



Научная статья

К НОВЫМ МЕТОДАМ ИЗМЕРЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ МИКРОЧАСТИЦ ПЫЛЕЙ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ

А.Н. Кокоулин¹, И.В. Май², С.Ю. Загороднов², А.А. Южаков¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29

²Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения, Россия, 6140045, г. Пермь, ул. Монастырская, 82

Доказанная опасность микрочастиц пылей для здоровья населения определяет потребность в автоматизированных и мобильных устройствах, позволяющих оперативно в режиме реального времени анализировать химический и дисперсный составы твердой компоненты загрязнения и заменить трудоемкие методы отбора проб и раздельное определение фракционного и химического состава пыли.

Цель исследования состояла в разработке и аprobации новых методических, программных и инструментальных подходов к мониторингу твердых частиц в атмосферном воздухе. Предложен аппаратно-программный комплекс, реализующий двухэтапную схему распознавания отобранных из атмосферного воздуха твердых частиц по принципу «от грубого к точному». На первом этапе происходит определение общей концентрации твердых частиц с использованием метода лазерной дифракции. Для получения микрофотографий пыли используется миниатюрный микроскоп iMicro Q2 с увеличением в 800 раз. Линза микроскопа присоединяется к камере, подключенной к микроКомпьютеру nVidia Jetson Nano. МикроКомпьютер выполняет классификацию и определение контуров частиц с использованием нейронной сети, решает задачу сегментации изображения. На втором этапе схемы применяется принцип «компьютерного зрения», автоматизирующий рутинные операции распознавания изображений частиц, получаемых с микроскопа, для расчета содержания веществ в пробе. В качестве обработчика информации применяется вторая нейронная сеть, выполняющая заданный набор вычислений согласно математической логике (модели). Обучение нейросети выполняется на библиотеке атрибутированных микрофотографий пылей разного качественного и дисперсного состава.

При аprobации алгоритма результаты определения дисперсного и химического состава пыли показали высокую сходимость с аналогами, полученными с использованием стандартных подходов и методов измерений. Показаны широкие возможности метода по оперативному установлению состава и структуры пылей, формированию профилей пылевого загрязнения, оценке вклада источника в формирование загрязнения.

Полученные результаты обеспечивают повышение корректности и точности оценки рисков для здоровья при воздействии пыли, содержащейся в атмосферном воздухе.

Ключевые слова: пылевое загрязнение, концентрации твердых частиц, фракционный, химический состав пыли, атмосферный воздух, распознавание изображений, «компьютерное зрение».

Важность систематических инструментальных наблюдений за уровнем пыли в атмосферном воздухе как фактора риска дополнительной смертности и заболеваемости населения подтверждена многочисленными зарубежными и отечественными исследованиями. В частности доказано, что наиболее мелкие частицы $PM_{2.5}$ могут преодолевать аэрогематический барьер и попадать в кровеносную систему

[1]. По имеющимся оценкам, при увеличении концентрации PM_{10} на 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ суточная смертность от всех причин возрастает на 0,2–0,6 %. В условиях хронической экспозиции $PM_{2.5}$ каждое повышение концентрации $PM_{2.5}$ на 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ сопряжено с ростом долговременного риска кардиопульмональной смертности на 6–13 % [2–4]. В работе Б.А. Ревича (2018) показано, что в условиях загрязнения воздуха

© Кокоулин А.Н., Май И.В., Загороднов С.Ю., Южаков А.А., 2023

Кокоулин Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики и телемеханики (e-mail: a.n.kokoulin@at.pstu.ru; тел.: 8 (342) 239-18-16; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1095-4508>).

Май Ирина Владиславовна – доктор биологических наук, профессор, заместитель директора по научной работе (e-mail: may@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-25-47; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0976-7016>).

Загороднов Сергей Юрьевич – старший научный сотрудник (e-mail: zagorodnov@fcrisk.ru; тел.: 8 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6357-1949>).

Южаков Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматики и телемеханики (e-mail: uz@at.pstu.ru; тел.: 8 (342) 239-18-16).

мелкодисперсными частицами дополнительная смертность населения 219 городов России составила 67,9 тысячи случаев в год при воздействии PM_{10} и 88,2 тысячи случаев в год при воздействии $PM_{2.5}$ [5].

Накапливающиеся данные свидетельствуют о том, что твердые частицы $PM_{2.5}$ в качестве основного загрязнителя воздуха вызывают определенную степень разрушения и токсичности для кожи. Это особенно ухудшает структуру и функцию эпидермиса [6, 7].

В работах Petersa, Choi, Mihe описано негативное влияние $PM_{2.5}$ на когнитивные функции и риск возникновения ранних деменций [8–10]. Даже относительно низкие уровни $PM_{2.5}$ могут быть важным фактором окружающей среды, влияющим на модели структурного развития мозга в детстве [11]. Подтверждается и негативная роль пылевых частиц в распространении инфекционных заболеваний, в частности COVID-19 [12, 13]. Все это свидетельствует о крайне высокой актуальности мониторинга мелкодисперсных пылей и управления уровнями загрязнения воздуха в российских городах, в том числе через нормирование выбросов хозяйствующих субъектов.

Так, по данным Росгидромета¹ суточные измерения взвешенных частиц PM_{10} в таких городах, как Москва, Сочи, Красноярск, Иркутск, Ангарск, Гусиноозерск, Находка, Улан-Удэ, Чита и др., свидетельствуют о практических повсеместном превышении установленных гигиенических нормативов. Средняя за год концентрация PM_{10} в г. Гусиноозерске составила 1,6 ПДК_{с.г.}, в г. Селенгинске – 1,3 ПДК_{с.г.}, в г. Чите и г. Шелехове – 1,1. В г. Байкальске в 2021 г. отмечено загрязнение на уровне до 23,3 ПДК_{с.г.} $PM_{2.5}$ измеряется в 7 городах (11 постов). Средняя за год концентрация достигает 1,8 ПДК_{с.г.} (Улан-Удэ). Максимальная из среднесуточных концентраций достигала 8,2 ПДК_{с.г.} в г. Селенгинске. При этом факты нарушения суточных ПДК фиксировались во всех городах, где проводились измерения, за исключением г. Ангарска. Данные системы государственной сети наблюдения Росгидромета подтверждаются данными с постов региональных систем мониторинга и систем социально-гигиенического мониторинга.

