

Май И.В.¹, Загороднов С.Ю.¹, Вайсман Я.И.²

Техногенные мелкодисперсные частицы PM_{10} и $PM_{2.5}$ в атмосферном воздухе как фактор риска для здоровья и объект управления: отечественный и мировой опыт (аналитический обзор)

¹ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 614045, Пермь, Россия;

²ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», 614990, Пермь, Россия

РЕЗЮМЕ

Цель исследования — обзор и анализ отечественных и зарубежных научных работ, законодательных и нормативно-методических документов, посвящённых исследованию мелкодисперсных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ в атмосферном воздухе с позиций их влияния на здоровье населения, управления выбросами со стороны государства. Изучены базы данных WoS, SCOPUS, eLIBRARY, законодательные и нормативно-методические документы, размещённые на сайтах ВОЗ, органов власти Российской Федерации и ряда зарубежных стран. Многочисленные эпидемиологические и лабораторные исследования подтверждают высокую опасность частиц размером менее 10 мкм (PM_{10} , $PM_{2.5}$) для здоровья населения. При этом доказано, что мелкодисперсные фракции являются постоянной составляющей выбросов промышленных источников, объектов энергетики, транспорта. Отечественная методическая база учёта мелкодисперсных пылей в составе выбросов требует развития и совершенствования в части обязательного включения PM_{10} и $PM_{2.5}$ в расчётные методики состава выбросов, разработки и утверждения методик количественного измерения мелкодисперсных частиц. Наличие расчётных и инструментальных методик установления масс PM_{10} и $PM_{2.5}$ в выбросах обеспечит корректную инвентаризацию источников и реализацию процесса государственного управления выбросами через установление допустимых нормативов и разработку воздухоохраных мероприятий. Представляется, что учёт PM_{10} и $PM_{2.5}$ в выбросах обеспечит исчерпывающую оценку достаточности санитарно-защитных зон предприятий и повысит качество системы квотирования выбросов. В этом случае приоритетные вещества будут оцениваться с учётом рисков для здоровья, в который мелкодисперсные частицы нередко вносят весомый вклад.

Ключевые слова: мелкодисперсные частицы PM_{10} , $PM_{2.5}$; риск для здоровья; квотирование выбросов

Для цитирования: Май И.В., Загороднов С.Ю., Вайсман Я.И. Техногенные мелкодисперсные частицы PM_{10} и $PM_{2.5}$ в атмосферном воздухе как фактор риска для здоровья и объект управления: отечественный и мировой опыт (аналитический обзор). *Гигиена и санитария*. 2024; 103(11): 1441–1446. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-11-1441-1446> <https://elibrary.ru/injyln>

Для корреспонденции: Май Ирина Владиславовна, e-mail: may@fcrisk.ru

Участие авторов: Май И.В. — концепция и дизайн исследования, написание текста, редактирование; Загороднов С.Ю. — дизайн исследования, сбор и обработка материала, написание текста; Вайсман Я.И. — обработка материала, редактирование. Все соавторы — утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Поступила: 14.10.2024 / Поступила после доработки: 22.10.2024 / Принята к печати: 19.11.2024 / Опубликовано: 17.12.2024

Irina V. May¹, Sergey Yu. Zagorodnov¹, Yakov I. Vaisman²

Man-made fine dispersed PM_{10} and $PM_{2.5}$ in ambient air as a health risk factor and an object of management: domestic and international experience (analytical review)

¹Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation;

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation

ABSTRACT

The aim was to review and analyze Russian and foreign research works, legal, regulatory and methodical documents that focus on investigating fine-dispersed particles in ambient air considering their influence on human health and external management of emissions. The materials were searched for in relevant databases including WoS, SCOPUS, eLIBRARY; we also examined legal, regulatory and methodical documents available at web-sites of the WHO, Russian authorities and relevant authorities of several foreign countries.

Multiple epidemiological and laboratory investigations confirm substantial health hazards posed by particles smaller than 10 μm (PM_{10} , $PM_{2.5}$). There is evidence that fine-dispersed fractions are a persistent component in emissions from industries, energy-producing facilities, and transport. The Russian methodical base for considering fine-dispersed dusts in emissions requires upgrading and improving as regards mandatory PM_{10} and $PM_{2.5}$ inclusion into methods for identifying emission structures. It is also necessary to develop and approve methods for quantification of fine-dispersed particles in industrial emissions. Access to calculation and instrumental methods for establishing PM_{10} and $PM_{2.5}$ masses in emissions allows correcting inventories of emission sources and proper state regulation of emissions through establishing safety ratios of sufficiency of sanitary protection zones around enterprises. It also allows creating a more qualitative system for setting emission quotas where priority chemicals are identified on the basis of assessed health risks considering substantial contributions often made to them by fine-dispersed particles.

Keywords: fine-dispersed dusts PM_{10} , $PM_{2.5}$; health risks; management of emissions

For citation: May I.V., Zagorodnov S.Yu., Vaisman Ya.I. Man-made fine dispersed PM_{10} and $PM_{2.5}$ in ambient air as a health risk factor and an object to be managed: Russian and global experience (analytical review). *Gigiena i Sanitariya / Hygiene and Sanitation, Russian journal*. 2024; 103(11): 1441–1446. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2024-103-11-1441-1446> <https://elibrary.ru/injyln> (In Russ.)

For correspondence: Irina V. May, e-mail: may@fcrisk.ru

Contributions: May I.V. — the study concept and design, writing the text, editing; Zagorodnov S.Yu. — the concept and design of the study, the collection and processing of the material, writing the text; Vaisman Ya.I. — processing of the material, editing. All authors are responsible for the integrity of all parts of the manuscript and approval of the manuscript final version.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement. The study had no sponsorship.

