 4 января 2020 г. часовая концентрация PM_{2.5} достигала 2496,1 мкг/м³, а в Новой Зеландии — 48,8 мкг/м³ [10]. Данные показатели превышают национальные нормы ПДК в 100 и 2 раза соответственно, что свидетельствует о значительном влиянии лесных пожаров на качество воздуха в этих регионах.

Концентрация мелкодисперсных частиц определялась при помощи наземных пунктов мониторинга, расположенных по всей территории исследуемого района. Общее количество станций, участвовавших в эксперименте, составило 25. Из них 20 располагались на территории Австралии, а пять — в районах Новой Зеландии. В отличие от австралийских станций мониторинга, расположенных в густонаселенных городах, вблизи оживленных магистралей или сельских населенных пунктов с развитой аграрной промышленностью, в Новой Зеландии пункты мониторинга разместили в отдаленных районах с низкой плотностью населения.

Установлено, что за период с 29 декабря 2019 г. по 4 января 2020 г. пожары уничтожили 14 230 км² лесов, что составляет порядка 1,5 % от всей площади зеленых насаждений региона [10].

По данным, полученным расчетным способом с учетом нормативных коэффициентов, определено, что в атмосферу попало 526 569 125 кг мелкодисперсных частиц. Распределение количества выбрасываемых в атмосферу частиц напрямую зависело от площади пожаров. Так, 29 декабря 2019 г. при площади пожара 493 км² в атмосферу попало 17 338 953 кг загрязняющих мелкодисперсных частиц, а 4 января 2020 г. подверженный огню район составил 5 286 587 330 км², и выбросы PM_{2.5} составили 200 481 575 кг (рис. 5).

В период пожаров на станциях мониторинга проводились натурные замеры. Часовые концентрации PM_{2.5} на австралийской территории варьировались от 0,1 мкг/м³ до 2496 мкг/м³. Среднее значение составило 76 мкг/м³. Новозеландские станции определили среднюю часовую концентрацию менее 50 мкг/м³ при нормативном уровне качества воздуха 25 мкг/м³ (рис. 6)⁶.

На рисунке 6 представлены распределения концентрации PM_{2.5} в австралийских городах. Из графиков видно, что превышение концентрации наблюдалось до 6 января 2020 г. Пики ПДК приходятся на одни и те же дни. Превышение нормы составило от 60 до 80 раз⁷.

⁶ Australia State of the Environment, National Air Quality Standards: Ambient Air Quality, 2016. URL: <https://soe.environment.gov.au/theme/ambient-air-quality/topic/2016/national-air-qualitystandards>.

⁷ Australian Government Bureau of Meteorology, Australia in December 2019, 2020. URL: <https://www.bom.gov.au/climate/current/month/aus/archive/201912.summary.shtml>.

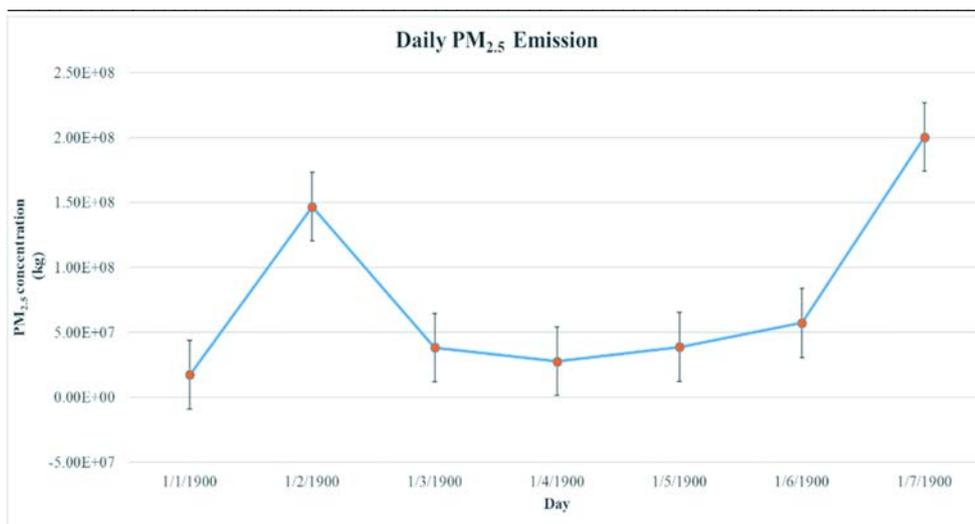


Рис. 5. График ежедневных выбросов PM_{2.5} в юго-восточной части Австралии в исследуемый период [10]