Однако управление качеством воздуха в части загрязнения мелкодисперсными фракциями пыли не всегда является эффективным. Основная причина заключается в том, что промышленные предприятия крайне редко указывают на наличие мелкодисперсных пылей в составе отходящих пылегазовых сме-

сей. На текущий момент из 118 методик, которые рекомендуются хозяйствующими субъектам для использования при проведении инвентаризации источников выбросов² только 3 предполагают учет мелкодисперсных пылей. Ориентируясь на документы министерства, хозяйствующие субъекты не указывают дисперсный состав твердой компоненты выбросов. В результате опасные фракции пыли «выпадают» из процедуры экологического нормирования. Источники ненормативного содержания $PM_{2.5}$, PM_{10} в воздухе невозможно идентифицировать, и загрязнение остается вне системы государственного регулирования.

Отсутствие управления выбросами выражается в следующей ситуации: по данным самих хозяйствующих субъектов декларируется снижение выбросов твердых компонентов. В целом по стране в 2010 г. поступало в атмосферу порядка 2,4 млн тонн пылей, 2020 г. – 1,6 млн тонн (снижение более чем на 30 %), а среднегодовые измеряемые на постах концентрации взвешенных веществ в воздухе за этот же период изменились незначительно и составили в 2010 г. – 116 мкг, в 2020 г. – 109 мкг/м³ (снижение на 6 %).

Сложность управления выбросами пыли состоит еще и в том, что пыль является общераспространенным загрязняющим веществом. Как следствие, выделить и доказать вклад конкретного хозяйствующего субъекта в уровень пылевого загрязнения очень непросто. Вместе с тем задача такого выделения встает перед специалистами Роспотребнадзора и в ходе контрольно-надзорных мероприятий при лабораторных исследованиях воздуха и при анализе данных социально-гигиенического мониторинга. Задачу обязательного выявления источников выбросов мелкодисперсных пылей ставит документ ВОЗ [14].

Измерения мелкодисперсных частиц в атмосферном воздухе обеспечиваются целым рядом методов: гравиметрии³, лазерной дифракции⁴, нефелометрии и др. Широко применяются анализаторы пыли типа DustTrak (модели 8530, 8533), основанные на принципах лазерной нефелометрии. Нашли применение приборы линейки АТМАС на базе пьезоэлектрического принципа измерения частоты пьезоэлемента во время осаждения на его поверхности аэрозольных частиц.

Вместе с тем одновременное и взаимосвязанное измерение фракционного и химического состава пыли в настоящее время остается актуальной задачей.

Цель исследования – разработка и апробация новых методических и инструментальных подходов

¹ Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2021 г.: ежегодник. – Санкт-Петербург, 2022.

² Перечень методик расчета выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух стационарными источниками [Электронный ресурс] // ГАРАНТ: информационно-правовой портал. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402674938/> (дата обращения: 15.01.2023).

³ CSN EN 12341. Ambient air – Standard gravimetric measurement method for the determination of the PM_{10} or $PM_{2.5}$ mass concentration of suspended particulate matter.

⁴ МУК 4.1.3242-14. Измерение массовой концентрации мелкодисперсных частиц РМ и РМ в атмосферном воздухе с использованием метода лазерной дифракции [Электронный ресурс] // КОДЕКС: электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200132738> (дата обращения: 15.01.2023).

к мониторингу твердых частиц, в том числе мелко-дисперсных, для задач мониторинга качества воздуха.

Материалы и методы. С целью повышения оперативности мониторинга пылей предложена двухэтапная схема распознавания отобранных из атмосферного воздуха твердых частиц по принципу «от грубого к точному» (coarse-to-fine) [15, 16].

В схеме на первом этапе происходит быстрое определение общей концентрации частиц PM с применением датчика SDS011, использующего метод лазерной дифракции для оценки концентраций частиц размеров PM₁₀ и PM_{2.5} [17]. Определяя с помощью датчика максимумы концентраций, можно найти наилучшую локацию для проведения точных измерений второго этапа.

На втором этапе схемы применяется принцип «компьютерного зрения», автоматизирующий рутинные операции распознавания образов объектов для расчета процентного содержания веществ в пробе. Поток воздуха засасывается в прибор вентилятором датчика, и пылевые частицы при прохождении по каналу частично осаждаются на предметном стекле. Изображение осажденных частиц, получаемое с микроскопа, содержит все необходимые признаки анализируемой сцены в численном виде, в качестве обработчика этой информации задействуется имитация биологической нейронной сети, выполняющая заданный набор вычислений согласно математической логике (модели) [18, 19]. Для создания микрофотографий используется миниатюрный микроскоп iMicro Q2, позволяющий получать изображения с увеличением в 800 раз. Линза микроскопа присоединяется к камере, подключенной к микрокомпьютеру nVidia Jetson Nano. Микрокомпьютер выполняет классификацию и определение контуров частиц с использованием нейронной сети, то есть решает задачу сегментации изображения. В результате обработки вычисляется маска каждой частицы в кадре и из исходного кадра вырезаются соответствующие фрагменты ROI (region of interest, область интереса), содержащие изображения всех обнаруженных и классифицированных по виду вещества частиц.

Для решения задач обработки данных системы мониторинга могут быть использованы как облачные технологии, применяемые в том числе для интернета вещей (IoT), так и децентрализованные вычисления, например, по принципу EDGE-устройств [18, 19].

Облачные технологии способны централизованно решать задачи сегментации и классификации за счет использования централизованной обработки данных мощными серверами облачной платформы. С одной стороны, серверы обрабатывают потоки данных, генерируемых устройствами, с использованием методов искусственного интеллекта, а также их визуализацию, но при этом необходим надежный канал передачи данных.

С другой стороны, портативное EDGE-устройство для решения задачи мониторинга может реализо-

вать схему многоэтапной обработки данных в парадигме «coarse-fine» на уровне самого прибора:

- непрерывные замеры концентрации частиц PM_{2.5}/PM₁₀ в воздухе (без оценки морфологии и распознавания частиц пыли);

- проведение морфологического и компонентного анализа частиц с использованием оптических методов распознавания объектов и сопоставление распознанных частиц с пылевыми профилями предприятий.

При использовании такой схемы ресурсоемкие операции, связанные с оптическими методами обработки изображений (Computer Vision), выполняются только в тех точках, где есть необходимость, а полученные результаты экстраполируются на соседние точки. В результате составление картограммы загрязнений происходит оперативно, в непрерывном режиме.

