

УДК 004.6

Д.В. ШЕВЧЕНКО*, Б.Л. ГОЛУБ*

МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

*Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

Анотація. Стаття присвячена розробці та впровадженню системи моніторингу якості атмосферного повітря в реальному часі, яка базується на сучасних інформаційних технологіях. У дослідженні акцентується увага на використанні протоколу MQTT для ефективної передачі даних, фреймворку Django для створення серверної частини та Celery для асинхронної обробки задач. Особливістю системи є її модульна архітектура, яка забезпечує високу масштабованість та можливість адаптації до зростаючих вимог. Детально розглянуто алгоритми обчислення індексів якості повітря AQI та CAQI, що дозволяють оперативно аналізувати рівень забруднення атмосфери. Для обробки великих обсягів екологічних даних застосовуються методи оптимізації зберігання, зокрема, агрегація середніх, мінімальних та максимальних значень. Це сприяє зменшенню обсягів збереженої інформації, підвищенню швидкодії та ефективності системи. Система отримує дані з різних джерел, зокрема, датчиків IoT, відкритих API та MQTT-серверів, що дозволяє забезпечити комплексний моніторинг якості повітря у міських і промислових зонах. Для забезпечення доступу до інформації користувачам пропонується інтерактивний вебінтерфейс із дашбордами, які дозволяють переглядати дані у реальному часі, аналізувати історичні тренди та отримувати повідомлення у випадку перевищення граничних рівнів забруднення. У статті підкреслюється важливість впровадження інноваційних технологій та постійного вдосконалення методів моніторингу. Зокрема, це включає впровадження адаптивних алгоритмів для автоматизації процесів збору та аналізу даних, інтеграцію з новими типами датчиків та покращення обробки великих обсягів інформації. Такі підходи спрямовані на підвищення точності, актуальності екологічних даних і створення надійної основи для ефективного вирішення екологічних проблем, що виникають у зв'язку з глобальним забрудненням атмосфери.

Ключові слова: атмосферне повітря, система моніторингу, якість повітря, датчики, IoT, MQTT, Django, Celery, великі дані, агрегація даних, інтерактивний інтерфейс, екологічний моніторинг, оптимізація обробки даних, AQI, CAQI, забруднювачі.

Abstract. The article is dedicated to the development and implementation of a real-time air quality monitoring system based on modern information technologies. The study emphasizes the use of the MQTT protocol for efficient data transmission, the Django framework for building the server-side application, and Celery for asynchronous task processing. A key feature of the system is its modular architecture, which ensures high scalability and adaptability to growing requirements. The algorithms for calculating air quality indices, AQI and CAQI, enabling rapid assessment of atmospheric pollution levels, have been thoroughly analyzed. To process large volumes of environmental data, storage optimization methods have been used, including aggregation of average, minimum, and maximum values. These approaches reduce the volume of stored information, enhance processing speed, and improve system efficiency. The system gathers data from various sources, including IoT sensors, open APIs, and MQTT servers, enabling comprehensive air quality monitoring in urban and industrial areas. An interactive web interface with dashboards is provided to ensure user access to information, allowing real-time data visualization, analysis of historical trends, and alerts in case of threshold exceedances. The article highlights the importance of integrating innovative technologies and continuously improving monitoring methods. This includes the implementation of adaptive algorithms for automating data collection and analysis processes, integration with new types of sensors, and enhancement of big data processing capabilities. Such approaches aim to improve the accuracy and relevance of environmental data and establish a reliable foundation for effectively addressing ecological challenges arising from global atmospheric pollution.

Keywords: atmospheric air, monitoring system, air quality, sensors, IoT, MQTT, Django, Celery, big data, data aggregation, interactive interface, environmental monitoring, data processing optimization, AQI, CAQI, pollutants.

DOI: 10.34121/1028-9763-2025-1-103-112

1. Вступ

Атмосферне повітря є невід’ємною частиною глобальної екосистеми, забезпечуючи киснем усі живі організми та підтримуючи життєво важливі процеси на нашій планеті. Кисень, як головний компонент повітря, є необхідним для обмінних процесів у клітинах тварин, людей та мікроорганізмів. Забруднення повітря негативно впливає на здоров’я людей, викликаючи респіраторні та серцево-судинні захворювання, ослаблення імунітету та розвиток хронічних хвороб. Забруднене повітря також завдає шкоди тваринам і рослинам, що може призводити до серйозних екологічних порушень.

Стан атмосферного повітря є критичним для здоров’я та благополуччя живих істот, а також для стабільності екосистем, що підкреслює необхідність постійного моніторингу та ефективних заходів щодо зниження забруднення. Якість повітря в Україні є об’єктом постійного моніторингу, що має важливе значення для екологічної безпеки та охорони здоров’я населення. Моніторинг включає збір, аналіз та обробку даних про концентрації забруднюючих речовин, результати якого використовуються для розробки екологічної політики та впровадження заходів із поліпшення якості повітря.

