

АНАЛИЗ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА, СОЗДАНЫХ НА БАЗЕ НЕДОРОГИХ СЕНСОРНЫХ ДАТЧИКОВ

Ольга Олеговна Ахмедова¹; Роман Андреевич Лясин²; Валерий Николаевич Азаров³

¹Камышинский технологический институт (филиал) Волгоградского государственного технического университета, Волгоградская область, Камышин, Россия

^{2,3}Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия

¹ahmedova-olga@mail.ru, ²roman.lyasin@mail.ru, ³azarovpubl@mail.ru

Аннотация. Качество воздуха регулярно измеряется с помощью стационарных станций мониторинга воздуха. Эти станции оснащены высококачественными приборами, которые соответствуют требованиям к точности данных. Стационарные станции предоставляют информацию об изменениях качества воздуха. Однако их плотность недостаточна для того, чтобы предоставлять информацию о качестве воздуха на уровне улиц. Некоторые загрязняющие вещества, особенно связанные с дорожным движением, могут демонстрировать очень высокую пространственную и временную изменчивость в пределах города или района.

Мобильный мониторинг наночастиц позволит улучшить оценки долгосрочных последствий для здоровья, оценить воздействие качества воздуха для медико-санитарные и эпидемиологические исследования, а также выработать политику действий по устранению вредного влияния в городском масштабе.

В этой работе мы провели сравнительный анализ датчиков и приборов, которые используются для оценки качества воздуха в городских условиях. Представлены графики, сравнения данных, полученные со стационарных станций (эталонных приборов), с данными более дешёвых систем оценки качества воздуха. Также рассчитан коэффициент детерминации для исследуемых приборов.

Ключевые слова: твердые частицы, экологическая диагностика, мониторинг окружающей среды, сенсорные датчики

Original article

ANALYSIS OF AIR QUALITY MONITORING SYSTEMS BASED ON LOW-COST SENSORS

Olga O. Akhmedova¹; Roman A. Lyasin²; Valery N. Azarov³

¹Kamyshin Technological Institute (branch) of Volgograd State Technical University, Volgograd Region, Kamyshin, Russia, ^{2,3}Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

¹ahmedova-olga@mail.ru, ²roman.lyasin@mail.ru, ³azarovpubl@mail.ru

Abstract. Air quality is regularly measured using stationary air monitoring stations. These stations are equipped with high-quality devices that meet the requirements for data accuracy. Stationary stations provide information on changes in air quality. However, their density is insufficient to provide information on air quality at the street level. Some pollutants, especially those associated with road traffic, can exhibit very high spatial and temporal variability within a city or region.

Mobile monitoring of nanoparticles will improve the assessment of long-term health effects, assess the impact of air quality for health and epidemiological studies, and develop policies to eliminate harmful effects at the urban scale.

In this article, we conducted a comparative analysis of sensors and devices that are used to assess air quality in urban conditions. Graphs are presented, comparing data obtained from stationary stations (reference devices) with data from cheaper air quality assessment systems. The coefficient of determination for the devices under study is also calculated.

Keywords: particulate matter, environmental diagnostics, environmental monitoring, sensors



*Ахмедова
Ольга Олеговна*

*Азаров
Валерий Николаевич*

*Лясин
Роман Андреевич*

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение воздуха — одна из самых серьёзных экологических проблем, с которой сталкивается человечество. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), более 90 % населения планеты дышит воздухом, не соответствующим стандартам ВОЗ. Около 55 % жителей Земли подвергаются воздействию опасных концентраций PM_{2,5}, и с каждым годом эта цифра растёт. По оценкам ВОЗ, в 2012 году около 7 миллионов человек по всему миру преждевременно умерли из-за загрязнения воздуха, вызванного антропогенными выбросами как на открытом воздухе, так и в помещениях [1].

В то время как установленные городские сети стационарных мониторов имеют пространственную плотность порядка 1-10 кв. км, концентрации загрязнителей воздуха могут значительно варьироваться в пределах 10-100 метров от дорог [2].

Увеличение плотности сети стационарных станций затруднительно из-за их высоких затрат на установку и техническое обслуживание. В качестве альтернативы можно использовать сети из недорогих сенсорных приборов для контроля качества воздуха.

Улучшенное пространственно-временное разрешение многокомпонентных данных о качестве воздуха имеет решающее значение для более глубокого понимания связи между параметрами качества воздуха, воздействием на человека и дальнейшими последствиями для здоровья. Для оценки влияния качества воздуха на здоровье необходимо иметь мелкомасштабные данные о его воздействии. Для правильной интерпретации фактического негативного эффекта требуется высокое пространственно-временное разрешение.

Несмотря на преимущества сенсорных датчиков, надёжность данных, которые они собирают, часто вызывает сомнения. Один из способов, который обычно предлагают производители для улучшения качества данных, — это настройка функций линейной регрессии с использованием калибровочных лабораторий. В этих лабораториях создаются контролируемые условия с разными концентрациями загрязнителей воздуха, чтобы оценить параметры калибровочных функций.

1. Источники и выбросы загрязнителей воздуха.

Основными загрязнителями воздуха, негативно влияющими на здоровье человека, являются твёрдые частицы PM_{2,5} и PM₁₀, озон (O₃) и диоксид азота (NO₂). Твёрдые частицы также образуются из пыли, особенно в засушливых сельскохозяйственных регионах.

В мире наблюдается сокращение антропогенных выбросов. А изменение климата и связанные с ним последствия могут вызвать увеличение выбросов пыли и лесные пожары из-за усиления засухи и опустынивания.

