

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2022.4.06

УДК 004.93

А.Н. Кокоулин¹, И.В. Май², С.Ю. Загороднов²¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия²ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий
управления рисками здоровью населения», Пермь, Россия

АЛГОРИТМ ВЫБОРА МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПОСТОВ МОНИТОРИНГА ПЫЛЕВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОРТАТИВНОГО АНАЛИЗАТОРА

Технологические процессы промышленных предприятий являются источниками выбросов мелкодисперсных пылевых частиц в атмосферу, опасных для здоровья человека. Для оценки и контроля выбросов необходимы разработка и модернизация методов мониторинга качества атмосферного воздуха. Наиболее информативными и надежными методами оценки загрязнения являются систематические измерения на стационарных постах, и задача выбора месторасположения поста является очень важной. Мы предлагаем портативную систему измерения концентрации пыли, позволяющую определить наилучшие места для размещения постов. **Цель исследования:** разработка портативной установки для анализа пылевого загрязнения воздуха и модернизация алгоритма выбора местоположения постов мониторинга при использовании портативной установки. **Методы:** использование методов оптического распознавания объектов, таких как нейронные сети, для количественного и морфологического анализа частиц. **Результаты:** предложена модификация алгоритма выбора оптимальных точек размещения постов мониторинга при использовании портативного измерительного устройства, позволяющая выявить наилучшие локации. Разрабатываемое портативное устройство позволяет непрерывно анализировать пробы воздуха, привязывая полученные результаты к координатной сетке, для составления предварительной («грубой») картограммы концентраций загрязнений по веществам и выделять локальные максимумы для размещения постов мониторинга. В сравнении с исходным алгоритмом выбора местоположения постов, при котором выполнялся забор только нескольких проб на территории (в точках, не соответствующих максимумам), и выполнялось полноценное исследование с последующей аппроксимацией результатов по территории, предлагаемая модификация алгоритма опирается на результаты реальных замеров и не допускает пропуска (сглаживания) максимумов. **Практическая значимость:** разработанное устройство и алгоритм позволяют ускорить составление предварительной картограммы распределения концентраций веществ за счет использования оптических методов распознавания по сравнению с традиционными методиками, подразумевающими полноценный длительный анализ нескольких проб и дальнейшую аппроксимацию результатов.

Ключевые слова: PM2.5, PM10, распознавание объектов, иерархическое распознавание.

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

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Federal Scientific Center for Medical and Preventive Health Risk Management
Technologies, Perm, Russian Federation

THE ALGORITHM OF THE DUST POLLUTION MONITORING POSTS LOCATION USING THE PORTABLE ANALYSER DEVICE

Technological processes of industrial plants and factories lead to intense dust emissions into the atmosphere of fine-disperse particles discharges which are dangerous for human health. To assess and control emissions, it is necessary to develop and modernize methods for monitoring atmospheric air quality. Most informative and reliable methods of dust concentration assessment are systematic instrumental measurements at stationary posts, so the choice of the post localization is important. We offer a portable dust measurement system to help determine the best locations for posts. **The purpose of the study:** the development of a portable installation for the analysis of dust air pollution and the modernization of the algorithm for choosing the location of monitoring posts when using a portable installation. **Methods:** Use of optical object recognition methods such as neural networks for quantitative and morphological analysis of particles. **Results:** A modification of the algorithm for choosing the optimal points for the placement of monitoring posts using a portable measuring device is proposed, which makes it possible to identify the best locations. The developed portable device allows you to continuously analyze air samples, tying the results to a coordinate grid, to compile a preliminary ("rough") cartogram of pollution concentrations by substances and highlight local maxima for monitoring posts. In comparison with the original algorithm for choosing the location of posts, in which only a few samples were taken on the territory (at points that did not correspond to the maxima), and a full study was performed with subsequent approximation of the results over the territory, the proposed modification of the algorithm is based on the results of real measurements and does not allow missing (smoothing) maxima. **Practical relevance:** the developed device and algorithm make it possible to speed up the preparation of a preliminary cartogram of the distribution of substance concentrations through the use of optical recognition methods compared to traditional methods that involve a full-fledged long-term analysis of several samples and further approximation of the results.

Keywords: PM2.5, PM10, object recognition, hierarchical recognition.

Введение

Наиболее информативным и надежным методом оценки пылевого загрязнения атмосферы являются систематические инструментальные измерения в рамках мониторинга качества атмосферного воздуха.

Для определения массовой концентрации пылей в воздухе используются методы:

– гравиметрический (эталонный, эквивалентный) – наиболее распространенный метод. Метод определения массовой концентрации взвешенных пылевых частиц с выполнением анализа отобранных проб воздуха фильтрами сертифицированного устройства. Осажденная пыль взвешивается для определения навески и расчета значения концентрации. Доля сажи в измеренной массе частиц, осевших на фильтр, определяется фотометрически [1–4]. Метод требует длительного отбора

проб для анализа воздуха, в котором частицы пыли содержатся в низких концентрациях и обладает достаточной точностью при определении высоких концентраций пыли в воздухе (например, в воздухе рабочей зоны). Для определения содержания в воздухе пыли различных фракций используются специальные вспомогательные устройства – импакторы, позволяющие разделять частицы разных аэродинамических размеров. Для автоматических анализаторов с использованием гравиметрического метода устанавливаются корректировочные коэффициенты;

– физические методы измерений (оптический, радиоизотопный, нефелометрический, счетчик частиц, микробаланс и др.) – для анализа используются автоматические анализаторы пыли (так называемые «пылемеры»), позволяющие в режиме реального времени напрямую определять массовые концентрации в воздухе как взвешенных веществ (TSP – Total Suspended Particles), так и частиц с заданными по фракциям диаметрами (чаще всего PM10, PM4, PM2.5, PM1). Технически такие приборы определяют счетную концентрацию частиц аэрозоля в воздухе, а расчет массовой концентрации проводится на основе заложенных в программу моделей распределения массы частиц в зависимости от их размера и калибровочных зависимостей. Для калибровки прибора могут использоваться импактор и гравиметрический метод, что позволяет достигать высокой точности измерений. Использование автоматических анализаторов позволяет быстро и с приемлемой точностью определять низкие значения концентраций пылевых частиц в воздухе. Возможна передача данных с результатами в режиме онлайн.