Якість повітря в останні роки є нестабільною через вплив різноманітних факторів, таких як промислова діяльність, автомобільні викиди, спалювання палива та природні явища, зокрема, лісові пожежі та пилові бурі. Ці фактори можуть призводити до значного забруднення повітря небезпечними речовинами, такими як вуглеводні, оксиди азоту та сірки, а також дрібнодисперсними частинками. Це створює загрозу для здоров’я людей, тварин і рослин, а також негативно впливає на екологічний баланс.

У багатьох розвинених країнах впроваджуються системи моніторингу на основі передових технологій, таких як IoT, машинне навчання та великі дані. Наприклад, у Сингапурі створена мережа IoT-датчиків для моніторингу рівня забруднення, які передають дані до центральної системи для аналізу в режимі реального часу. У США використання машинного навчання дозволяє прогнозувати рівень забруднення на основі метеорологічних даних і даних про викиди, що сприяє оперативному плануванню екологічних заходів.

В Україні вже працюють кілька пілотних проєктів. Одним із них є SaveEcoBot, що забезпечує інтеграцію даних із місцевих сенсорів і надає інформацію у вигляді зручних інтерфейсів для громадян. У Києві було впроваджено систему моніторингу за підтримки міської адміністрації, яка дозволяє отримувати дані про якість повітря у міських районах і реагувати на критичні зміни в екологічній ситуації.

Аналіз сучасних досліджень демонструє необхідність оновлення національних систем моніторингу до сучасних стандартів. Звіт Київської міської державної адміністрації за 2023 рік [1] вказує на технічну застарілість існуючих систем та недостатню актуальність даних. Використання новітніх технологій та підходів до збору і обробки інформації, таких як машинне навчання та інформаційно-аналітичні системи, сприятиме покращенню моніторингу та ефективнішій реалізації екологічної політики.

Ефективним інструментом у боротьбі з цією проблемою є розробка та впровадження систем моніторингу якості повітря. Вони дозволяють вчасно реагувати на загрози та розробляти дієві заходи щодо запобігання забрудненню.

Метою статті є розробка та впровадження ефективної модульної системи моніторингу якості повітря, яка поєднує сучасні методи збору, аналізу та візуалізації даних для забезпечення оперативного реагування на забруднення.

2. Архітектура системи

Системи моніторингу якості повітря є невід'ємною частиною сучасних екологічних досліджень, спрямованих на захист навколишнього середовища та здоров'я населення. Основна мета таких систем полягає в безперервному зборі, обробці та аналізі даних про стан атмосфери, що дозволяє своєчасно виявляти небезпечні рівні забруднення та вживати відповідних заходів.

Сучасні системи моніторингу якості повітря базуються на використанні різноманітних датчиків, що встановлюються на спеціальних станціях. Ці станції можуть бути стаціонарними, розміщеними в конкретних стратегічних точках, таких як міські центри, промислові райони або прибережні регіони, або ж мобільними, що дозволяє проводити вимірювання в різних географічних місцях залежно від потреб дослідження.

Датчики, що встановлюються на цих станціях, вимірюють різні параметри якості повітря, такі як концентрації твердих часток (PM2.5, PM10), оксидів азоту (NO₂), діоксиду сірки (SO₂), озону (O₃) та інших поллютантів. Ці дані є критично важливими для розуміння динаміки забруднення повітря та його впливу на здоров'я населення і навколишнє середовище.

Зібрані дані з датчиків передаються до централізованої системи, де вони проходять обробку, аналізуються та зберігаються. На основі цієї інформації користувачі, такі як державні органи, науковці та екологи, можуть приймати рішення щодо вжиття необхідних заходів для покращення якості повітря та мінімізації його негативного впливу на населення.

Система моніторингу якості атмосферного повітря побудована на модульному принципі, що дозволяє забезпечити гнучкість і масштабованість під час інтеграції нових компонентів та розширення функціональності (рис. 1). Основними складовими архітектури є сервер збору даних, датчики, підсистема адміністрування та інтерактивний вебінтерфейс.

