

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ

І. Оленич, С. Баб'як

*Факультет електроніки та комп'ютерних технологій
Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Драгоманова, 50, 79005 Львів, Україна
igor.olenych@lnu.edu.ua, sviatoslav.babiak@lnu.edu.ua*

У роботі розроблено автоматизовану систему моніторингу забруднення повітря на основі мікроконтролера Arduino UNO R4 WiFi та сенсорів твердих мікрочастинок і вуглекислого газу. Для дослідження якості повітря додатково використано одержані за допомогою он-лайн сервісу метеорологічні дані. Продемонстровано можливість виявлення основних джерел забруднення на основі аналізу добового розподілу концентрації забруднюючих речовин та інформації про напрям і швидкість вітру. Встановлено кореляційну залежність концентрації твердих мікрочастинок PM1, PM2.5, PM10 і молекул CO₂ в атмосфері від температури та швидкості вітру. Для прогнозування якості повітря визначено коефіцієнти лінійної кореляції та параметри лінії регресії.

Ключові слова: моніторинг забруднення повітря, метеорологічні фактори, кореляція, лінія регресії, прогнозування.

1. Вступ

Забруднення повітря стає однією з найважливіших проблем міських агломерацій і промислових регіонів, яка призводить до серйозних наслідків у всьому світі. Зокрема, забруднення повітря не тільки погіршує якість життя та є загрозою для здоров'я людей, але й має фундаментальний вплив на глобальну зміну клімату. Статистичні дані Всесвітньої організації охорони здоров'я показують, що забруднене повітря є причиною мільйонів неочікуваних смертей. Серед найпоширеніших причин погіршення якості повітря є урбанізація, виробництво енергії, важка промисловість і транспорт. Основними антропогенними забруднювачами повітря вважають тверді мікрочастинки розміром до 2.5 мкм (PM2.5) [1]. Крім безпосередньої небезпеки для серцево-судинної та дихальної систем людини, зумовленої їхньою здатністю проникати глибоко в легені та кров, мікрочастинки PM2.5 можуть адсорбувати на своїй поверхні інші небезпечні речовини, виступати каталізаторами хімічних реакцій і спричиняти додаткові негативні наслідки [2]. Тому токсична дія PM2.5 може посилюватися через вміст інших забруднювальних речовин у повітрі. Це унеможливає чітке визначення безпечної концентрації дрібнодисперсних мікрочастинок та зумовлює необхідність комплексного моніторингу та аналізу різних параметрів якості повітря.

Сьогодні існує гостра потреба в ефективній системі екологічного моніторингу та виявлення різних видів забруднень атмосфери, яка могла б не тільки надавати точні та актуальні дані про якість повітря, але здійснювати їх аналіз [3]. Розробка глобальної мережі моніторингу якості повітря передбачає визначення кількості станцій та їх

розташування, а також методів моніторингу з огляду на цілі та наявні ресурси. Типовий підхід до проектування мережі міського чи національного масштабу передбачає розміщення станцій моніторингу або точок відбору проб у репрезентативних місцях, ретельно відібраних на основі відомих моделей викидів/розсіювання забруднюючих речовин [4]. Дослідження якості повітря є важливою прикладною задачею, яка потребує сучасних підходів інтелектуального аналізу даних і відповідних програмно-апаратних засобів [5].

Удосконалення технологій бездротового зв'язку та інтелектуальних сенсорів змінюють парадигму моніторингу забруднення повітря [6]. Технології Інтернету речей (IoT), що вже революціонізували спосіб нашої взаємодії зі світом, дають змогу створювати розумні середовища, в яких об'єкти взаємодіють та обмінюються інформацією один з одним [7–9]. Зокрема, розроблено системи моніторингу якості повітря, які використовують засоби IoT для отримання даних про забруднення навколишнього середовища та бездротового міжмашинного зв'язку з внутрішнім сервером, що забезпечує не тільки збір і опрацювання сенсорних даних у режимі реального часу, але й відтворення інформації для користувачів через веб-портالي та мобільні додатки [9, 10]. У разі перевищення допустимого рівня забруднення повітря сенсорна система може надсилати попереджувальну інформацію за допомогою SMS-повідомлень [11]. Отже, використання пристроїв IoT робить систему моніторингу якості повітря гнучкою та масштабованою.

Для моніторингу забруднення повітря у важкодоступних районах автори роботи [12] використали систему на базі безпілотного літального апарату (БПЛА). Система була оснащена автопілотом для управління БПЛА та мікрокомп'ютером Raspberry Pi для вимірювання та аналізу сенсорних даних. Проте використання БПЛА не забезпечує безперервний моніторинг якості повітря упродовж тривалого часу. У роботах [13, 14] для моніторингу забруднення повітря було запропоновано сенсорні системи, чутливі елементи яких були встановлені на транспортних засобах. Такий підхід дає можливість досліджувати значну територію, використовуючи невелику кількість сенсорів. Щоб завантажити дані про забруднення повітря у централізоване сховище використовувався мобільний додаток.