Классификация и вычисление размеров частиц выполняется с помощью модели нейронной сети, обученной на сотнях примеров, размещенных (атрибутированных) экспертами. Структура сети – однородная (без обратных связей), многослойная. Для обучения используются стандартные методы обратного распространения ошибки.

Обучение нейронной сети выполнено с применением библиотек микрофотографий пылей разных производств и технологических аппаратов. Изображения на каждой микрофотографии характеризовались параметрами химического, фракционного и морфологического состава пыли. Изображения были размечены с указанием расположения и контуров объектов, которые должна распознавать нейросеть.

Для разметки использовали Coco-annotator – веб-инструмент для аннотирования изображений, разработанный для обеспечения универсальности и эффективной маркировки изображений для создания обучающих данных для локализации изображений, позволяющий сохранять результаты разметки в формате CoCo.

Использование микрофотографий в портативном приборе затрудняется необходимостью фокусировки камеры и обработки нескольких фотографий для получения качественной фотографии одной сцены. В настоящем исследовании использован метод совмещения фокуса (Focus stacking) для увеличения глубины резкости изображения путем объединения нескольких изображений, снятых с разных фокусных расстояний, в одно изображение с большей резкостью и четкостью как объектов переднего плана, так и фона. Метод использует несколько снимков одной и той же сцены, полученных с разными фокусными расстояниями, объединяя их в одно четкое изображение [18].

Аппаратное и программное обеспечение опробовано в реальных условиях загрязнения атмосферного воздуха в зоне влияния горнодобывающего предприятия. База микрофотографий, на которых было проведено обучение нейронных сетей, была сформирована в 2020–2021 гг.

Для верификации получаемых результатов с применением новых подходов параллельно проводили исследования пылевого загрязнения стандартными методами. Дисперсный состав пылевых выбросов определялся с применением лазерного анализатора размера частиц Microtrac S3500 6. Определение компонентного (химического) состава пылевых выбросов проводилось методами микроскопирования с использованием сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения с термоэмиссией с рентгено-флуоресцентной приставкой S-3400N HITACHI и рентгенофазового анализа образцов с использование рентгеновского дифрактометра XRD-700 Shimadzu. Обработка рентгенограмм проводилась с использованием программного обеспечения XRD 6000/7000 Ver. 5.21. Определение фазового состава анализируемых образцов проводилось с использованием базы данных ICDD PDF-4+ 2012 на базе центра коллективного пользования Пермского национального исследовательского политехнического университета.

Результаты и их обсуждение. Полученные результаты показали, что пылевое загрязнение ат-

мосферного воздуха вблизи промышленного объекта с интенсивными выбросами твердых веществ в атмосферу характеризуется сложным и компонентным, и дисперсным составом. В составе пыли, которая на посту Росгидромета оценивается как «взвешенные вещества», были идентифицированы соли и оксиды железа, кремния, магния, марганца, алюминия и пр. С применением предлагаемых подходов были получены близкие результаты.

Используемая нейронная сеть показала хорошие результаты при распознавании изображений. Метод позволил получить контуры отдельных частиц, и каждая частица была идентифицирована и классифицирована. В результате для каждой пробы была составлена таблица обнаруженных веществ, подсчитано процентное содержание по количеству частиц каждого вещества, уточнены размеры частиц и определены статистические характеристики (рис. 1).

Сравнительные данные, полученные стандартным путем и предлагаемым методом, приведены в табл. 1.

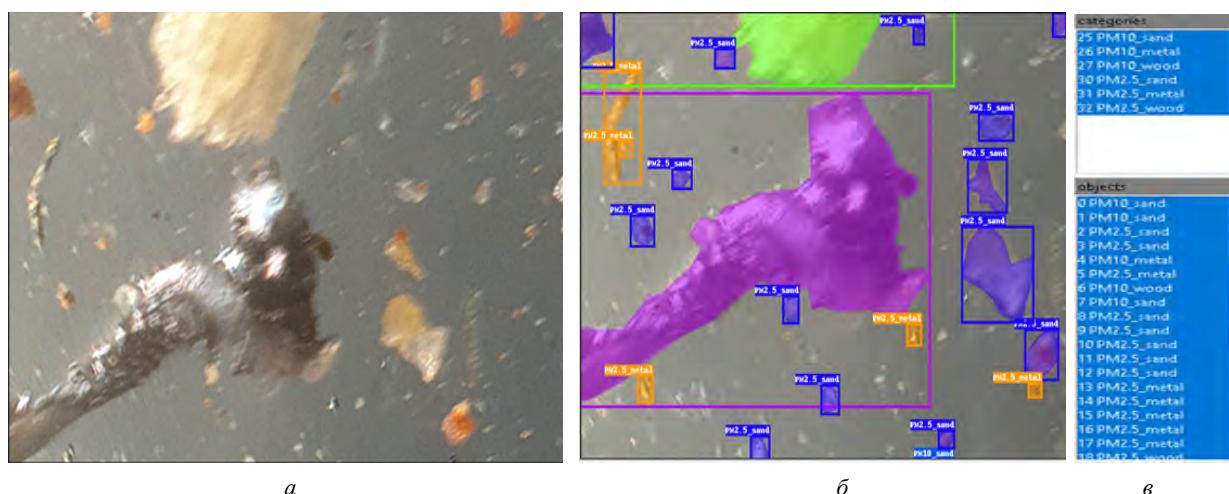


Рис. 1. Исходное изображение пылевых частиц (а) и результат распознавания пылевых частиц (б, в)

Таблица 1

Результаты идентификации качественных и количественных показателей пылевой компоненты

Химическое вещество	Концентрация в измеренной пробе, мг/м ³		Достоверность различий	
	Стандартные измерения	Метод распознавания изображения	t-критерий	P (уровень значимости)
Fe ₂ O ₃	19,49 ± 0,2	17,25 ± 0,29	6,36	0,00
SiO ₂	31,04 ± 12,98	27,16 ± 13,68	0,21	0,84
Al ₂ O ₃	22,22 ± 2,75	21,03 ± 4,58	0,22	0,82
NaCl	1,3 ± 3,85	1,9 ± 1,53	0,14	0,88
CaO	20,12 ± 2,67	18,86 ± 3,74	0,27	0,78
MgO	4,21 ± 0,75	4,01 ± 1,26	0,14	0,89
KCl	1,62 ± 0,19	0,85 ± 0,97	0,78	0,44
MnSO ₄	0,05 ± 3,62	0,00 ± 0,00	0,01	0,99
AlCl ₃	0,85 ± 1,58	0,1 ± 0,04	0,47	0,64
Прочие	2,38 ± 0,63	4,89 ± 6,68	0,37	0,71
PM ₁₀	74,28 ± 15,3	72,75 ± 12,92	0,08	0,94
PM _{2,5}	21,3 ± 1,16	19,49 ± 4,54	0,39	0,70

Как видно из представленных данных, сходимость измерений можно признать удовлетворительной. Существенную роль в качестве результатов сыграла качественная база микрофотографий образцов пыли, накопленная на предыдущих этапах работ [20–22].