Активное разрастание городов приводит к ухудшению состояния экологии, истощению природных ресурсов и увеличению

потребления ресурсов и выбросов парниковых газов на душу населения. Это также негативно сказывается на качестве воздуха, что влияет на здоровье горожан.

Изменение климата меняет городскую метеорологию, что влияет на качество городского воздуха и химические реакции в атмосфере. Это сложная, нелинейная зависимость, которая требует дальнейшего изучения. Сегодня проблемы качества воздуха в городах в основном связаны с выявлением источников выбросов и распространением загрязнений, таких как дорожное движение или промышленная деятельность. Однако также важно понимать вклад региональных и местных источников, таких как сжигание древесины в домах и морское движение, в ежедневное воздействие на горожан.

Успешное управление качеством воздуха и контроль за ним требуют не только измерения уровней загрязнения воздуха. Для планирования и принятия экономически эффективных мер контроля также требуется информация об источниках загрязнения воздуха, их относительных масштабах и важности [3].

Традиционно информация о качестве воздуха в городских районах получается через сети высококачественных сертифицированных измерительных станций, которые предоставляют данные гарантированного качества. Однако развертывание сетей мониторинга сертифицированных станций надлежащего размера часто неосуществимо для многих городов из-за высоких затрат на их приобретение и обслуживание [4]. В ответ на это недавно появилось множество недорогих сенсорных технологий (LCS) для оценки качества воздуха. Эти решения позволяют развертывать крупные сенсорные сети, решая задачу мониторинга качества воздуха в обширных мегаполисах в режиме реального времени и с высоким пространственным разрешением [5-14].

2. Системы мониторинга качества воздуха.

2.1 AQMesh — это система мониторинга качества воздуха с небольшими датчиками, которая может отслеживать до 6 газов (электрохимический метод измерения) (NO, NO₂, O₃, CO, SO₂, H₂S, TVOC и CO₂) (до 30 микрон), а также PM (PM₁, PM_{2.5},

PM4, PM10, TPC и TSP) (оптический счетчик частиц), шум и скорость и направление ветра с бесперебойной передачей данных и различными вариантами питания. Производитель Environmental Instruments Ltd., Великобритания [15].

Для проверки собранных данных использовались базовые процедуры обеспечения контроля качества (т.е. из набора данных были исключены очевидные выбросы, отрицательные значения и неверные данные). Данные с эталонных приборов FEM GRIMM и FEM T640 продемонстрировали сильные корреляции для PM2,5 ($R^2 \sim 0,84$) (рис. 1, б) и PM10 ($R^2 \sim 0,87$) (рис. 1, г), сопоставление составляет ~89% и 76% соответственно для PM2,5 (рис. 1, а) и PM10 (рис. 1, в).

Сличение показаний, измеренных при помощи AQMesh, с показаниями эталонных приборов FEM GRIMM и FEM T640 представлено на рис. 2 и 3, измерения проводились в течение 5 мин., 1 часа и 24 часов для фракций PM2,5 и PM10 [15].

Массовые концентрации PM2,5, измеренные датчиком AQMesh, показали слабую или сильную корреляцию с соответствующими данными эталонных приборов FEM GRIMM и FEM T640 ($0,48 < R^2 < 0,82$; среднее значение за 1 час). Датчики занижали массовую концентрацию PM2,5, измеренную приборами FEM GRIMM и FEM T640. Массовые концентрации PM10, измеренные датчиками AQMesh, показали очень слабую или умеренную корреляцию с данными GRIMM ($0,28 < R^2 < 0,62$; среднее значение за 1 час) и T640 ($0,33 < R^2 < 0,70$; среднее значение за 1 час) и заниженные массовые концентрации PM10, измеренные GRIMM и T640.

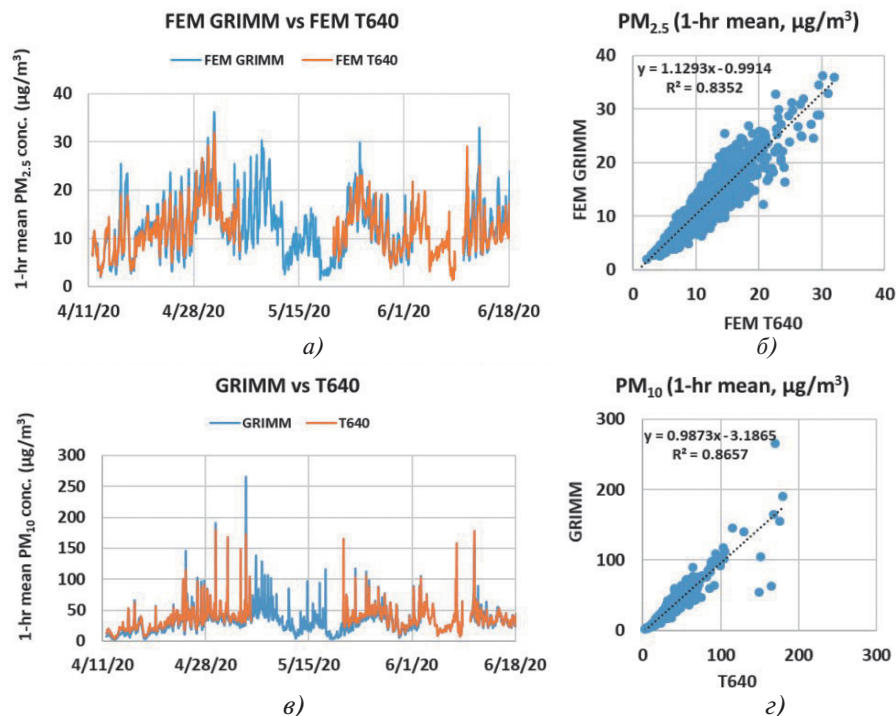


Рис. 1. Данные измерений твердых частиц эталонными приборами FEM GRIMM и FEM T640

