

УДК 004.6

Д.В. ШЕВЧЕНКО\*, Б.Л. ГОЛУБ\*

## ТЕХНОЛОГІЯ OLAP ЯК ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ БАГАТОВИМІРНОГО АНАЛІЗУ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

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

**Анотація.** У статті розглянуто сучасний підхід до екологічного моніторингу якості атмосферного повітря з використанням OLAP-технологій (On-Line Analytical Processing). Актуальність дослідження зумовлена високим рівнем забруднення повітря в урбанізованих регіонах, що призводить до серйозних екологічних і соціальних наслідків. Існуючі системи моніторингу, як правило, не забезпечують оперативного доступу до багатовимірної аналітики та не здатні підтримувати прийняття управлінських рішень у режимі реального часу. Запропонована інформаційно-аналітична система базується на використанні OLAP-кубів, які дають змогу здійснювати гнучкий аналіз даних за різними вимірами: часом, локацією, типом забруднювача, індексами тощо. Побудовано два окремі аналітичні блоки: один для аналізу вимірних концентрацій шкідливих речовин (Measurements), інший — для перевищень нормативно встановлених порогів (ThresholdExceed). Дані інтегруються з кількох джерел, зокрема стаціонарних автоматизованих станцій і громадських сенсорних мереж. Здійснено реалізацію системи у Power BI, що забезпечує візуалізацію у вигляді інтерактивних графіків, KPI-індикаторів та аналітичних панелей. Система дозволяє виявляти аномалії, аналізувати сезонні закономірності та формувати комплексне уявлення про динаміку забруднення. Зокрема, зафіксовано аномальні показники PM10 у 2024 році та сплески радіаційного навантаження у 2022-му. Запропонований підхід доводить доцільність використання OLAP-технологій як інструмента для побудови гнучких масштабованих і візуально орієнтованих екологічних аналітичних систем, що можуть бути інтегровані у державні механізми моніторингу довкілля.

**Ключові слова:** OLAP, екологічний моніторинг, якість атмосферного повітря, Power BI, атмосферне забруднення, аналітична система, багатовимірний аналіз, індекс якості повітря (AQI, CAQI), екологічна безпека, KPI-індикатори, система моніторингу, забруднювачі.

**Abstract.** This article explores a modern approach to environmental monitoring of ambient air quality using OLAP (On-Line Analytical Processing) technologies. The relevance of this research stems from the high levels of air pollution in urbanized areas, which lead to serious environmental and social consequences. Existing monitoring systems often lack real-time access to multidimensional analytics and are unable to effectively support decision-making processes. The proposed information-analytical system is based on OLAP cubes, enabling flexible data analysis across various dimensions — such as time, location, pollutant type, and quality indices. Two separate analytical blocks have been developed: one for analyzing measured concentrations of harmful substances (Measurements), and the other for detecting exceedances of regulatory thresholds (ThresholdExceed). Data are integrated from multiple sources, including automated stationary stations and community-based sensor networks. The system is implemented in Power BI, providing interactive visualizations, KPI indicators, and analytical dashboards. It enables anomaly detection, seasonal pattern analysis, and a comprehensive overview of pollution dynamics. In particular, abnormal PM10 values were recorded in 2024, along with radiation spikes observed in 2022. The proposed approach demonstrates the effectiveness of OLAP technologies as tools for developing flexible, scalable, and visually-oriented environmental analytical systems that can be integrated into national environmental monitoring frameworks.

**Keywords:** OLAP, environmental monitoring, air quality, Power BI, air pollution, analytical system, multidimensional analysis, air quality index (AQI, CAQI), environmental safety, KPI indicators, monitoring system, pollutants.

## 1. Вступ. Актуальність

Забруднення атмосферного повітря в містах є однією з найгостріших екологічних та соціальних проблем сучасності. Згідно з даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), понад 92% населення планети проживає в регіонах, де рівень забруднення повітря перевищує рекомендовані безпечні межі, що безпосередньо впливає на стан здоров'я людей та тривалість життя [1]. Особливо критичною ситуація є в країнах із недостатнім рівнем екологічного контролю. Так, Україна займає перше місце серед 120 країн світу за рівнем смертності, зумовленої забрудненням повітря — у середньому 120 смертей на 100 000 населення.

Високі концентрації шкідливих домішок фіксуються не лише в індустріально навантажених регіонах, а й у великих урбанізованих центрах, зокрема у місті Києві. Експертні оцінки та результати моніторингу свідчать, що близько 85% усіх викидів забруднюючих речовин у повітря Києва припадає саме на автомобільний транспорт, що є основним джерелом пилу, оксидів азоту, вуглецю та летких органічних сполук [2]. Унаслідок цього, у Києві систематично фіксується перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) таких речовин, як діоксид азоту (NO<sub>2</sub>), формальдегід, оксид вуглецю, тверді частки (PM<sub>2.5</sub> та PM<sub>10</sub>), а також фенол. Наприклад, ще у 2016 році середньодобові концентрації діоксиду азоту та формальдегіду у повітрі столиці регулярно перевищували санітарні норми, що свідчило про хронічний характер проблеми.

Попри наявність моніторингових мереж, традиційні підходи до збору та обробки даних часто не забезпечують належної оперативності та гнучкості [3]. Звітність формується із запізненням, а дані подаються у формі, складній для інтеграції в системи прийняття рішень.

У цих умовах зростає потреба в новому підході до екологічного моніторингу з використанням сучасних інформаційних технологій, які дозволяють не лише фіксувати поточний стан довкілля, а й забезпечують багатовимірний аналіз, виявлення аномалій, прогнозування та візуалізацію даних у реальному часі. Однією з таких технологій є OLAP-аналітика, що лежить в основі запропонованої у статті системи.