Достоинством предложенного подхода измерения пылей для задач социально-гигиенического мониторинга является возможность оперативно определять дисперсный и компонентный состав пылей (идентификация и количественное определение химического состава пылевой компоненты воздуха стандартными методами требовала периода от нескольких дней до нескольких недель).

Получаемые данные могут являться основанием для определения вклада хозяйствующего субъекта в загрязнение и, что немаловажно, – в риски для здоровья населения. Корректное установление такого вклада важно как для самого хозяйствующего субъекта (источника выброса), так и для надзорного органа. Апробация подходов была выполнена при оценке санитарно-гигиенической ситуации вблизи промплощадки рудника крупного предприятия по добыче калийных солей. При проведении инвентаризации источников выбросов предприятия был выполнен компонентный анализ твердой составляющей, построен «профиль пылевого выброса» и сделаны микрофотографии частиц.

Сопоставительный анализ химического состава выбросов и компонентного состава пыли на границе санитарно-защитной зоны (СЗЗ) (1 км от границы промплощадки) показал существенную разницу отобранных образцов пыли (табл. 2). Маркерные, типичные для предприятия вещества присутствовали в пыли на границе СЗЗ и характеризовали источник. Однако вклад этих веществ в общую массу составлял в отобранных пробах порядка 5,9 % (4,6–7,2 %). При том, что на границе были зафиксированы превышения гигиенических

нормативов до 4,2 ПДК_{mp}, хозяйствующий субъект доказал, что не создавал превышений и не имел в выбросах примесей, которые составляли основную массу определенной на границе санзоны пыли.

Полученные результаты были подтверждены и сопоставительным анализом выполненных фотоснимков пылевых частиц на источниках выбросов и на границе санзоны (рис. 2). Большинство частиц, выбрасываемых источниками предприятия, имели однотипную кристаллическую форму, характерную для солей. Идентифицированные твердые частицы на границе СЗЗ предприятия кардинально отличались по внешним признакам.

Полученные результаты, с одной стороны, обеспечили отсутствие некорректных административных мер в отношении хозяйствующего субъекта, с другой стороны, поставили задачу выявления реальных источников загрязнения.

Еще одной важной позитивной стороной построения профилей пылевых выбросов является возможность корректной оценки рисков для здоровья населения. Нередко пыли, которые кодируются в ходе инвентаризации самим хозяйствующим субъектом как «взвешенные вещества» или, к примеру, как «пыль с содержанием SiO₂ менее 20 %», содержат примеси солей и / или оксидов тяжелых металлов, опасность которых существенно выше, чем просто взвешенных частиц. Несколько примеров приведены в табл. 3. Так, выбросы обрабатывающих станков, кодируемые хозяйствующим субъектом как «взвешенные вещества» ($RfC^5 = 0,075 \text{ мг}/\text{м}^3$), по факту представляют собой сложную смесь оксидов и солей железа, магния, алюминия. При этом референтные уровни каждого компонента ниже, чем «взвешенных веществ». Кроме того, в составе выбросов идентифицированы мелкодисперсные частицы PM₁₀, PM_{2,5}, опасность которых для здоровья тоже выше, чем суммы взвешенных веществ в целом.

Таблица 2

Вклад источников горно-перерабатывающего предприятия в уровень пылевого загрязнения атмосферного воздуха на границе санитарно-защитной зоны

Вещество	Профиль пыли, мг/м ³		Вклад предприятия на границе СЗЗ, %		Фоновое загрязнение	
	выброс предприятия	в точке измерения	в концентрацию примеси	в общее пылевое загрязнение	мг/м ³	% от общего
KCl	0,0383	0,0383	100,0	1,47	0	0
NaCl	0,0296	0,0296	100,0	1,13	0	0
AlCl ₃	0,002	0,006	33,3	0,08	0,0040	0,15
MgSO ₄	0,0029	0,0118	24,6	0,11	0,0089	0,34
SiO ₂	0,0284	0,7762	3,66	1,09	0,7478	28,64
MgO	0,0015	0,0535	2,80	0,06	0,0520	1,99
Al ₂ O ₃	0,009	0,4133	2,18	0,34	0,4043	15,48
CaO	0,0014	0,1989	0,70	0,05	0,1975	7,56
Fe ₂ O ₃	0,0033	0,9589	0,34	0,13	0,9556	36,60
MnSO ₄	0,000	0,0135	0,00	0,00	0,0135	0,52
Прочие	0,0377	0,111	33,96	1,44	0,0733	2,81
Итого:	0,1541	2,6110		5,90	2,4569	94,10

⁵ RfC – референтная концентрация – среднесуточная концентрация химического вещества, которая устанавливается с учетом всех имеющихся научных данных и, вероятно, не приводит к возникновению неприемлемого риска для здоровья чувствительных групп населения (Р 2.1.10.1920-04).