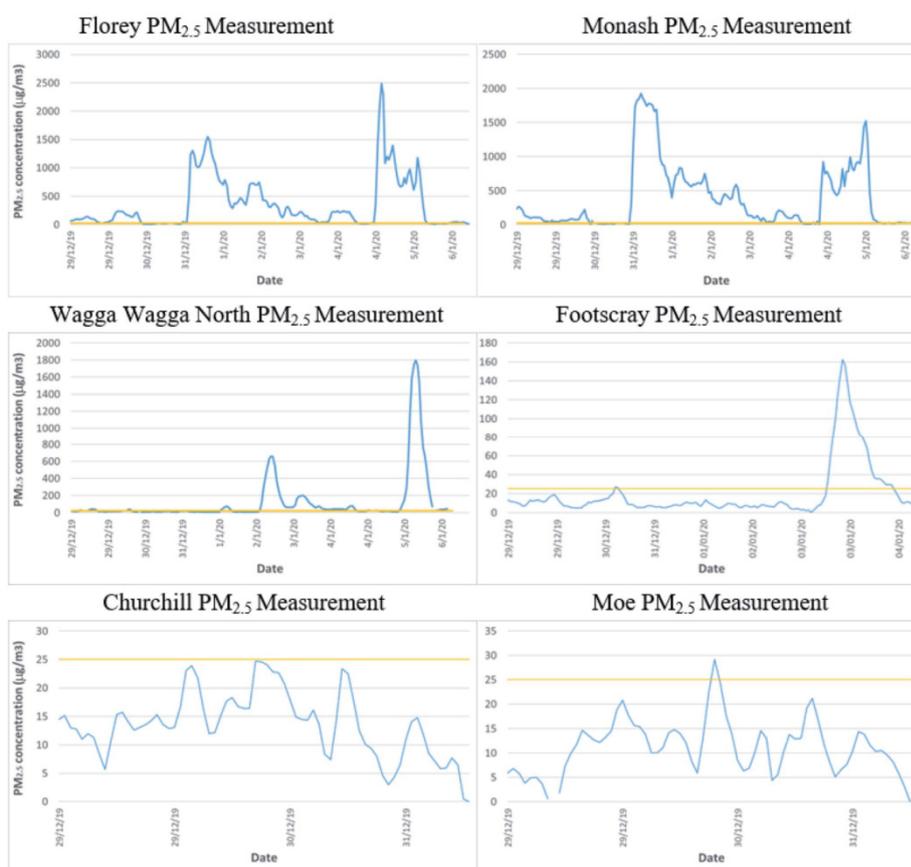


Рис. 6. График ежечасных концентраций PM_{2.5} в период с 29.12.2019 по 05.01.2020

Китай. Как было отмечено, данный регион планеты является одним из неблагоприятных мест по показателю загрязнения атмосферы мелкодисперсными частицами. Начиная с 2013 года Китай принял государственную программу, нацеленную на борьбу с загрязнением окружающей среды и озонового слоя. Одним из направлений стало уменьшение общего количества и увеличение экологического класса грузовых машин, работающих на дизельном топливе. Благодаря принятым мерам в период с 2016 по 2019 гг. среднегодовая массовая концентрация PM_{2.5} снизилась с 47 до 36 мкг/м³⁸.

Положительная динамика наблюдается и в столице КНР — г. Пекине. За тот же период среднегодовая массовая концентрация PM_{2.5} снизилась с 75 до 40 мкг/м³. Несмотря на достигнутые результаты, КНР необходимо пройти длинный путь преобразований для достижения уровня концентрации, рекомендуемой ВОЗ — 5 мкг/м³ [11].

В Китае натурные исследования проводились на территории Пекина. Информация собиралась с 35 станций мониторинга, расположенных во всех административных районах города [12], в непосредственной близости от крупных жилых районов, офисов, школ, больниц, торговых центров, станций метро и рядом с основными автомагистралями.

Период наблюдения пришелся на лето (с 4 июля по 6 августа) и осень (с 19 сентября по 11 октября) 2019 г. Отбор проб производился в дневное время с 07:30 до 19:00 и ночью с 19:30 до 07:00. Тридцатиминутный перерыв вызван необходимостью замены фильтрующих элементов.

Установлено, что концентрация PM_{2.5} возрастает с 05:00 и достигает пикового значения в 09:00. Данное явление связано с интенсивным дорожным движением (утренний «час пик») с 06:00 до 09:00. Большой объем транспортного потока приводит к быстрому увеличению концентрации загрязняющих веществ в воздухе (рис. 7). Аналогичная картина наблюдалась в исследовании, проводимом в Боготе.