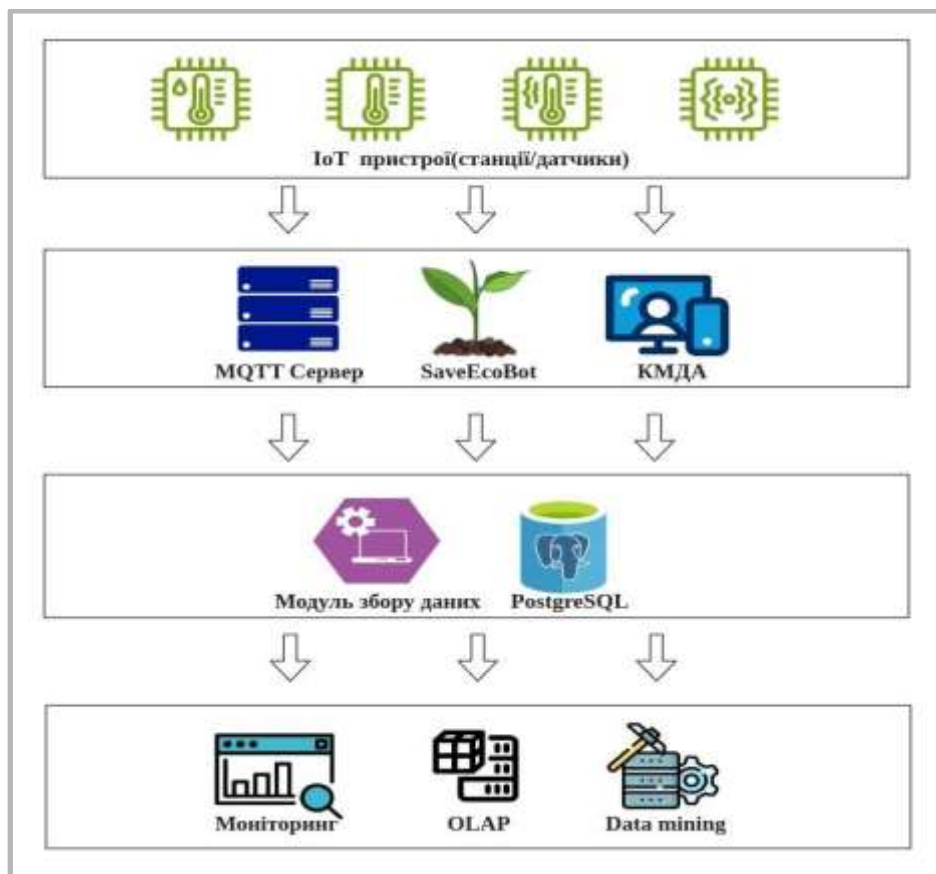


Рисунок 1 — Архітектура системи

Сервер збору даних

Центральний елемент системи, який відповідає за прийом і обробку даних, що надходять від різних джерел. Сервер розроблений на основі фреймворку Django та мови програмування Python, що забезпечує високу продуктивність та можливість розширення системи в майбутньому. Сервер здійснює первинну обробку даних, включаючи перевірку їхньої цілісності та валідацію, після чого вони зберігаються в базі даних.

Інтеграція джерел даних

Система отримує дані від різноманітних джерел, включаючи датчики якості повітря, розміщені на різних локаціях, API Київської міської державної адміністрації (КМДА), SaveEcoBot та сервери MQTT. Датчики можуть бути стаціонарними або мобільними, що дозволяє здійснювати моніторинг якості повітря як у постійних, так і у тимчасових місцях розташування. Використання різних протоколів обміну даними забезпечує надійну і стабільну передачу інформації навіть у випадку нестабільних умов зв'язку.

Підсистема адміністрування

Цей компонент відповідає за управління та налаштування системи, включаючи додавання нових датчиків, оновлення параметрів збору даних, а також моніторинг стану системи в реальному часі. Підсистема адміністрування надає інтерфейс для користувачів із правами адміністратора, що дозволяє їм швидко і ефективно реагувати на зміни в системі та здійснювати контроль над її роботою.

Інтерактивний вебінтерфейс

Для забезпечення зручного доступу до даних користувачам системи надається інтерактивний вебінтерфейс, який включає дашборди з можливістю перегляду даних у реальному часі, а також аналізу історичних даних. Користувачі можуть взаємодіяти з системою, переглядати графіки змін показників якості повітря, а також отримувати попередження у випадку перевищення допустимих норм забруднення.

Такий підхід до побудови архітектури забезпечує стабільну роботу системи в умовах великого обсягу даних, а також дозволяє легко адаптувати систему до нових вимог і змін у зовнішньому середовищі.

3. База даних та механізми накопичення

Ключовим етапом таких систем є систематичне зберігання та обробка наборів даних. Зокрема, для цих критичних завдань у нашій структурі використовується система керування базами даних PostgreSQL. Внутрішні сильні сторони PostgreSQL, включаючи гнучкість і непохитну надійність, позиціонують його як оптимальний вибір для проєктів, які характеризуються вимогливими вимогами до обробки даних.