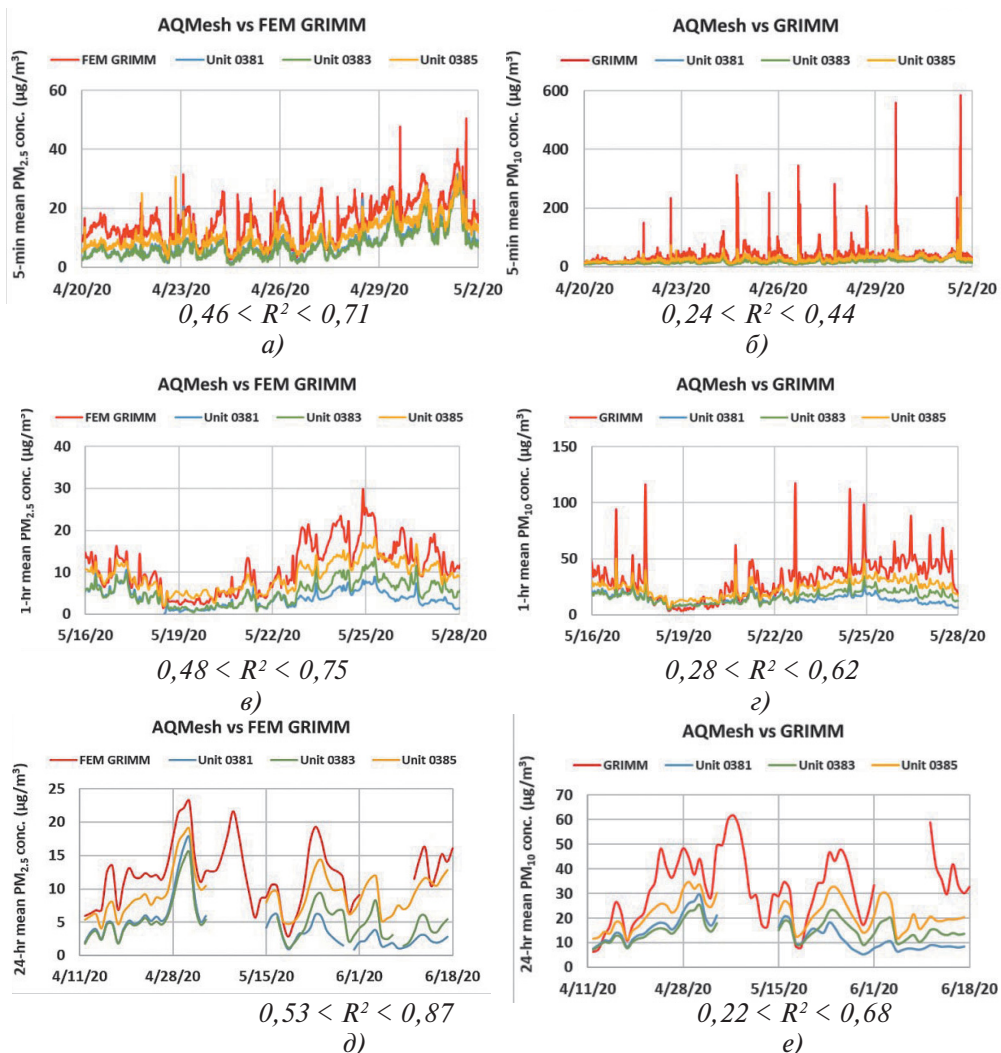


Рис. 2. Корреляция данных прибора AQMesh и прибора FEM GRIMM за 5 мин., 1 час и 24 часа для фракций PM2,5 и PM10

На рис. 2 и 3 представлены данные от датчиков, которые предварительно не были откалиброваны [15].

2.2 Станция мониторинга качества воздуха Kunak AIR включает множество датчиков окружающей среды, а также разъемы для внешних погодных датчиков или зондов, работает на солнечной панели и осуществляет беспроводную передачу данных в режиме реального времени. Измеряемые параметры: CO, CO₂, NO, NO₂, O₃, SO₂, H₂S, NH₃, CoVs, PM₁, PM_{2.5}, PM₄, PM₁₀, TSP и TPC. Температура, влажность, атмосферное давление и точка росы. Производитель Kunak Technologies s.l., Испания [16].

На рисунках 4 и 5 представлены результаты измерений PM_{2,5} с использованием различных «недорогих» датчиков и устройств контроля качества воздуха по сравнению с MetOne BAM и Teledyne API T640, которые являются эталонными приборами.

При сравнении сенсорной системы Kunak Air A10 с прибором MetOne BAM (рис. 4), устройство Kunak показало более низкий уровень PM_{2,5} по сравнению с другими недорогими датчиками и устройствами контроля качества воздуха.

Датчик OPC N3 показал результаты, аналогичные другим датчикам, он работал без дополнительных корректировок.

Значения R², полученные при сравнении датчиков с Teledyne API T60 (рис. 5), не показали большой разницы между ними, хотя датчик OPC без коррекции достиг самого низкого значения R² [16].