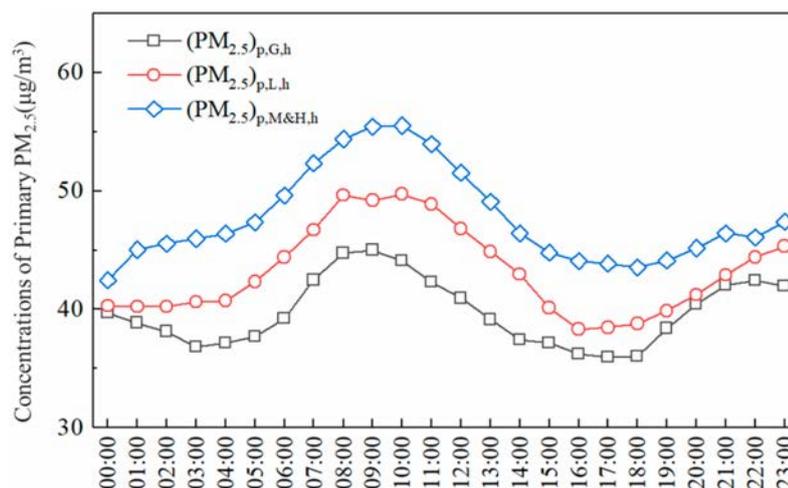


Рис. 7. Распределение суточных колебаний мелкодисперсных частиц PM_{2.5}, Пекин

⁸ Beijing Municipal Ecology and Environment Bureau. Beijing : China, 2019. URL: <https://openalex.org/institutions/I4210122384>.

После 09:00 концентрация PM2.5 снижалась. Повторное увеличение наблюдалось в районе 17:00 (вечерний «час пик») с последующим плавным снижением⁹.

Для дальнейшего анализа рассмотрим города с наиболее критичным уровнем загрязнения воздуха мелкодисперсными частицами. Исследование основывается на показателях, приведенных в интерактивной карте качества воздуха IQAir по состоянию на ноябрь 2023 г.¹⁰

Наиболее критическая обстановка сложилась в Дели — столице и втором по величине городе Индии. Число жителей составляет 16 753 235 чел. Площадь — 1483 км². Плотность населения составляет 1296,85 чел./км².

На момент исследования уровень PM2.5 составлял 399 мкг/м³, уровень PM10 — 641 мкг/м³. Указанные значения превышают ПДК, рекомендуемые ВОЗ в 79,8 раз (рис. 8).

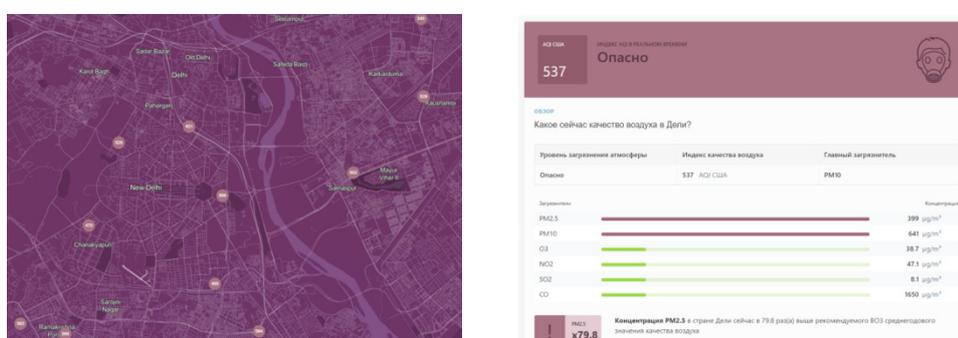


Рис. 8. Дели: уровень загрязнения атмосферы (ноябрь 2023 г.)¹¹

Следующим в рейтинге по уровню загрязнения атмосферы располагается город Лахор — второй по величине город Пакистана. По состоянию на 2023 г. численность населения составляет 11 761 251 чел. Площадь, занимаемая городом — 1772 км². Соответственно плотность населения — порядка 6637 чел./км². Как видно из материалов на рис. 9, концентрация PM2.5 составляет 238 мкг/м³, что в 47,6 раз выше допустимого значения, рекомендованного ВОЗ.