Логічна модель бази даних включає основні сутності, такі як «Вимірювання», «Станції», «Датчики», «Типи забруднювачів», «Часові інтервали» та ін. Кожна таблиця має унікальний ідентифікатор, що дозволяє ефективно керувати даними та забезпечувати цілісність інформації. Логічна модель бази даних представлена на рис. 2.

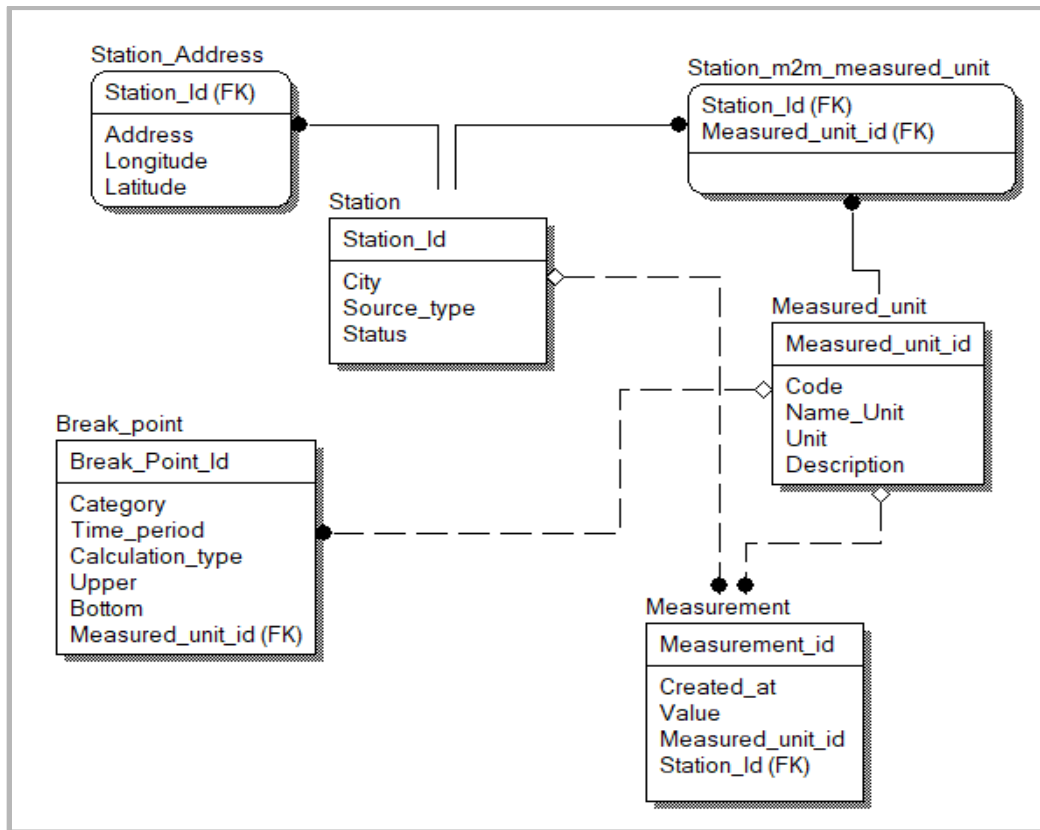


Рисунок 2 — Логічна модель бази даних

Логічна модель забезпечує чітку структуру даних, яка оптимізована для зберігання великих обсягів інформації. Наприклад, таблиця «Вимірювання» містить поля для зберігання даних про тип забруднювача, концентрацію, місце розташування станції та час вимірювання. Всі ці дані зв'язані за допомогою зовнішніх ключів із відповідними таблицями «Станції» та «Типи забруднювачів». Така структура дозволяє легко здійснювати запити та аналізувати дані в різних розрізах.

При наявності чітко сформованої бази даних та її структури можна переходити до накопичення. Механізм збору даних розпочинається з визначення задач, призначених для отримання інформації з різних джерел. Ці задачі плануються за допомогою вбудованих функцій планування періодичних завдань Celery, що дозволяє точно контролювати частоту збору даних. Після налаштування задачі виконуються у фоновому режимі, використовуючи асинхронну модель виконання, яка гарантує, що процеси збору даних не впливають на операційну пропускну здатність системи. Ця асинхронна модель є ключовою для підтримки оперативної реакції системи та забезпечення можливості моніторингу в реальному часі.

Однією з головних переваг використання Celery у системі моніторингу якості повітря (AQMS) є його гнучкість і масштабованість. Адміністратори системи мають змогу налаштовувати параметри задач збору даних відповідно до змін у навколишньому середовищі або специфічних вимог дослідження. Ця адаптивність є критично важливою в умовах моніторингу навколишнього середовища, де точність даних відіграє вирішальну роль в інтерпретації атмосферних умов.