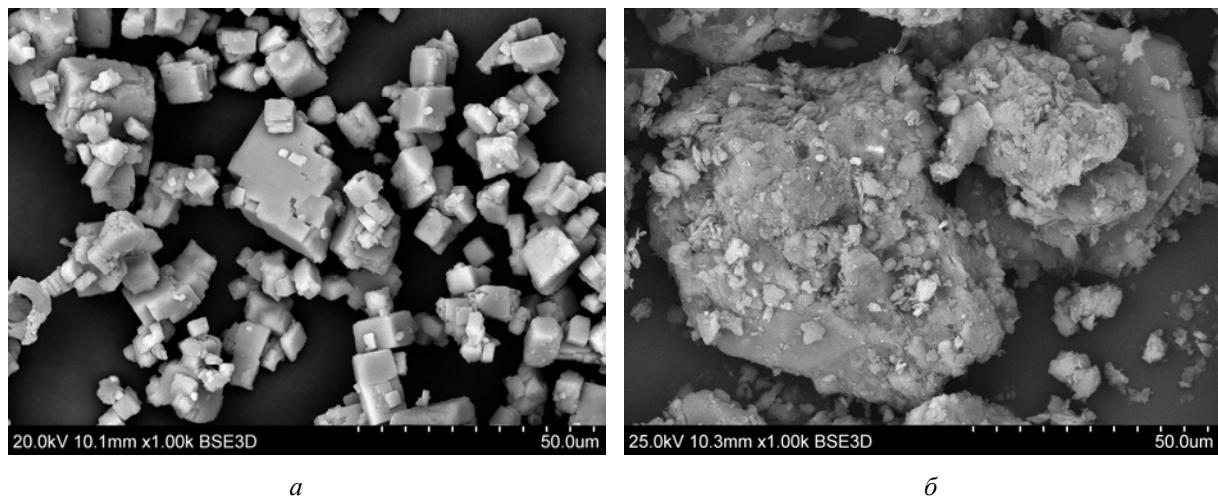


Рис. 2. Формы пылевых частиц: *а* – от источников предприятия (степень увеличения 1000 крат); *б* – в атмосферном воздухе на границе СЗЗ (степень увеличения 1000 крат)

Таблица 3

Примеры кодирования и номенклатура учета химических веществ по данным расчетных методик и результатов исследований

Источник выделения	Кодируется предприятием		Компоненты пыли, установленные по результатам исследований		
	вещество	RfC , мг/м ³	идентифицированный состав	RfC , мг/м ³	% содержания
Механическая обработка металла (обрубка)	Взвешенные вещества	0,075	Сульфат железа	0,007–	30,58
			Диоксид кремния	0,05	20,07
			Железа оксид	0,04–	19,67
			Магний оксид	0,05–	16,81
			Оксид алюминия	0,005	3,23
			Прочие (не идентиф.)	0,075	9,43
			PM ₁₀	0,05	33,0
			PM _{2,5}	0,015	7,1
Механическая обработка металла (сверление)	Взвешенные вещества	0,075	Железа оксид	0,04–	97,35
			Mn и его соединения	0,00005	1,15
			Хром (в пересчете на хрома (VI) оксид)	0,000008	0,99
			Прочие примеси	0,15/0,075	0,40
			Оксид алюминия	0,005	0,11
			PM ₁₀	0,04	13,00
			PM _{2,5}	0,015	7,00
Токарные работы	Взвешенные вещества	0,075	Железа оксид	0,04	98,19
			Марганец и его соединения	0,00005	1,07
			Прочие неидентиф.	0,075	0,41
			Хром	0,000008	0,33
			PM ₁₀	0,05	12,00
			PM _{2,5}	0,015	0,40

И наличие токсичных составляющих в составе пыли, и значительная доля мелкодисперсных частиц позволяют предполагать, что потенциальные риски в зоне влияния предприятия при существующей системе идентификации примесей могут быть существенно недооценены.

Последнее утверждение было подтверждено при анализе санитарно-гигиенической ситуации в зоне влияния выбросов производства одного предприятия по получению первичного алюминия. Выбросы кодируются как пыль неорганическая (рефе-

рентная концентрация, принятая по «TSP», составляет $0,075 \text{ мг/м}^3$), тогда как в составе пылевой фракции определен оксид алюминия (Al_2O_3), доля которого составляет 84–87 % (референтная, безопасная концентрация составляет $0,005 \text{ мг/м}^3$).

Измеренная приземная концентрация пыли вблизи границы санитарно-защитной зоны производства составила $0,035 \text{ мг/м}^3$. Если принимать во внимание данные предприятия, риск для здоровья жителей ближайшей селитебной застройки является приемлемым: коэффициент опасности (hazard

quotient – HQ^6) не превышает 0,47 при допустимом уровне 1,0. Перед предприятием не ставится задача снижения выбросов или принятия иных действий по минимизации риска для населения.

Если учитывать, что 85 % пылевых частиц – это оксид алюминия, приземная концентрация которого составляет порядка 0,030 мг/м³, риск для здоровья формируется на уровне 7,0 HQ , что характеризуется как риск «высокий»⁷. В такой ситуации зона негативного влияния предприятия существенно увеличивается. Под опасным воздействием ($HQ > 1,0$) оказываются граждане, постоянно проживающие в 10 жилых домах, дети, посещающие дошкольные учреждения, владельцы 60 дачных участков. Ситуация характеризуется как неблагоприятная, требующая мероприятий по снижению выбросов оксида алюминия.

Пылевое загрязнение является серьезным источником угроз и опасностей для здоровья населения. В силу того, что на основе гигиенических оценок, в том числе оценки и характеристики уровней рисков для здоровья, принимаются управляющие решения, корректная оценка дисперсного и компонентного состава пылей, содержащихся в атмосферном воздухе, остается важнейшей актуальной задачей.

Социально-гигиенический мониторинг, основная цель которого – выявление причин условий нарушения безопасности среды обитания населения и выявления причинной-следственных связей в системе «среда – здоровье» – нуждается в современных методах количественного определения и дифференциации пылей.

Предлагаемые подходы, основанные на современных методах, могут найти применение в системе постоянных наблюдений, которые ведутся специалистами Роспотребнадзора. Важно, что метод и его аппаратное оформление позволяют идентифицировать и устанавливать количественные характеристики как компонентного, так и дисперсного состава пыли, что обеспечивает решение целого комплекса задач, которые могут возникать при ведении мониторинга или контроля качества атмосферного воздуха: установление реального уровня содержания в воздухе опасных примесей (таких как соединения тяжелых металлов и т.п.), формирование доказательной базы вклада отдельных источников в загрязнение, повышение точности и адекватности оценки экспозиции населения и т.п.

Несомненно, важным условием реализации предлагаемых подходов является наличие библиотек атрибутированных (аннотированных) микрофотографий. Такие библиотеки (базы данных) обеспечивают обучение нейронной сети и последующее распознавание образов отобранный пыли. Вместе с тем исследования пылевых выбросов в настоящее время ведутся достаточно широко [23–25]. Это позволяет постепенно нака-

пливать и расширять информацию для использования. Кроме того, представляется, что в формировании таких библиотек заинтересованы многие стороны. Для надзорных органов появляется возможность через оперативную идентификацию маркерных веществ доказывать объективность мер административного воздействия при выявлении нарушений. Для хозяйствующих субъектов появляется возможность как выполнять самооценку в рамках производственного контроля, так и отстаивать свои позиции в сложных ситуациях при выявлении нарушений гигиенических нормативов в ходе контрольно-надзорных мероприятий.