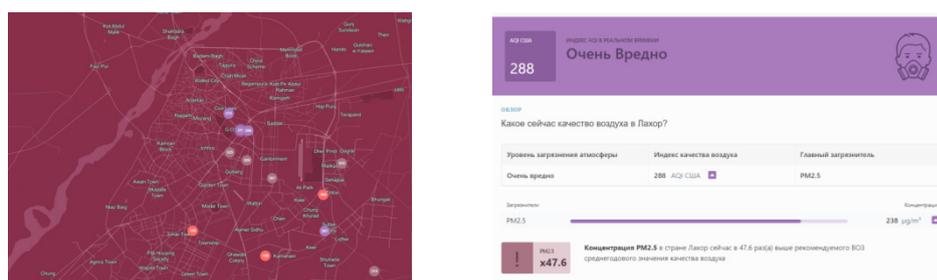


Рис. 9. Лахор: уровень загрязнения атмосферы (ноябрь 2023 г.)¹²

⁹ Beijing Municipal Ecology and Environment Bureau. Beijing : China, 2019. URL: <https://openalex.org/institutions/I4210122384>.

¹⁰ IQAir — Карта загрязнения атмосферы и индекса качества воздуха. URL: <https://www.iqair.com/ru/air-quality-map>.

¹¹ Там же.

В Китае районом с наихудшим состоянием воздуха является Ухань [13], самый густонаселенный город центральной части Китая (рис. 10). Численность жителей составляет 12 326 518 чел., площадь города — 8494 км², плотность населения — 1451,2 чел./км².

Загрязнение мелкодисперсными частицами в настоящее время составляет: PM2.5 — 70,5 мкг/м³, PM10 — 70 мкг/м³. Таким образом, рекомендованное нормативное значение превышено в 14,1 раз, что крайне негативно сказывается на здоровье жителей данного города. Кроме того, зафиксировано распространение загрязняющих веществ на значительные территории вследствие их переноса воздушными потоками [14].

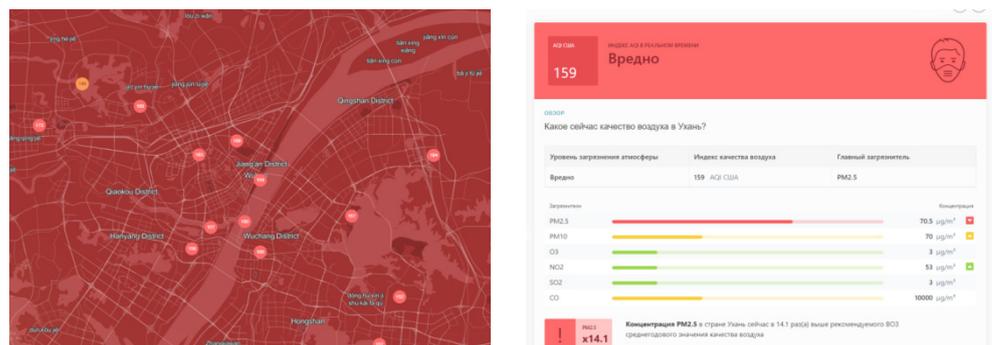


Рис. 10. Ухань: уровень загрязнения атмосферы (ноябрь 2023 г.)

Критический уровень загрязнения наблюдается в Ташкенте, одном из крупнейших городов Центральной Азии, столице Республики Узбекистан (рис. 11). Его площадь составляет 435 км². По состоянию на январь 2023 г. в Ташкенте проживает 2 956 384 чел., плотность населения составляет 6796,3 чел./км². Концентрация мелкодисперсных частиц PM2.5 в воздухе превышает нормативные требования в 22,8 раза и составляет 113,8 мкг/м³. Более крупные частицы PM₁₀ имеют концентрацию 125,1 мкг/м³.

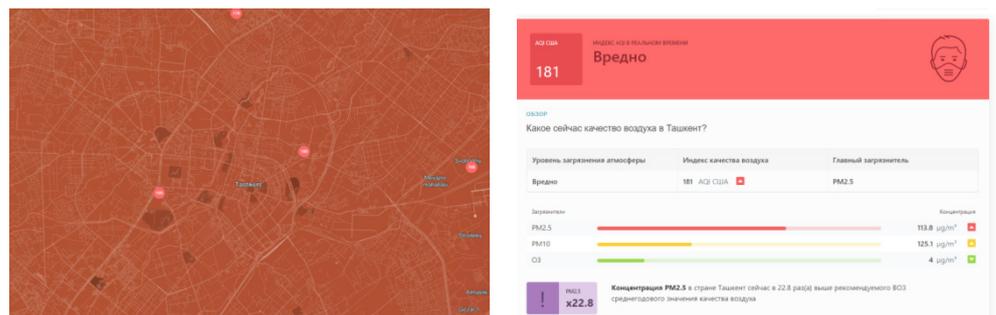


Рис. 11. Ташкент: уровень загрязнения атмосферы (ноябрь 2023 г.)¹³

¹² IQAir — Карта загрязнения атмосферы и индекса качества воздуха.
URL: <https://www.iqair.com/ru/air-quality-map>.