Надзвичайно важливою складовою системи екологічного моніторингу є опрацювання та аналіз сенсорних даних. Зокрема, для підвищення ефективності бездротової системи моніторингу забруднення повітря запропоновано алгоритм Recursive Converging Quartiles, який дає змогу агрегувати дані, виявляти помилкові записи і видаляти повтори [15]. Значна увага дослідників зосереджена на алгоритмах виявлення викидів у вимірних даних [16–18]. Це дає змогу розробити моделі якості повітря з розумінням ролі викидів та інших аномалій у часових рядах сенсорних даних. Алгоритми k -means та c -means використовуються для кластеризації наборів даних [19]. Технології великих даних, штучні нейромережі та інші методи машинного навчання забезпечують необхідні інструменти для аналізу сенсорних даних, встановлення закономірностей і прогнозування якості повітря [9, 20]. Зважаючи на складні залежності рівня забруднення повітря від багатьох факторів, таких як метеорологічні умови, топографія місцевості, випадкові флуктуації внаслідок атмосферної турбулентності, різні види і джерела забруднення, їх поєднання тощо [21], одержання додаткових сенсорних даних і встановлення нових закономірностей може підвищити точність розроблювальних моделей аналізу якості повітря. Тому мета роботи полягала у

розроблені програмно-апаратних засобів для дослідження якості повітря та виявлення джерел забруднення.

2. Методи та засоби реалізації

Запропонована система моніторингу забруднення повітря була реалізована в рамках парадигми IoT, яка передбачає обмін даними між взаємозв'язаними електронними пристроями, зокрема різноманітними сенсорами, та комп'ютерними системами в автоматичному режимі з використанням бездротових телекомунікацій і стандартних протоколів зв'язку. Архітектура розробленої системи схематично зображена на рис. 1.

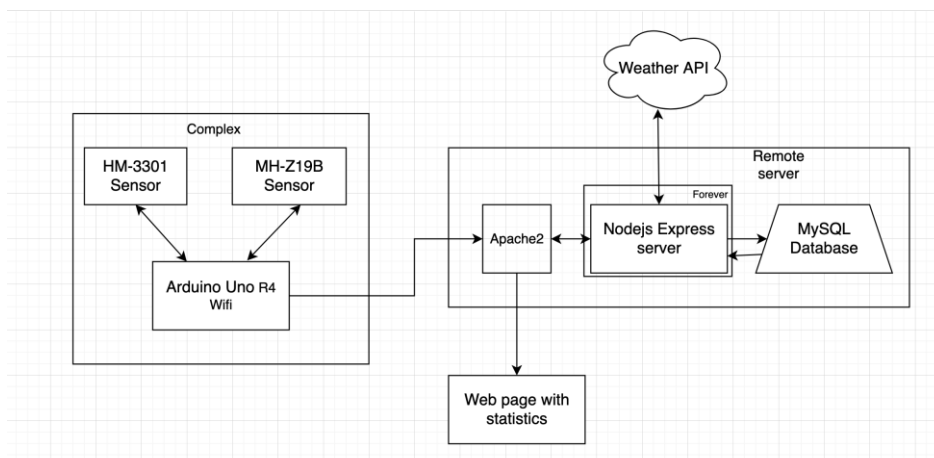


Рис. 1. Архітектура системи моніторингу забруднення повітря на основі мікроконтролера Arduino UNO R4 WiFi.

Fig. 1. Architecture of the air pollution monitoring system based on the Arduino UNO R4 WiFi microcontroller.

Моніторинг якості повітря здійснювався за допомогою лазерного сенсора твердих мікрочастинок HM-3301 та інфрачервоного оптичного сенсора діоксиду вуглецю (CO₂) MH-Z19B. Завдяки технології розсіювання лазерного променя сенсор HM-3301 характеризується високою чутливістю до частинок пилу розміром понад 0.3 мкм, високою точністю і стабільністю, низьким рівнем шуму та можливістю безперервного визначення концентрації пилу у режимі реального часу. Триканальний лічильник сенсора дає змогу одержати дані про концентрацію твердих частинок з розмірами 1 мкм (PM1), 2.5 мкм (PM2.5) і 10 мкм (PM10). Робота сенсора MH-Z19B базується на принципі недиспергуючого інфрачервоного аналізатора (nondispersive infrared sensor, NDIR), який забезпечує високу чутливість сенсора до CO₂ у діапазоні 0...5000 ppm і незалежність від молекул O₂. Вбудована температурна компенсація дає змогу використовувати сенсор MH-Z19B у широкому діапазоні температур з мінімальною похибкою. Обидва сенсори характеризуються низьким енергоспоживанням, що відповідає принципам IoT і є вагомим перевагою для створення автономних станцій моніторингу повітря.

Як платформу для збору та опрацювання сенсорних даних використано мікроконтролер Arduino UNO R4 WiFi. Для під'єднання сенсорів HM-3301 та MH-Z19B

використано інтерфейси I2C та UART і порти мікроконтролера SDA/SCL та TX/RX, відповідно. Мікроконтролер не лише збирає дані з сенсорів, але й надсилає їх у форматі JSON на віддалений сервер за допомогою вбудованого модуля Wi-Fi з інтервалом 2 хв. На сервері дані перевіряються на валідність і зберігаються в базі даних MySQL для подальшого їхнього аналізу. Крім того, сервер одержує інформацію з веб-ресурсу <https://www.weatherapi.com> щодо поточних погодних умов (дані про температуру, вологість, напрям і швидкість вітру) для заданої місцевості. У підсумку, вся необхідна інформація для подальшого аналізу зберігається у базі даних і доступна для візуалізації у графічному вигляді.