Было замечено, что Kunak A10 занижает значения PM_{2,5}, это связано с тем, что датчики PM нуждаются в повторной калибровке в зависимости

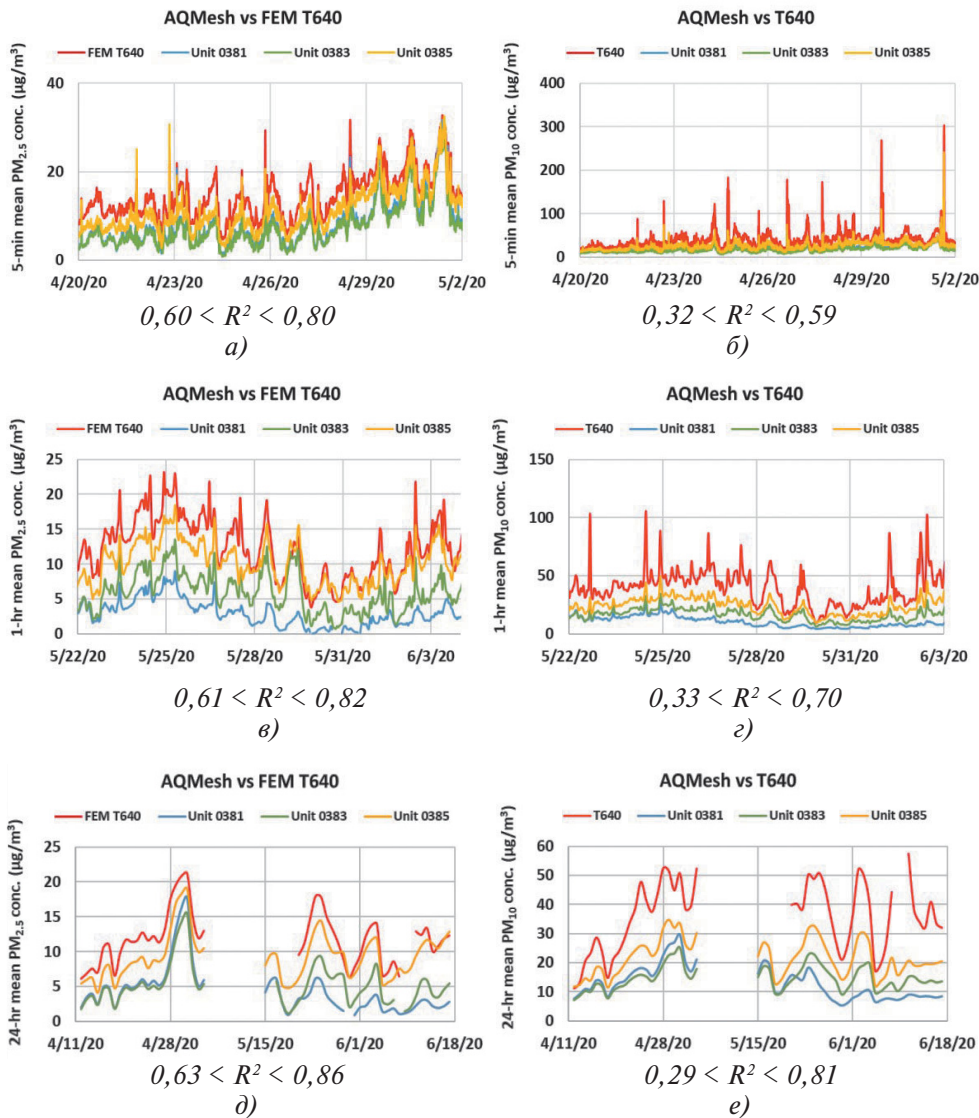


Рис. 3. Корреляция данных прибора AQMesh и прибора FEM T640 за 5 мин, 1 час и 24 часа для фракций PM_{2,5} и PM₁₀

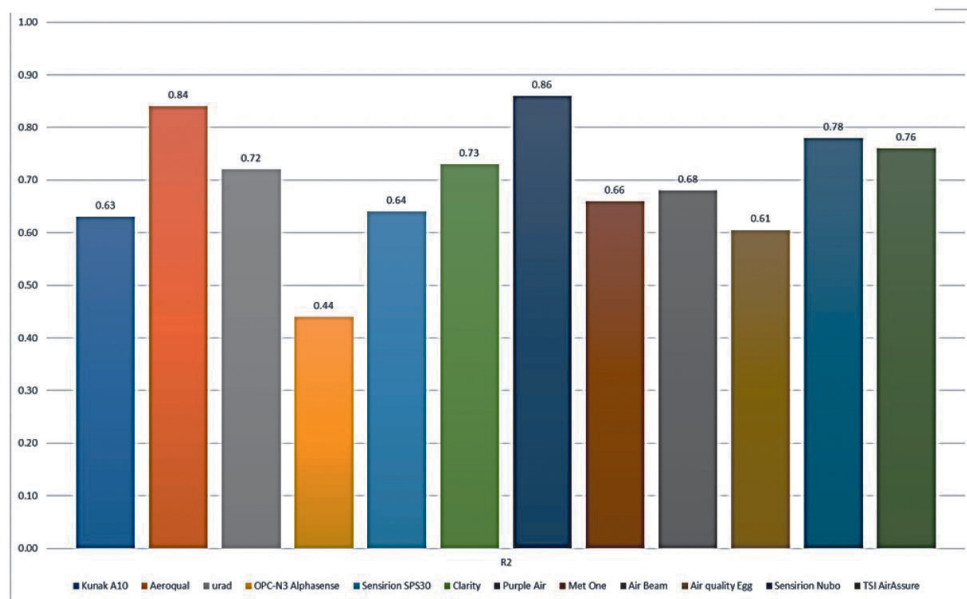


Рис. 4. Корреляция значений R², полученных с помощью бюджетных датчиков PM_{2.5} в соответствии с эталонным прибором Teledyne API T640