В рамках контроля качества атмосферного воздуха в Российской Федерации реализуются три вида мониторинга, имеющие свои задачи, принципы выбора точек и программ наблюдений.

1. Экологический мониторинг. Цель – наблюдение за уровнем загрязнения атмосферы, формируемым выбросами промышленных объектов и автотранспорта, метеорологическими условиями, прогноз изменений качества атмосферы за длительный период. основополагающий документ системы государственного экологического мониторинга – «Руководство по контролю загрязнения атмосферы» [2]. Закрепленная в этом документе система мониторинга имеет единый порядок определения размещения и количества постов наблюдений, формирования программ и сроков наблюдений. Она соблюдается всеми структурными подразделениями уполномоченного органа – Росгидромета. По реко-

мендациям документа размещение постов мониторинга в первую очередь производится в жилых районах с наибольшим превышением ПДК загрязнений и в административных центрах.

Контроль на опорных постах экомониторинга концентрации и состава пылей производится в обязательном порядке. Остальные вещества, к которым относится идентифицируемый по химическому составу твёрдый компонент промышленных выбросов, отнесены к «специфическим», включение их в программу наблюдения зависит от сложившегося загрязнения. Предполагается, что программы должны обеспечивать не менее 200 наблюдений (часть из которых может быть некорректной) для каждого вида примеси. Для вычисления средней концентрации (хронической) усредняются данные от этих 200 измерений.

Учёт дисперсного (фракционного) состава пылевых частиц в атмосферном воздухе РД 52.04.186-89 «Руководство по контролю загрязнения атмосферы» предусмотрен не был. Несмотря на введение гигиенических нормативов содержания PM10 и PM2.5 в атмосферном воздухе, мониторинг содержания этих мелкодисперсных частиц в атмосферном воздухе на территории Российской Федерации развит мало. Это объясняется кроме прочего экономическими сложностями для формирования приборно-аналитической базы.

Содержание PM10, PM2.5 контролируется в атмосферном воздухе либо экономически развитых крупных городов (Москва, Санкт-Петербург, Казань), либо в населённых пунктах с высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха (Красноярск, Норильск, Селенгинск, Улан-Удэ, Шелехов, Ангарск, Гусиноозерск) [5–7].

2. Производственный экологический контроль. Цель – фиксирование соблюдения или нарушения установленных требований безопасности в результате деятельности хозяйствующего субъекта [8, 9]. Контроль осуществляют непосредственно хозяйствующие субъекты, имеющие источники выбросов, по разработанной ими и утверждённой в установленном порядке программе [10, 11]. Инструментальные измерения содержания загрязняющих веществ, в том числе пылей, осуществляются непосредственно на источнике выброса. Полученные результаты сравниваются с установленными нормативами допустимых выбросов.

3. Социально-гигиенический мониторинг. Цель – оценка, выявление изменений и прогноз состояния здоровья населения под воздействием загрязнения атмосферного воздуха [12]. Универсальный порядок

выбора точек и формирования программ мониторинга качества воздуха в рамках социально-гигиенического мониторинга в рекомендациях не закреплен. Принципы выбора мест измерений в соответствии с Инструктивным письмом 2006 г. [13] аналогичны подходам, используемым при выборе постов экологического мониторинга. Локация стационарных пунктов наблюдения учитывает плотность и численность населения в прилегающих к промышленным зонам территориях. Должно быть проведено исследование для определения приоритетных источников выбросов. Письмом не уточняются подходы к организации предварительного исследования и установлению приоритетности загрязняющих веществ. Эта формулировка недостаточно четкая, не позволяет определить, как рельеф, особенности климата, время года и прочие факторы могут повлиять на правильность выбора места проведения замеров.

Программы мониторинга должны формироваться с учетом потенциальных угроз для населения [14, 15]. Соответственно точки отборов должны быть репрезентативными в условиях значительных территорий населённых пунктов и большой численности населения, проживающего в условиях разной экспозиции.

Таким образом, выбор оптимального перечня измеряемых показателей, числа и мест размещения точек отбора проб является серьёзной научной задачей для решения вопросов оценки экспозиции населения к выбросам и установления конкретных источников, формирующих загрязнение [16].

Один из важнейших инструментов для выбора точек и примесей для контроля – пространственный анализ полей концентраций, получаемых с использованием автоматизированных программ расчетов рассеивания выбросов, с использованием геоинформационных систем [17, 18]. По мнению ряда авторов, расчеты рассеивания не всегда могут быть единственной основой для формирования программ наблюдения [19] и требуют верификации результатов инструментальными исследованиями, в том числе данными автоматизированных систем непрерывного контроля и учета выбросов [20].

В данной статье рассмотрен алгоритм выбора оптимальных точек размещения постов мониторинга и обоснована возможность модернизации этого алгоритма при использовании портативного измерительного устройства. Во второй части статьи описана разработка портативного устройства измерения концентрации пыли, позволяющего оперативно

оценивать изменения концентрации пылей в атмосферном воздухе, и привязывать измеренные концентрации к геолокациям. В третьей части описана разработка основных алгоритмов для распознавания объектов в подсистеме оптического зрения прибора.

1. Алгоритм проведения оценки пылевого загрязнения

Оценка пылевого загрязнения жилой территории и установление источников выбросов необходимы для разработки воздухоохраных мероприятий. Перечислим основные этапы на примере реального производства:

Изучение технологической цепочки, производственных процессов и оборудования, воздухоохранной документации. Результат: установлено, что на исследуемом предприятии размещается полный комплекс производства алюминия: электролизное производство, литейное производство, анодное производство, участок транспортировки глинозема и фторсолей, участок производства фторсолей и пылегазоулавливающих устройств, энергоцех, железнодорожный цех. Количество стационарных источников выбросов: 245. Общая характеристика выброса: 30 загрязняющих веществ массой 57498,6 т/год, из них 3405,6 т/год – твердые (пылевые) компоненты, включая фториды неорганические, плохо растворимые, пыль неорганическую (SiO_2 менее 20 %) и смолистые вещества (возгоны пека) в составе электролизной пыли выбросов производства алюминия.