*Метою статті* є дослідження можливостей інтеграції OLAP-аналітики в інформаційно-аналітичні системи екологічного моніторингу для забезпечення динамічного, просторово-часового аналізу стану атмосферного повітря.

### 1.1. Огляд існуючих методів моніторингу та аналітики

Система державного моніторингу атмосферного повітря в Україні сформувалась ще за радянських часів і на сьогодні є технічно та концептуально застарілою. Вона базується на мережі стаціонарних постів, які працюють переважно в ручному або напівавтоматичному режимі, здійснюючи лабораторний аналіз відібраних проб із періодичністю кілька разів на день. Такий підхід не забезпечує достатньої оперативності, просторової деталізації та охоплення ключових показників якості повітря.

На тлі зростаючих екологічних викликів низка міст, зокрема Київ, ініціювали модернізацію системи моніторингу. Передбачається розгортання сучасних автоматизованих станцій, здатних передавати дані в режимі реального часу, охоплювати більше локацій, включно з периферією, та інтегруватися у централізовані аналітичні платформи [4].

Окрім офіційних ініціатив, активно розвиваються громадські мережі моніторингу — EcoCity, FlatFly тощо. Вони забезпечують високу частоту оновлення даних і гнучке масштабування, але стикаються з проблемами точності, калібрування та відсутністю стандартизації [5]. Додатково використовуються супутникові джерела (Copernicus Sentinel-

5P, Aerosol Index), що забезпечують ширший географічний огляд, але мають обмежену деталізацію.

Усі ці джерела формують великі обсяги даних, які потребують ефективної системи обробки та аналітики. Традиційні засоби — таблиці, звіти, базові візуалізації — не здатні забезпечити багатовимірний аналіз, необхідний для виявлення закономірностей і прийняття обґрунтованих рішень.

У цьому контексті особливої актуальності набуває впровадження OLAP-технологій (On-Line Analytical Processing), які дозволяють організовувати дані у вигляді багатовимірних кубів. OLAP забезпечує швидкий доступ до агрегованої та деталізованої інформації, дозволяє гнучко аналізувати дані за різними вимірами (час, місце, забруднювач, індекс тощо) та є потужним інструментом для екологічного моніторингу в умовах динамічного середовища.

## 2. Архітектура системи

### 2.1. Архітектура збору та обробки даних

Сучасні системи моніторингу атмосферного [6] повітря проєктуються з урахуванням вимог щодо високої частоти оновлення даних, просторового охоплення та гнучкої аналітики. У центрі таких рішень — побудова інтегрованої архітектури (рис. 1), що забезпечує збір, зберігання, обробку та подальший аналіз екологічної інформації з різноманітних джерел.

Зібрані дані надходять до централізованої платформи збору, яка функціонує як data lake або сховище даних (data warehouse), залежно від обраної логіки зберігання та подальшого аналізу. Така платформа здатна обробляти як потокові, так і дані, які періодично надходять, що дозволяє підтримувати як ретроспективний, так і квазіреальний режим аналітики.

Перед завантаженням у сховище дані проходять етап ETL-обробки (Extract, Transform, Load). Спочатку виконується отримання інформації з джерел — через API, файлові канали, брокери повідомлень (наприклад, MQTT). Далі здійснюються очищення, валідація, нормалізація одиниць вимірювання та приведення до уніфікованої структури. Завершальним етапом є завантаження оброблених даних до відповідних таблиць сховища.

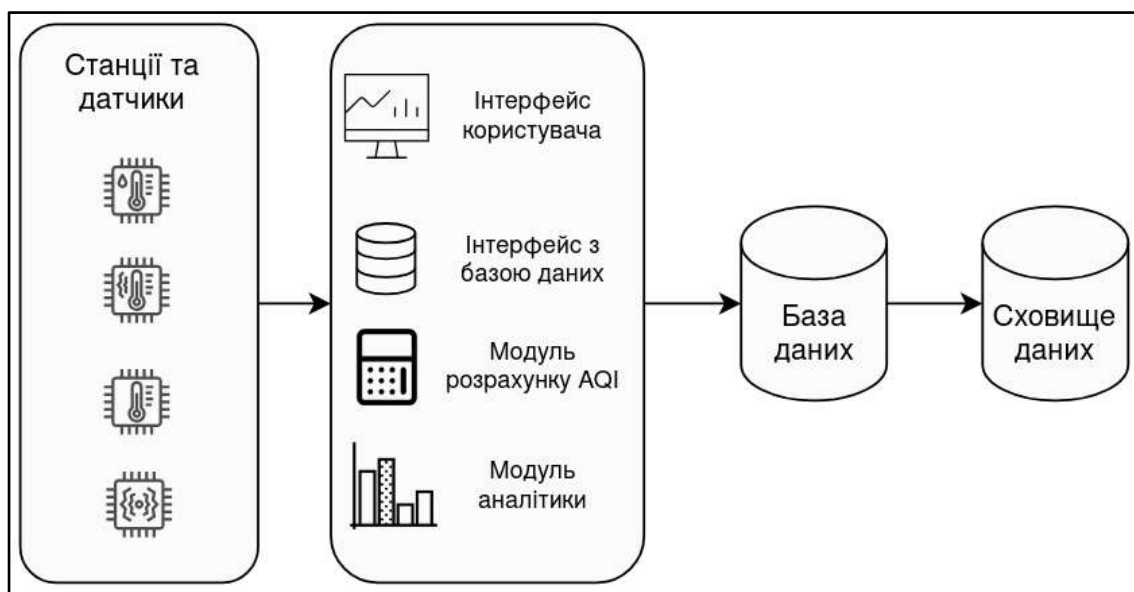


Рисунок 1 — Архітектура системи

Архітектура сховища проектується відповідно до принципів багатовимірного аналізу. У структурі бази даних відокремлюються факт-таблиці, де зберігаються кількісні значення (наприклад, концентрації забруднювачів, індекси якості повітря, кількість перевищень), та вимірні таблиці, що містять класифікатори для аналітичного розрізу (час, географічна локація, тип полютанта, тип сенсора тощо).