Апаратна частина розробленої системи моніторингу якості повітря була розміщена стаціонарно у м. Новояворівськ Львівської області на висоті 23 м від поверхні землі. Вибір локації зумовлений важливістю екологічного моніторингу не тільки у міських агломераціях, але й у невеликих містечках і селах, де забруднення повітря, зумовлене спалюванням енергоресурсів, може бути серйозною проблемою для мешканців особливо у зимовий період. Як можна побачити на рис. 2, поблизу пункту відбору сенсорних даних можна виділити такі потенційні джерела забруднення повітря: Новояворівська ТЕЦ, промислові підприємства, об'єкти будівництва, автодорога М10 Львів – Краковець, котельні комунальних закладів.



Рис. 2. Розташування пункту відбору сенсорних даних (1) і потенційних джерел забруднення повітря у м. Новояворівськ: об'єкти будівництва (2), промислові підприємства (3), автодорога М10 Львів – Краковець (4), Новояворівська ТЕЦ (5), промзона (6), котельня міської лікарні (7).

Fig. 2. Location of the sensor data collection point (1) and potential sources of air pollution in the Novoyavorivsk city: construction sites (2), industrial enterprises (3), highway M10 Lviv – Krakovets (4), Novoyavorivsk CHPP (5), industrial zone (6), city hospital boiler house (7).

Обробка та статистичний аналіз одержаних даних здійснювалися методами кореляційного аналізу, які дають змогу кількісно виразити характеристики аналізованих даних, виявити закономірності та формалізувати взаємозв'язки, необхідні для

подальшого моделювання і прогнозування. Формування кореляційно-регресійної моделі і визначення кореляційних характеристик, а саме коефіцієнта лінійної кореляції та параметрів лінії регресії, здійснювалося на основі експериментальних даних.

3. Результати та їх аналіз

Основною вимогою до застосування кореляційного аналізу є достатня кількість сенсорних даних і спостережень за погодою, тобто сукупності факторних і результативних показників. У роботі використані дані, одержані у період з 14 листопада 2023 року до 14 січня 2024 року. За цей період було зібрано понад 35 тис. записів про концентрацію PM1, PM2.5, PM10 і вуглекислого газу, а також інформацію про погодні умови в м. Новояворівськ. Зокрема рис. 3 ілюструє часові ряди температури та швидкості вітру у зазначений період. Часові залежності вимірених сенсорних даних зображено на рис. 4. Аналіз здійснювався з використанням усієї сукупності даних.

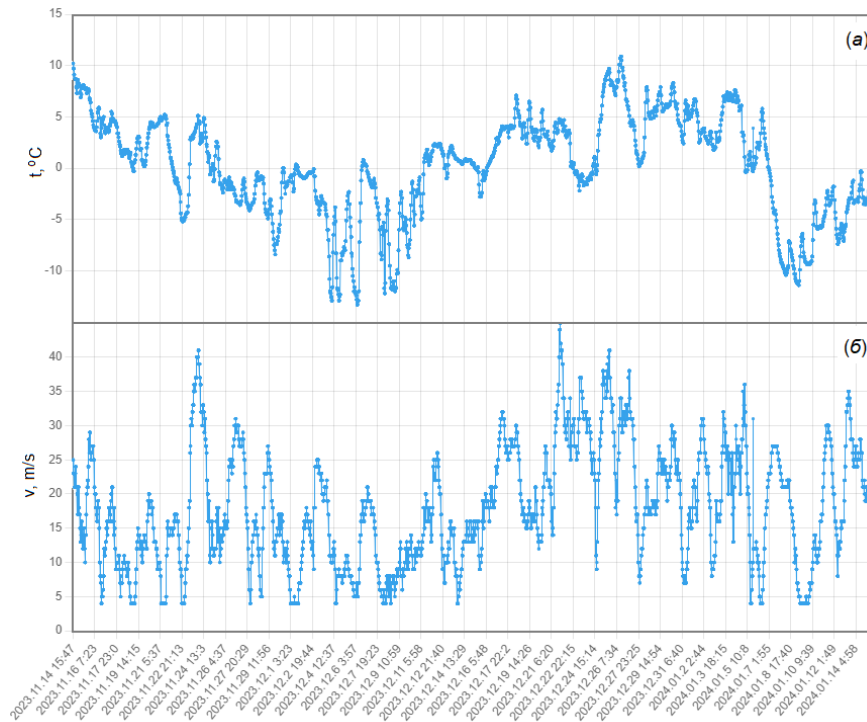


Рис. 3. Часові залежності температури (а) та швидкості вітру (б).

Fig. 3. Time dependences of temperature (a) and wind speed (b).

На рис. 4 прослідковується кореляція між концентраціями твердих мікрочастинок PM1, PM2.5 і PM10, що, ймовірно, зумовлено особливостями визначення сенсором HM-3301 їхньої концентрації за певним розподілом. Однак, спостерігаються різні діапазони концентрацій для частинок різного розміру. Вміст мікрочастинок PM2.5 і PM10 у повітрі був більшим, ніж PM1. Крім того, було виявлено одночасні викиди значень концентрації частинок пилу різного розміру, що може бути зумовлено апаратними аномаліями чи деяким погодним впливом (наприклад, поривами вітру). Враховуючи короткочасність

ISSN 2224-087X. Електроніка та інформаційні технології. 2024. Випуск 26
аномальних значень, усереднення значень концентрації мікрочастинок за 60 хвилинний період дало змогу зменшити негативний вплив таких аномалій.