Асинхронна черга завдань Celery включає механізми відмовостійкості, такі як повторні спроби виконання задач і процедури обробки помилок, що є важливими для забезпечення безперервності збору даних у разі виникнення операційних аномалій. Додатково інтеграція функцій моніторингу та журналювання у задачі Celery забезпечує прозорий огляд продуктивності системи, що полегшує своєчасне виявлення та вирішення проблем.

Основними джерелами даних у системі є відкритий ресурс Київської міської державної адміністрації (КМДА), бот SaveEcoBot та сервер MQTT. Дані КМДА надають доступ до офіційної статистики та результатів моніторингу міських служб, забезпечуючи об'єктивну картину стану атмосфери в Києві. SaveEcoBot збирає дані з різних датчиків у реальному часі, що дозволяє оперативно реагувати на зміни якості повітря. Сервер MQTT використовується для збору та передачі даних від різних пристроїв, використовуючи ефективний протокол обміну повідомленнями, що забезпечує надійність у складних умовах.

4. Індекси якості повітря

На основі зібраних даних реалізовано два алгоритми для аналізу індексу якості повітря: Air Quality Index (AQI) для США та Common Air Quality Index (CAQI) для Європи. Хоча ці індекси мають певні відмінності, вони обидва слугують ключовими показниками рівня забруднення повітря та можливого впливу на здоров'я населення.

Для розрахунку AQI використовуються виміряні концентрації основних забруднювачів, таких як дрібнодисперсні частинки PM_{2.5} та PM₁₀, діоксид азоту (NO₂), озон (O₃), діоксид сірки (SO₂), та оксид вуглецю (CO). Дані, отримані з різних станцій, проходять попередню обробку перед розрахунками, де для кожного забруднювача обчислюється субіндекс. Цей субіндекс зіставляється з відповідними діапазонами, визначеними у таблицях стандартів якості повітря. Остаточний AQI визначається як максимальне значення в розрізі субіндексів, що відповідають кожному з основних забруднювачів повітря, де кожен субіндекс AQI обчислюється за формулою (1)

$$AQI_i = \frac{(I_{high} - I_{low})}{(C_{high} - C_{low})} \times (C - C_{low}) + I_{low}, \quad (1)$$

де C — виміряна концентрація забруднювача;

C_{high} та C_{low} — межі концентрації для відповідного діапазону AQI;

I_{high} та I_{low} — межі субіндексу AQI для відповідного діапазону.

Завдяки безперервному збору даних у реальному часі та можливості інтеграції інформації з різних джерел (MQTT-брокери, API відкритих даних), система постійно оновлює значення AQI та CAQI. Дані накопичуються з інтервалом у 10 хвилин, що дозволяє виконувати перерахунок цих індексів для всіх активних станцій із такою ж частотою. Це забезпечує оперативне відображення рівнів забруднення на інтерактивних дашбордах і генерування повідомлень для користувачів у разі досягнення критичних значень індексів. Однак такий підхід вимагає значних обчислювальних ресурсів, особливо з огляду на необхідність оптимізації складних запитів до бази даних для швидкого розрахунку індексів. Це стає критично важливим при зростанні обсягу даних або збільшенні кількості активних станцій, що може викликати затримки в обробці даних і зниження швидкодії системи.

Вирішення цієї проблеми потребує додаткових оптимізацій алгоритмів та покращення архітектури бази даних для підтримки швидкого та стабільного функціонування системи в умовах високого навантаження.

4. Результати та обговорення

У результаті дослідження побудована система моніторингу якості повітря, яка відзначається не лише надійною та перевіреною архітектурою, але й здатністю забезпечувати спостереження за станом повітря в режимі реального часу. Ця архітектура дозволяє накопичувати дані та зберігати їх у базі даних перед агрегацією, доступною через вебінтерфейс системи. Головний сервер та база даних розміщені в хмарних сервісах, що забезпечує стабільність

та незалежність системи від зовнішніх факторів. Такий підхід допомагає забезпечити надійність та ефективність системи, а також сприяє її гнучкості та масштабованості для відповіді на змінні потреби користувачів.

Використання асинхронних алгоритмів за допомогою Celery забезпечило безперервний збір даних навіть у випадку підвищеного навантаження на систему або виникнення технічних збоїв. Завдяки реалізації механізмів відмовостійкості та автоматичного відновлення задач, система здатна ефективно обробляти великі обсяги даних без втрати інформації, що є критичним для забезпечення актуальності та достовірності даних.