Наявність такої архітектури дозволяє формувати OLAP-куби, які забезпечують швидкий і гнучкий доступ до агрегованих і деталізованих зрізів даних. Це створює аналітичну основу для візуалізації, формування звітів, сценарного аналізу та реалізації систем підтримки прийняття рішень у сфері екологічного управління.

## 2.2. OLAP-структури: куби, виміри, показники

В основі багатовимірного аналізу даних лежить поняття OLAP-куба — логічної структури, що дозволяє досліджувати дані у різних розрізах, комбінуючи часові, просторові та предметні параметри. OLAP-куб можна уявити як багатовимірний гіперпростір, де виміри відповідають аналітичним ознакам (наприклад, час, локація, вид забруднювача), а комірки містять числові значення, тобто показники або факти (наприклад, концентрація речовини, індекс AQI, кількість перевищень нормативу).

У випадку систем моніторингу повітря типовим прикладом є куб «Якість повітря», який містить час, локацію та забруднювач. У кожній комірці такого куба зберігаються фактичні значення, наприклад, середньодобова концентрація конкретного забруднювача, розрахований індекс AQI або CAQI, максимальні значення за день або кількість годин з перевищенням ГДК.

Ключовими властивостями OLAP-систем є підтримка аналітичних операцій:

- Roll-Up / Drill-Down — агрегування даних на вищий рівень або деталізація;
- Slice-and-Dice — вибір та порівняння підмножин даних.

Ці можливості дозволяють швидко відповідати на запити типу:

- «Показати середньомісячний рівень PM2.5 по локаціях за останні 5 років»;
- «Визначити дні тижня з піками концентрацій NO<sub>2</sub>»;
- «Порівняти середні значення AQI/CAQI у різних сезонах».

Високу швидкодію таких запитів забезпечує попереднє агрегування даних та використання багатовимірних індексів. Часто застосовується збереження популярних зрізів — підмножин даних, які найчастіше використовуються в запитах, що суттєво зменшує час обробки.

## 2.3. Схеми зберігання даних: зіркоподібна та сніжинкова моделі

У контексті реалізації OLAP-аналітики для моніторингу якості атмосферного повітря критично важливою є правильно побудована модель сховища даних. У практиці побудови дата-вітрин найчастіше застосовуються зіркоподібна (star schema) та сніжинкова (snowflake schema) схеми.

Зіркоподібна схема передбачає наявність центральної факт-таблиці, яка зберігає ключові числові показники (факти) та низки пов'язаних з нею вимірних таблиць (dimension tables), що містять довідкову інформацію. Цей тип структури є найбільш поширеним у системах багатовимірного аналізу завдяки простоті, швидкодії та зручності візуалізації. Запити в такій структурі зазвичай потребують лише одного рівня з'єднання (JOIN), що робить їх продуктивними при виконанні OLAP-операцій.

Наведена вітрина на рис. 2 реалізує саме зіркоподібну схему для вітрини вимірювань концентрацій (*Measurements*). Центральною є таблиця *MeasurementFact*, яка містить середні (*avg\_value*), мінімальні (*min\_value*) та максимальні (*max\_value*) значення концентрацій.

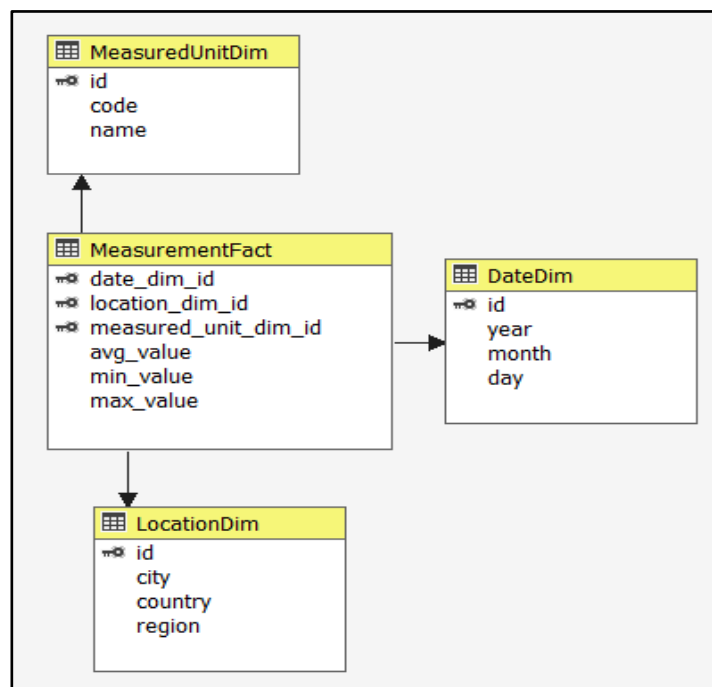


Рисунок 2 — Вітрина даних: Measurements

Вона пов'язана з трьома вимірними таблицями:

- *DateDim* — календарна інформація (рік, місяць, день);
- *LocationDim* — географічна ознака (місто, регіон, країна);
- *MeasuredUnitDim* — тип забруднювача (код, назва, одиниці виміру).

Завдяки цій структурі можливо здійснювати OLAP-запити, які обчислюють середні концентрації за обраний період, в обраній локації та по певному полютанту, з можливістю drill-down (наприклад, з річного до щоденного рівня).