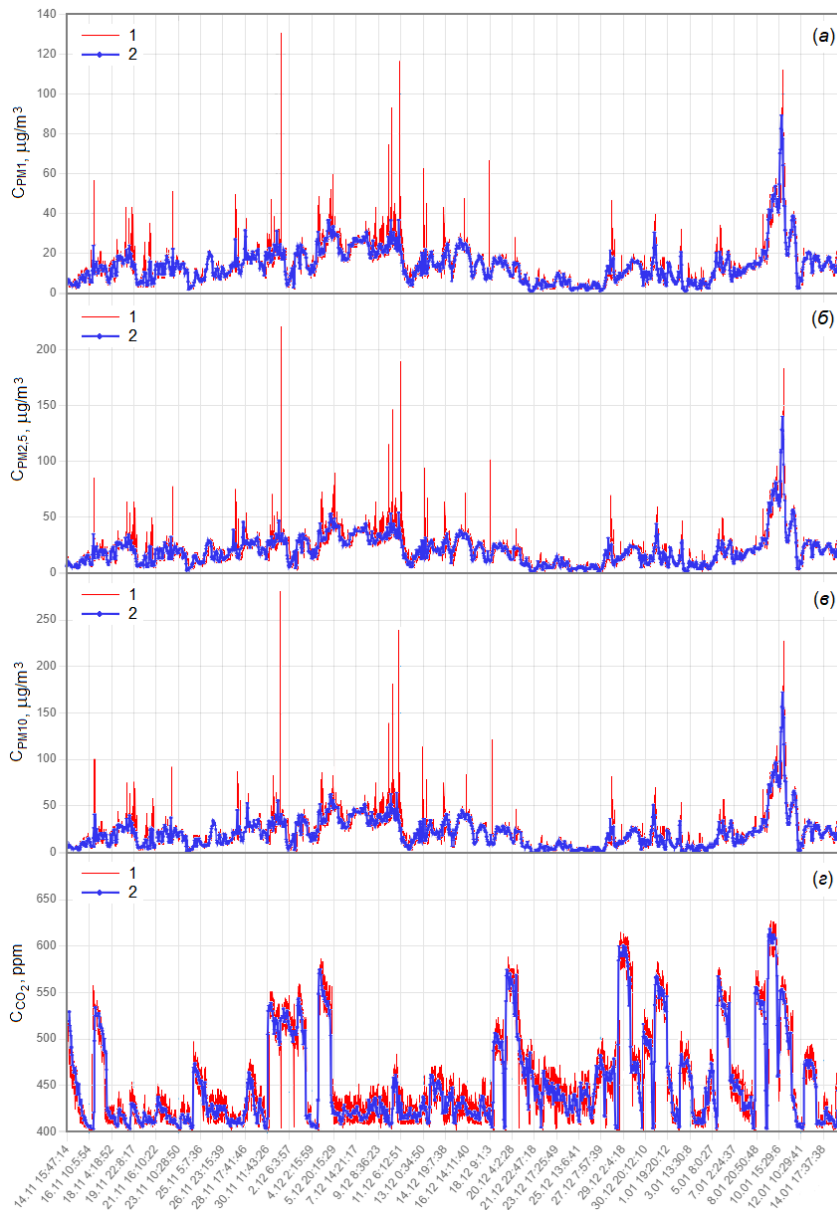


Рис. 4. Виміряні (1) та усереднені за 60 хв (2) часові залежності концентрації мікрочастинок PM1 (а), PM2.5 (б), PM10 (в) і молекул CO₂ (г).

Fig. 4. Time dependencies of the concentration of the PM1 (a), PM2.5 (b), PM10 (c) microparticles and CO₂ molecules (d) measured (1) and averaged over 60 min (2).

Часова залежність концентрації молекул CO_2 загалом відрізняється від таких залежностей для твердих мікрочастинок (див. рис. 4, з), хоча окремі часові діапазони підвищеної концентрації різних видів забруднень збігаються. Це може свідчити про наявність як спільних, так і різних джерел забруднення повітря вуглекислим газом та мікрочастинками PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ і PM_1 , внесок яких у загальний рівень забруднення у зоні вимірювання залежить також від напрямку вітру.

Додатковим підтвердженням цього припущення є залежності усередненої концентрації забруднюючих речовин у повітрі від напрямку вітру, які зображені на рис. 5. На основі аналізу одержаних результатів можна зробити висновок, що найбільше значення концентрації твердих мікрочастинок сенсор НМ-3301 реєстрував у разі південно-східного вітру. Одним з джерел забруднення може бути Новояворівська ТЕЦ, яка знаходиться у цьому ж напрямку відносно пункту відбору сенсорних даних. Крім того, підвищена концентрація пилу у повітрі спостерігалася у випадках, коли вітер дув з півдня або сходу. Моніторинг концентрації молекул CO_2 виявив максимальне забруднення повітря у разі північно-східного та південного вітру, що може бути пов'язано із спалюванням іншого виду енергоносіїв.

