



DOI 10.28925/2663-4023.2025.27.728

УДК 004.8:504.5:711.5

Паливода Андрій Юрійович

аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення та кібербезпеки

Державний торговельно-економічний університет, Київ, Україна

ORCID ID: 0009-0009-4785-244X

palyvoda.andrii@gmail.com**Касимбеков Адлет Жаксикайули**

докторант

Казахський національний дослідницький технічний університет імені К.І. Сатпаєва

Алмати, Казахстан

ORCID ID: 0009-0009-1995-4860

kas.adl.13@gmail.com

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ РОЗМІЩЕННЯ МІСЬКИХ СТАНЦІЙ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Анотація. У статті акцентується увага на ключовій ролі інформаційних систем в розвитку екологічної складової сучасних розумних міст (Smart City). Підкреслено, що впровадження технологій IoT та Data Science може значно підвищити ефективність систем моніторингу та управління екологічними параметрами, що, в свою чергу, дозволить своєчасно виявляти та реагувати на екологічні проблеми. Такий підхід у сукупності з застосуванням інтелектуальних інформаційних систем може сприяти оперативному прийняттю ефективних заходів щодо усунення та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище. Проведено огляд попередніх досліджень, присвячених застосуванню різних інформаційних технологій та систем для оптимізації розміщення ресурсів, таких як метеостанції та сенсори моніторингу стану навколишнього середовища. Обґрунтовано, що, хоча лінійні та нелінійні методи забезпечують точні рішення, вони вимагають значних обчислювальних ресурсів. Еволюційні алгоритми пропонують гнучкість, але їх результати можуть бути менш передбачуваними. Зазначено, що еволюційні алгоритми, такі як генетичні алгоритми, демонструють значний потенціал у вирішенні завдань, пов'язаних з великими обсягами даних. Методи машинного навчання здатні виявляти приховані закономірності, але потребують великого обсягу даних для навчання. Мережеві алгоритми оптимізують розміщення станцій з урахуванням топології мережі, хоча їх реалізація може бути складною. У статті також розглядаються питання інтеграції даних з різних джерел, що дозволяє створювати комплексні моделі екологічного стану міста. Це включає в себе використання геоінформаційних систем (GIS) для візуалізації та аналізу даних, що допомагає приймати обґрунтовані рішення щодо управління міським середовищем. У висновку підкреслюється необхідність подальших досліджень для вибору оптимальних алгоритмів вирішення завдань, пов'язаних з розміщенням моніторингових станцій у містах, з урахуванням специфічних вимог кожної конкретної ситуації. Це відкриває перспективи для розвитку методик оптимізації мережі моніторингових станцій контролю стану повітря в розумних містах. Додатково, наголошується на важливості міждисциплінарного підходу, що включає співпрацю між інженерами, екологами та міськими планувальниками для створення стійких та екологічно безпечних міських середовищ. Висвітлено необхідність подальших досліджень для вдосконалення методик оптимізації мережі моніторингових станцій у міських умовах.

Ключові слова: інформаційні технології; smart city; інфраструктура; екологічний моніторинг; навколишнє середовище; аналіз якості повітря.



ВСТУП

Екологічна складова відіграє найважливішу роль у розвитку сучасних постіндустріальних міст, а також у концепції створення розумних міст (далі Smart City). Основна мета Smart City полягає у створенні комфортного та стійкого міського середовища, де сучасні технології застосовуються для покращення якості життя населення та оптимізації міських процесів, причому важливим аспектом цієї концепції є саме екологічна складова, оскільки якість повітря, води та ґрунту безпосередньо впливає на здоров'я та добробут громадян. Однак вирішення екологічних проблем актуальне не лише для нових міст, але й для вже існуючих, інакше вони можуть зіткнутися з серйозними викликами, особливо з погіршенням якості повітря. Одним із ключових завдань у цій галузі є моніторинг та управління екологічною ситуацією, що неможливо без використання інтелектуальних інформаційних систем та технологій. Сьогодні для досягнення цієї мети застосовуються мережі метеостанцій та інших сенсорів, розташованих у стратегічно важливих точках міста. Ці пристрої збирають дані про забруднення повітря, рівні шуму, температуру та інші параметри навколишнього середовища. У цій статті проведено аналіз попередніх досліджень, присвячених екологічній складовій міського розвитку без глибокого розгляду математичних моделей та методів для вирішення цього актуального завдання.