Поряд з вимірюваннями часто потрібно проводити аналіз перевищень екологічних нормативів. Для цього створено окрему вітрину *ThresholdExceed*, яка базується на фактовій таблиці *ThresholdExceedFact* (рис. 3).

Вона містить посилання на таблиці:

- *DateDim*;
- *LocationDim*;
- *ThresholdLevelDim* — вимір порогів, що має поля для типу забруднювача, середнього періоду (наприклад, 1 год, 24 год, рік), типу порогу (верхній або нижній), значення порогу та допустимої межі перевищень.

Ця модель ближча до сніжинкової схеми, оскільки таблиця *ThresholdLevelDim* опосередковано пов'язана з *MeasuredUnitDim* через зовнішній ключ, що вказує на тип забруднювача. Така структура дозволяє уникати дублювання інформації про полютанти, якщо один і той самий параметр має кілька нормативів за різні періоди.

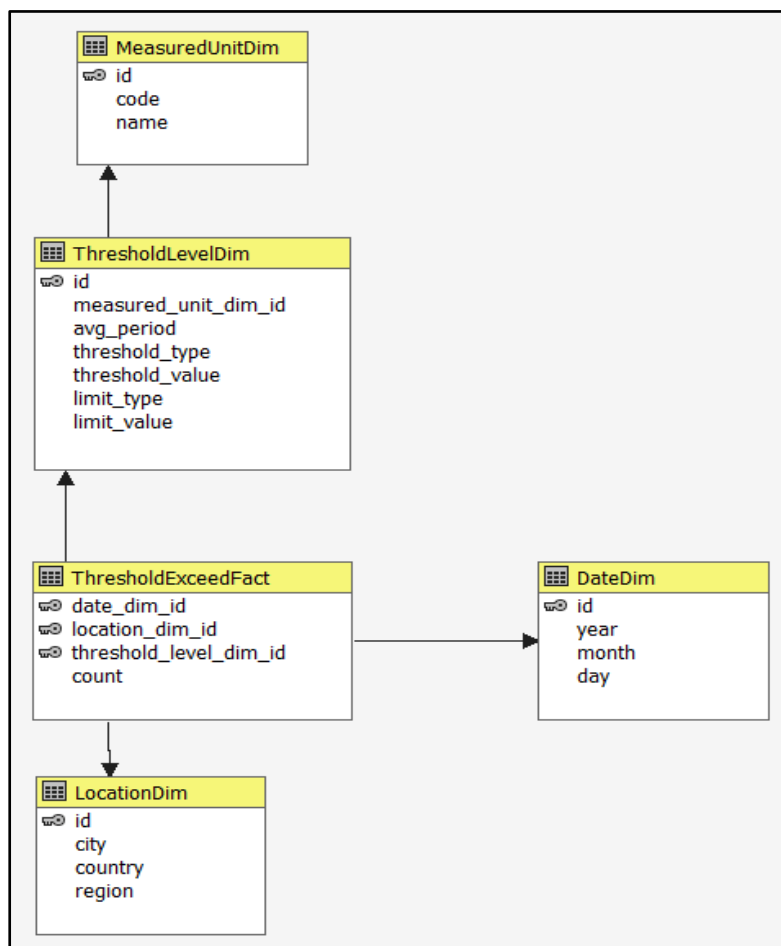


Рисунок 3 — Вітрина даних: ThresholdExceed

Отже, реалізована модель є гібридною: вона поєднує переваги зіркоподібної схеми для операцій над агрегованими вимірюваннями та нормалізовані сніжинкові компоненти для роботи з довідниками нормативів.

У практиці екологічного аналізу це дозволяє досягнути балансу між продуктивністю аналітичних запитів і гнучкістю моделі, не ускладнюючи структуру без необхідності.

### 3. Аналіз даних моніторингу якості повітря у Power BI з використанням OLAP

#### 3.1. Аналіз динаміки індексу якості повітря

Однією з ключових переваг OLAP-підходу є можливість побудови інтерактивних аналітичних візуалізацій на основі агрегованих багатовимірних даних. Для екологічного моніторингу, зокрема оцінки якості повітря, особливо цінними є інструменти, що дозволяють простежити часову динаміку змін показників у зручній для інтерпретації формі.

У межах реалізованої системи аналітики побудовано лінійний графік (рис. 4), що відображає усереднені значення індексу якості повітря (AQI / CAQI) за обраний часовий період. Дані агрегуються по всіх доступних станціях, що дозволяє оцінити загальну ситуацію в регіоні або місті. Така агрегація відбувається завдяки структурі OLAP-куба, де вимір *Локація* дозволяє об'єднувати дані з різних джерел, а вимір *Час* — формувати усереднені показники на рівні дня, тижня або місяця.