Выводы. Предложен метод идентификации и количественного определения химического состава и фракционной структуры пылей в атмосферном воздухе. Метод основан на отборе и микроскопировании проб пыли и анализе состава твердой компоненты с использованием нейросети, обученный на ранее собранных данных о структуре и дисперсном составе пылей. Для обработки изображений предложен ряд технических решений, повышающих качество изображения и адекватность получаемых результатов.

Предлагаемые подходы могут найти применение в системе постоянных наблюдений, которые ведутся специалистами Роспотребнадзора.

Метод требует дальнейшей отработки, апробирования на более широком спектре разных видов и уровней пылевого загрязнения. Вместе с тем полученные результаты свидетельствуют о его широких возможностях, позволяющих:

- оперативно устанавливать компонентный и дисперсный состав пылей, присутствующих в атмосферном воздухе;
- формировать профиль пылевого загрязнения;
- при сопоставительном анализе проводить оценку вклада источника в формирование загрязнения.

Получаемые результаты обеспечивают повышение корректности и точности оценки рисков для здоровья.

Важным условием реализации метода является наличие баз данных атрибутированных микрофотографий пылей разного качественного и дисперсного состава. Формирование таких баз данных (библиотек), их постоянное пополнение и применение в практических задачах может являться одним из направлений развития системы социально-гигиенического мониторинга.

Финансирование. Исследование проводилось при финансовой поддержке Пермского научно-образовательного центра «Рациональное недропользование».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

⁶ HQ , коэффициент опасности – отношение воздействующей концентрации химического вещества к его безопасному (референтному) уровню (Р.2.1.10.1920-04).

⁷ МР 2.1.10.0156-19. 2.1.10. Гигиена. Коммунальная гигиена. Состояние здоровья населения в связи с состоянием окружающей среды и условиями проживания населения. Оценка качества атмосферного воздуха и анализ риска здоровью населения в целях принятия обоснованных управлений решений в сфере обеспечения качества атмосферного воздуха и санитарно-эпидемиологического благополучия населения: методические рекомендации [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_415503/ (дата обращения: 15.01.2023).

Список литературы

1. Adverse health effects of outdoor air pollutants / L. Curtis, W. Rea, P. Smith-Willis, E. Fenyves, Y. Pan // Environ. Int. – 2006. – Vol. 32, № 6. – P. 815–830. DOI: 10.1016/j.envint.2006.03.012
2. Треккова Ю.В. Оценка степени опасности мелкодисперсных частиц в атмосферном воздухе и целесообразность их нормирования // Молодой ученый. – 2016. – Т. 111, № 7. – С. 291–294.
3. Воздействие взвешенных частиц на здоровье [Электронный ресурс] // ВОЗ. – 2013. – URL: https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0007/189052/Health-effects-of-particulate-matter-final-Rus.pdf (дата обращения: 27.12.2022).
4. Health effects of dust [Электронный ресурс] // Government of Western Australia, Department of Health. – URL: https://www.healthywa.wa.gov.au/Articles/F_I/Health-effects-of-dust (дата обращения: 27.12.2022).
5. Ревич Б.А. Мелкодисперсные взвешенные частицы в атмосферном воздухе и их воздействие на здоровье жителей мегаполисов // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2018. – Т. 29, № 3. – С. 53–78. DOI: 10.21513/0207-2564-2018-3-53-78
6. 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. – 2019. – Vol. 7. – P. 1–9. DOI: 10.1016/j.toxrep.2019.11.014
7. Skin Damage Mechanisms Related to Airborne Particulate Matter Exposure / N.D. Magnani, X.M. Muresan, G. Belmonte, F. Cervellati, C. Sticcozzi, A. Pecorelli, C. Miracco, T. Marchini [et al.] // Toxicol. Sci. – 2016. – Vol. 149, № 1. – P. 227–236. DOI: 10.1093/toxsci/kfv230
8. Air Pollution and Dementia: A Systematic Review / R. Peters, N. Ee, J. Peters, A. Booth, I. Mudway, K.J. Anstey // J. Alzheimers Dis. – 2019. – Vol. 70, № s1. – P. S145–S163. DOI: 10.3233/JAD-180631
9. Choi H., Kim S.H. Air Pollution and Dementia // Dement. Neurocogn. Disord. – 2019. – Vol. 18, № 4. – P. 109–112. DOI: 10.12779/dnd.2019.18.4.109
10. Long-term effect of fine particulate matter on hospitalization with dementia / M. Lee, J. Schwartz, Y. Wang, F. Dominici, A. Zanobetti // Environmental Pollution. – 2019. – Vol. 254, pt A. – P. 112926. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.07.094
11. Fine particulate matter exposure during childhood relates to hemispheric-specific differences in brain structure / D. Cserbik, J.-C. Chen, R. McConnell, K. Berhane, E.R. Sowell, J. Schwartz, D.A. Hackman, E. Kan // Environ. Int. – 2020. – Vol. 143. – P. 105933. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105933
12. Acute and chronic exposure to air pollution in relation with incidence, prevalence, severity and mortality of COVID-19: a rapid systematic review / P.D.M.C. Katoto, A.S. Brand, B. Bakan, P.M. Obadia, C. Kuhangana, T. Kayembe-Kitenge, J.P. Kitenge, C.B.L. Nkulu [et al.] // Environ. Health. – 2021. – Vol. 20, № 1. – P. 41. DOI: 10.1186/s12940-021-00714-1
13. Air Pollution and COVID-19: The Role of Particulate Matter in the Spread and Increase of COVID-19's Morbidity and Mortality / S. Comunian, D. Dongo, C. Milani, P. Palestini // Int. J. Environ. Res. Public. Health. – 2020. – Vol. 17, № 12. – P. 4487. DOI: 10.3390/ijerph17124487
14. Бауманн Р., Кржикановски М., Чичерин С. Рамочный план организации мониторинга взвешенных веществ в атмосфере в странах Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии [Электронный ресурс]. – Бонн: ВОЗ, Европейский центр по окружающей среде и охране здоровья, 2006. – URL: https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0020/130763/E88565R.pdf (дата обращения: 27.12.2022).
15. Kokoulin A.N., Kokoulin R.A. The Hierarchical Approach for Image Processing in Objects Recognition System // Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). – 2022. – P. 340–344.
16. Wang W., Chang F. A Multi-focus Image Fusion Method Based on Laplacian Pyramid // Journal of Computers. – 2011. – Vol. 6, № 12. – P. 2559–2566. DOI: 10.4304/jcp.6.12.2559-2566
17. Kokoulin A.N., Yuzhakov A.A., Kokoulin R.A. Multiscale Optical PM2.5 Particles Recognition and Sorting System in Dust Probes // 2020 5th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech). – Croatia, 2020. – P. 1–6. DOI: 10.23919/SpliTech49282.2020.9243759
18. Fast and Accurate Image Super-Resolution with Deep Laplacian Pyr-amid Networks [Электронный ресурс] / W.-S. Lai, J.-B. Huang, N. Ahuja, M.-H. Yang. – URL: <https://arxiv.org/abs/1710.01992> (дата обращения: 10.02.2023).
19. Handheld Multi-Frame Super-Resolution / B. Wronski, I. Garcia-Dorado, M. Ernst, D. Kelly, M. Krainin, C.-K. Liang, M. Levoy, P. Milanfar // ACM Transactions on Graphics. – Vol. 38, № 4. – P. 1–18. DOI: 10.1145/3306346.3323024
20. Сысоева Е.В., Гельманова М.О. Исследование загрязнения района Москвы мелкодисперсными частицами пыли вблизи автомобильных дорог // Актуальные проблемы строительной отрасли и образования: сборник докладов Первой Национальной конференции. – М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2020. – С. 566–571.
21. Оценка пылеаэрозольного загрязнения в зоне влияния цементного завода на основе изучения снегового покрова (Новосибирская область) / Д.А. Володина, А.В. Таловская, Е.Г. Язиков, А.Ю. Девятова, А.В. Еделев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333, № 10. – С. 69–85. DOI: 10.18799/24131830/2022/10/3704
22. Будаева Ю.С. Эколо-геохимическая оценка влияния твердых частиц на качество атмосферного воздуха на территории г. Юрги по данным изучения снегового покрова (Кемеровская область) // Актуальные проблемы недропользования: тезисы докладов XVIII Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых. – СПб., 2022. – С. 172–175.
23. Methodology for monitoring dust concentrations in ambient air and analysis of collected measurements [Электронный ресурс] // CEE Bankwatch Network. – URL: <https://bankwatch.org/wp-content/uploads/2020/07/Methodology-EDM-164.pdf> (дата обращения: 13.01.2023).