¹³ IQAir — Карта загрязнения атмосферы и индекса качества воздуха.
URL: <https://www.iqair.com/ru/air-quality-map>.

Европа. Для примера рассмотрим второй по величине город Италии, ее экономический центр — Милан. Его площадь составляет 181,76 км². Численность населения — 1 350 487 чел., плотность — 7428 чел./км².

Загрязненность воздуха PM2.5 составляет 36 мкг/м³, что в 7,2 раза превышает ПДК, рекомендованную ВОЗ (рис. 12).

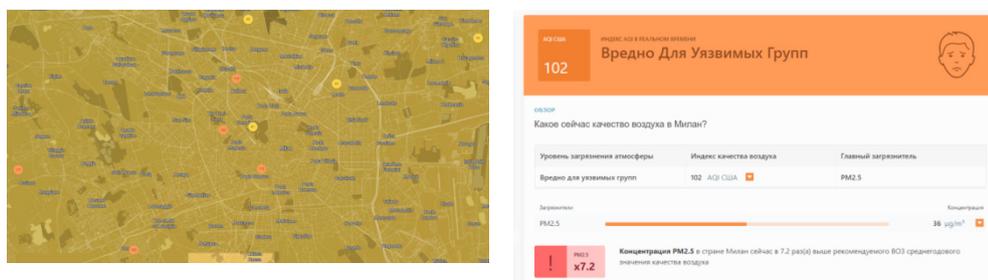


Рис. 12. Милан: уровень загрязнения атмосферы (ноябрь 2023 г.)¹⁴

Северная Америка. В столице Мексики, г. Мехико, уровень загрязнения воздуха частицами PM2.5 составляет 33,3 мкг/м³, что в 6,7 раза превышает нормативные требования (рис. 13). Площадь, занимаемая городом, составляет 1485 км². Численность населения — 9 209 944 чел. Плотность населения — 6201 чел./км².

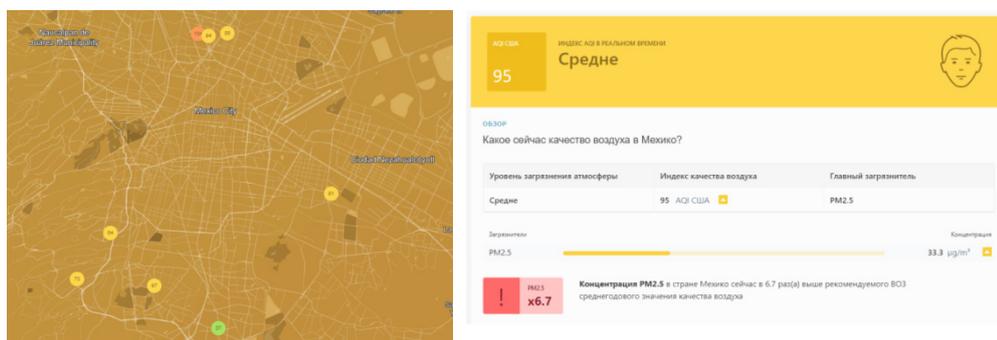


Рис. 13. Мехико: уровень загрязнения атмосферы (ноябрь 2023 г.)¹⁵

Восточное побережье США, г. Нью-Йорк (рис. 14). Состояние воздуха «среднего» качества. ПДК, рекомендуемая ВОЗ, превышена в 4,4 раза. Содержание мелкодисперсных частиц PM2.5 составляет 22,1 мкг/м³. Площадь Нью-Йорка — 1223 км². Количество жителей по состоянию на 2023 г. — 8 992 908 чел., плотность населения — 7353,1 чел./км². В целом для США проблема лесных пожаров чрезвычайно актуальна [15] и вносит значительный вклад в загрязнение воздуха мелкодисперсными частицами [16].

¹⁴ Там же.

¹⁵ IQAir — Карта загрязнения атмосферы и индекса качества воздуха.
URL: <https://www.iqair.com/ru/air-quality-map>.