Received: October 14, 2024 / Revised: October 22, 2024 / Accepted: , 2024 / Published: December 17, 2024

Согласно официальным данным, в атмосферный воздух Российской Федерации в последние 10 лет ежегодно выбрасывается порядка 1,7 млн тонн твёрдых частиц (пыль, взвешенные вещества), в том числе в 2022 г. — 1,67 млн тонн¹.

Из 205 городов страны, проводящих постоянные наблюдения за качеством атмосферного воздуха, в 114 среднегодовые концентрации взвешенных веществ превышают установленные гигиенические нормативы и во многом формируют высокие и очень высокие индексы загрязнения атмосферы (ИЗА). Так, взвешенные вещества являются определяющими в таких городах с ИЗА > 14 (очень высокие загрязнение), как Абакан, Ачинск, Красноярск, Магнитогорск, Нижний Тагил, Новочеркасск, Норильск, Улан-Удэ, Чита, Южно-Сахалинск. При допустимом уровне 75 мкг/м³ максимальные средние концентрации в этих городах достигают 855 мкг/м³ за год¹. Поскольку повышенные уровни загрязнения фиксируются именно в российских городах с развитой промышленностью и (или) энергетикой, использующей твёрдое топливо, возникает задача управления пылевым загрязнением техногенного характера.

Повышенное содержание пылевых частиц в воздухе является причиной ухудшения комфортности проживания и качества жизни населения в целом. Многочисленные эпидемиологические исследования, начало которым было положено ещё в конце прошлого века, доказывают, что взвешенные частицы (ВЧ) влияют на увеличение смертности населения [1–3], вызывают поражения дыхательной и сердечно-сосудистой систем [4–6]. Данные подтверждаются и более поздними научными работами. Так, J.O. Anderson и соавт. отмечают, что загрязнение воздуха ВЧ ежегодно приводит примерно к 800 тыс. преждевременных смертей в мире [7]. Наиболее чувствительны к воздействию высокого уровня ВЧ младенцы и маленькие дети, пожилые люди (65 лет и старше), пациенты с болезнями органов дыхания и системы кровообращения, курильщики [8]. Взвешенные вещества формируют риски для здоровья населения как при кратковременном (часы, дни), так и при длительном (месяцы, годы) воздействии. У людей с респираторными болезнями (астма, хронический бронхит, хроническая обструктивная болезнь лёгких) даже разовое увеличение концентрации ВЧ может усугубить состояние [9]. Повторные (многодневные) воздействия могут формировать более серьёзные нарушения здоровья, в том числе хронические [10, 11]. По данным ВОЗ, твёрдые частицы по сравнению с иными атмосферными загрязнениями оказывают негативное воздействие на большее число людей [12]. Исследованиями последних десятилетий доказано, что наиболее опасными являются мелкие фракции ВЧ — частицы диаметром менее 10 мкм (PM₁₀) и 2,5 мкм (PM_{2,5}), поскольку они могут легко проникать в лёгкие и альвеолы [13, 14]. По имеющимся оценкам, при увеличении концентрации PM₁₀ на 10 мкг/м³ суточная смертность возрастает на 0,2–0,6%. В условиях хронической экспозиции PM_{2,5} повышение среднегодовой концентрации PM_{2,5} на 10 мкг/м³ сопряжено с ростом риска смерти от болезней органов дыхания и системы кровообращения на 6–13% [15, 16].

В работе Б.А. Ревича [17] показано, что в условиях загрязнения воздуха мелкодисперсными частицами дополнительная смертность населения 219 городов России составила 67,9 тыс. случаев в год при воздействии PM₁₀ и 88,2 тыс. случаев в год при воздействии PM_{2,5}. В работе московских гигиенистов определено: дополнительная смертность среди жителей столицы в результате негативного воздействия частиц PM₁₀ составляет ≈ 1% от показателя общей смертности без учёта внешних причин [18].

Доказано негативное влияние мелкодисперсных частиц на нарушение функций органов дыхания [19–21]. Накопленные данные свидетельствуют о том, что PM_{2,5} в качестве основного компонента, загрязняющего атмосферный

воздух, вызывают определённую степень разрушения, ухудшают структуру и функцию эпидермиса [22, 23]. В работах R. Peters Peters, H. Choi, J.T. Lee, Schwartz J. описано негативное влияние PM_{2,5} на когнитивные функции и риск возникновения ранних деменций [24, 25]. Даже относительно низкие уровни PM_{2,5} могут быть важным фактором окружающей среды, влияющим на модели структурного развития мозга в детстве [26]. Были обнаружены и описаны обратная связь между содержанием PM₁₀ в воздухе и показателями уровней гемоглобина и эритроцитов в крови экспонированных лиц [27] и прямая связь с частотой регистрации анемий у детского населения, постоянно проживающего в зоне повышенного загрязнения [28, 29].