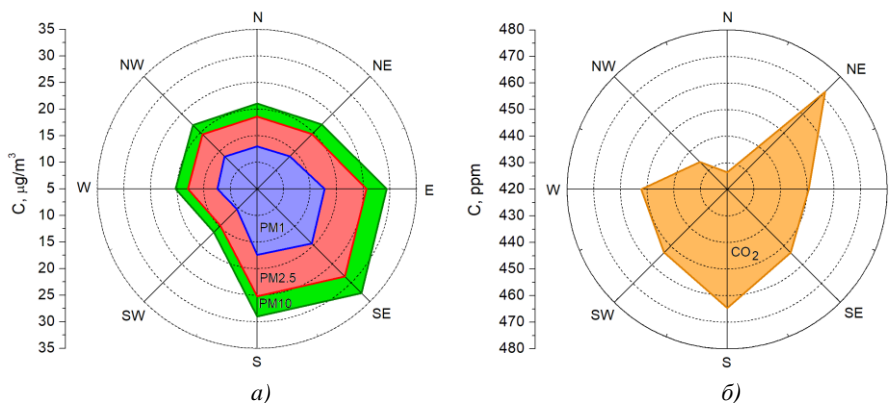


Рис. 5. Залежність концентрації твердих мікрочастинок (а) і молекул CO_2 (б) у повітрі від напрямку вітру.

Fig. 5. Dependence of the concentration of the solid microparticles (a) and CO_2 molecules (b) in the air on the wind direction.

Поряд з напрямком вітру важливий вплив на якість повітря має також і його швидкість. На рис. 6 зображені залежності концентрації забруднюючих речовин від швидкості вітру. На основі аналізу одержаних залежностей встановлено, що забруднення повітря зменшується із збільшенням швидкості вітру. Максимальні значення концентрації частинок PM_1 , $\text{PM}_{2.5}$ і PM_{10} спостерігалися для швидкості вітру у діапазоні 4–8 м/с, що ймовірно зумовлено близьким розташуванням джерел забруднення до сенсорів. Концентрація вуглекислого газу характеризується більш складною залежністю від швидкості та напрямку вітру. Слід зазначити, що спостережувані концентрації забруднюючих речовин у повітрі загалом не становлять серйозної небезпеки для мешканців міста. Зокрема, середні значення вмісту частинок PM_1 , $\text{PM}_{2.5}$ і PM_{10} в атмосфері за весь період спостережень були 13.8, 12.9 та 22.6 мкг/м^3 , відповідно. Середня концентрація молекул CO_2 становила 454 ppm.

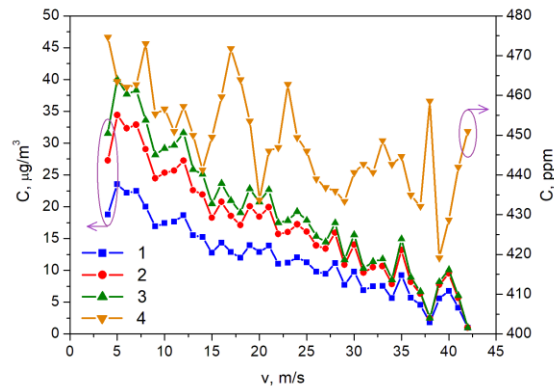


Рис. 6. Залежність концентрації мікрочастинок PM1 (1), PM2.5 (2), PM10 (3) і молекул CO₂ (4) в атмосфері від швидкості вітру.

Fig. 6. Dependencies of the concentration of the PM1 (1), PM2.5 (2), PM10 (3) microparticles and CO₂ molecules (4) in the atmosphere on wind speed.

Усереднений розподіл концентрації забруднюючих речовин у повітрі впродовж доби зображено на рис. 7. Спостерігається зниження рівня забруднення ближче до полудня, після чого концентрація як мікрочастинок, так і вуглекислого газу збільшується і досягає максимальних значень у вечірні години. Такий характер добового розподілу якості повітря вказує на те, що основним джерелом забруднення атмосфери є продукти горіння енергоносіїв для обігріву помешкань у холодну пору року.

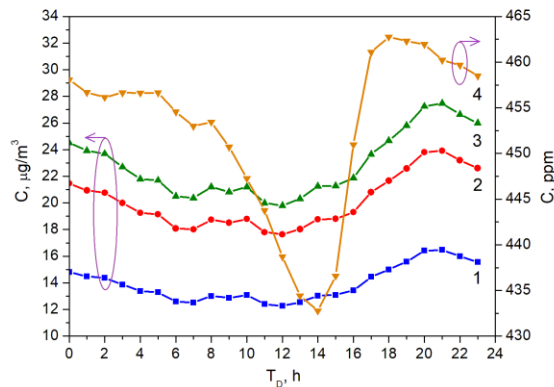


Рис. 7. Залежність концентрації мікрочастинок PM1 (1), PM2.5 (2), PM10 (3) і молекул CO₂ (4) в атмосфері від часу доби.

Fig. 7. Dependencies of the concentration of the PM1 (1), PM2.5 (2), PM10 (3) microparticles and CO₂ molecules (4) in the atmosphere on the time of day.