Определение приоритетных источников пылевого загрязнения. Результат: по результатам анализа инвентаризации источников выбросов и компьютерного моделирования рассеивания выбросов твердых примесей от всех источников предприятия с использованием программы УПРЗА «Эколог-Город» 4.60.1 установлены источники выбросов, формирующих максимальный вклад в пылевой загрязнение атмосферного воздуха территории, прилегающей к предприятию. Более 90 % вклада в пылевое загрязнение вносит электролизное производство.

Определение пылевого профиля предприятия:

а) отбор проб на приоритетных источниках во время штатной работы оборудования методом осаждения твердых фракций на фильтры. Продолжительность отбора проб – 40 мин при объемном расходе $10 \text{ дм}^3/\text{мин}$;

б) определение химического состава пылей, установление форм частиц. Существует много методов определения химического состава веществ, но все они связаны со стационарным оборудованием, как это

было описано ранее в [11]. Например, хроматографический [6] и спектрометрический методы [7] с использованием сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения (степень увеличения – от 5 до 300 000 крат) с рентгено-флуоресцентной приставкой.

Результат: химический состав исследованных источников характеризуется широким набором химических элементов с высоким содержанием частиц, относимых к спектрам алюминия, фтора, натрия, кальция, железа и серы (рис. 1).

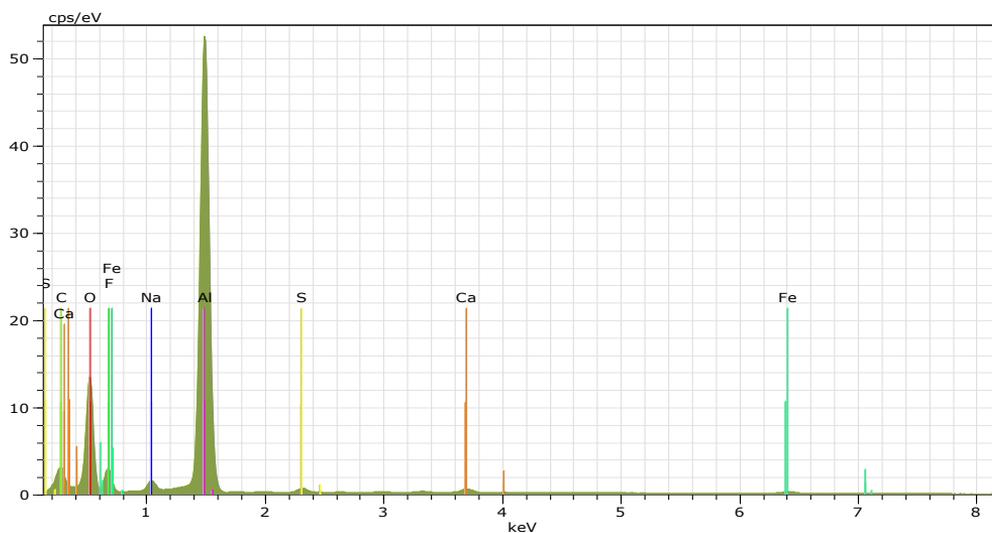


Рис. 1. Спектральный анализ проб

Балансовый расчет состава пылевых выбросов источников может показать процентное распределение химических веществ в составе. Морфология пылевых частиц подтверждает многокомпонентный химический состав выбросов. Большинство сфотографированных частиц имеет сложную, неправильную форму (рис. 2).

Оценка фактического распределения пылевых выбросов по территории. После этого исследователи получают химический профиль выбросов и списки веществ, концентрации которых нужно оценивать. Их примерная морфология, текстура могут быть получены из базы изображений частиц пылей, привязанных к масштабам. После этого можно приступить к выбору мест для организации постов (этап 4). Проблема в том, что количество проб чаще всего бывает небольшим, и не факт, что будут выбраны локации, соответствующие реальным максимумам кон-

центраций. Нами предлагается *дополнить* этап 4 предварительным исследованием по методу «coarse-to-fine», который позволит определить наилучшие позиции для выставления постов для замеров.

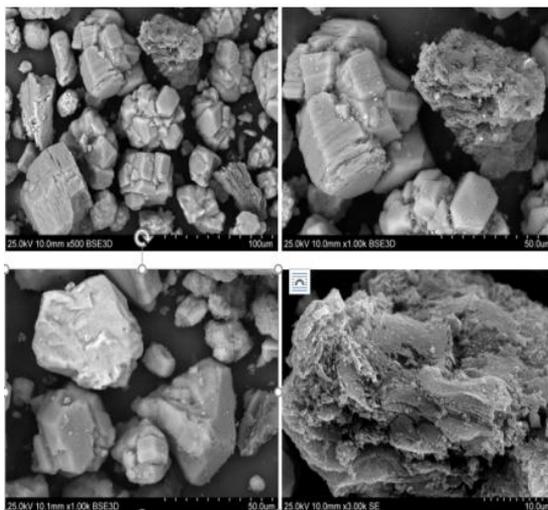


Рис. 2. Микрофотографии частиц

По результатам этого исследования будет составлена приблизительная картограмма пылевых загрязнений по веществам, согласно которой, тем не менее, достаточно точно можно определить относительное изменение концентраций и локализовать максимумы концентраций. Для выполнения такого исследования достаточно использовать портативное оборудование, содержащее недорогие компоненты, пусть не имеющие сертификации и калибровки, но способные в реальном времени определять (выявление максимумов концентраций) и привязывать результаты замеров к текущим GPS/GLONASS-координатам. Несколько человек, управляющих портативными устройствами, смогут в течение нескольких дней провести предварительную оценку и составить грубую картограмму пылевых загрязнений на территории населенного пункта (рис. 3). На основании полученных грубых результатов можно провести более точные исследования для уточнения местоположения постов замера.

Установленные в выбранных местах посты измерения позволяют систематически выполнять замеры пылевых загрязнений атмосферного воздуха для определения средних концентраций и проводить компьютерное моделирование рассеивания примесей, например, с использованием программного продукта УПРЗА «Эколог-Город» 4.60.1.