Негативные биологические эффекты воздействия мелкодисперсных частиц на здоровье усугубляются в тех случаях, когда твёрдые компоненты содержат в своём составе токсические элементы. Так, в работах R. Saldiva и соавт., J.M. Soukup и соавт. установлено, что в результате сжигания топлива всех видов образуются в больших количествах частицы PM_{2,5} и PM₁₀, содержащие бром, ванадий, медь, органический углерод, что существенно повышает риски развития болезней лёгких [30, 31]. Выявлено, что мелкодисперсные частицы в воздухе зон влияния открытых карьеров по добыче угля и теплоэлектростанций, работающих на угле, содержат в своём составе примеси титана, хрома, меди, цинка, марганца, что должно учитываться при оценке вероятных неблагоприятных эффектов на здоровье населения [32]. Углублённые исследования компонентного состава пылевых выбросов металлургического комплекса показали присутствие в составе твёрдых компонентов соединений свинца, марганца, алюминия, железа и др. [33]. Следовательно, при сокращении выбросов мелких фракций ВЧ во многих случаях может достигаться и снижение загрязнения среды обитания высокоопасными токсичными элементами.

С учётом накопленного объёма научных данных о вреде загрязнения воздуха ВОЗ в 2021 г. опубликовала новые глобальные рекомендации по качеству воздуха, в которых показано, что ≈ 80% случаев смерти от воздействия PM_{2,5} можно предотвратить за счёт достижения установленного безопасного уровня [34].

В России, как и во многих странах мира, предельно допустимые концентрации мелкодисперсных частиц в атмосферном воздухе закреплены в гигиенических нормативах, что обеспечивает критериальную базу управления качеством среды обитания и управления выбросами².

Снижение уровней загрязнения воздуха ВЧ может и должно быть достигнуто в первую очередь за счёт сокращения выбросов пылей основными источниками, к которым относятся объекты энергетики [35, 36], предприятия горнодобывающей и горноперерабатывающей отраслей [37, 38], производства строительных материалов, объекты транспорта, машиностроения и ряд других [39–41]. Мелкодисперсные ВЧ постоянно присутствуют в пылевых выбросах, что подтверждает актуальность применения к PM₁₀ и PM_{2,5} всей системы государственного регулирования.

В России основным инструментом управления выбросами в атмосферу является установление нормативов допустимых масс выбросов (НДВ) для каждого хозяйствующего субъекта и каждого конкретного источника выбросов [42]. Важна и разработка мероприятий по достижению приемлемых рисков при установлении санитарно-защитных зон (СЗЗ) промышленных объектов³. В основе установления

² Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 г. № 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (с изменениями и дополнениями). <https://base.garant.ru/400274954/>

³ Постановление Правительства РФ от 3 марта 2018 г. № 222 «Об утверждении Правил установления санитарно-защитных зон и использования земельных участков, расположенных в границах санитарно-защитных зон» (с изменениями и дополнениями). <https://base.garant.ru/71892700/>

¹ О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году: Государственный доклад. М.: Минприроды России; МГУ им. М.В. Ломоносова, 2023. 686 с.

НДВ и обоснования СЗЗ лежат результаты инвентаризации источников выбросов: географические координаты размещения источника, его высота и аэродинамические параметры (температура, расход, линейная скорость выхода газовоздушной смеси), а также масса выбрасываемого вещества (г/сек, т/год). Насколько корректно и полно проведена инвентаризация, настолько корректными и точными будут установленные допустимые уровни выбросов.

Следует отметить, что в действующей нормативно-методической базе, которой руководствуются хозяйствующие субъекты при проведении инвентаризации, фактически отсутствуют документы, директивно обязывающие выделять фракции пылевых выбросов с размерами частиц менее 10 и 2,5 мкм. Распоряжение Минприроды России № 38-Р от 26.12.2022 г. (в редакции от 19.17.2024 г.)⁴ закрепляет перечень из 129 методик расчёта состава и масс выбросов. В документе 65 методик предусматривают учёт отдельных видов пыли (например, пыль зерновая, цементная, древесная), взвешенных веществ и (или) просто твёрдых частиц (без указания их химического состава) и только три методики в перечень рассчитываемых веществ включают частицы PM_{10} и $PM_{2,5}$: «Методика расчёта выбросов от источников горения...» [43], «Методика определения и расчёта выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров» [44], «Методика по расчёту выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от факельных установок по сжиганию попутного нефтяного газа...» [45]. Хозяйствующие субъекты при инвентаризации учитывают в выбросах компоненты, указанные в методиках, не выполняя дополнительных исследований, следовательно, данные фракции полностью выпадают из системы государственного нормирования выбросов. К сожалению, за последние годы, несмотря на значительное количество гигиенических исследований, подтверждающих высокую опасность мелкодисперсных частиц для здоровья населения, нормативно-методическая база экологического нормирования не претерпела существенных изменений.

В государственном реестре методов измерений⁵ отсутствуют утверждённые методики определения мелкодисперсных частиц в промышленных выбросах, что затрудняет проведение инвентаризации с применением инструментальных методов измерений. Поскольку статья 4 Федерального закона 20.12.2021 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды»⁶ гласит, что меры государственного регулирования применяются в отношении загрязняющих веществ при наличии методик (методов) измерения загрязняющих веществ, регулирование и сокращение выбросов PM_{10} и $PM_{2,5}$ теряют правовую поддержку.