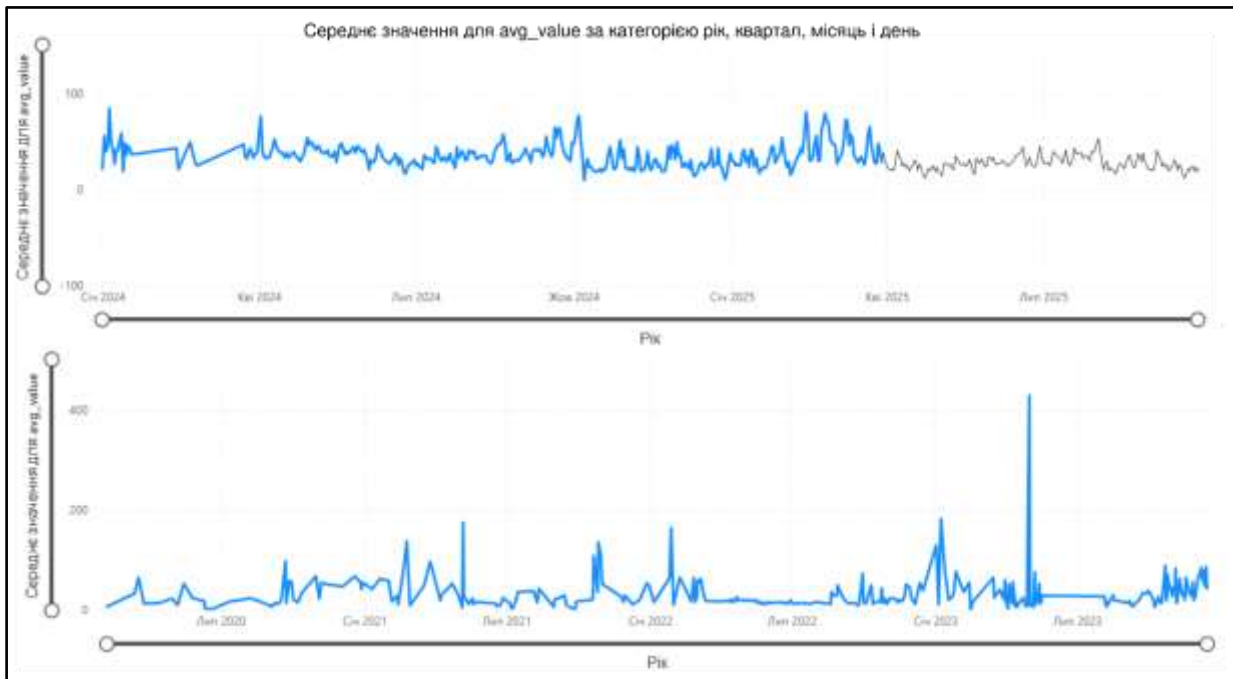


Рисунок 4 — Динаміка AQI та CAQI з трендом і середніми значеннями

У графіку передбачено можливість вмикання лінії тренду, яка розраховується автоматично (наприклад, методом ковзного середнього або поліноміальної регресії) і дозволяє оцінити загальні тенденції зміни якості повітря з часом. Такий підхід є корисним для виявлення як сезонних коливань, так і довготривалих змін (наприклад, покращення після запуску екологічної ініціативи або погіршення через підвищене навантаження транспорту).

Разом з тим у випадку індексу AQI виявлено, що накопичення історичних даних було нерівномірним, з розривами та періодами неповного охоплення. Це унеможливило формування коректної лінії тренду, оскільки вибірка є статистично нестабільною. На відміну від цього, для CAQI (Common Air Quality Index), який базується на більш повному наборі сенсорів, побудова тренду є допустимою.

### 3.2. Аналіз усереднених річних значень CAQI та забруднювачів

Наступним типом візуалізації (рис. 5), реалізованим на базі OLAP-структури, є стовпчаста діаграма, що дозволяє здійснити порівняльний аналіз середніх значень індексу CAQI за окремими роками. Цей графік доповнюється розбивкою по ключових вимірах, зокрема за типами забруднювачів (PM2.5, PM10, NO2, CO,  $\gamma$ -випромінювання тощо).

Завдяки агрегаційним можливостям OLAP-кубу, візуалізація показує:

- річні середньозважені значення індексу CAQI;
- внесок кожного полютанта у загальну картину (stacked bar);
- варіації між роками, що дозволяє виявити аномальні пікові періоди або сезонні зміни.