Аналогічний висновок можна зробити на основі аналізу залежності усереднених значень концентрації забруднюючих речовин від температури повітря (рис. 8). На одержаних графіках простежується збільшення забруднення атмосфери у випадку

зниження температури і, навпаки, покращення якості повітря за вищих температур. Добовий розподіл температури, зазвичай, характеризується більш холодним нічним періодом, що корелює з добовим розподілом забруднення повітря. Крім того, спостерігалось аномальне збільшення концентрації частинок PM1, PM2.5, PM10 і молекул CO₂ при температурах близько -9 та -6 °C, а також підвищення концентрації вуглекислого газу при температурі близько 5 °C. Спостереження аномалії у даних обох сенсорів НМ-3301 і МН-Z19В, ймовірно, зумовлено метеорологічними факторами. Наприклад, 22–24 листопада 2023 року при температурі близько -6 °C було зареєстровано збільшення швидкості вітру до 41 м/с, яке могло зумовити потребу додаткових енерговитрат. Отже, рівень забруднення атмосфери залежить від багатьох антропогенних і метеорологічних факторів, які ускладнюють виявлення закономірностей і встановлення взаємозв'язків між ними і якістю повітря. Зокрема, на точність вимірювання такого типу сенсорів мікрочастинок і вуглекислого газу суттєво впливає висока вологість повітря [22], що додатково необхідно враховувати при аналізі результатів досліджень.

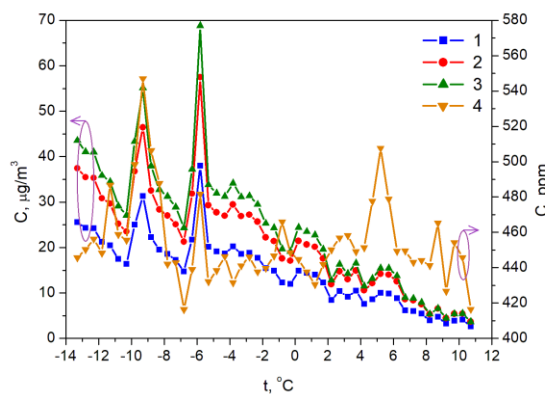


Рис. 8. Залежність концентрації мікрочастинок PM1 (1), PM2.5 (2), PM10 (3) і молекул CO₂ (4) в атмосфері від температури повітря.

Fig. 8. Temperature dependencies of the concentration of the PM1 (1), PM2.5 (2), PM10 (3) microparticles and CO₂ molecules (4) in the atmosphere.

Для кількісної оцінки впливу метеорологічних факторів на різні типи забруднення атмосфери було проаналізовано кореляційні зв'язки між рівнем забруднення і температурою та швидкістю вітру. Для оцінки міцності зв'язку та ступеня лінійної кореляції між концентрацією забруднюючих речовин і зазначеними метеорологічними факторами було обчислено попарні коефіцієнти лінійної кореляції r за допомогою виразу

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \tag{1}$$

де n – обсяг вибірки, \bar{x} та \bar{y} – середні значення, а x_i та y_i – пари значень температури або швидкості вітру та концентрації забруднюючих речовин, відповідно. Коефіцієнти лінійної кореляції, визначені для різних типів забруднення повітря, наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Коефіцієнт лінійної кореляції між забрудненням повітря та метеорологічними факторами.

Table 1. Coefficient of linear correlation between air pollution and meteorological factors.

Метеорологічний фактор	Коефіцієнт лінійної кореляції			
	PM1	PM2.5	PM10	CO ₂
Температура	-0.536	-0.529	-0.525	-0.030
Швидкість вітру	-0.419	-0.412	-0.408	-0.139

Аналіз значень коефіцієнта лінійної кореляції вказує на доволі тісний зв'язок та обернену лінійну кореляцію між вмістом твердих мікрочастинок і температурою повітря та швидкістю вітру. Проте, виявлено слабку кореляцію між концентрацією CO₂ і швидкістю вітру. Ба більше, можна стверджувати про відсутність лінійної кореляції між концентрацією вуглекислого газу і температурою, що не виключає можливість нелінійної кореляції та більш складної статистичної залежності. Близькі до нуля значення коефіцієнта лінійної кореляції між концентрацією вуглекислого газу та метеорологічними факторами не дають підстав для розроблення надійної прогностичної моделі на основі лінійної регресії [23].

Для формування кореляційно-регресійної моделі забруднення повітря твердими мікрочастинками PM1, PM2.5 та PM10 було визначено параметри лінії регресії $y = a \cdot x + b$, скориставшись виразом

$$y - \bar{y} = r \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} (x - \bar{x}). \quad (2)$$

З рівняння (2) одержуємо

$$a = r \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}, \quad (3)$$

$$b = -r \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \bar{x} + \bar{y}. \quad (4)$$

Обчислені значення параметрів лінії регресії для кожного виду забруднення твердими мікрочастинками приведені у табл. 2.

Таблиця 2. Параметри лінії регресії для кореляційної моделі забруднення повітря твердими мікрочастинками.

Table 2. Regression line parameters for the correlation model of air pollution with solid microparticles.