При этом зарубежная практика государственного регулирования выбросов мелкодисперсных частиц достаточно обширна. Так, Директивой 2010/75/ЕС о промышленных выбросах (комплексное предотвращение и контроль загрязнения)⁷, главным законодательным инструментом регулирования выбросов промышленных объектов в странах Евросоюза, закреплён список веществ, подлежащих государственному регулированию через применение наилучших доступных технологий. В этот список включены и мелкодисперсные частицы (PM_{10} ; $PM_{2,5}$). Массы пылевых выбросов должны обеспечивать достижение показателей качества атмосферного воздуха, установленных Директи-

вой 2008/50/ЕС⁸. В Германии с целью накопления данных о содержании мелкодисперсных частиц в составе выбросов были сформированы и реализованы программы измерения PM_{10} ; $PM_{2,5}$; $PM_{1,0}$ в отходящих газах промышленных предприятий, имеющих значительный общий объём выбросов пыли. Исследования проводились на предприятиях по сжиганию бурого угля, мазута, древесины, цементных, стекольных, асфальтосмесительных заводах, заводах по переработке природного камня и песка, предприятиях керамической промышленности, металлургии, химической промышленности, заводах по окраске распылением, деревообработке, сушке щепы, птицеводства и заводах по переработке отходов. Всего было проведено 106 кампаний по измерениям в Саксонии-Анхальт (Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, 2001), Баварии (Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 2000), Саксонии (Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, 1999; Baumbach, et al., 1999; Dreiseidler, et al., 2001) [46]. Были получены доказательства того, что более 70% выбросов промышленных предприятий и бытовых печей содержали PM_{10} и $PM_{2,5}$ (от 50 до 90% от общего объёма выбросов твёрдых частиц). Экспериментально определённые коэффициенты выбросов PM_{10} , $PM_{2,5}$ и $PM_{1,0}$ были переданы для разработки и пересмотра «Национальной директивы по предельным значениям выбросов» Европейской комиссии (Директива 2001/81/ЕС, 2001).

В США законом о чистом воздухе⁹ стационарный источник или группа стационарных источников, которые выбрасывают или могут выбрасывать в атмосферный воздух 10 или более тонн в год опасного компонента выброса или 25 или более тонн в год их комбинаций, относятся к группе «основные источники», для которых установлены ограничения эмиссии, основанные на наилучших технологиях и наиболее эффективных методиках контроля. К атмосферным загрязнениям, для которых устанавливаются такие ограничения, отнесены и частицы PM_{10} , $PM_{2,5}$. Предприятия – источники выбросов обязаны предоставлять ежегодную отчётность о выбросах в соответствии с формами по инвентаризации токсичных веществ. При этом каждый штат принимает собственные шаги по регулированию выбросов опасных пылей и максимально полно информирует население и бизнес о рисках и угрозах, оптимальных действиях по предотвращению загрязнений и инструментах государственного управления выбросами. Так, например, «Руководство по соблюдению требований нормативных документов по воздуху в части твёрдых частиц» Департамента по качеству окружающей среды штата Мичиган [47] однозначно формулирует императивные требования к источникам выбросов пыли. Приводим несколько выдержек из документа:

- *лицо, ответственное за любой источник выброса пыли на участке или складе, включая любую деятельность по обработке материалов <...> не должно вызывать или допускать выброс... пыли... которая имеет непрозрачность более 5% <...>; лицо не должно допускать выброс из любого другого источника пыли, которая имеет непрозрачность более 20%;*
- *все зоны доступа к схемам движения вокруг отвалов, <...> дороги и парковки должны быть вымощены или обработаны водой, маслами или химическими пылеподавителями. Все вымощенные площади <...> должны быть очищены;*
- *все операции по разгрузке и транспортировке материалов <...> должны быть закрыты или должны использовать распыление, гранулирование, винтовую транспортировку или другие эквивалентные методы;*
- *если эксплуатируется оборудование для сбора твёрдых частиц, выбросы от такого оборудования не должны превышать 0,03 г на сухой стандартный кубический фут (0,07 г на кубический метр);*

⁴ Распоряжение Минприроды России № 38-Р от 26.12.2022 г. (в редакции от 19.17.2024 г.) – URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/metodicheskie_dokumenty/metodiki_rascheta_vybrosov_vrednykh_zagryaznyayushchikh_veshchestv_v_atmosfernyy_vozdukh_statsionarn/ (дата обращения: 02.09.2024 г.).

⁵ Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry> (дата обращения: 02.09.2024 г.).

⁶ Федеральный закон от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (с изменениями на 8 августа 2024 г.) (редакция, действующая с 1 сентября 2024 г.).

⁷ Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24.11.2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control).

⁸ Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21.05.2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe.

⁹ Clean Air Act: Title I – Air Pollution Prevention and Control, Parts A through D. URL: <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview/clean-air-act-text> (дата обращения: 02.09.2024 г.).

• *строительные подрядные организации обязаны обеспечить отсутствие загрязнения пылью при вывозе материалов с рабочей площадки <...>. Инженер Департамента транспорта Мичигана имеет право закрыть рабочую площадку, если подрядчик не соблюдает требования к качеству воздуха, и может потребовать немедленных мер по исправлению положения для обеспечения соответствия.*

Таким образом, документ устанавливает чёткие требования к организации деятельности и количественным показателям источников выбросов.

В соответствии с Законом Канады об охране окружающей среды¹⁰ проектирование и эксплуатация промышленных предприятий должны осуществляться в соответствии с главным принципом: обеспечивать фактические концентрации выбросов в атмосферном воздухе ниже значений стандартов качества. Для промышленных источников устанавливаются нормативы выбросов взвешенных частиц (PM) – базовые требования, призванные гарантировать, что все значимые промышленные источники в Канаде независимо от расположения предприятий соответствуют хорошему базовому уровню обеспечения безопасности окружающей среды и населения.