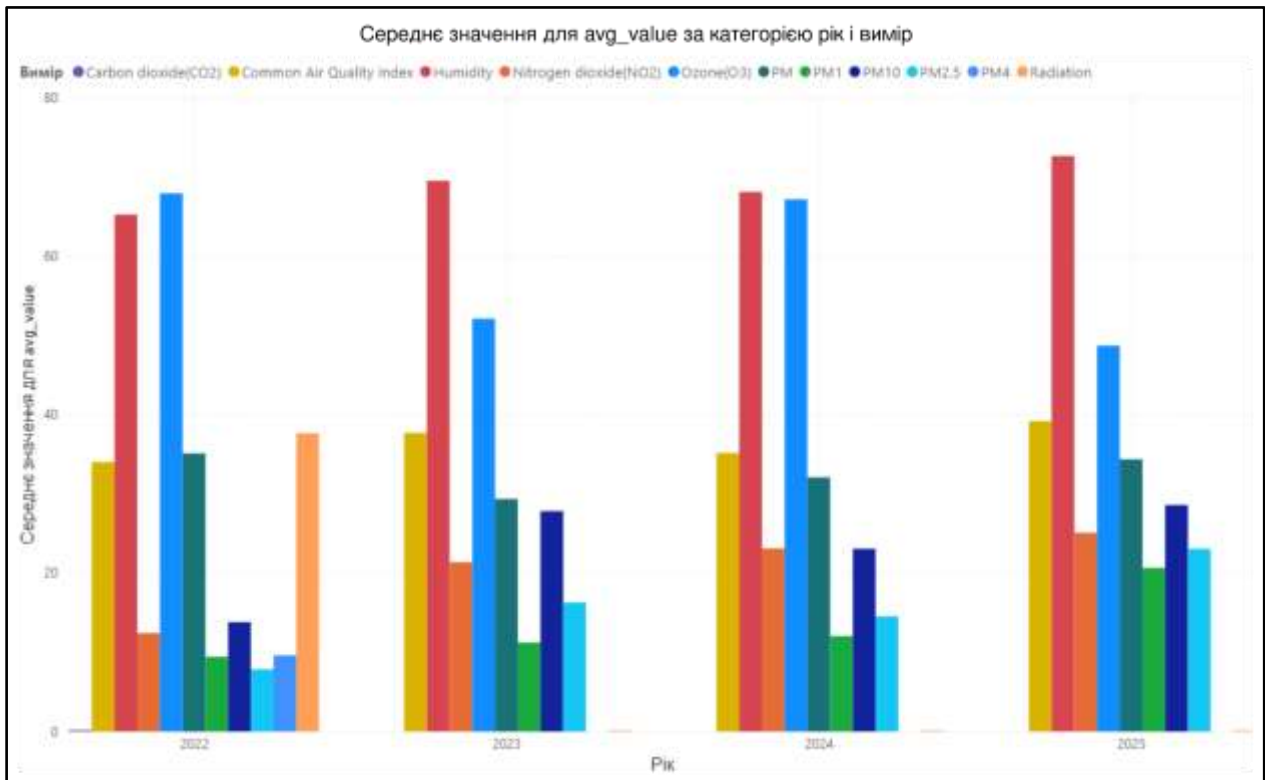


Рисунок 5 — Середньорічні значення CAQI (2020–2024)

Особливо наочно проявляється аномальний стрибок значень у 2022 році, який чітко зафіксовано за параметром радіаційного навантаження ( $\gamma$ -випромінювання). Цей сплеск був зафіксований багатьма сенсорами і візуально виокремлюється на графіку серед інших років, що дозволяє швидко ідентифікувати нестандартну ситуацію, яка може мати надзвичайний або техногенний характер.

### 3.3. Аналіз мінімальних, середніх і максимальних значень CAQI та AQI

Ще одним важливим інструментом аналізу в рамках OLAP-архітектури є лінійна діаграма з мультисерією (рис. 6), що дозволяє одночасно відображати мінімальні, середні та максимальні значення індексу якості повітря (CAQI / AQI) у часовому розрізі. Для кожного індексу побудовано окремий графік, при цьому вони розміщені на одному полотні, що візуально створює цілісну основу для порівняння.

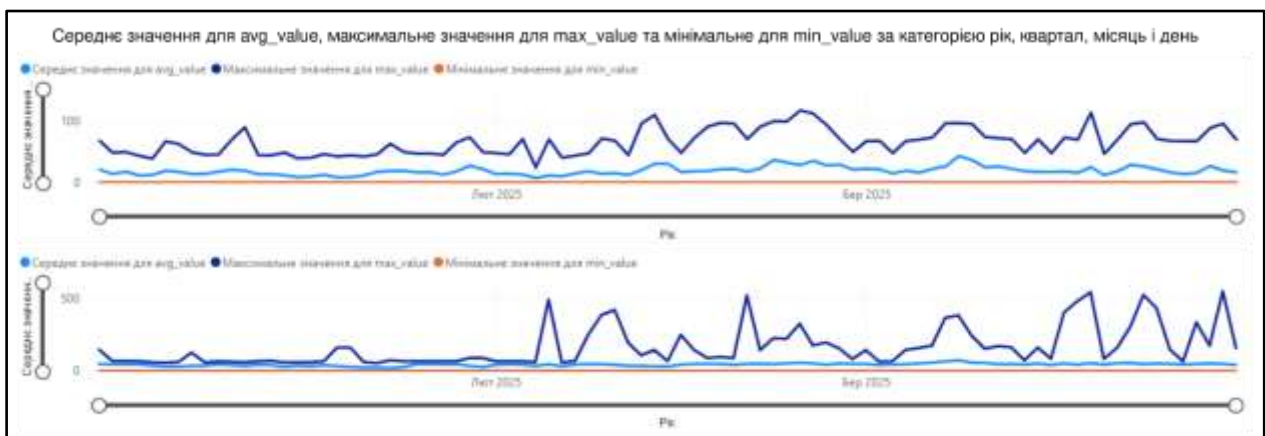


Рисунок 6 — Min / Avg / Max значення AQI та CAQI

Особливо цінним є одночасне розміщення двох графіків — для CAQI та AQI, оскільки це дає змогу провести візуальне порівняння між двома підходами до розрахунку індексів. Такий формат показує, де індекси реагують подібно (наприклад, на сезонні фактори або сплески NO<sub>2</sub>), а де — розбігаються через різні принципи нормалізації, джерела даних або часову стабільність.

### 3.4. Аналіз допустимих екологічних перевищень

Окрім безпосереднього аналізу концентрацій забруднювачів та індексів якості повітря, важливою складовою багатовимірної аналітики є оцінка частоти та масштабності перевищень нормативних рівнів. Для цього в системі реалізовано окрему OLAP-вітрину *ThresholdExceed*, яка дозволяє відстежувати кількість випадків перевищення порогових значень для різних поллютантів у часовому та просторовому вимірах.

Основна візуалізація — це лінійна діаграма, яка показує динаміку перевищень у часовому розрізі (рис. 7). Кожна точка графіка відповідає загальній кількості зафіксованих перевищень за певний проміжок часу (наприклад, за місяць або тиждень). Побудова такої лінії базується на агрегації *count* із факт-таблиці *ThresholdExceedFact*, згрупованої за виміром *DateDim*.