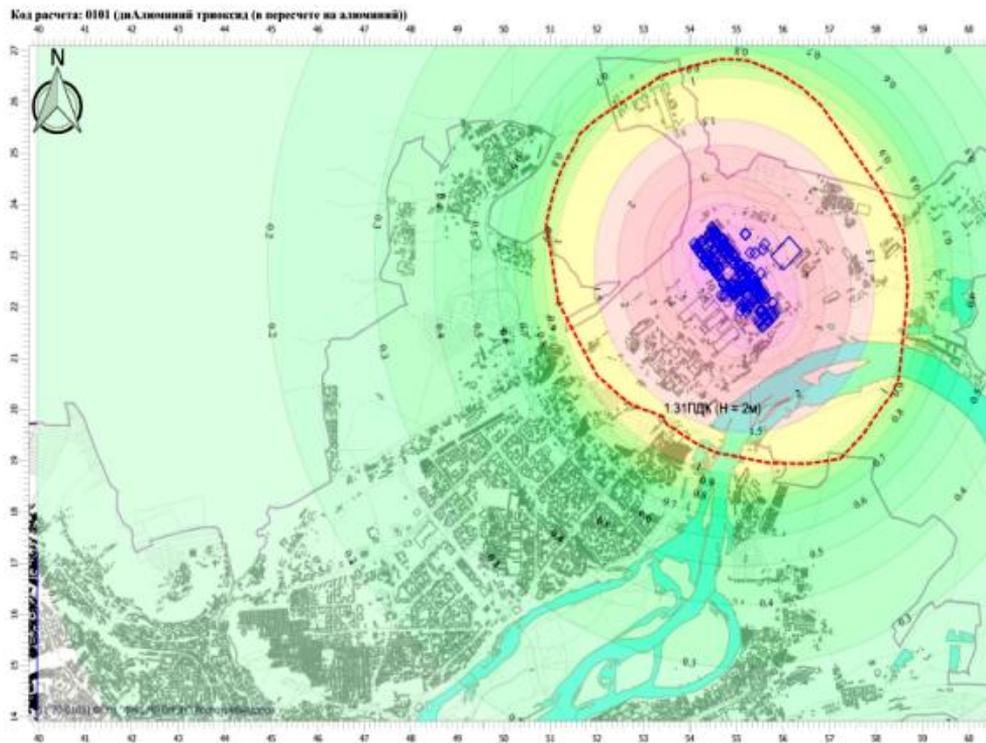


Рис. 3. Картограмма пылевых загрязнений

Результат: установлено, что фактическая пылевая нагрузка выбросов предприятия формируется специфическими для данного производства химическими веществами: оксидом алюминия, пылью неорганической: до 20 % SiO_2 , фиксируются превышения гигиенических нормативов до 1,3 ПДК. Мониторинг содержания в воздухе оксида алюминия на контрольной территории позволит делать более надежные выводы о вкладе предприятия в общее пылевое загрязнение атмосферного воздуха.

2. Разработка портативного устройства для измерения концентраций пылей

Требования к оборудованию:

- портативное оборудование должно быть легким, портативным, автономным;
- оборудование способно составить карту концентраций пылевых загрязнений и локализовать пики концентраций;
- оборудование способно распознавать и классифицировать пылевые частицы, используя атлас пылей с накопленной картотекой пылей.

Выбор архитектуры портативного устройства. Развитие технологий в области программного и аппаратного обеспечения, появление новых протоколов связи привели к появлению технологии Интернета вещей (IoT), способной обрабатывать, хранить и передавать данные от множества конечных устройств. Облачные технологии способны решить большинство задач IoT за счет использования централизованной обработки данных мощными серверами облачной платформы, в том числе и задачи мониторинга. Серверы обрабатывают потоки данных, генерируемых устройствами, с использованием методов искусственного интеллекта, а также их визуализацию.

Современный принцип «туманных» вычислений (Fog) и EDGE способен дополнить облачные решения, масштабировав и оптимизировав инфраструктуру IoT. Туманные вычисления эффективнее чистой IoT-архитектуры при решении real-time-задач. Они обеспечивают быстрый отклик на запросы и минимальную задержку при обработке данных, т.е. Fog дополняет IoT, расширяет его возможности и обеспечивает выполнение части распределенных вычисления «непосредственно на объекте» в режиме реального времени.

Для разрабатываемой системы можно выделить две особенности, определяющие выбор архитектуры:

- большой объем микрофотографий и прочих данных, которые практически невозможно передавать в реальном времени в полном объеме на сервер. Это замедлило бы процесс мониторинга при использовании «чистой» IoT-архитектуры;

- обработка постоянного потока микрофотографий на SoM, используемом в носимом устройстве, является ресурсоемкой процедурой, что также не позволит проводить вычисления по EDGE или Fog-модели в реальном времени.

Возможное решение заключается в реализации схемы многоэтапной обработки данных в парадигме «coarse-fine» на уровне самого прибора.

Два этапа проведения измерений:

- 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 только в тех точках, где наблюдается локальный максимум концентрации.

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.

Методы оценки концентрации и компонентного состава пылей.
 На первом этапе устройство выполняет бесконечный цикл алгоритма измерения концентрации с помощью PM-датчика SDS011. Он реализует метод лазерного рассеяния для определения концентрации частиц от 0,3 до 10 мкм в воздушном потоке и позволяет обнаруживать частицы PM_{2,5} и PM₁₀ в широком рабочем диапазоне 0,0–999,9 мкг/м³ (рис. 4). Этот датчик не сертифицирован для проведения точных измерений, но нам нужны только относительные значения концентрации, чтобы найти ее максимумы.