В Новой Зеландии принята специальная стратегия достижения установленных нормативов PM₁₀ в воздухе – The National Air Quality Compliance Strategy to Meet the PM₁₀ Standard [48]. В рамках стратегии последовательно подготовлены и внедрены в практику руководящие документы по определению мелкодисперсных частиц в выбросах (Compliance Monitoring & Emissions Testing of Discharges to Air [1998]) [49]; по подготовке кадастров выбросов мелкодисперсных частиц (Preparing Emission Inventories) [50], моделированию распространения частиц в атмосфере (Atmospheric Dispersion Modelling) [51], оценке выбросов от транспорта и промышленных выбросов (Assessing Discharges <...>) [52], мониторингу и управлению данными (Monitoring & Data Management) [53]. Детальные руководящие документы и систематические обзоры лучших практик обеспечивают информационную и методическую поддержку

хозяйствующих субъектов и дают чёткие представления о правовых последствиях несоблюдения требований.

Следует отметить ориентацию государственного управления за рубежом на комплексный подход к предотвращению и контролю загрязнения техногенными мелкодисперсными частицами, жёсткие требования к применению технологических нормативов и наилучших доступных технологий. Это позволяет вести контроль потенциального загрязнения на этапе образования выбросов и максимально управлять им.

Заключение

Мелкодисперсные частицы (твёрдые частицы с диаметром менее 10 мкм и менее 2,5 мкм) являются постоянной составляющей выбросов промышленных источников, объектов энергетики, транспорта. Данные мониторинга воздуха свидетельствуют о том, что уровни содержания данных примесей в атмосферном воздухе городов России нередко превышают установленные гигиенические нормативы, что имеет следствием формирование рисков дополнительной смертности и (или) заболеваемости населения.

Отечественная методическая база учёта мелкодисперсных пылей в составе выбросов требует развития и совершенствования. Основными направлениями такого развития должны стать обязательное включение PM₁₀ и PM_{2,5} в расчётные методики состава выбросов, разработка, утверждение и внесение в Реестр методов измерений методик количественного определения измерения мелкодисперсных частиц в промышленных выбросах. Расчётные и инструментальные методики установления масс PM₁₀ и PM_{2,5} в выбросах дадут возможность включать данные соединения в ведомости инвентаризации и реализовать весь процесс государственного управления выбросами через установление допустимых нормативов, разработку мероприятий в рамках программ повышения экологической эффективности. По нашему мнению, учёт PM₁₀ и PM_{2,5} в выбросах обеспечит более корректную оценку размеров санитарно-защитных зон предприятий и повысит качество системы квотирования выбросов, в которой приоритетные вещества оцениваются с учётом рисков для здоровья, создаваемых в значительной степени мелкодисперсными частицами.

Литература

(п.п. 1–10, 13–16, 19, 20, 22–32, 37, 46–53 см. References)

- Нахратова О.В., Цыганкова Д.П., Баздырев Е.Д. Влияние загрязнения атмосферного воздуха взвешенными частицами на риск сердечно-сосудистых заболеваний (обзор). *Экология человека*. 2022; 29(8): 531–46. <https://doi.org/10.17816/humeco104609> <https://elibrary.ru/osafti>
- ВОЗ. Качество воздуха и здоровье: информационный бюллетень о Целях в области устойчивого развития (ЦУР): задачи, связанные со здоровьем; 2018. Доступно: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/340800>
- Ревич Б.А. Мелкодисперсные взвешенные частицы в атмосферном воздухе и их воздействие на здоровье жителей мегаполисов. *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. 2018; 29(3): 53–78. <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2018-3-53-78> <https://elibrary.ru/yrxuvf>
- Иваненко А.В., Судакова Е.В., Скворцов С.А., Бестужева Е.В. Оценка риска здоровью населения от воздействия атмосферных загрязнений на отдельных территориях города Москвы. *Гигиена и санитария*. 2017; 96(3): 206–11. <https://elibrary.ru/yhswj>
- Тихонова И.В., Землянова М.А., Кольдибекова Ю.В., Пескова Е.В., Игнатова А.М. Гигиеническая оценка аэрогенного воздействия взвешенных веществ на заболеваемость детей болезнями органов дыхания в зоне влияния источников выбросов металлургического производства. *Анализ риска здоровью*. 2020; (3): 61–9. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.07> <https://elibrary.ru/anuqda>
- Загороднов С.Ю., Кокорулина А.А., Попова Е.В. Изучение компонентного и дисперсного состава пылевых выбросов предприятий металлургического комплекса для задач оценки экспозиции населения. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2015; 17(5–2): 451–56. <https://elibrary.ru/vyzjmd>
- ВОЗ. Глобальные рекомендации ВОЗ по качеству воздуха: касающиеся твердых частиц (ТЧ_{2,5} и ТЧ₁₀), озона, двуокиси азота, двуокиси серы и окиси углерода. Резюме; 2021.
- Чекалов Л.В., Смирнов М.Е., Гузаев В.А. Развитие технологии электрической очистки дымовых газов и снижение выбросов твердых частиц. В кн.: *Экология в энергетике. II Научно-техническая конференция с международным участием*. М.; 2021: 55–60.
- Андрешунас А.М., Клейн С.В., Горяев Д.В., Балашов С.Ю., Загороднов С.Ю. Гигиеническая оценка эффективности воздухоохраных мероприятий на объектах теплоэнергетики. *Гигиена и санитария*. 2022; 101(11): 1290–8. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-11-1290-1298> <https://elibrary.ru/nvnitk>
- Снищерева В.П., Козлова Л.О. Источники пылеобразования и комплексное обеспыливание на Жезказганских обогатительных фабриках. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021; (S1–1): 38–46. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_1_1_38 <https://elibrary.ru/byxzuq>
- Дормидонтова Т.В., Алиев Э.Р. Влияние строительства и реконструкции автомобильных дорог на экологию. *Тенденции развития науки и образования*. 2022; (87–3): 64–7. <https://doi.org/10.18411/trnio-07-2022-96> <https://elibrary.ru/ugkzrm>
- Просвирякова И.А., Шевчук Л.М. Гигиеническая оценка содержания твердых частиц PM₁₀ и PM_{2,5} в атмосферном воздухе и риска для здоровья жителей в зоне влияния выбросов стационарных источников промышленных предприятий. *Анализ риска здоровью*. 2018; (2): 14–22. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2018.2.02> <https://elibrary.ru/xrnwhj>
- Уланова Т.С., Антипова М.В., Сухих Е.А., Крылов А.А. Анализ мелкодисперсных фракций пыли в атмосферном воздухе вблизи транспортных развязок крупного промышленного центра. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*. 2022; (2): 45–54. <https://doi.org/10.15593/2409-5125/2022.02.05> <https://elibrary.ru/zbrzyd>
- Опунтина И.П., Костылева Н.В. Выявление по результатам анализа правоприменительной практики областей природоохранной