Постановка проблеми. Зі збільшенням чисельності міст у всьому світі та зростанням міського населення, а також зростанням екологічних проблем виникає необхідність у створенні ефективних систем моніторингу стану повітря. Причому одним із ключових наукових завдань для вирішення цих проблем стане вибір методу оптимізації розміщення мережі станцій екологічного моніторингу, які забезпечать максимальну ефективність та точність збору даних.

Існуючі підходи до розміщення станцій моніторингу варіюються від традиційних математичних методів до сучасних технологій, таких як методи машинного навчання (МН). Однак вибір найбільш підходящого методу вимагає ретельного аналізу їх переваг та недоліків, враховуючи специфічні умови та потреби конкретного міста. На перших етапах вирішення зазначеного завдання необхідно провести огляд та аналіз попередніх досліджень у галузі застосування інформаційних систем та технологій для екологічного моніторингу, а також оптимізації розміщення ресурсів, що дозволить виявити успішні стратегії, оцінити застосовність різних методів та адаптувати їх до унікальних умов міського середовища.

Мета досліджень. Систематизація знань у галузі використання інформаційних технологій та систем для моніторингу стану навколишнього середовища (НС) у містах, з акцентом на оптимізацію розміщення мережі станцій моніторингу стану повітря. Для досягнення цієї мети буде застосовано аналітичний метод дослідження, що включає огляд існуючої літератури, аналіз попередніх робіт та виявлення ключових підходів і методів, що використовуються в цій галузі.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

У статті застосовується аналітичний метод дослідження, який включає в себе огляд існуючої літератури, аналіз попередніх робіт та систематизацію знань у галузі використання інформаційних технологій та систем для моніторингу стану навколишнього середовища у містах.



РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Сучасні технології, такі як МН (тобто Machine Learning) та наука про дані (Data Science), відіграють важливу роль в обробці та аналізі великого обсягу даних, отриманих від сенсорів та метеостанцій. У науковій літературі [2] – [4] детально описані способи залучення цих технологій. Так, зокрема, у [2] пропонується нова система прогнозування опадів у реальному часі для Smart City з використанням методів МН. У рамках запропонованої моделі використовуються чотири широко застосовувані методи навчання з учителем: 1) дерево рішень; 2) наївний байєсівський класифікатор; 3) метод найближчих сусідів; 4) метод опорних векторів. Стаття детально описує, як ці методи можуть бути застосовані до даних про погоду для точного прогнозування опадів.

У [2] наведено детальний огляд потенціалу технологій IoT та МН для створення Smart City з акцентом на обробці даних. У статті аналізується роль IoT та методів МН у реалізації Smart City з акцентом на обробці даних. Показано, що МН може використовуватися для аналізу історичних даних про забруднення повітря та метеорологічні умови. Це дозволяє виявляти закономірності та тенденції, що, в свою чергу, допомагає прогнозувати майбутні рівні забруднення.

В [3] досліджується застосування МН у бездротових сенсорних мережах для Smart City. Робота охоплює різні аспекти, включаючи обробку даних від сенсорів, оптимізацію енергоспоживання та забезпечення надійності. Також у статті представлено огляд існуючих методів та викликів, пов'язаних із застосуванням МН у мережах сенсорів для Smart City.

Алгоритми передбачувального моделювання, розглянуті у [4] – [6], допомагають надавати точні прогнози про забруднення на основі поточних та історичних даних, що дозволяє муніципалітетам приймати превентивні заходи.

У [7] – [9] показано, як методи оптимізації та МН можуть допомогти у визначенні найкращих місць для розміщення метеостанцій та інших сенсорів, щоб максимально ефективно покрити територію міста та отримувати релевантні дані. Аналіз даних допомагає зрозуміти, які райони міста найбільш уразливі до забруднення та потребують особливої уваги. Зокрема, у [7] порівнюються різні методи, включаючи інтерполяцію, МН на основі супутникових даних та метеорологічне моделювання, для картування температури повітря у Smart City. Дослідження використовує дані мережі IoT-метеостанцій Netatmo у Варшаві, Польща, та оцінює ефективність цих методів у прогнозуванні температурних варіацій на дрібному масштабі, показуючи переваги та обмеження кожного підходу.