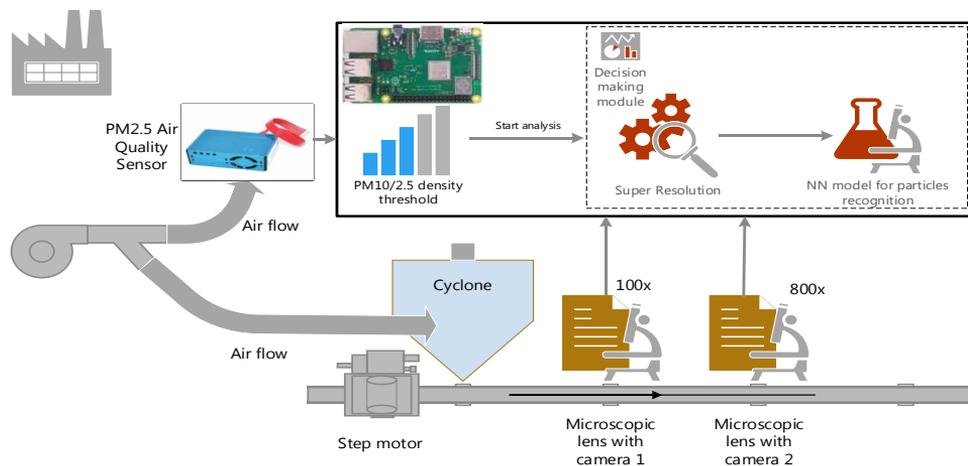


Рис. 4. Портативный прибор измерения концентраций

На втором этапе модуль оптического распознавания обнаруживает и классифицирует частицы с помощью методов предобработки изображений, повышения качества изображения (Super-Resolution) и распознавания объектов с помощью нейронных сетей (CNN) [22]. Этот модуль запускается при обнаружении максимума концентрации датчиком SDS011. Программный модуль написан на языке программирования Python и выполняется на SoM Raspberry PI 4. Оптическая система для получения исходных микрофотографий состоит из двух микроскопных

линз и фотокамер, позволяющих сохранять фотографии в RAW-формате без потери данных. Полученные микрофотографии отправляются в систему принятия решений. Для распознавания и идентификации частиц пылей нейронной сетью учитываются морфологические особенности, форма и размер.

В модуле оптического распознавания используются два типа входных изображений с разным коэффициентом увеличения, полученные от двух микроскопических линз. Линза с максимальным увеличением позволяет получить качественные изображения, позволяющие классифицировать частицы пыли PM10 и частично PM2.5, но эти изображения имеют недостаточное поле зрения для распознавания всего набора частиц в отобранном образце (только центральные частицы попадают в кадр). В свою очередь, линза с минимальным увеличением обеспечивает обзор всей сцены, но имеет низкое качество изображения, что не позволяет распознавать частицы. В связи с этим требуются дополнительные преобразования изображений для получения качественного изображения, которое можно обработать нейронной сетью.

3. Разработка основных алгоритмов для распознавания объектов

Основная проблема, с которой столкнулись разработчики ПО устройства, – низкое качество изображения. Для решения этой проблемы обычно используются методы суперразрешения (Super Resolution, SR). Эти методы базируются в основном на использовании нейронных сетей для прогнозирования текстуры в высоком разрешении по ее исходному изображению. Методы условно можно разделить на 2 группы: multi-image super-resolution (MISR) и single-image super-resolution (SISR), использующих соответственно несколько исходных изображений или единственное для восстановления SR-изображения [23–26]. Авторами предложена модификация метода SR для обработки серий изображений, созданных двумя источниками изображений (рис. 5), объединяющая преимущества алгоритмов SISR и MISR.

На первом этапе было решено использовать подход MISR, описанный в статье Handheld Multi-Frame Super-Resolution [24]. Камеры прибора способны сохранять изображения в RAW-формате, избегая потерь, связанных с сжатием изображения такими алгоритмами, как JPEG, и связанных с потерями в результате аппроксимации после фильтра

Байера (шаблона Байера), используемого для получения цифровых цветных фотографий. Для выполнения масштабирования на вход алгоритма подаются несколько фотографий неподвижного изображения пыли и выполняется двукратное увеличение разрешения. Следующим этапом проводится улучшение методом SISR.

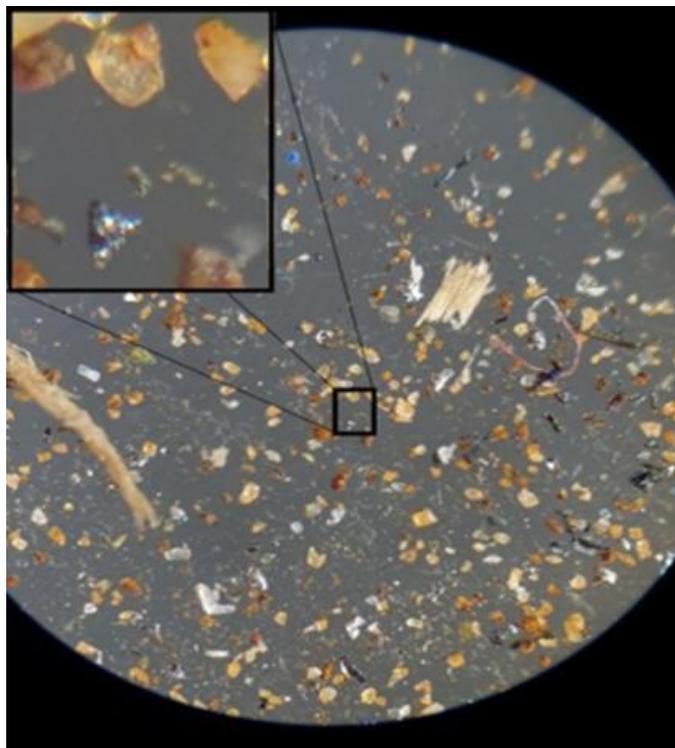


Рис. 5. Два вида фотографий, получаемых прибором

Одним из лучших методов SR по одиночному изображению (SISR), который дает хорошие результаты даже при 8-кратном масштабировании, является LapSRN (или MS-LapSRN) [23]. Этот подход использует глубокую лапласовскую пирамидальную сеть SR для точной дискретизации изображения. Этот метод дал нам оптимальное соотношение качества масштабирования (критерий PSNR) к скорости обработки изображения.

Основная идея усовершенствования алгоритма сверхвысокого разрешения заключается в том, что мы можем использовать изображение с лучшим увеличением в качестве исходной точки (Ground Truth) для оценки качества обработки сверхвысокого разрешения. Как уже

упоминалось выше, для каждой пробы получают несколько изображений с камер с разным увеличением. Первая группа фотографий (центр пробы, см. рис.5) сделана с большим увеличением, и ее можно использовать для проверки результатов сверхвысокого разрешения (SISR) по второй группе фотографий. Результат с наилучшим показателем PSNR используется для создания синтетического изображения с большим полем зрения. В результате мы можем синтезировать изображение с высоким разрешением для проведения морфологического анализа.

Заключение

Предложен алгоритм выбора оптимальных точек размещения постов мониторинга при использовании портативного измерительного устройства, позволяющий выявить наилучшие локации.