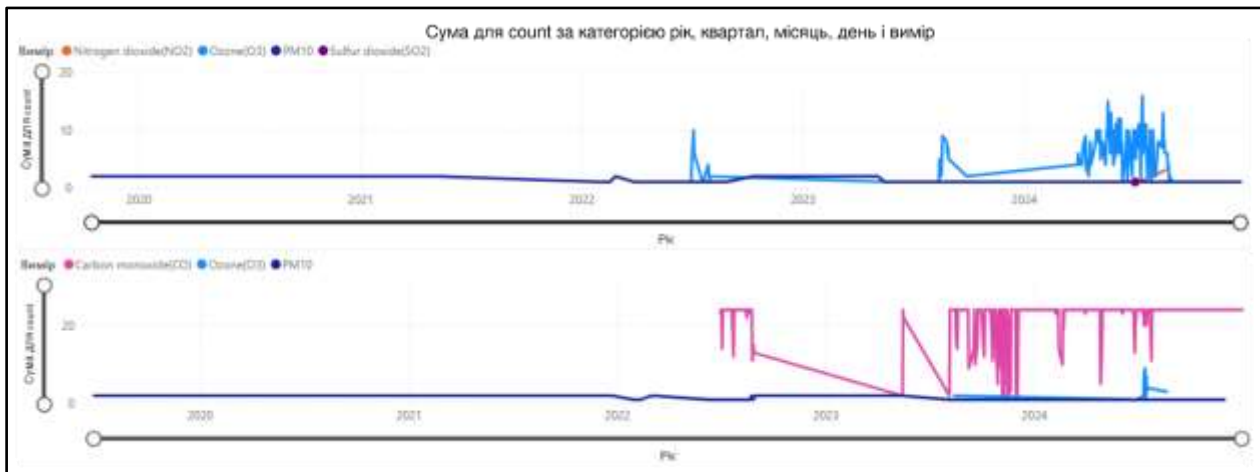


Рисунок 7 — Кількість перевищень порогових значень

Доповненням до цього є стовпчаста діаграма з розбивкою по роках (рис. 8), яка дозволяє порівняти загальну кількість перевищень у різні роки. Такий формат особливо корисний для ретроспективного аналізу ефективності екологічної політики, змін транспортного навантаження або впливу форс-мажорних обставин (наприклад, масових пожеж, воєнних дій).

Особливої уваги потребує спостереження, що найвищий рівень перевищень зафіксовано у 2024 році. Цей рік демонструє чітко вищі значення як на лінійній, так і на стовпчастій діаграмі, що може свідчити про суттєве погіршення умов або через реальне зростання викидів, або через ширше покриття новими сенсорами (що також враховується при інтерпретації).

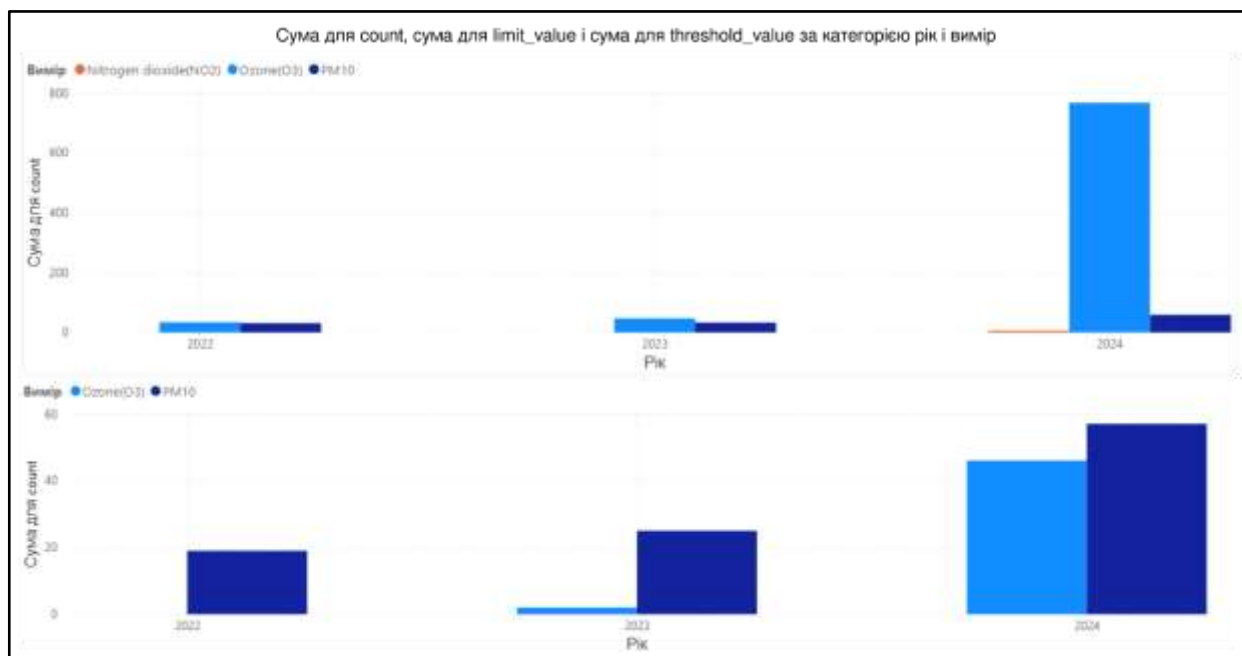


Рисунок 8 — Кількість перевищень порогів за роками

Отже, OLAP-аналітика перевищень порогових рівнів слугує не лише для статистичного звітування, а й для виявлення критичних періодів, оцінки ефективності заходів та побудови моделей екологічного ризику.

### 3.5. KPI-індикатори перевищень

Для підвищення наочності та оперативного контролю за дотриманням екологічних норм у системі реалізовано KPI-візуалізації на основі OLAP-куба *ThresholdExceed* (рис. 9). Ці індикатори дозволяють у реальному часі зіставити кількість зафіксованих перевищень із встановленими нормативами, що є особливо корисним при щоденному моніторингу або стратегічному аналізі ризиків.

Типовий приклад — показник PM10 для середньодобового періоду (24 години), що має нормативи у вигляді граничного допустимого значення (threshold) та межі кількості допустимих перевищень на рік.