У [8] представлено детальний огляд питань розгортання та управління системами моніторингу у Smart City. У статті розглядаються ключові аспекти та виклики, пов'язані зі створенням та експлуатацією сенсорних мереж Smart City. Основні теми, охоплені у роботі, включають: технології сенсорних мереж (обговорення різних типів сенсорів, що використовуються для моніторингу НС, інфраструктури та різних процесів Smart City); методи розгортання сенсорів (огляд стратегій та алгоритмів, що використовуються для оптимального розміщення сенсорів у Smart City для забезпечення максимального покриття та точності даних); управління даними та їх аналіз (методи збору, зберігання та обробки даних, отриманих від сенсорних мереж, включаючи використання МН та аналітики даних для отримання корисної інформації); застосування у Smart City (опис різних додатків та сценаріїв використання сенсорних мереж у Smart City, таких як управління транспортом, моніторинг якості повітря, управління водними ресурсами та



громадська безпека). Дослідження підкреслює важливість інтеграції різних технологій та методів для створення ефективних та стійких систем моніторингу у Smart City.

У [9] досліджується використання технологій для екологічного моніторингу у Smart City. У роботі зроблено акценти на екологічному моніторингу. Розглядається застосування різних сенсорів та мереж для моніторингу НС у містах. Також публікація торкається технологій IoT. Описуються технології IoT, що використовуються для збору та передачі даних про НС. І досліджуються методи оптимізації розміщення сенсорів для ефективного покриття території Smart City та отримання релевантних даних. У роботі наведено приклади успішного впровадження систем моніторингу у різних містах, включаючи аналіз даних, отриманих за допомогою цих систем. Робота фокусується на розробці та впровадженні екологічних моніторингових систем для територій Smart City.

У [10], [11] розглянуто аспекти того, як технології Data Science дозволяють інтегрувати дані з різних джерел, включаючи метеостанції, супутники та транспортні системи, для створення комплексної картини екологічного стану міста. Автори зазначають, що візуалізація даних, включаючи геоінформаційні системи (GIS), допомагає городянам та владі краще розуміти екологічну обстановку та приймати обґрунтовані рішення. На основі аналізу даних та прогнозів МН, служби Smart City можуть впроваджувати розумні рішення для управління трафіком, зменшення викидів від транспортних засобів та промисловості, та покращення зелених зон. У [11] автори обговорюють використання технологій IoT в екологічному ланцюгу промисловості, особливо у розрізі перспектив розвитку Smart City та інформаційної безпеки (ІБ). Розглядаються різні додатки IoT для моніторингу та управління екологічними аспектами у промисловості Smart City. Це включає використання датчиків та мереж для збору даних про стан НС, таких як якість повітря та води, та управління відходами. Підкреслюється важливість захисту даних, зібраних за допомогою IoT-пристроїв. Автори обговорюють методи та технології забезпечення інформаційної безпеки для запобігання несанкціонованому доступу та захисту конфіденційних даних. Також досліджується застосування IoT у Smart City для оптимізації послуг Smart City, таких як управління транспортом та енергосистемами. Автори торкаються і методів інтеграції даних з різних джерел, включаючи метеостанції, супутники та транспортні системи, для створення комплексної картини екологічного стану міста. Автори пропонують використання методів аналізу даних та МН для обробки великих обсягів даних та отримання корисної інформації. Зазначимо, що співпраця між містами та мегаполісами відіграє ключову роль у вирішенні проблеми забруднення повітря.

Спільні зусилля дозволяють містам обмінюватися передовим досвідом, ресурсами та знаннями, що може призвести до більш ефективних та стійких рішень. Так, наприклад, C40 Cities — це група мегаполісів, які співпрацюють для вирішення глобальних проблем, включаючи забруднення повітря. Наприклад, міста, такі як Лондон, Лос-Анджелес, Париж та Лісабон, використовують недорогі датчики для моніторингу забруднення повітря та розробки заходів щодо його покращення [12].