Одним із ключових елементів системи є відкритий доступ до системи моніторингу. Візуалізація даних дозволяє легко інтерпретувати результати моніторингу, що сприяє швидкому прийняттю рішень та розробці відповідних заходів у разі виявлення перевищення допустимих рівнів забруднення. Завдяки можливості накопичення даних у реальному часі було реалізовано алгоритми прорахунку індексів якості повітря AQI (Air Quality Index) та CAQI (Common Air Quality Index), що дозволяє проводити подальший аналіз та розробляти пропозиції щодо покращення алгоритмів якості повітря та більш якісного реагування на ці зміни.

На головній сторінці системи моніторингу якості повітря (рис. 3), доступній усім користувачам, розміщений інтерактивний дашборд, що надає комплексний огляд стану повітря в режимі реального часу. Основний елемент дашборду – це інтерактивна карта, на якій відображені всі активні станції моніторингу. Користувачі можуть взаємодіяти з картою, натискаючи на будь-яку станцію для отримання детальної інформації про її параметри.



Рисунок 3 — Dashboard. Перегляд графіків за станцією та виміром AQI

При виборі конкретної станції користувач отримує доступ до ключових характеристик цієї станції, включаючи її тип, адресу та доступні параметри вимірювання. Додатково користувач може вибрати конкретний параметр, за яким хоче переглянути дані. Після вибору система надає детальну інформацію про цей параметр, включаючи опис та графік, що показує динаміку змін протягом вибраного періоду.

Система дозволяє переглядати дані за різними часовими інтервалами, такими як день, тиждень, місяць або рік. На відміну від даних у реальному часі, на графіках відображаються дані, агреговані до середнього значення на годину, що забезпечує більш точне та зручне для аналізу представлення інформації. Цей підхід дозволяє користувачам отримувати актуальну та зрозумілу інформацію про якість повітря в їхньому регіоні.

Для зареєстрованих користувачів із правами адміністратора в системі доступний широкий набір інструментів для управління станціями моніторингу. Адміністратори можуть керувати станціями, здійснювати їх включення, відключення, а також оновлювати дані показників для подальшого збору та аналізу. Крім того, є можливість закріплювати певні станції на початку списку для зручного та швидкого доступу до них. Функції по управлінню зображені на рис. 4.

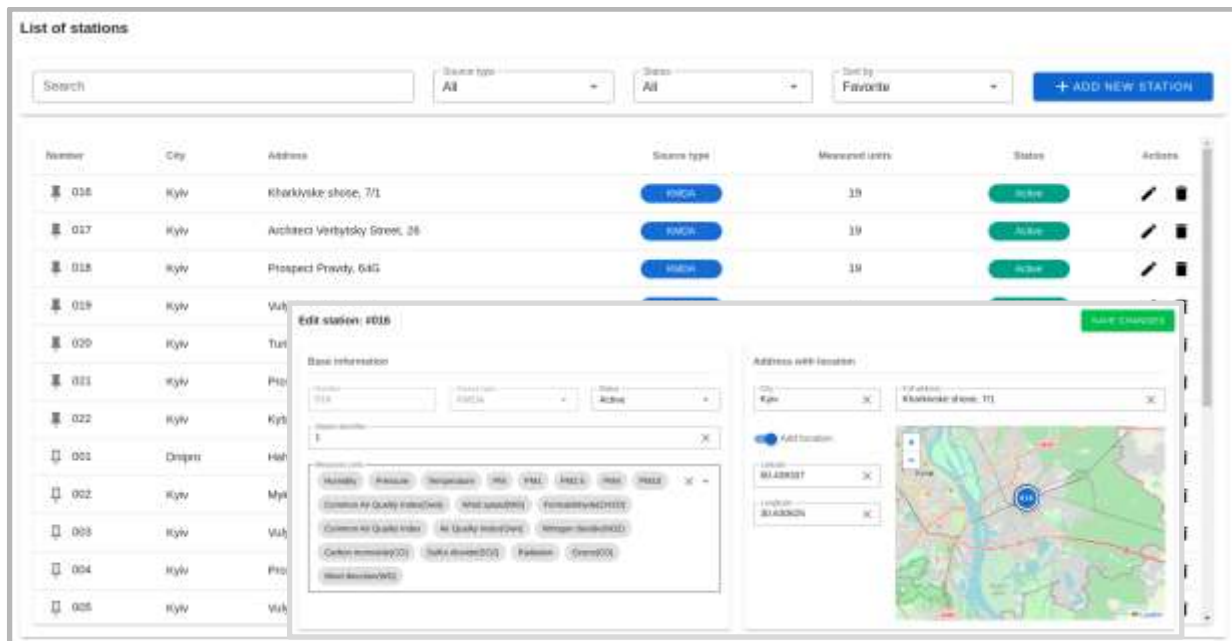


Рисунок 4 — Управління станціями в системі

У системі передбачені функції пошуку та фільтрації, які дозволяють адміністраторам оперативно знаходити необхідні станції за різними параметрами, такими як тип, розташування або стан. Це забезпечує ефективний контроль та управління всіма станціями, що входять до системи моніторингу якості повітря, дозволяючи підтримувати їхню працездатність і точність збору даних.