К новым методам измерения и распознавания микрочастиц пылей в атмосферном воздухе / А.Н. Кокулин, И.В. Май, С.Ю. Загороднов, А.А. Южаков // Анализ риска здоровью. – 2023. – № 1. – С. 36–45. DOI: 10.21668/health.risk/2023.1.04

Research article

ON NEW METHODS FOR MEASURING AND IDENTIFYING DUST MICROPARTICLES IN AMBIENT AIR

A.N. Kokoulin¹, I.V. May², S.Yu. Zagorodnov², A.A. Yuzhakov¹

¹Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolskii Ave., Perm, 614990, Russian Federation

²Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management Technologies, 82 Monastyrskaia Str., Perm, 6140045, Russian Federation

Established health hazards posed by dust microparticles require automated and mobile devices for their assessment. Such devices should provide an opportunity to analyze component and disperse structures of the solid component in ambient air pollution operatively and in real time. In future, they will replace labor-consuming sampling and separate identification of fraction structure and chemical composition of dusts.

The aim of this study was to develop and test new methodical, procedural and instrumental approaches to monitoring of solid particles in ambient air. We suggest a hardware and software complex that implements a two-stage scheme for identifying solid particles sampled in ambient air according to the from-coarse-to-fine principle. The first stage involves identifying the total concentration of solid particles by laser diffraction. Microphotographs are taken with iMicro Q2 mini portable microscope with magnification x800. The microscope lens is connected to a camera, which is linked to nVidia Jetson Nano micro PC. The micro PC classifies particles, identifies their contours by using a neural network and deals with image segmentation. The second stage relies on using computer vision that makes it possible to automate routine recognition of particle images created by the microscope in order to calculate levels of different substances in a sample. All the data are analyzed by the second neural network that performs preset calculations in accordance with mathematical logic (model). The network is trained using a library that contains attributed microphotographs of dusts with different qualitative and disperse structures.

The algorithm has been tested with some promising results. Identified disperse structures and chemical composition of dusts turn out to be quite similar to those identified by conventional approaches and measurement methods. The method has been shown to offer wide opportunities to identify dust composition and structure, to create dust pollution profiles, and to estimate a contribution made by a specific source to overall pollution.

The study results ensure more correct and precise health risk assessment under exposure to dusts in ambient air.

Keywords: dust pollution, concentration of solid particles, dust fraction structure and chemical composition, ambient air, image recognition, computer vision.

References

1. Curtis L., Rea W., Smith-Willis P., Fenyves E., Pan Y. Adverse health effects of outdoor air pollutants. *Environ. Int.*, 2006, vol. 32, no. 6, pp. 815–830. DOI: 10.1016/j.envint.2006.03.012
2. Treskova Yu.V. Otsenka stepeni opasnosti melkodispersnykh chastits v atmosfernom vozdukhe i tselesobraznost' ikh normirovaniya [Assessment of the degree of danger of fine particles in the atmospheric air and the feasibility of their regulation]. *Molodoi uchenyi*, 2016, vol. 111, no. 7, pp. 291–294 (in Russian).
3. Health effects of particulate matter final. *WHO*, 2013. Available at: https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/189051/Health-effects-of-particulate-matter-final-Eng.pdf (December 27, 2022).
4. Health effects of dust. *Government of Western Australia, Department of Health*. Available at: https://www.healthywa.wa.gov.au/Articles/F_I/Health-effects-of-dust (December 27, 2022).
5. Revich B.A. Fine suspended particulates in ambient air and their health effects in megalopolises. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2018, vol. 29, no. 3, pp. 53–78. DOI: 10.21513/0207-2564-2018-3-53-78 (in Russian).
6. 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.*, 2019, vol. 7, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.toxrep.2019.11.014

© Kokoulin A.N., May I.V., Zagorodnov S.Yu., Yuzhakov A.A., 2023

Andrey N. Kokoulin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Automation and Tele-mechanics (e-mail: a.n.kokoulin@at.pstu.ru; tel.: +7 (342) 239-18-16; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1095-4508>).