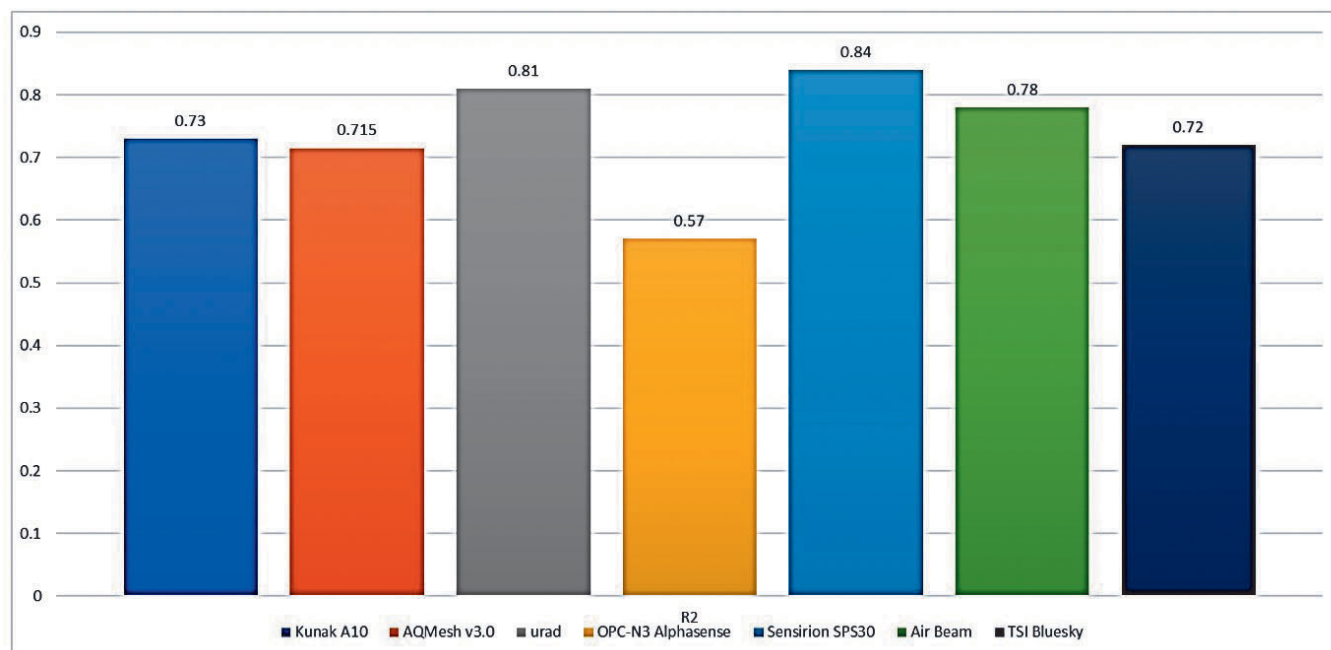


Рис. 5. Значения R2 получены путем оценки датчиков PM2,5 с использованием эталонного прибора MetOne BAM

от их местоположения. Поправочный коэффициент, используемый алгоритмом Кунака, зависит от массы частицы и варьируется в зависимости от местоположения.

2.3 MODULAIR-PM (сенсор OPC-N3) осуществляет поминутные измерения твердых частиц с разрешением по размерам в режиме реального времени. Система сочетает нефелометрию с рассеянием света на отдельных частицах для точной характеристики ТЧ, независимо от того, образуется ли он в результате сгорания или пыли. Датчик QuantAQ – MODULAIR-PM использует комбинацию двух оптических датчиков частиц (OPS): нефелометра (Plantower PMS5003) и оптического счетчика частиц (Alphasense OPC-N3) для определения характеристик твердых частиц PM1.0, PM 2,5 и PM10. Производитель QuantAQ Inc., США [17].

MODULAIR-PM обеспечивает оценку концентраций твердых частиц в реальном времени (PM1, PM2.5, PM10) и распределения частиц по размерам с использованием новой комбинации датчиков частиц на основе множественного рассеяния света. Каждое устройство подключено к интернету и сопряжено с QuantAQ CloudTM для обеспечения визуализации данных в режиме реального времени и доступа к ним, для диагностики работоспособности датчиков по всему парку. Датчик MODULAIR-PM может оценить скорость при вентиляции помещения или на открытом воздухе, определить максимальные точки концентрации PM и количественно оценить воздействие твердых частиц на человека.

Три прибора MODULAIR-PM были установлены в стационарном пункте мониторинга окружающей среды и выполняли измерения параллельно с эталонными приборами GRIMM и T640 (федеральный эквивалентный метод FEM), которые также предназначены для измерения тех же загрязняющих веществ (рис. 6, 7) [17].

Абсолютная внутри модельная изменчивость для PM1.0, PM2.5 и PM10 составила приблизительно 0,59, 0,62 и 1,77 мкг/м³ соответственно. При измерениях PM2,5 наблюдалась сильная корреляция между датчиками MODULAIR и FEM GRIMM, а также T640 (0,84 < R2 < 0,90). Однако датчики MODULAIR также имели тенденцию к завышению концентраций PM2,5 по сравнению с измерениями методом FEM. Измерения массовых концентраций PM10, проведенные датчиками MODULAIR-PM, выявили слабую или сильную взаимосвязь с соответствующими данными, полученными приборами GRIMM и T640 (R2 варьируется от 0,47 до 0,80, среднее значение за 1 час). Однако датчики MODULAIR-PM показали более низкие значения массовой концентрации PM10 по сравнению с результатами, полученными GRIMM и T640. Перед началом этого теста калибровка датчиков не проводилась [17].