Додатково система забезпечує логування всіх дій, пов'язаних з управлінням станціями. Записуються такі операції, як додавання, видалення, редагування, зміна статусу та оновлення полів. Інструменти пошуку та фільтрації дозволяють адміністраторам швидко аналізувати ці журнали дій, зокрема, за користувачем, датою або типом операції. Це сприяє підвищенню рівня безпеки та дозволяє ефективно відстежувати зміни, що відбуваються в системі, забезпечуючи її стабільну роботу та надійність.

На рис. 5 графік показує зміни в середньому індексі якості повітря (CAQI) від 1 вересня до 26 вересня 2024 року (в момент написання публікації). Нижче наведені кілька ключових спостережень.

- Високі піки: 20 вересня (58,86) та 23 серпня (51,97) спостерігаються значні піки CAQI. Це вказує на періоди з погіршеною якістю повітря.
- Низькі значення: 5 вересня (6,14) та 1 вересня (15,67) показують нижчі значення CAQI, що свідчить про вищу якість повітря в ці дні.
- Різкі зміни: з 20 по 23 вересня можна спостерігати пікові показники, що може свідчити про події або зміни в атмосферних умовах, які сильно вплинули на якість повітря.

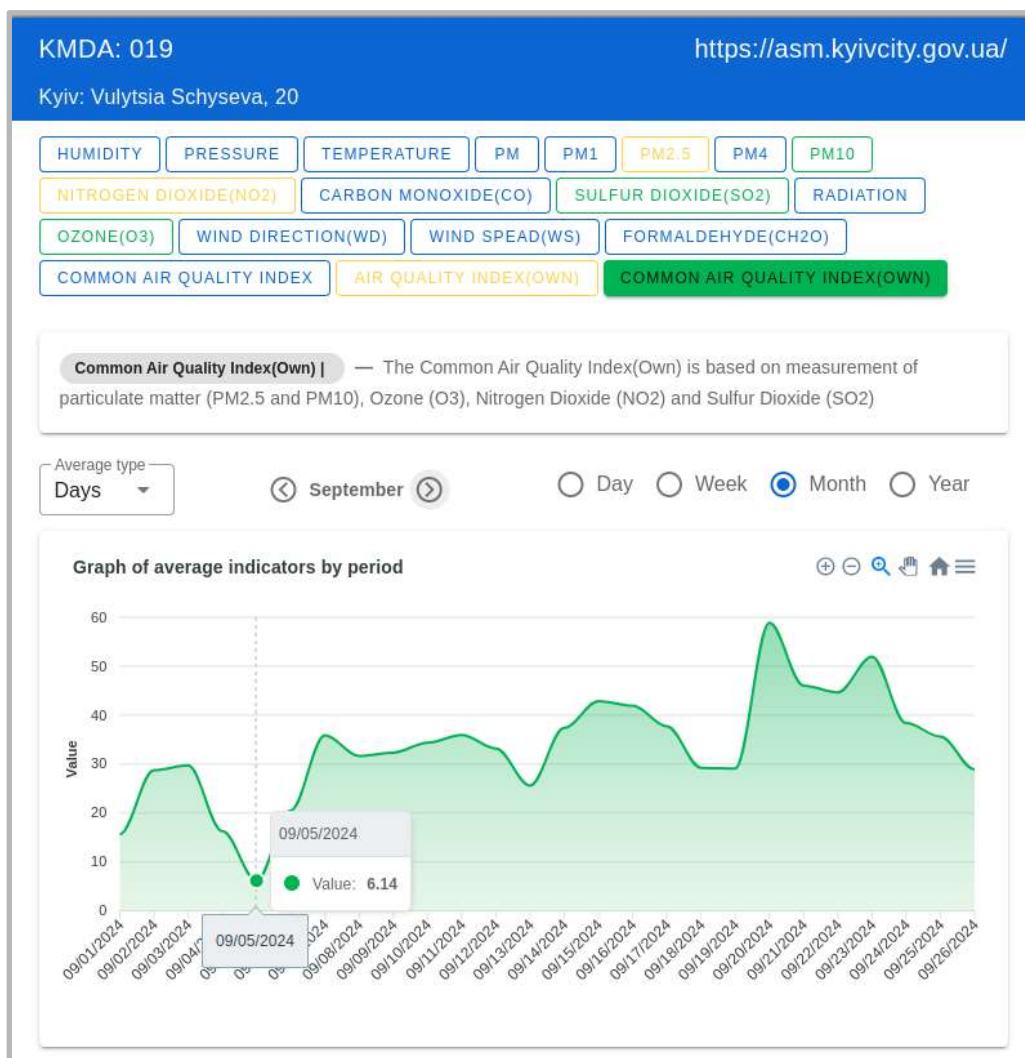


Рисунок 5 — Графік зміни CAQI протягом вересня 2024 року станції №019

Загалом, графік демонструє значну варіативність якості повітря протягом вересня 2024 року з різкими змінами, які заслуговують на додаткове дослідження для визначення причин таких коливань. Щоб більш точно зрозуміти причини цих змін, можна провести детальний погодинний аналіз даних, що дозволить виявити зв'язки між піковими значеннями CAQI та конкретними подіями або змінами в атмосферних умовах. Такий аналіз допоможе визначити часові інтервали, коли відбувалися найбільш значні коливання якості повітря, і встановити можливі фактори, що вплинули на ці зміни.

5. Висновки

Реалізована архітектура системи моніторингу якості атмосферного повітря відіграє ключову роль у забезпеченні надійного та стабільного збору даних. Це дозволяє не лише гарантувати точність та актуальність інформації, але й забезпечує її безперервне оновлення майже в реальному часі. Такий підхід відкриває нові можливості для користувачів, які тепер можуть своєчасно в режимі реального часу відстежувати зміни в якості повітря та реагувати на них відповідно.

Ця інформація є критично важливою для державних органів у процесі адаптації й оптимізації національної екологічної політики. На основі отриманих даних можна вносити зміни в екологічні стандарти, регулювати гранично допустимі норми викидів, зміцнювати контроль за діяльністю, яка може бути потенційно шкідливою для навколишнього середо-

вища, а також удосконалювати економічні стимули та обмежувальні заходи для більшої ефективності екологічної політики.