Review article

- деятельности, на которые могут влиять качество и правильность применения методик расчета выбросов в атмосферный воздух. *Астраханский вестник экологического образования*. 2021; (6): 122–5. <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2021-6-122-125> <https://elibrary.ru/cvalig>
43. Методика расчета выбросов от источников горения при разливе нефти и нефтепродуктов; 1997.
 44. Методика определения и расчета выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров; 1997.
 45. Методика по расчету выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от факельных установок по сжиганию попутного нефтяного газа (ПНГ) с дополнительной подачей воздуха (используемых на объектах ООО «ЯРГЕО» или аналогичных установок); 2020.
- ## References
1. Dockery D.W., Pope C.A. 3rd, Xu X., Spengler J.D., Ware J.H., Fay M.E., et al. An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *N. Engl. J. Med.* 1993; 329(24): 1753–9. <https://doi.org/10.1056/nejm199312093292401>
 2. Schwartz J. Total suspended particulate matter and daily mortality in Cincinnati, Ohio. *Environ. Health Perspect.* 1994; 102(2): 186–9. <https://doi.org/10.1289/ehp.94102186>
 3. Pope C.A., Dockery D.W., Schwartz J. Review of epidemiological evidence of health effects of particulate air pollution. *Inhal. Toxicol.* 1995; 7(1): 1–18. <https://doi.org/10.3109/08958379509014267>
 4. Schwartz J. Air pollution and hospital admissions for respiratory disease. *Epidemiology.* 1996; 7(1): 20–8. <https://doi.org/10.1097/00001648-199601000-00005>
 5. Samoli E., Peng R., Ramsay T., Pipikou M., Touloumi G., Dominici F., et al. Acute effects of ambient particulate matter on mortality in Europe and North America: results from the APHENA Study. *Environ. Health Perspect.* 2008; 116(11): 1480–6. <https://doi.org/10.1289/ehp.11345>
 6. Heinrich J. Nonallergic respiratory morbidity improved along with a decline of traditional air pollution levels: a review. *Eur. Respir. J. Suppl.* 2003; 40: 64s–9s. <https://doi.org/10.1183/09031936.03.00402603>
 7. Anderson J.O., Thundiyil J.G., Stolbach A. Clearing the air: a review of the effects of particulate matter air pollution on human health. *J. Med. Toxicol.* 2012; 8(2): 166–75. <https://doi.org/10.1007/s13181-011-0203-1>
 8. Health effects of dust. Department of Health. Western Australia; 2022. Available at: https://www.health.wa.gov.au/Articles/F_1/Health-effects-of-dust
 9. Wu J.Z., Ge D.D., Zhou L.F., Hou L.Y., Zhou Y., Li Q.Y. Effects of particulate matter on allergic respiratory diseases. *Chronic Dis. Transl. Med.* 2018; 4(2): 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.cdtm.2018.04.001>
 10. Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP Project. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2013. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK361803/>
 11. Nakhratova O.V., Tsygankova D.P., Bazdyrev E.D. Impact of air pollution with particulate particles on the risk of cardiovascular diseases (review). *Ekologiya cheloveka*. 2022; 29(8): 531–46. <https://doi.org/10.17816/humeco104609> <https://elibrary.ru/osafti> (in Russian)
 12. WHO. Air quality and health: Newsletter on the Sustainable Development Goals (SDGs): health-related challenges; 2018. Available at: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/340800> (in Russian)
 13. Curtis L., Rea W., Smith-Willis P., Fenyes E., Pan Y. Adverse health effects of outdoor air pollutants. *Environ. Int.* 2006; 32(6): 815–30. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.03.012>
 14. Air quality guidelines for Europe. WHO Regional office for Europe. Copenhagen; 2000. Available at: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8681>
 15. Ochoa-Alvarado L.M., Zafra-Mejia C.A., Rondón-Quintana H.A. Multitemporal analysis of the influence of PM₁₀ on human mortality according to Urban Land Cover. *Atmosphere*. 2022; 13(12): 19–49. <https://doi.org/10.3390/atmos13121949>
 16. Curtis L., Rea W., Smith-Willis P., Fenyes E., Pan Y. Adverse health effects of outdoor air pollutants. *Environ. Int.* 2006; 32(6): 815–30. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2006.03.012>
 17. Revich B.A. Fine suspended particulates in ambient air and their health effects in megalopolises. *Problemy ekhologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ehkositsem*. 2018; 29(3): 53–78. <https://doi.org/10.21513/0207-2564-2018-3-53-78> <https://elibrary.ru/yrxuvf> (in Russian)
 18. Ivanenko A.V., Sudakova E.V., Skvortsov S.A., Bestuzheva E.V. Assessment of risks to the health of the population from air borne contaminants in certain areas of Moscow (based on the findings of on-going socio-hygienic monitoring). *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2017; 96(3): 206–11. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-3-206-211> <https://elibrary.ru/yhswjj> (in Russian)
 19. Trippetta S., Sabia S., Caggiano R. Fine aerosol particles (PM₁): natural and anthropogenic contributions and health risk assessment. *Air Qual. Atmos. Health*. 2016; 9(6): 621–9. <https://doi.org/10.1007/s11869-015-0373-0>
 20. Jakovljević I., Štrukil Z.S., Godec R., Bešlić I., Davila S., Pehnc G., et al. Pollution sources and carcinogenic risk of PAHS in PM₁ particle fraction in an urban area. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2020; 17(24): 1–21. <https://doi.org/10.3390/ijerph17249587>
 21. Tikhonova I.V., Zemlyanova M.A., Koldibekova Yu.V., Peskova E.V., Ignatova A.M. Hygienic assessment of aerogenic exposure to particulate matter and its impacts on morbidity with respiratory diseases among children living in a zone influenced by emissions from metallurgical production. *Health Risk Analysis*. 2020; (3): 60–68. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2020.3.07> <https://elibrary.ru/oqwizs>