Метеорологічний фактор	Параметри лінії регресії					
	PM1		PM2.5		PM10	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
Температура	14.159	-1.052	20.436	-1.568	23.241	-1.899
Швидкість вітру	22.352	-0.465	32.604	-0.690	37.924	-0.833

Одержані параметри лінії регресії дають змогу побудувати кореляційні моделі залежності рівня забруднення атмосфери твердими мікрочастинками PM1, PM2.5 та PM10 від метеорологічних факторів: температури повітря та швидкості вітру. Слід зазначити, що використання множинної кореляції та аналіз впливу додаткових факторів (наприклад, часу доби, відносної вологості, сезонних змін забруднення тощо) може підвищити точність прогнозування якості повітря.

4. Висновки

У роботі розроблено автоматизовану систему моніторингу забруднення повітря на основі мікроконтролера Arduino UNO R4 WiFi та сенсорів HM-3301 і MH-Z19B, які вимірюють концентрацію твердих мікрочастинок PM1, PM2.5 та PM10 і молекул CO₂, відповідно. Реалізовано Wi-Fi передачу вимірних сенсорних даних на віддалений сервер для зберігання в базі MySQL і подальшого аналізу. Запропонована система моніторингу якості повітря додатково одержує інформацію з веб-ресурсу <https://www.weatherapi.com> про температуру, вологість, напрям і швидкість вітру у заданій місцевості. Для аналізу використано дані про забруднення повітря та метеорологічні умови у м. Новояворівську з 14 листопада 2023 р. по 14 січня 2024 р.

На основі аналізу добового розподілу забруднення повітря та даних про напрям і швидкість вітру виявлено можливі джерела забруднення у м. Новояворівськ. З'ясовано, що основним джерелом забруднення атмосфери є продукти горіння енергоносіїв для обігріву помешкань у холодну пору року. Виявлено кореляційний зв'язок між концентрацією твердих мікрочастинок і молекул CO₂ в атмосфері та температурою і швидкістю вітру. Визначено коефіцієнти лінійної кореляції та параметри лінії регресії, що дає змогу побудувати кореляційні моделі залежності рівня забруднення повітря твердими мікрочастинками від метеорологічних факторів: температури повітря та швидкості вітру. Середні значення вмісту частинок PM1, PM2.5, PM10 і концентрації молекул CO₂ в атмосфері за час спостереження були 13.8, 12.9, 22.6 мкг/м³ і 454 ppm, відповідно, що не становить серйозної небезпеки для мешканців м. Новояворівськ. Запропонована у роботі автоматизована система дослідження забруднення повітря може бути корисною для регіонів, не охоплених глобальною системою моніторингу атмосфери, а також для наукових досліджень і розв'язання екологічних проблем.

- [1] Air quality in the world [Electronic resource]. - Mode of access: <https://www.iqair.com/world-air-quality>.
- [2] *Kunzli N., Jerrett M., Mack W.J., Beckerman B., LaBree L., Gilliland F., Thomas D., Peters J., Hodis H.N.* Ambient air pollution and atherosclerosis in Los Angeles // *Environmental Health Perspectives*. – 2005. – Vol. 113. – P. 201–206.
- [3] *Yi W.Y., Lo K.M., Mak T., Leung K.S., Leung Y., Meng M.L.* A Survey of Wireless Sensor Network Based Air Pollution Monitoring Systems // *Sensors*. – 2015. – Vol. 15. – P. 31392–31427.
- [4] *Sivertsen B.* Monitoring air quality, objectives and design // *Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly*. – 2008. – Vol. 14, No. 3. – P. 167–171.
- [5] *Kortoci P., Motlagh N.H., Zaidan M.A., Fung P.L., Varjonen S., Rebeiro-Hargrave A., Niemi J.V., Nurmi P., Hussein T., Petäjä T., Kulmala M., Tarkoma S.* Air pollution exposure monitoring using portable low-cost air quality sensors // *Smart Health*. – 2022. – Vol. 23. – P. 100241.
- [6] *Snyder E.G., Watkins T.H., Solomon P.A., Thoma E.D., Williams R.W., Hagler G.S.W., Shelow D., Hindin D.A., Kilaru V.J., Preuss P.W.* The changing paradigm of air pollution monitoring // *Environ. Sci. Technol.* – 2013. – Vol. 47. – P. 11369–11377.
- [7] *Shitole P.V., Markande S.D.* Review: Air Quality Monitoring System // *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*. – 2016. – Vol. 5, No. 6. – P. 461-463.
- [8] *Edupuganti S., Tenneti N.S.S., Iqbal M.M., Rajaram G.* An IoT Implemented Dynamic Air Pollution Monitoring System // *EAI Endorsed Transactions on Internet of Things*. – 2023. – Vol. 9, No 4. – P. 1–6.
- [9] *Xiaojun C., Xianpeng L., Peng X.* IoT-based air pollution monitoring and forecasting system // *2015 International Conference on Computer and Computational Sciences (ICCCS)*. – 2015. – P. 257–260, <https://doi.org/10.1109/ICCCS.2015.7361361>.
- [10] *Sammarco M., Tse R., Pau G., Marfia G.* Using geosocial search for urban air pollution monitoring // *Pervasive and Mobile Computing*. – 2017. – Vol. 35. – P. 15–31.
- [11] *Saha D., Shinde M., Thadeshwar S.* IoT-based air quality monitoring system using wireless sensors deployed in public bus services // *ICC '17: Proceedings of the Second International Conference on Internet of things, Data and Cloud Computing*. – 2017. – P. 87, <https://doi.org/10.1145/3018896.3025135>.
- [12] *Alvear O., Zema N.R., Natalizio E., Calafate C.T.* Using UAV-Based Systems to Monitor Air Pollution in Areas with Poor Accessibility // *Journal of Advanced Transportation*. – 2017. – Vol. 2017. – P. 8204353.
- [13] *Hu S.C., Wang Y.C., Huang C.Y., Tseng Y.C.* Measuring air quality in city areas by vehicular wireless sensor networks. *Mobile Applications: Status and Trends* // *J. Syst. Softw.* – 2011. – Vol. 84. – P. 2005–2012.
- [14] *Devarakonda S., Sevusu P., Liu H., Liu R., Iftode L., Nath B.* Real-time Air Quality Monitoring Through Mobile Sensing in Metropolitan Areas // *Proceedings of the 2nd ACM SIGKDD International Workshop on Urban Computing (UrbComp '13)*. – 2013. – P. 1–8.