2.4 Станция контроля качества воздуха Libelium позволяет измерять наиболее важные загрязняющие вещества и ключевые параметры, необходимые в каждом проекте по обеспечению качества воздуха: твердые частицы (PM2.5, PM10) (диапазон частиц: 0,35 – 40 мкм.; различные газы: CO, NO₂, NO, O₃, SO₂). Производитель Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L., Испания [18].

Станция контроля качества воздуха Libelium оснащена искусственным интеллектом и технологией машинного обучения. Это позволяет ей «обучаться» на данных эталонной станции, расположенной рядом с ней. Когда интеллектуальная станция контроля качества воздуха находится рядом с эталонной станцией, она анализирует данные, которые та генерирует. Затем станция может обмениваться информацией с другими станциями, расположенными в разных частях города. Таким образом, станция постоянно учится и повышает свою точность. Она сравнивает и анализирует данные с информацией, полученной

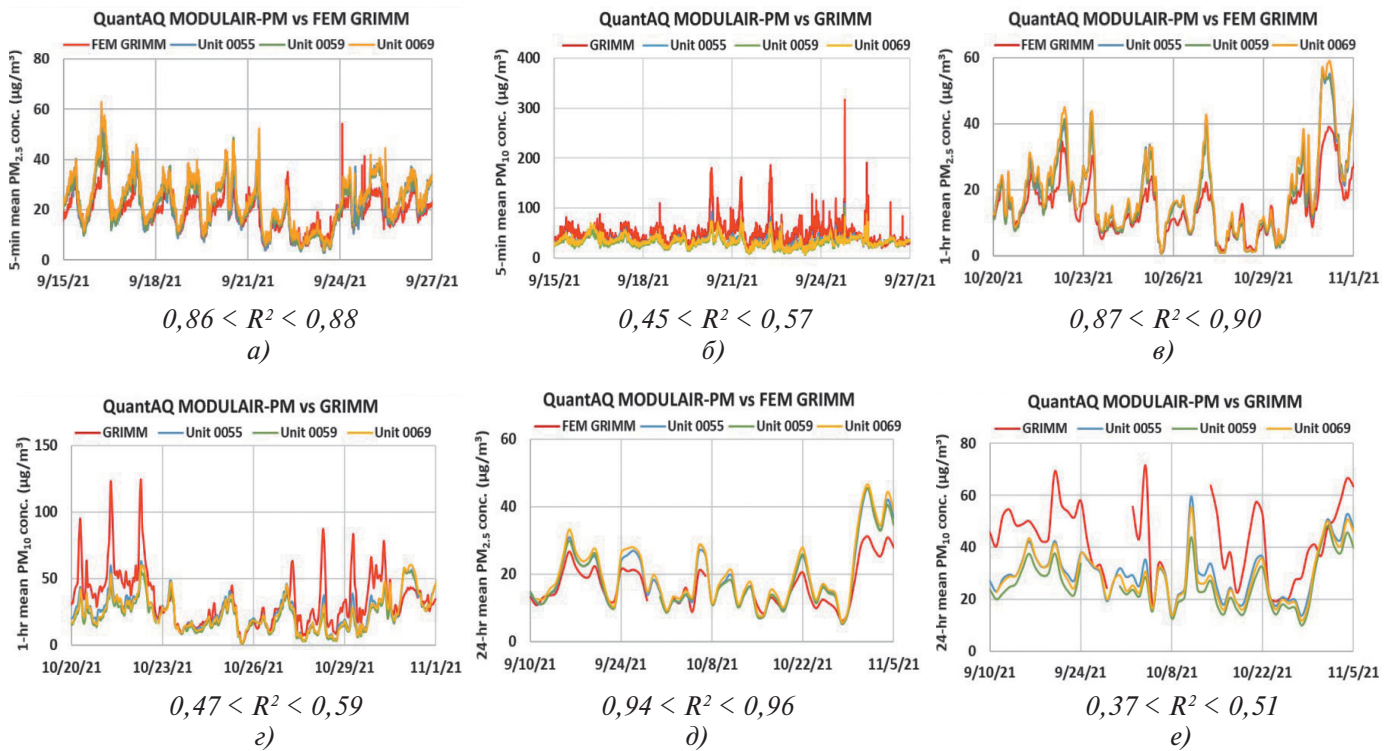


Рис. 6. Корреляция данных прибора MODULAIR-PM и прибора FEM GRIMM за 5 мин., 1 час и 24 часа для фракций PM_{2,5} и PM₁₀