 22. Liao Z., Nie J., Sun P. The impact of particulate matter (PM_{2.5}) on skin barrier revealed by transcriptome analysis: Focusing on cholesterol metabolism. *Toxicol. Rep.* 2020; 7: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2019.11.014>
 23. Magnani N.D., Muresan X.M., Belmonte G., Cervellati F., Sticozzi C., Pecorelli A., et al. Skin damage mechanisms related to airborne particulate matter exposure. *Toxicol. Sci.* 2016; 149(1): 227–36. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfv230>
 24. Peters R., Ee N., Peters J., Booth A., Mudway I., Anstey K.J. Air pollution and dementia: a systematic review. *J. Alzheimers Dis.* 2019; 70(S1): S145–63. <https://doi.org/10.3233/jad-180631>
 25. Choi H., Kim S.H. Air pollution and dementia. *Dement. Neurocogn. Disord.* 2019; 18(4): 109–12. <https://doi.org/10.12779/dnd.2019.18.4.109>
 26. Cserbik D., Chen J.C., McConnell R., Berhane K., Sowell E.R., Schwartz J., et al. Fine particulate matter exposure during childhood relates to hemispheric-specific differences in brain structure. *Environ. Int.* 2020; 143: 105933. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105933>
 27. Poursafa P., Kelishadi R., Amini A., Amin M.M., Lahijanzadeh M., et al. Association of air pollution and hematologic parameters in children and adolescents. *J. Pediatr.* 2011; 87(4): 350–6. <https://doi.org/10.2223/jped.2115>
 28. Quintana R., Serrano J., Gómez V., de Foy B., Miranda J., Garcia-Cuellar C., et al. The oxidative potential and biological effects induced by PM₁₀ obtained in Mexico City and at a receptor site during the MILAGRO campaign. *Environ. Pollut.* 2011; 159(12): 3446–54. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.08.022>
 29. Nikolic M., Nikic D., Stankovic A. Effect of air pollution on red blood cells in children. *Pol. J. Environ. Stud.* 2008; 17(2): 267–71.
 30. Saldiva P.H., Clarke R.W., Coull B.A., Stearns R.C., Lawrence J., Murthy G.G., et al. Lung inflammation induced by concentrated ambient air particles is related to particle composition. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 2002; 165(12): 1610–7. <https://doi.org/10.1164/rccm.2106102>
 31. Soukup J.M., Ghio A.J., Becker S. Soluble components of Utah Valley particulate pollution alter alveolar macrophage function *in vivo* and *in vitro*. *Inhal. Toxicol.* 2000; 12(5): 401–14. <https://doi.org/10.1080/089583700196112>
 32. Larionov A., Volobaev V., Zverev A., Vdovina E., Bach S., Schetnikova E., et al. Chemical composition and toxicity of PM₁₀ and PM_{0.1} samples near open-pit mines and coal power stations. *Life (Basel)*. 2022; 12(7): 1047. <https://doi.org/10.3390/life12071047>
 33. Zagorodnov S.Yu., Kokoulina A.A., Popova E.V. Studying of component and disperse structure of dust emissions of metallurgical complex enterprises for problems of estimation the population exposition. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoi akademii nauk*. 2015; 17(5–2): 451–56. <https://elibrary.ru/vyzmjd> (in Russian)
 34. WHO. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Executive summary; 2021. (in Russian)
 35. Chekalov L.V., Smirnov M.E., Guzaev V.A. Development of technology for electric flue gas purification and reduction of particulate emissions. In: *Ecology in the Energy Sector. II Scientific and Technical Conference with International Participation [Ekologiya v ehnergetike. II Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem]*. Moscow; 2021: 55–60. (in Russian)
 36. Andrichunas A.M., Kleyn S.V., Goryaev D.V., Balashov S.Yu., Zagorodnov S.Yu. Hygienic assessment of air protection activities at heat-and-power engineering enterprises. *Gigiena i Sanitariya (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2022; 101(11): 1290–8. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-11-1290-1298> <https://elibrary.ru/nvnitk> (in Russian)
 37. Vorobev A.E., Datchenko V.V., Madaeva M.Z. Dust contamination of upland areas of the North Caucasus by mines. *Science. Education. Engineering*. 2021; (1): 9–16. <https://elibrary.ru/ticczj>
 38. Snitserova V.P. Sources of dust formation and integrated dusting at Zhezkazgan concentrating factories. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*. 2021; (S1–1): 38–46. https://doi.org/10.25018/0236_14_93_2021_1_1_38 <https://elibrary.ru/byxzuq> (in Russian)
 39. Dormidontova T.V., Aliev E.R. The impact of road construction and reconstruction on the environment. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2022; (87–3): 64–7. <https://doi.org/10.18411/trnio-07-2022-96> <https://elibrary.ru/ugkzrm> (in Russian)
 40. Prosviryakova I.A., Shevchuk L.M. Hygienic assessment of PM₁₀ and PM_{2.5} contents in the atmosphere and population health risk in zones influenced by emissions from stationary sources located at industrial enterprises. *Health Risk Analysis*. 2018; (2): 14–22. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2018.2.02> <https://elibrary.ru/vtczvu>
 41. Ulanova T.S., Antipeva M.V., Sukhikh E.A., Krylov A.A. Analysis of fine dust fractions in the atmospheric air near highways and intersections of a large industrial center. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekhologiya. Urbanistika*. 2022; (2): 45–54. <https://doi.org/10.15593/2409-5125/2022.02.05> <https://elibrary.ru/zbryid> (in Russian)
 42. Oputina I.P., Kostyleva N.V. Identification by the results of analysis of law environmental practice, which may be influenced by the quality and correct application of methods for calculating emissions in the atmospheric air. *Astrakhanskii vestnik ekhologicheskogo obrazovaniya*. 2021; (6): 122–5. <https://doi.org/10.36698/2304-5957-2021-6-122-125> <https://elibrary.ru/cvalig> (in Russian)
 43. Methodology for calculating emissions from combustion sources during oil and petroleum product spills; 1997. (in Russian)