У візуалізації KPI представлено 35 допустимих перевищень на рік для Lower/Upper рівнів:

- Lower: 59 перевищень;
- Upper: 57 перевищень.



Рисунок 9 — KPI для PM10 щодо добового нормативу

Отже, згідно з OLAP-аналітикою, реальне значення перевищує як базову, так і граничну норму, що автоматично підсвічується у KPI-індикаторі червоним або попереджувальним кольором. Це сигналізує про екологічну небезпеку, потребу в інтервенції та може бути підставою для ініціювання адміністративних заходів.

#### 4. Результати

У результаті впровадження системи моніторингу якості повітря з використанням OLAP-аналітики було досягнуто низку важливих функціональних та аналітичних переваг.

Побудовано два незалежні OLAP-куба: для вимірюваних концентрацій (Measurements) та для перевищень нормативних порогів (ThresholdExceed). Обидві моделі реалізовані на основі гібридного сховища даних з поєднанням зіркоподібної та сніжинкової схем, що забезпечує гнучкість структури та високу продуктивність запитів.

На основі цих кубів реалізовано інтерактивну аналітику у Power BI. Створено такі ключові візуалізації:

- графіки динаміки індексів  $CAQI$  та  $AQI$  з трендовими лініями;
- порівняльні стовпчасті діаграми середніх значень за роками та типами забруднювачів;
- мультисерійні графіки мінімальних, середніх і максимальних значень індексів;
- діаграми динаміки та накопичення перевищень екологічних нормативів;
- KPI-індикатори, що сигналізують про поточні перевищення встановлених меж.

Аналіз даних дозволив виявити:

- аномально високий рівень перевищень у 2024 році, зокрема за показником  $PM_{10}$  (59 перевищень при добовому нормативі  $35 \text{ мкг/м}^3$ );
- сплески радіаційного навантаження у 2022 році;
- нестабільність в історичних даних  $AQI$ , що ускладнює побудову трендів;
- виражені сезонні та річні коливання в індексах якості повітря.

Загалом впроваджена система дозволила перейти від статичних звітів до динамічної, візуально доступної та багатовимірної аналітики, яка може слугувати надійною основою для екологічної оцінки, виявлення ризиків та підтримки прийняття управлінських рішень.

#### 5. Висновки

Запропонований підхід до використання OLAP-технологій у моніторингу якості атмосферного повітря довів свою ефективність і практичну значущість в умовах сучасних екологічних викликів. OLAP-моделювання дозволяє формувати структуроване, масштабоване й гнучке аналітичне середовище, здатне охоплювати як базові концентрації забруднювачів, так і складні інтегральні показники — індекси, нормативи, перевищення.

Інтеграція даних із різномірних джерел (стаціонарні станції, сенсорні мережі, супутникові платформи) забезпечує комплексність інформаційної бази та підвищує достовірність аналітичних висновків. Завдяки застосуванню Power BI та OLAP-кубів, дані подаються у візуально доступному форматі, що робить аналітику зручною для використання як фахівцями, так і управлінцями.

Виявлення аномалій, зокрема, у 2022 та 2024 роках, підтверджує здатність системи оперативно реагувати на зміни в екологічній ситуації. Реалізовані KPI-індикатори дозволяють не лише фіксувати порушення, а й виконувати функції раннього попередження.

OLAP-аналітика є ефективним інструментом для органів державного управління, оскільки забезпечує своєчасне, обґрунтоване та зрозуміле інформаційне підґрунтя для ухвалення екологічно виважених рішень.

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Popov O., Iatsyshyn A., Kovach V., Artemchuk V., Kameneva I., Taraduda D., Sobyna V., Sokolov D., Dement M., Yatsyshyn T. Risk Assessment for the Population of Kyiv, Ukraine as a Result of Atmospheric Air Pollution. United States. 2020. 1 March. URL: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.5696/2156-9614-10.25.200303>.
2. Air quality in Kyiv. URL: <https://www.iqair.com/us/ukraine/kyiv/kyiv-c>.
3. Bogolubov V.M., Holub B.L. Informational and analytical system for assessing the state of atmospheric air. *Proc. of VII International scientific and practical online conference «Sustainable development» — 21st century (scientific readings named after Igor Nedin)*. Kyiv, 2021. P. 235–246. URL: <https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u423/materials21.pdf>.
4. Shahid S., Brown D.J., Wright P., Ahmad M. Khasawneh Innovations in Air Quality Monitoring: Sensors, IoT and Future Research. *Sensors*, 26 March 2025. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/7/2070>.
5. WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. World Health Organization (WHO), 2021. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>.
6. IoT Solution for Smart Cities' Pollution Monitoring and the Security Challenges. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/15/3401>.
7. Rollo F., Bachechi Ch., Po L. Anomaly Detection and Repairing for Improving Air Quality Monitoring. *Sensors*. 2023. 6 January. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/2/640>.
8. Air quality in Europe — European Environment Agency (EEA) Report 05/2022. URL: <https://op.europa.eu/publication-detail/-/publication/f2bf4bce-72ee-11ee-9220-01aa75ed71a1/>.
9. World Health Organization. WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>), 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>.
10. Azevedo R., Silva J.P., Lopes N., Curado A., Nunes L.J.R., Lopes S.I. Designing an IoT-enabled Data Warehouse for Indoor Radon Time Series Analytics. *Proc. of the 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), IEEE*. 2022. URL: <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/7WQLQwzl/>.
11. Discussion of the Kyiv City State Administration Report on Atmospheric Air Quality Monitoring Results in Kyiv for 2023. URL: <https://nubip.edu.ua/node/141976>.

Стаття надійшла до редакції 04.06.2025