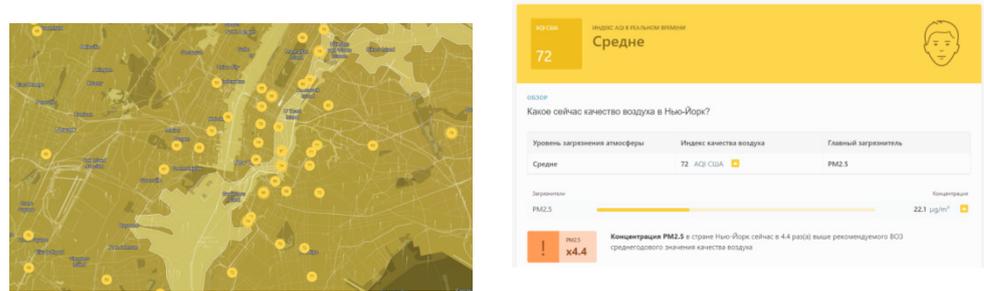


Рис. 14. Нью-Йорк: уровень загрязнения атмосферы (ноябрь 2023 г.)¹⁶

Канада, г. Монреаль (рис. 15). Содержание мелкодисперсных частиц PM2.5 на конец 2023 г. составляло 9,7 мкг/м³. Несмотря на незначительное содержание, по сравнению с другими городами планеты, нормативные требования ВОЗ превышены в 1,9 раза. Площадь Монреаля — 431 км². Число жителей — 1 762 949 чел. Плотность населения — 4090,3 чел./км².

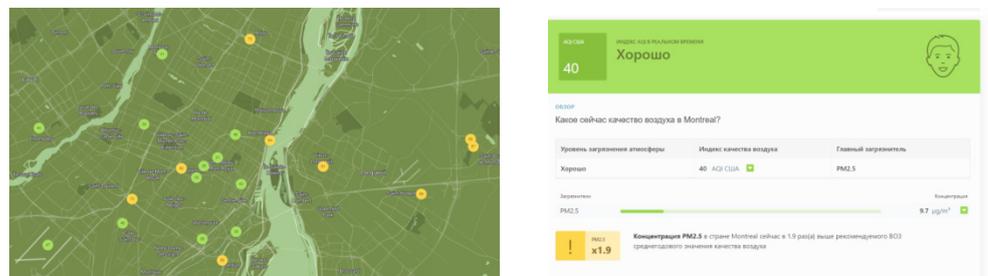


Рис. 15. Монреаль: уровень загрязнения атмосферы (ноябрь 2023 г.)¹⁷

Результаты исследования

Проанализированы научные исследования ведущих специалистов в данной сфере В. Н. Азарова, Н. В. Бакаевой, М. Ю. Слесарева, В. И. Теличенко, L. C. Blanco-Becerra, L. M. Ochoa-Alvarado, S. Chowdhury и др. [17, 18], а также мониторинги качества воздуха по основным городам планеты. Выявлены следующие зависимости:

- уровень загрязненности воздуха зависит от плотности населения. Что показано на примере городов Лахор, Ташкент, Милан, Мехико, Нью-Йорк, в которых плотности населения сравнимы;
- концентрация мелкодисперсных частиц PM2.5 в этих городах колеблется в диапазоне 22,1...238 мкг/м³, что превышает ПДК в 4,4...47,6 раз. На примере данных городов можно наблюдать зависимость качества воздуха от уровня озеленения территории. Наименьший уровень загрязнения воздуха наблюдается в Нью-Йорке (PM2.5 = 22,1 мкг/м³), где наибольший уровень озеленения территории — 27 %, что подтверждает благоприятное влияние зеленых насаждений на состояние окружающей среды, в т. ч. и на снижение концентрации мелкодисперсных частиц в воздухе;

¹⁶ Там же.

¹⁷ IQAir — Карта загрязнения атмосферы и индекса качества воздуха.
URL: <https://www.iqair.com/ru/air-quality-map>.

- нельзя рассматривать уровни загрязнения воздуха в отрыве от дополнительных причин, негативно влияющих на содержание мелкодисперсных частиц.

Критическое загрязнение воздуха до уровня $PM_{2.5} = 399 \text{ мкг/м}^3$, а $PM_{10} = 641 \text{ мкг/м}^3$ в Дели связано в основном не с плотностью населения, а с тем, что фермеры из соседних штатов перед началом посевных работ сжигают остатки прежнего урожая и оставшейся на полях ботвы. Аналогичная причина (сжигание биомассы) ухудшает непростую исходную экологическую обстановку в Лахоре.

В Ухане, городе с относительно небольшой плотностью населения, уровень загрязнения воздуха превышает ПДК в 14,1 раз. Помимо повышенного автомобильного трафика ситуацию усугубляют выбросы производственных предприятий (металлургический завод, химическое производство и т. д.).

В Австралии и Новой Зеландии основной проблемой загрязнения атмосферы являются сезонные лесные пожары, охватывающие обширные площади. Причиной является высокая температура воздуха в сочетании с низким количеством атмосферных осадков.