У [13] розглядається досвід держав ЄС у питанні моніторингу якості повітря, використовуючи датчики, встановлені на автомобілях, велосипедах з загального користування, муніципальних вантажівках та навіть безпілотних літальних апаратах. У Лондоні було запущено пілотний проект Breathe London, метою якого було продемонструвати, як недорогі монітори та мобільний моніторинг можуть генерувати корисні дані про забруднення повітря Smart City. У рамках проекту було встановлено 100

недорогих сенсорних «подів» та дві спеціально обладнані машини Google Street View [14]. Цей проект доповнив існуючу регуляторну мережу Лондона та допоміг виміряти вплив Ultra Low Emission Zone (ULEZ) на забруднення повітря. Використання відносно недорогого обладнання дозволило отримати більш локалізовані дані НС.

На азіатському континенті, наприклад, в Індії багато міст, такі як Бхубанешвар, Раджкот та Пуна, встановлюють сотні датчиків для моніторингу якості повітря. Навіть середні міста, наприклад, Гандхінагар, Варанасі та Сурат, впроваджують IoT-сенсори для контролю забруднення НС [15].

В Україні та Казахстані також існують приклади застосування моніторингу якості повітря. Зокрема, використовується індекс якості повітря (AQI) для оцінки забруднення повітря, див. рис. 1. Системи моніторингу, такі як IQAir, PurpleAir, U.S. Department of State, AirNow та MosEcoMonitoring, надають реальні, історичні та прогнозні дані про PM2.5 та погоду для окремого регіону або великого міста.

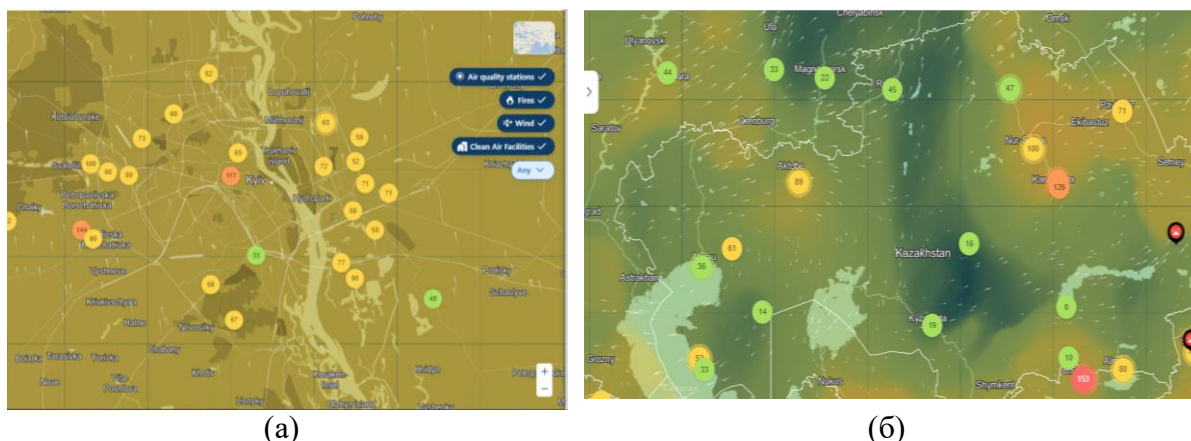


Рис. 1. Моніторинг якості повітря за даними сайту www.iqair.com для (а) України та (б) Казахстану

Сайт IQAir [16] надає інформацію про забруднення повітря за допомогою динамічної карти повітряних потоків. На сайті IQAir є інтерактивна карта, яка показує реальний стан якості повітря на більш ніж 10 000 станціях по всьому світу. Можна переглядати дані про PM2.5 (частинки розміром менше 2,5 мікрометра), індекс якості повітря (AQI) та інші параметри для різних регіонів, наприклад, для різних міст світу. Сайт також надає інформацію про кількість станцій, які задіяні у моніторингу, що дозволяє користувачам бачити, наскільки широко охоплено моніторингом кожен регіон. Дані збираються з громадських державних станцій, станцій якості повітря та спільноти користувачів.

На жаль, сайт IQAir не надає динамічну карту повітряних потоків для конкретних міст напряму. І кількість станцій відносно невелика. Про оптимальне їх розміщення взагалі мова при створенні подібного ресурсу не йшла. Є кілька аналогів сайту IQAir, які надають інформацію про якість повітря та дані моніторингу якості повітря. Наприклад, AirNow — це платформа, створена Агентством з охорони навколишнього середовища США (EPA), яка надає дані про якість повітря для США, див. рис. 2.