44. Methodology for determining and calculating emissions of pollutants from forest fires; 1997. (in Russian)
45. Methodology for calculating emissions of pollutants into the atmospheric air from flare installations for burning associated petroleum gas (APG) with additional air supply (used on Gorenje facilities of YARGEO LLC or similar installations); 2020. (in Russian)
46. Ehrlich C., Noll G., Kalkoff W.-D., Baumbach. G., Dreiseidler A. PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{1.0} emissions from industrial plants – results from measurement programmes in Germany. *Atmos. Environ.* 2007; 41(29): 6236–54. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.03.059>
47. Managing Fugitive Dust. A guide for Compliance with the Air Regulatory Requirements for Particulate Matter Generation. Michigan Department of Environmental Quality; 2014. Available at: <https://www.michigan.gov/-/media/Project/WebSites/egle/Documents/Regulatory-Assistance/Guidebooks/Fug-Dust-Man.pdf?rev=1bffa8aa79524fdabe234a7c6bdcc82e>
48. Clean Healthy Air For All New Zealanders: The National Air Quality Compliance Strategy to Meet the PM₁₀ Standard. Wellington: Ministry for the Environment
- Ministry for the Environment; 2011. Available at: <https://environment.govt.nz/assets/Publications/Files/air-quality-compliance-strategy.pdf>
49. Compliance Monitoring and Emissions Testing of Discharges to Air: A Guide for the Management of Ambient Air Quality. Ministry for the Environment Wellington New Zealand; 1998. Available at: <https://environment.govt.nz/assets/Publications/Files/discharges-to-air-compliance-aug98.pdf>
50. Good Practice Guide for Preparing Emission Inventories. Ministry for the Environment; 2001. Available at: <https://environment.govt.nz/assets/Publications/Files/emissions-good-practice-guide.pdf>
51. Good Practice Guide for Assessing Discharges from Industry; 2016. Available at: <https://environment.govt.nz/publications/good-practice-guide-for-preparing-emissions-inventories/>
52. Good Practice Guide for Assessing Discharges from Industry; 2016. Available at: <https://environment.govt.nz/publications/good-practice-guide-for-preparing-emissions-inventories/>
53. Air Quality Monitoring and Data Management Guidebook for the States of the Gulf Cooperation Council. 2021. https://zoinet.org/wp-content/uploads/2023/02/Air-quality-monitoring_EN.pdf

Сведения об авторах

Май Ирина Владиславовна, доктор биол. наук, профессор, ГНС-советник директора ФБУН ФНЦ МПТ УРЗН, 614045, Пермь, Россия. E-mail: may@fcrisk.ru

Загороднов Сергей Юрьевич, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. — руководитель экспертной группы лаб. методов комплексного санитарно-гигиенического мониторинга ФБУН ФНЦ МПТ УРЗН, 614045, Пермь, Россия. E-mail: Zagorodnov@fcrisk.ru

Вайсман Яков Иосифович, доктор мед. наук, профессор кафедры «Охрана окружающей среды» ФГАОУ ВО ПНИПУ, 614990, Пермь, Россия. E-mail: eco@pstu.ru

Information about the authors

Irina V. May, DSc (Biology), professor, principal researcher-advisor to the Director of the Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-0976-7016> E-mail: may@fcrisk.ru

Sergey Yu. Zagorodnov, PhD (Engineering), Senior Research Associate, Head of the Expert Group in Laboratory of Complex Sanitary and Hygienic Monitoring Methods of the Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, Perm, 614045, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6357-1949>

Iakov I. Vaisman, DSc (Medicine), Professor of Environmental Protection Department, Perm National Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation <https://orcid.org/0000-0003-4700-030X>