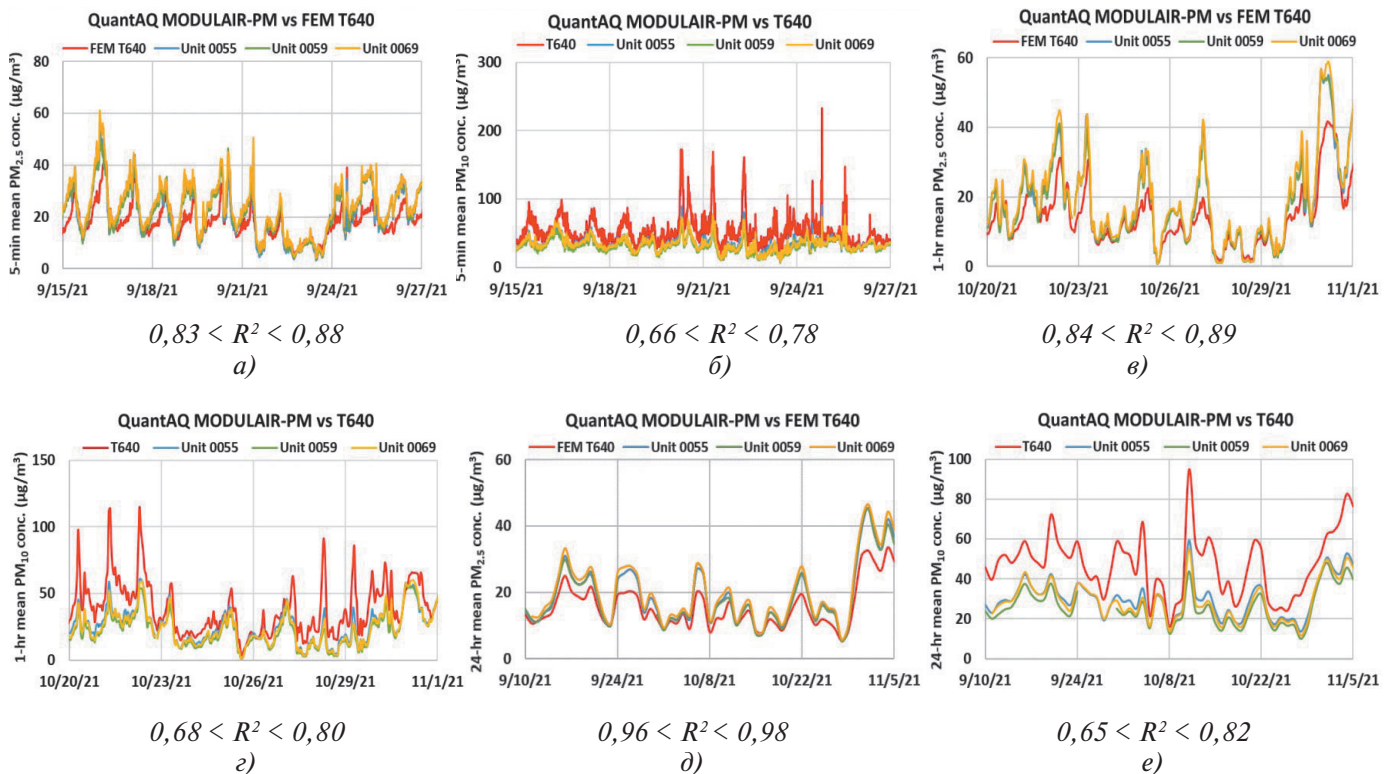


Рис. 7 Корреляция данных прибора MODULAIR-PM и прибора FEM T640 за 5 мин., 1 час и 24 часа для фракций PM_{2,5} и PM₁₀

от официальных референтных станций. Кроме того, благодаря совместимости с различными облачными сервисами, такими как Libelium Cloud, станция может предоставлять данные в режиме реального времени.

Облако Libelium позволяет создавать разнообразные графики, дашборды и оповещения для удобного мониторинга и анализа информации о качестве воздуха [17].

ВЫВОД

Исходя из данных о сходимости результатов эталонных и испытываемых датчиков и приборов, можно сделать вывод о необходимости проведения совместной калибровки непосредственно на месте перед развёртыванием сенсорной сети в различных условиях.

Величина измеряемых датчиками данных различалась для каждого загрязняющего компонента воздуха. Сенсорная сеть позволит получить новые данные об изменчивости газовой фазы и уровне загрязнения воздуха твёрдыми частицами в черте города. Эта информация может быть использована городскими администрациями для оптимизации контроля за выбросами пыли от дорог и строительных работ, а также для повышения осведомлённости о проблемах качества воздуха, связанных со сжиганием древесины в жилых помещениях.

Важно продолжать оценку производительности датчиков в процессе испытаний на совместное размещение в течение всего года в разных городских районах и климатических зонах, включая условия с более высокими температурами и влажностью.