На карте (рис. 16) указаны места планеты с основными проблемными территориями, на которых значительно превышен уровень ПДК по $PM_{2.5}$ и PM_{10} . Как видно, это большая часть земного шара. На оставшейся площади качество воздуха может быть лучше, или отсутствуют данные мониторингов.



Рис. 16. Карта мира (без анализа территории Российской Федерации) с указанием мест с наибольшим уровнем загрязнения воздуха

Таким образом, проблема загрязнения окружающей среды и, в частности, мелкодисперсными частицами в воздухе, является общемировой. По данным ВОЗ до 7 млн смертей за год по всей планете вызваны загрязнением окружающей среды. А это значит, что ежегодно из-за отравления загрязненным воздухом исчезает целый мегаполис.

Существующее экологическое состояние градостроительной системы в России и по всему миру требует внимания специалистов-экологов и строителей. Необходимо создание методики снижения плотности твердых взвешенных частиц за счет озеленения, в т. ч. крыш и в некоторых случаях фасадов, и введение новых пунктов в нормативные документы для увеличения заинтересованности инвесторов в проектировании и строительстве дополнительного компенсационного озеленения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецова К. С. Роль приумножения народонаселения в России // Актуальные исследования. 2023. № 10(140). С. 42—50.
2. Global health burden of ambient PM_{2.5} and the contribution of anthropogenic black carbon and organic aerosols / S. Chowdhury, A. Pozzer, A. Haines, K. Klingmüller, T. Münzel, P. Paasonen, A. Sharma, C. Venkataraman, J. Lelieveld // *Environ. International*. 2022. Vol. 159. No. 107020. DOI: 10.1016/j.envint.2021.107020.
3. Understanding global PM_{2.5} concentrations and their drivers in recent decades (1998—2016) / C. H. Lim, J. E. Ryu, Y. Choi, S. Jeon, W. K. Lee // *Environment international*. 2020. Vol. 144. No. 106011. DOI: 10.1016/j.envint.2020.106011.
4. Теличенко В. И., Слесарев М. Ю. «Зеленая» стандартизация будущего — фактор экологической безопасности среды жизнедеятельности // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 8. С. 90—97.
5. Effect of Particulate Matter Less than PM₁₀ on Mortality in Bogota, Colombia: A Time-Series Analysis, 1998—2006 / L. C. Blanco-Becerra, V. Miranda-Soberanis, L. Hernández-Cadena, A. Barraza-Villarreal, W. Junger, M. Hurtado-Díaz, I. Romieu // *Salud Pública México*. 2014. Vol. 56. Pp. 363—370.
6. Whyand T., Hurst J. R., Beckles M., Caplin M. E. Pollution and Respiratory Disease: Can Diet or Supplements Help? // *A Review. Respir. Res.* 2018. Vol. 19. P. 79.
7. East J., Montealegre J. S., Pachon J. E., Garcia-Menendez F. Air Quality Modeling to Inform Pollution Mitigation Strategies in a Latin American Megacity // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 776. No. 145894.
8. Ochoa-Alvarado L. M., Zafra-Mejía C. A., Rondón-Quintana H.A. Multitemporal. Analysis of the Influence of PM₁₀ on Human Mortality According to Urban Land // *Cover. Atmosphere*. 2022. Vol. 13. Iss. 12. Pp. 19—49. DOI: org/10.3390/atmos13121949.
9. Connections of climate change and variability to large and extreme forest fires in southeast Australia / N. J. Abram, B. J. Henley, A. Sen Gupta, T. J. R. Lippmann, H. Clarke, A. J. Dowdy // *Commun. Earth Environ.* 2021. Vol. 2. Iss. 1. URL: <https://www.nature.com/articles/s43247-020-00065-8>.
10. Akdemir E. A., Battye W. H., Myers C. B., Aneja V. P. Estimating NH₃ and PM_{2.5} emissions from the Australia mega wildfires and the impact of plume transport on air quality in Australia and New Zealand // *Environmental Science: Atmospheres journal*. 2022. Vol. 2. Pp. 634.
11. Zan, H., Zhao Y., Huo J., Zhao Q. High atmospheric oxidation capacity drives wintertime nitrate pollution in the eastern Yangtze River Delta of China // *Atmos. Chem. Phys.* 2022. Vol. 22. Pp. 4355—4374.
12. Maji K. J. Substantial changes in PM_{2.5} pollution and corresponding premature deaths across China during 2015—2019: a model prospective // *Sci. Total Environ.* 2020. Vol. 729. 138838.
13. Sahu S. K., Chen L., Liu S., Ding D. The impact of aerosol direct radiative effects on PM_{2.5}-related health risk in Northern Hemisphere during 2013–2017 // *Chemosphere*. 2020. Vol. 254. 126832.
14. Yu H. Interannual variability and trends of combustion aerosol and dust in major continental outflows revealed by MODIS retrievals and CAM5 simulations during 2003—2017 // *Atmos. Chem Phys.* 2020. Vol. 20. Pp. 139—161.
15. Burke M. The changing risk and burden of wildfire in the United States // *Proc. Natl Acad. Sci. USA*. . 2021. Vol. 118. e2011048118.
16. Childs M. L. Daily local-level estimates of ambient wildfire smoke PM_{2.5} for the contiguous US // *Environ. Sci. Technol.* 2022. Vol. 56. Pp. 13607—13621.
17. Сергина Н. М., Брызгина Е. О., Сущенко Р. В., Азарова М. Д. Сравнение уровня загрязнения частицами PM₁₀ и PM_{2.5} атмосферного воздуха на территориях парков в промышленных городах с разным климатом // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-*

строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 5(93). С. 168—178.

18. Прокопенко В. В. Основные теоретические аспекты формирования системы озелененных территорий в городской среде // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2023. Вып. 1(90). С. 224—237.

© Безбородов Е. Л., Сысоева Е. В., 2024

Поступила в редакцию
в январе 2024 г.

Ссылка для цитирования:

Безбородов Е. Л., Сысоева Е. В. Исследование проблемы загрязнения атмосферы мелкодисперсными частицами PM_{2.5} и PM₁₀ // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2024. Вып. 1(94). С. 186—202. DOI: 10.35211/18154360_2024_1_186.

Об авторах:

Безбородов Евгений Леонидович — старший преподаватель каф. архитектурно-строительного проектирования и физики среды, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (МГСУ). Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; BezborodovEL@gis.mgsu.ru

Сысоева Елена Владимировна — канд. техн. наук, доц., доц. каф. архитектурно-строительного проектирования и физики среды, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (МГСУ). Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; SyssoevaEV@mgsu.ru

Evgeny L. Bezborodov, Elena V. Sysoeva

Moscow State University of Civil Engineering

INVESTIGATION OF THE PROBLEM OF ATMOSPHERIC POLLUTION BY FINE PARTICLES PM_{2.5} AND PM₁₀

Introduction. This article includes an analysis of air pollution by fine particles of the main populated areas of the Planet. The results of scientific research of scientists dealing with this topic are presented. Their analysis is based on field surveys related to the sampling of air and the study of the atmosphere using satellite monitoring data. The general causes of fatal diseases of the respiratory tract and circulatory system of the body of citizens of large cities around the world are presented. The reasons for the deterioration of the ecological state of the urban environment are named.

Materials and methods. The work used statistical methods of data processing according to ROSSTAT, analytical analysis of the results obtained.

Results. The identified main causes of pollutants and events affecting their concentration are described. The resulting amount of fine particles in the air during the day was analyzed with the determination of peaks exceeding the MPC for several cities located on different continents. The dependence of the concentration distribution on the intensity of traffic at different intervals of the day was revealed. The relationship between the level of air pollution and the number of premature deaths is indicated. With the help of open data, the main megacities of the Planet were analyzed with the detection of the level of pollution by fine particles, the excess of the MPC for each of the territories under construction was calculated.

Conclusions. The cities with the most critical situation in terms of air pollution as of November 2023 have been identified. The analysis linking the population density of cities, the coefficient of greening and the level of air pollution with particles PM_{2.5} and PM₁₀ was carried out. Based on the results of the analysis, a world map has been compiled indicating the places with the highest level of air pollution.

Key words: fine particles, population density, dust masses, environmental safety, landscaping coefficient, forest fires, biomass burning, traffic flow intensity, concentration of pollutants.

For citation:

Bezborodov E. L., Sysoeva E. V. [Investigation of the problem of atmospheric pollution by fine particles PM_{2.5} and PM₁₀]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2024, iss. 1, pp. 186—202. DOI: 10.35211/18154360_2024_1_186.

About authors:

Evgeny L. Bezborodov — Senior Lecturer, Moscow State University of Civil Engineering (MGSU). 26, Yaroslavskoe highway, Moscow, 129337, Russian Federation; BezborodovEL@gic.mgsu.ru

Elena V. Sysoeva — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Moscow State University of Civil Engineering (MGSU). 26, Yaroslavskoe highway, Moscow, 129337, Russian Federation; SysoevaEV@mgsu.ru