Описана конструкция портативного устройства измерения концентрации пыли, позволяющего оперативно оценивать изменения концентрации пылей в атмосферном воздухе и привязывать измеренные концентрации к геолокациям. Основным преимуществом разработанного устройства является реализация морфологической идентификации частиц, позволяющая разделять источники загрязнения атмосферного воздуха по классам веществ.

Библиографический список

1. ГОСТ 17.2.4.05-83 (СТ СЭВ 3846-82). Атмосфера. Гравиметрический метод определения взвешенных частиц пыли [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200012793>
2. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы (утв. Госкомгидрометом и Минздравом СССР) // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.
3. РД 52.04.893-2020. Массовая концентрация взвешенных веществ в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений гравиметрическим методом [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/565233912>
4. Методические проблемы мониторинга мелкодисперсных частиц в атмосферном воздухе населённых мест / сост. А.О. Карелин, А.Ю. Ломтев, Н.А. Мозжухина, А.О. Карелин, Г.Б. Еремин, В.А. Никонов // Гигиена и санитария. – 2016. – 95 (10). – С. 985–988.

5. Список городов России с наибольшим уровнем загрязнения атмосферного воздуха [Электронный ресурс]. – URL: http://voeikov-mgo.ru/?option=com_content&view=article&id=681:rc20150423&catid=15:resursy&lang=ru

6. Разовые концентрации загрязняющих веществ (далее – ЗВ), измеряемые в режиме on-line (в долях ПДК_{мр}) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.krasecology.ru/>

7. Мониторинг загрязнения атмосферного воздуха г. Казани [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.tatarmeteo.ru/ru/monitoring-okruzhayushhej-sredyi/monitoring-zagryazneniya-atmosfernogo-vozduxa-kazani.html>

8. Фаблов С.А. Производственный экологический контроль в области охраны атмосферного воздуха // Аллея науки. – 2018. – Т. 5, № 10 (26). – С. 13–18.

9. Костюченко М.Н., Волохова Л.Т., Степанюк В.Д. Волохова М.Н. Производственный экологический контроль на хлебопекарных предприятиях в области охраны атмосферного воздуха // Хлебопечение России. – 2018. – № 4. – С. 12–16.

10. Об охране окружающей среды: Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ (последняя редакция) [Электронный ресурс]. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/

11. Об утверждении требований к содержанию программы производственного экологического контроля, порядка и сроков представления отчета об организации и о результатах осуществления производственного экологического контроля: приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 18.02.2022 № 109 [Электронный ресурс]. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202202250023>

12. О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения: Федеральный закон № 52-ФЗ от 30.03.1999 г. (ред. от 26.07.2019). Ст. 45: Социально-гигиенический мониторинг [Электронный ресурс]. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22481

13. Об организации лабораторного контроля при проведении социально-гигиенического мониторинга: письмо Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека № 0100/10460-06-32 от 01.10.2006 г. [Электронный ресурс]. – URL: http://50.rosпотребнадзор.ru/293/-/asset_publisher/U8Fg/content/письмо-от-02-10-2006-№-0100-10460-06-32

14. Platform for monitoring and analysis of air quality in environments with large circulation of people / P.H. Soares, J.P. Monteiro, H.F. Freitas, R. Zenko Sakiyama, C.M. Andrade // *Environmental Progress and Sustainable Energy*. – 2018. – Vol. 37, № 6. – P. 2050–2057.

15. Показатели качества воздуха для здоровья / А. Гайер, Л. Адамкевич, Д. Муха, А. Бадыда // *Инженерия пожарной и экологической безопасности*. – Львов; Украина, 2018. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/abs/2018/106/matecconf_fese2018_00002/matecconf_fese2018_00002.html

16. Методические подходы к выбору точек и программ наблюдения за качеством атмосферного воздуха в рамках социально-гигиенического мониторинга для задач федерального проекта «Чистый воздух» / Н.В. Зайцева, И.В. Май, С.В. Клейн, Д.В. Горяев // *Анализ рисков для здоровья*. – 2019. – № 3. – С. 4–17. DOI: 10.21668/health.risk/2019.3.01

17. Зайцева Н.В., Май И.В., Клейн С.В. Оптимизация программ наблюдения за качеством атмосферного воздуха селитебных территорий в системе социально-гигиенического мониторинга на базе пространственного анализа и оценки риска для здоровья населения [Электронный ресурс] // *Пермский медицинский журнал*. – 2010. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-programm-nablyudeniya-za-kachestvom-atmosfernogo-vozduha-selitebnyh-territoriy-v-sisteme-sotsialno-gigienicheskogo> (дата обращения: 23.12.2022).

18. Волкодаева М.В. Использование геоинформационных технологий для задач оптимизации размещения станций мониторинга качества атмосферного воздуха // *Записки Горного института*. – 2015. – Т. 215. – С. 107–114. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-geoinformatsionnyh-tehnologiy-dlya-zadach-optimizatsii-razmescheniya-stantsiy-monitoringa-kachestva-atmosfernogo> (дата обращения: 23.12.2022).

19. Оценка рисков для здоровья населения г. Владивостока при контакте с атмосферным воздухом / П.В. Кику, В.Ю. Ананьев, Д.С. Сигаев, Н.С. Ситтер, В.Д. Богданова, Ю.С. Завьялова // *Заметки ученого*. – 2015. – № 3. – С. 157–160.

20. Оптимизация региональной системы мониторинга атмосферного воздуха на примере г. Нижнекамска / Е.И. Игонин, А.П., Шлычков А.Р. Шагидуллин, Р.Р. Шагидуллин // *Российский журнал прикладной*

экологии. – 2016. – № 3 (7). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-regionalnoy-sistemy-monitoringa-atmosfernogo-vozduha-na-primere-g-nizhnekamska> (дата обращения: 23.12.2022).

21. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе (утв. приказом Минприроды России от 06.06.2017 г. № 273) // Доступ из справ.-правовой системы КонсультантПлюс.