Список литературы

1. Sokhi, R. S. *Advances in Air Quality Research – Current and Emerging Challenges* / R. S. Sokhi, N. Moussiopoulos, A. Baklanov [et al.] - <https://doi.org/10.5194/acp-2021-581> - Текст : электронный // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2021 - Vol. 22 - Is. 7
2. Башева, Т. С. *Определение величины эмиссии загрязняющих веществ и установление опасного расстояния для строящихся объектов с различными конструктивными особенностями* / Т. С. Башева, А. А. Шейх // *Строитель Донбасса*. – 2020. – № 2 – С. 20-26.
3. Bouziotis, D. *Towards comprehensive air quality management using low-cost sensors for pollution source apportionment* / D. Bouziotis, G. Allison, C. David [et al.] - <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00424-0> - Текст : электронный // *Nj Climate and Atmospheric Science*. – 2023 - Vol. 6 – Is. 122.
4. Amaral, S. S. *An Overview of Particulate Matter Measurement Instruments* / S. Amaral, J. Carvalho, M. A. M. Costa, C. Pinheiro // *Atmosphere*. – 2015. – Vol. 6. – P. 1327–1345.
5. Maag, B. *Survey on Sensor Calibration in Air Pollution Monitoring Deployments* / B. Maag, Z. Zhou, L.A. - <https://www.researchgate.net/publication/326236532> - Текст : электронный // *Thiele IEEE Internet Things J*. – 2018 - Vol. 5. – P 4857–4870.
6. Wilson, E W. *Monitoring of particulate matter outdoors* / E W. Wilson, J. C Chow, C. Claiborn, W. Fusheng, J. Engelbrecht, J. G Watson - DOI: 10.1016/s0045-6535(02)00270-9 - Текст : электронный // *Chemosphere*. – 2002. – Vol. 49. – P. 1009–1043.
7. Bagkis, E. *Learning Calibration Functions on the Fly: Hybrid Batch Online Stacking Ensembles for the Calibration of Low-Cost Air Quality Sensor Networks in the Presence of Concept Drift* / E. Bagkis, T. Kassandros, K. Karatzas - DOI:10.3390/atmos13030416 - Текст : электронный // *Atmosphere*. – 2022. – Vol. 13 – Is. 416.
8. Karagulian, F. *Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring*. / F. Karagulian, M. Barbieri, A. Kotsev, L. Spinelle, M. Gerboles, F. Lagler, N. Redon, S. Crunaire, A. Borowiak - DOI:10.3390/atmos10090506 - Текст : электронный // *Atmosphere*. – 2019. – Vol. 10. – Is. 506.
9. Liu, D. *Performance calibration of low-cost and portable particular matter (PM) sensors*. /D. Liu, Q. Zhang, J. Jiang, D. R. Chen - DOI:10.1016/j.jaerosci.2017.05.011 - Текст : электронный // *J. Aerosol Sci*. – 2017. Vol. 112. – P. 1–10.
10. Lewis, A. C. *Evaluating the performance of low cost chemical sensors for air pollution research*. /A. C. Lewis, J. D. Lee, P. M. Edwards, M. D. Shaw, M. J. Evans et al. - DOI:10.1039/C5FD00201J - Текст : электронный // *Faraday Discuss*. – 2016. Vol. 189. – P. 85–103.
11. Kumar, P. *The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities*. / P. Kumar, L. Morawska, C. Martani, G. Biskos, M. Neophytou, S. Di Sabatino, M. Bell, L. Norford, R. Britter. - DOI:10.3390/s18010265 - Текст : электронный // *Environ. Int*. 2015 - Vol. 75. – P. 199–205.
12. Snyder, E. G. *The Changing Paradigm of Air Pollution Monitoring*. / E. G. Snyder, T. H. Watkins, P. A. Solomon, E. D. Thoma, R. W. Williams, G. S. W. Hagler, D. Shelow, D.A. Hindin, V. J. Kilaru, P. W. Preuss - DOI:10.1021/es4022602 - Текст : электронный // *Environ. Sci. Technol* – 2013 - Vol. 47 – P. 11369–11377.
13. Montalvo, L. *An air quality monitoring and forecasting system for Lima city with low-cost sensors and artificial intelligence models*. / L. Montalvo, D. Fosca, D. Paredes, M. Abarca, C. Saito, E. Villanueva - DOI:10.3389/frsc.2022.849762 - Текст : электронный // *Front. Sustain. Cities*. – 2022 - Vol. 4 – Is. 849762.
14. Masselot, P. *Toward an Improved Air Pollution Warning System in Quebec*. / P. Masselot, F. Chebana, É. Lavigne, C. Campagna, P. Gosselin, T.B. Ouarda, - DOI:10.3390/ijerph16122095 - Текст : электронный // *Int. J. Environ. Res. Public Health* -2019 - Vol 16. – Is. 2095.
15. AQMesh : [caüm] /- URL: <https://www.aqmesh.com/products/aqmesh/> (дата обращения: 01.10.2024). - Текст : электронный.
16. Kunak AIR : [caüm] /- URL: <https://www.kunak.es/en/products/air-quality-monitor> (дата обращения: 11.08.2024). - Текст : электронный.
17. QuantAQ : [caüm] /- URL: <https://www.quant-aq.com/products/modulair-pt> (дата обращения: 21.08.2024). - Текст : электронный.
18. Air-quality-station : [caüm] /- URL: <https://www.libelium.com/iot-products/air-quality-station/> (дата обращения: 21.09.2024). - Текст : электронный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Ахмедова Ольга Олеговна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», декан факультета «Высшее образование» Камышинского технологического института Волгоградского государственного технического университета, Волгоградская область, Камышин, Россия. Научные интересы: повышение эффективности природоохранных систем, совершенствование пылегазоочистных устройств и аппаратов, исследования дисперсного состава пыли.

Лясин Роман Андреевич – аспирант института Архитектуры и строительства Волгоградского государственного технического университета, Волгоград, Россия. Научные интересы: повышение эффективности природоохранных систем, совершенствование пылегазоочистных устройств и аппаратов, исследования дисперсного состава пыли.

Азаров Валерий Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве» Волгоградского государственного технического университета, Волгоград, Россия. Научные интересы: повышение эффективности природоохранных систем, совершенствование пылегазоочистных устройств и аппаратов, совершенствование системы обращения с отходами, разработки технологий по переработке отходов, исследования дисперсного состава пыли.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Akhmedova Olga O. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Dean of the Faculty of Higher Education of the Kamyshinsky Technological Institute, Volgograd State Technical University, Volgograd Region, Kamyshin, Russia. Scientific interests: improving the efficiency of environmental protection systems, improving dust and gas cleaning devices and devices, and studying the dispersed composition of dust.

Lyasin Roman A. – Postgraduate Student, Institute of Architecture and Construction, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia. Scientific interests: improving the efficiency of environmental protection systems, improving dust and gas cleaning devices and devices, and studying the dispersed composition of dust.

Azarov Valery N. – D. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department "Life Safety in Construction and Urban Economy", Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia. Scientific interests: improving the efficiency of environmental protection systems, improving dust and gas cleaning devices and apparatuses, improving the waste management system, developing waste recycling technologies, and researching the dispersed composition of dust.

Статья поступила в редакцию 21.10.2024; одобрена после рецензирования 15.11.2024; принята к публикации 22.11.2024.

The article was submitted 21.10.2024; approved after reviewing 15.11.2024; accepted for publication 22.11.2024.