- [15] Khedo K.K., Perseedoss R., Mungur A. A wireless sensor network air pollution monitoring system // *International Journal of Wireless & Mobile Networks*. – 2010. – Vol. 2, No. 2. – P. 31–45.
- [16] Cieplak T., Rymarczyk T., Tomaszewsk R. A concept of the air quality monitoring system in the city of Lublin with machine learning methods to detect data outliers // *MATEC Web of Conferences*. – 2019. – Vol. 252. – P. 03009, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925203009>
- [17] Papadimitriou S., Kitagawa H., Gibbons P.B., Faloutsos C. LOCI: fast outlier detection using the local correlation integral // *19th International Conference on Data Engineering*. – 2003. – P. 315–326, <https://doi.org/10.1109/ICDE.2003.1260802>
- [18] O'Leary B., Reiners J.J. Jr, Xu X., Lemke L.D. Identification and influence of spatio-temporal outliers in urban air quality measurements // *Science of the Total Environment*. – 2016. – Vol. 573. – P. 55–65.
- [19] Matthews V.O., Adekitan A.I., Uzairue S.I., Noma-Osaghae E. Wireless Intelligent Electricity Metering and Billing System (WIMBIS) // *International Journal of Engineering and Techniques*. – 2018. – Vol. 4. – P. 57–61.
- [20] Rukmani P., Teja G.K., Vinay M.S. Industrial Monitoring Using Image Processing, IoT and Analyzing the Sensor Values Using Big Data // *Procedia Computer Science*. – 2018. – Vol. 133. – P. 991–997.
- [21] Munn R.E. *The Design of Air Quality Monitoring Networks* / R.E. Munn. – Macmillan, Canada, 1981.
- [22] Crilley L.R., Shaw M., Pound R., Kramer L.J., Price R., Young S., Lewis A.C., Pope F.D. Evaluation of a low-cost optical particle counter (Alphasense OPC-N2) for ambient air monitoring // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2018. – Vol. 11. – P. 709–720.
- [23] Rao C.R. *Linear Models and Generalizations* / C.R. Rao, Shalabh, H. Toutenburg, C. Heumann. – Heidelberg, Springer, 2008.

AUTOMATED AIR POLLUTION RESEARCH SYSTEM

I. Olenych, S. Babiak

*Ivan Franko National University of Lviv,
50 Drahomanov St., UA–79005 Lviv, Ukraine
igor.olenych@lnu.edu.ua, sviatoslav.babiak@lnu.edu.ua*

Air pollution is becoming a serious environmental problem and a threat to human health. Therefore, there is an urgent need for an effective system of environmental monitoring and detection of various types of atmospheric pollution, which could not only provide accurate real-time data on air quality but also carry out their analysis. The automated air pollution monitoring system based on the Arduino UNO R4 WiFi microcontroller and sensors of solid microparticles HM-3301 and carbon dioxide MH-Z19B was developed in the work. The Wi-Fi transfer of measured sensor data at 2-minute intervals to a remote server for storage in the MySQL database and further analysis has been implemented. The proposed air quality monitoring system additionally receives information from the web resource <https://www.weatherapi.com> about temperature, humidity, wind direction and speed in the given area. Data on air pollution and

meteorological conditions in the city of Novoyavorivsk from 14.11.2023 to 14.01.2024 were used for the analysis.

The possibility of reducing the negative impact of anomalous emissions of sensor data by averaging the values of the concentration of solid microparticles in the air for 60 minutes has been demonstrated. The possible sources of pollution in the city of Novoyavorivsk were identified based on the analysis of the daily distribution of air pollution and data on the direction and speed of the wind. It was found that the main source of atmospheric pollution is the combustion products of energy carriers for heating houses in the cold season. The correlation dependence of the concentration of PM1, PM2.5, PM10 solid microparticles and CO₂ molecules in the atmosphere on temperature and wind speed was established. Coefficients of pairwise linear correlation and parameters of the regression line were determined to develop correlation models that take meteorological factors into account for air quality forecasting. The automated air pollution research system proposed in the work can be useful for regions not covered by the global atmospheric monitoring system, as well as for scientific research and solving environmental problems.

Key words: air pollution monitoring, meteorological factors, correlation, regression line, forecasting.

Стаття надійшла до редакції 25.04.2024.

Прийнята до друку 01.05.2024.