22. Kokoulin A.N., Yuzhakov A.A., Kokoulin R.A. Multiscale Optical PM2.5 Particles Recognition and Sorting System in Dust Probes // 5th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech). – Split, Croatia, 2020. – P. 1–6. DOI: 10.23919/SpliTech49282.2020.9243759

23. Fast and accurate image super-resolution with deep laplacian pyramid networks / Wei-Sheng Lai, Jia-Bin Huang, Narendra Ahuja, Ming-Hsuan Yang. – URL: <https://arxiv.org/abs/1710.01992>

24. Handheld Multi-Frame Super-Resolution / Bartlomiej Wronski, Ignacio Garcia-Dorado, Manfred Ernst [et al.] // ACM Transactions on Graphics. – 2019. – Vol. 38, № 4. – URL: <https://doi.org/10.1145/3306346.3323024>

25. Second-order attention network for single image super-resolution / T. Dai, J. Cai [et al.]. – URL: http://openaccess.thecvf.com/content_CVPR_2019/papers/DaiSecond-Order_Attention_Network_for_Image_Super-Resolution_CVPR_paper.pdf

26. Sh. Kong, Ch. Fowlkes Image reconstruction with predictive filter flow. – URL: <https://arxiv.org/pdf/1811.11482v1.pdf>

References

1. GOST 17.2.4.05-83 (ST SEV 3846-82). Atmosfera. Gravimetricheskii metod opredeleniia vzveshennykh chastits pyli [GOST 17.2.4.05-83 (ST SEV 3846-82) Atmosphere. Gravimetric method for the determination of suspended dust particles], available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200012793>

2. RD 52.04.186-89. Rukovodstvo po kontroliu zagriazneniia atmosfery (utv. Goskomgidrometom i Minzdravom SSSR) [RD 52.04.186-89 The Guide on control over ambient air pollution, approved by the USSR Goskomgidromet and Public Healthcare Ministry]. Dostup iz spravochno-pravovoi sistemy Konsul'tantPlus.

3. RD 52.04.893-2020. Massovaia kontsentratsiia vzveshennykh veshchestv v probakh atmosfernogo vozdukha. Metodika izmerenii gravimetricheskim metodom [RD 52.04.893-2020 Mass concentration of particles in atmosphere], available at: <http://docs.cntd.ru/document/565233912>

4. Karelin A.O., Lomtev A.Iu., Mozzhukhina N.A., Karelin A.O., Eremin G.B., Nikonov V.A. Metodicheskie problemy monitoringa melkodispersnykh chastits v atmosfernom vozduke naseleennykh mest [Methodical issues related to monitoring of fine-dispersed particles in ambient air in settlements]. *Gigiena i sanitariia*, 2016, vol. 95, no. 10, pp. 985-988.

5. Spisok gorodov Rossii s naibol'shim urovnem zagriazneniia atmosfernogo vozdukha [List of Russian cities with most polluted atmosphere], available at: http://voeikovmgo.ru/?option=com_content&view=article&id=681:rc20150423&catid=15:resursy&lang=ru

6. Razovye kontsentratsii zagriazniaiushchikh veshchestv (dalee - ZV), izmeriaemye v rezhime on-line (v doliakh PDKmr) [Instant concentrations measured on-line (in PDK)], available at: <https://www.krasecology.ru/>

7. Monitoring zagriazneniia atmosfernogo vozdukha goroda Kazani [Atmosphere pollution monitoring in Kazan], available at: <http://www.tatarmeteo.ru/ru/monitoring-okruzhayushhej-sredyi/monitoring-zagryazneniya-atmosfernogo-vozduxa-kazani.html>

8. Fablov S.A. Proizvodstvennyi ekologicheskii kontrol' v oblasti okhrany atmosfernogo vozdukha [Industrial ecological control in ambient air protection]. *Alleia nauki*, 2018, vol. 5, no. 10 (26), pp. 13-18.

9. Kostiuhenko M.N., Volokhova L.T., Stepaniuk V.D. Volokhova M.N. Proizvodstvennyi ekologicheskii kontrol' na khlebopekarnykh predpriatiiakh v oblasti okhrany atmosfernogo vozdukha [Ecological Control on Bakery Enterprises in Area of Guard of Atmospheric Air]. *Khlebopechenie Rossii*, 2018, no. 4, pp. 12-16.

10. Ob okhrane okruzhaiushchei sredy: Federal'nyi zakon ot 10.01.2002 N 7-FZ (posledniaia redaktsiia) [Federal Law "On environment protection" at 10.01.2002 N 7-FZ], available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34823/

11. Ob utverzhdenii trebovanii k sodержaniiu programmy proizvodstvennogo ekologicheskogo kontrolya, poriadka i srokov predstavleniia otcheta ob organizatsii i o rezul'tatakh osushchestvleniia proizvodstvennogo ekologicheskogo kontrolya: prikaz Ministerstva prirodnykh resursov i ekologii Rossiiskoi Federatsii ot 18.02.2022 № 109

[Federal Law of 18.02.2022 № 109 “On approval of the requirements for the content of the program of industrial environmental control, the procedure and deadlines for submitting a report on the organization and on the results of the implementation of industrial environmental control”], available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202202250023>

12. O sanitarno-epidemiologicheskom blagopoluchii naseleniia: Federal'nyi zakon № 52-FZ ot 30.03.1999 g. (red. ot 26.07.2019). St. 45: Sotsial'no-gigienicheskii monitoring [Federal Law № 52-FZ at 30.03.1999 on the sanitary and epidemiological well-being of the population], available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22481

13. Ob organizatsii laboratornogo kontroliia pri provedenii sotsial'no-gigienicheskogo monitoringa: pis'mo Federal'noi sluzhby po nadzoru v sfere zashchity prav potrebiteli i blagopoluchiiia cheloveka № 0100/10460-06-32 ot 01.10.2006 g. [On the organization of laboratory control during social and hygienic monitoring: Letter from the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare № 0100/10460-06-32 at 01.10.2006], available at: http://50.rospotrebnadzor.ru/293/-/asset_publisher/U8Fg/content/письмо-от-02-10-2006-№-0100-10460-06-32

14. Soares P.H., Monteiro J.P., Freitas H.F., Zenko Sakiyama R., Andrade C.M. Platform for monitoring and analysis of air quality in environments with large circulation of people. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 2018, vol. 37, no. 6, pp. 2050-2057.