У подальшому розвитку системи планується не тільки інтеграція модулів OLAP та Data Mining для більш глибокого та комплексного аналізу даних, але й впровадження методів оптимізації зберігання інформації. Використання таких технологій дозволить виявляти нові кореляції між різними факторами, що впливають на якість повітря, робити прогнози та визначати тренди, які стануть основою для розробки більш ефективних стратегій моніторингу та управління станом атмосферного повітря.

Поряд з цим буде впроваджено механізми агрегації даних на різних часових інтервалах, зокрема, збереження середніх значень, мінімумів і максимумів на годинному та денному рівнях. Такий підхід дозволить не лише значно скоротити обсяги зберігання даних, а й підтримувати високу ефективність роботи системи, забезпечуючи при цьому необхідну глибину аналітики для довгострокових досліджень.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Обговорення звіту КМДА про результати моніторингу якості атмосферного повітря у місті Києві за 2023 рік. URL: <https://nubip.edu.ua/node/141976>.
2. An Overview of Experiences Made and Tools Used to Inform the Public on Ambient Air Quality. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4433/12/11/1524>.
3. IoT Solution for Smart Cities' Pollution Monitoring and the Security Challenges. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/15/3401>.
4. World Health Organization. WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide; World Health Organization. Geneva, Switzerland, 2021. P. 1–267. URL: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>.
5. European Environment Agency. Air quality in European cities: 2023 report. EEA Rep. 2023. Vol. 9. P. 1–188. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f2bf4bce-72ee-11ee-9220-01aa75ed71a1/language-en>.
6. Боголюбов В.М., Голуб Б.Л. Інформаційно-аналітична система оцінювання стану атмосферного повітря. *Сталий розвиток — XXI ст. Дискусії 2021*: матеріали VII Міжнар. наук.-практ. конф. / Національний університет «Києво-Могилянська академія» / за ред. проф. Є.В. Хлобистова. Київ, 2021. С. 235–246. URL: https://9922dac3-967f-46d7-a171-70a3fd248a04.filesusr.com/ugd/b93fb2_f01012_a644a04fe9a3de90b4e981a92b.pdf.
7. Шевченко Д.В., Голуб Б.Л. Information Service of The Atmospheric Air Quality Monitoring System. *Scientific Problems and Options for Their Solution*: IX International scientific and practical conf. Bucharest. Romania, 2024. 7–9 February. P. 55–60. URL: https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2024/02/Scientific_problems_and_options_for_their_solution_Feb_7_2024_Bucharest_Romania.pdf.
8. Setiawan F.N., Kustiawan I. IoT based Air Quality Monitoring. *Proc. of the 2018 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Bandung, Indonesia, 16 November 2017). 2017. Vol. 384. P. 012008. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/384/1/012008>.

Стаття надійшла до редакції 02.12.2024