Irina V. May – Doctor of Biological Sciences, Professor, Deputy Director responsible for research work (e-mail: may@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-25-47; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0976-7016>).

Sergey Yu. Zagorodnov – Senior Researcher (e-mail: zagorodnov@fcrisk.ru; tel.: +7 (342) 237-18-04; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6357-1949>).

Alexander A. Yuzhakov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Automation and Tele-mechanics (e-mail: uz@at.pstu.ru; tel.: +7 (342) 239-18-16).

7. Magnani N.D., Muresan X.M., Belmonte G., Cervellati F., Sticozzi C., Pecorelli A., Miracco C., Marchini T. [et al.]. Skin Damage Mechanisms Related to Airborne Particulate Matter Exposure. *Toxicol. Sci.*, 2016, vol. 149, no. 1, pp. 227–236. DOI: 10.1093/toxsci/kfv230
8. Peters R., Ee N., Peters J., Booth A., Mudway I., Anstey K.J. Air Pollution and Dementia: A Systematic Review. *J. Alzheimers Dis.*, 2019, vol. 70, no. s1, pp. S145–S163. DOI: 10.3233/JAD-180631
9. Choi H., Kim S.H. Air Pollution and Dementia. *Dement. Neurocogn. Disord.*, 2019, vol. 18, no. 4, pp. 109–112. DOI: 10.12779/dnd.2019.18.4.109
10. Lee M., Schwartz J., Wang Y., Dominici F., Zanobetti A. Long-term effect of fine particulate matter on hospitalization with dementia. *Environmental Pollution*, 2019, vol. 254, pt A, pp. 112926. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.07.094
11. Cserbik D., Chen J.-C., McConnell R., Berhane K., Sowell E.R., Schwartz J., Hackman D.A., Kan E. Fine particulate matter exposure during childhood relates to hemispheric-specific differences in brain structure. *Environ. Int.*, 2020, vol. 143, pp. 105933. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105933
12. Katoto P.D.M.C., Brand A.S., Bakan B., Obadia P.M., Kuhangana C., Kayembe-Kitenge T., Kitenge J.P., Nkulu C.B.L. [et al.]. Acute and chronic exposure to air pollution in relation with incidence, prevalence, severity and mortality of COVID-19: a rapid systematic review. *Environ. Health*, 2021, vol. 20, no. 1, pp. 41. DOI: 10.1186/s12940-021-00714-1
13. Comunian S., Dongo D., Milani C., Palestini P. Air Pollution and COVID-19: The Role of Particulate Matter in the Spread and Increase of COVID-19's Morbidity and Mortality. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2020, vol. 17, no. 12, pp. 4487. DOI: 10.3390/ijerph17124487
14. Baumann R., Krzyzanowski M., Chicherin S. Framework plan for the development of monitoring of particulate matter in EEC. Bonn, WHO European Centre for Environment and Health, 2006. Available at: https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0019/130762/E88565.pdf (December 27, 2022).
15. Kokoulin A.N., Kokoulin R.A. The Hierarchical Approach for Image Processing in Objects Recognition System. *Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, 2022, pp. 340–344.
16. Wang W., Chang F. A Multi-focus Image Fusion Method Based on Laplacian Pyramid. *Journal of Computers*, 2011, vol. 6, no. 12, pp. 2559–2566. DOI: 10.4304/jcp.6.12.2559-2566
17. Kokoulin A.N., Yuzhakov A.A., Kokoulin R.A. Multiscale Optical PM2.5 Particles Recognition and Sorting System in Dust Probes. *2020 5th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*. Croatia, 2020, pp. 1–6. DOI: 10.23919/SpliTech49282.2020.9243759
18. Lai W.-S., Huang J.-B., Ahuja N., Yang M.-H. Fast and Accurate Image Super-Resolution with Deep Laplacian Pyramid Networks. Available at: <https://arxiv.org/abs/1710.01992> (February 10, 2023).
19. Wronski B., Garcia-Dorado I., Ernst M., Kelly D., Krainin M., Liang C.-K., Levoy M., Milanfar P. Handheld Multi-Frame Super-Resolution. *ACM Transactions on Graphics*, vol. 38, no. 4, pp. 1–18. DOI: 10.1145/3306346.3323024
20. Sysoeva E.V., Gel'manova M.O. Issledovanie zagryazneniya raiona Moskvy melkodispersnymi chastitsami pyli vblizi avtomobil'nykh dorog [Study of pollution of the Moscow region with fine dust particles near highways]. *Aktual'nye problemy stroitel'noi otrassli i obrazovaniya: Sbornik dokladov Pervoi Natsional'noi konferentsii*. Moscow, Natsional'nyi issledovatel'skii Moskovskii gosudarstvennyi stroitel'nyi universitet Publ., 2020, pp. 566–571 (in Russian).
21. Volodina D.A., Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Devyatova A.Yu., Edelev A.V. Assessment of dust and aerosol pollution in the zone of influence of the cement plant based on the study of snow cover (Novosibirsk region). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2022, vol. 333, no. 10, pp. 69–85. DOI: 10.18799/24131830/2022/10/3704 (in Russian).
22. Budaeva Yu.S. Ecological and geochemical assessment of the territory of Yurga according to the data of studying the snow cover (Kemerovo region). *Aktual'nye problemy nedropol'zovaniya: tezisy dokladov XVIII Mezhdunarodnogo foruma-konkursa studentov i molodykh uchenykh*, Saint Petersburg, 2022, pp. 172–175 (in Russian).
23. Methodology for monitoring dust concentrations in ambient air and analysis of collected measurements. *CEE Bankwatch Network*. Available at: <https://bankwatch.org/wp-content/uploads/2020/07/Methodology-EDM-164.pdf> (January 13, 2023).

Kokoulin A.N., May I.V., Zagorodnov S.Yu., Yuzhakov A.A. On new methods for measuring and identifying dust microparticles in ambient air. *Health Risk Analysis*, 2023, no. 1, pp. 36–45. DOI: 10.21668/health.risk/2023.1.04.eng

Получена: 23.01.2023

Одобрена: 15.03.2023

Принята к публикации: 28.03.2023