15. Gaier A., Adamkevich L., Mukha D., Badyda A. Pokazateli kachestva vozdukha dlia zdorov'ia [Air quality health indices]. *Inzheneriia pozharnoi i ekologicheskoi bezopasnosti*. L'vov: Ukraina, 2018, available at: https://www.mateconferences.org/articles/mateconf/abs/2018/106/mateconf_fese2018_00002/mateconf_fese2018_00002.html

16. Zaitseva N.V., Mai I.V., Klein S.V., Gorlaev D.V. Metodicheskie podkhody k vyboru toчек i programm nabliudeniia za kachestvom atmosfernogo vozdukha v ramkakh sotsial'no-gigienicheskogo monitoringa dlia zadach federal'nogo proekta “Chisty i vozdukh” [Methodical approaches to selecting observation points and programs for observation over ambient air quality within social and hygienic monitoring and “pure air” federal project]. *Analiz riskov dlia zdorov'ia*, 2019, no. 3, pp. 4-17. DOI: 10.21668/health.risk/2019.3.01

17. Zaitseva N.V., Mai I.V., Klein S.V. Optimizatsiia programm nabliudeniia za kachestvom atmosfernogo vozdukha selitebnykh territorii v

sisteme sotsial'no-gigienicheskogo monitoringa na baze prostranstvennogo analiza i otsenki riska dlia zdorov'ia naseleniia [Optimizations of programs aimed at ambient air quality monitoring in settlements within social-hygienic monitoring activities based on spatial analysis and health risk assessment]. *Permskii meditsinskii zhurnal*, 2010, no. 2, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-programm-nablyudeniya-za-kachestvom-atmosfernogo-vozduha-selitebnyh-territoriy-v-sisteme-sotsialno-gigienicheskogo> (accessed 23 December 2022).

18. Volkodaeva M.V. Ispol'zovanie geoinformatsionnykh tekhnologii dlia zadach optimizatsii razmeshcheniia stantsii monitoringa kachestva atmosfernogo vozdukh [Geoinformation technologies applied to choose the most optimal locations for stations where ambient air quality is monitored]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2015, vol. 215, pp. 107-114, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-geoinformatsionnyh-tehnologiy-dlya-zadach-optimizatsii-razmescheniya-stantsiy-monitoringa-kachestva-atmosfernogo> (accessed 23 December 2022).

19. Kiku P.V., Anan'ev V.Iu., Sigaev D.S., Sitter N.S., Bogdanova V.D., Zav'ialova Iu.S. Otsenka riskov dlia zdorov'ia naseleniia g. Vladivostoka pri kontakte s atmosferym vozdukhom [Assessment of health risks of the population of vladivostok when exposed to atmospheric air]. *Zametki uchenogo*, 2015, no. 3, pp. 157-160.

20. Igonin E.I., Shlychkov A.P., Shagidullin A.R., Shagidullin R.R. Optimizatsiia regional'noi sistemy monitoringa atmosfernogo vozdukh na primere g. Nizhnekamska [Optimization of the regional atmospheric air monitoring system on the example of Nizhnekamsk]. *Rossiiskii zhurnal prikladnoi ekologii*, 2016, no. 3 (7), available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-regionalnoy-sistemy-monitoringa-atmosfernogo-vozduha-na-primere-g-nizhnekamska> (accessed 23 December 2022).

21. Metody raschetov rasseivaniia vybrosov vrednykh (zagriazniushchikh) veshchestv v atmosferym vozdukh (utv. prikazom Minprirody Rossii ot 06.06.2017 g. № 273) [Methods for calculating the dispersion of emissions of harmful (polluting) substances in the atmospheric air », Federal law 06.06.2017 № 273]. Dostup iz spravочно-pravovoi sistemy Konsul'tantPlius.

22. Kokoulin A.N., Yuzhakov A.A., Kokoulin R.A. Multiscale Optical PM2.5 Particles Recognition and Sorting System in Dust Probes. *5th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*. Split, Croatia, 2020, pp. 1-6. DOI: 10.23919/SpliTech49282.2020.9243759

23. Wei-Sheng Lai, Jia-Bin Huang, Narendra Ahuja, Ming-Hsuan Yang. Fast and accurate image super-resolution with deep laplacian pyramid networks, available at: <https://arxiv.org/abs/1710.01992>

24. Wronski Bartlomiej, Garcia-Dorado Ignacio, Ernst Manfred et al. Handheld Multi-Frame Super-Resolution. *ACM Transactions on Graphics*, 2019, vol. 38, no. 4, available at: <https://doi.org/10.1145/3306346.3323024>

25. Dai T., Cai J. et al. Second-order attention network for single image super-resolution, available at: http://openaccess.thecvf.com/content_CVPR_2019/papers/DaiSecond-Order_Attention_Network_for_Image_Super-Resolution_CVPR_paper.pdf

26. Sh. Kong, Ch. Fowlkes Image reconstruction with predictive filter flow, available at: <https://arxiv.org/pdf/1811.11482v1.pdf>

Сведения об авторах

Кокоулин Андрей Николаевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматики и телемеханики» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: a.n.kokoulin@at.pstu.ru).

Май Ирина Владиславовна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» (614000, Пермь, ул. Монастырская, 82, e-mail: may@fcrisk.ru).

Загороднов Сергей Юрьевич (Пермь, Россия) – старший научный сотрудник ФБУН «Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения» (614000, Пермь, ул. Монастырская, 82, e-mail: zagorodnov@fcrisk.ru).

About the authors

Andrey N. Kokoulin (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department Automatics and Telemechanics of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: a.n.kokoulin@at.pstu.ru).

Irina V. (May Perm, Russian Federation) – doctor, professor, Deputy director for research work at FCRISK, (614000, Perm, Monastyrskaya str., 82, e-mail: may@fcrisk.ru).

Sergey Yu. Zagorodnov (Perm, Russian Federation) – Scientist at FCRISK (614000, Perm, 82, Monastyrskaya str., e-mail: zagorodnov@fcrisk.ru).

Поступила: 25.10.2022. Одобрена: 05.11.2022. Принята к публикации: 01.12.2022.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Кокоулин, А.Н. Алгоритм выбора местоположения постов мониторинга пылевого загрязнения воздуха с использованием портативного анализатора / А.Н. Кокоулин, И.В. Май, С.Ю. Загороднов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 44. – С. 96–117. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.4.06

Please cite this article in English as:

Kokoulin A.N., May I.V., Zagorodnov S.Yu. The algorithm of the dust pollution monitoring posts location using the portable analyser device. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2022, no. 44, pp. 96-117. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.4.06