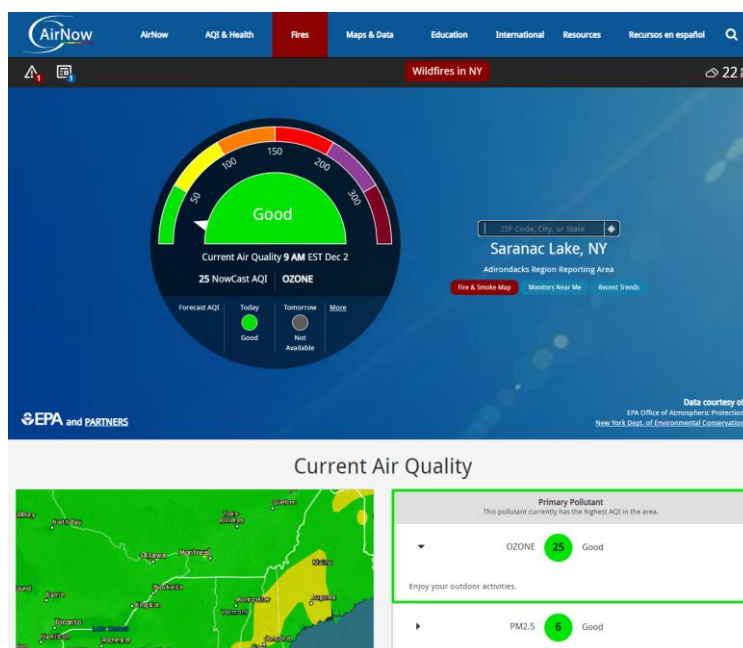


Рис. 2. Моніторинг якості повітря на прикладі (Saranac Lake, NY) за даними сайту <https://www.airnow.gov/>

Платформа <https://www.airnow.gov/> надає поточні дані про якість повітря, прогнози та карти, що показують рівні забруднення повітря. Також популярним є ресурс BreezoMeter (<https://mapsplatform.google.com/maps-products/air-quality/>), див. рис. 3, який надає дані про якість повітря в реальному часі, засновані на даних від державних станцій моніторингу та супутникових даних. Сайт BreezoMeter та додаток пропонують прогнози якості повітря, повідомлення про зміну якості повітря та іншу корисну інформацію.

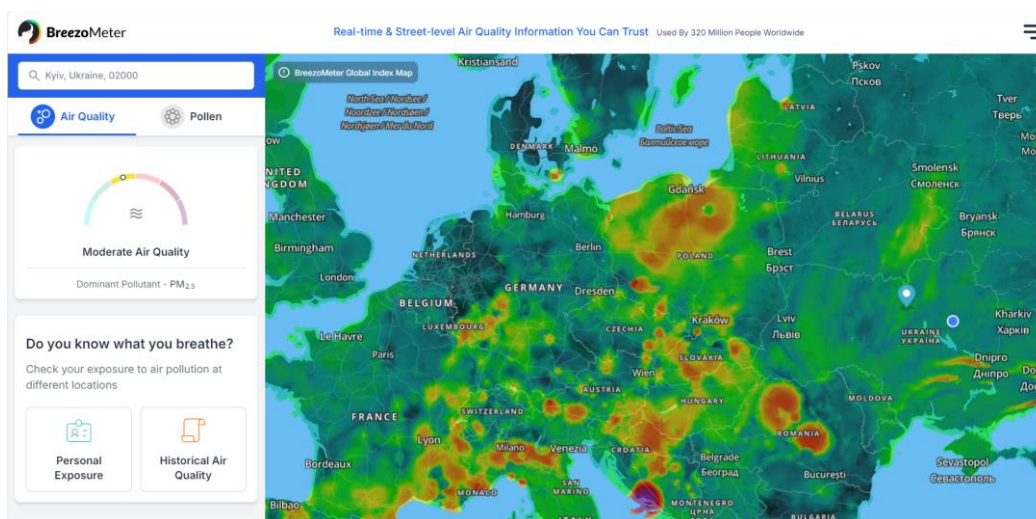


Рис. 3. Моніторинг якості повітря з допомогою ресурсу BreezoMeter

Також можна згадати Plume Lab, World Air Quality Index (WAQI), Aqicn (рис. 4) та інші аналоги, розроблені конкретно для окремої держави.

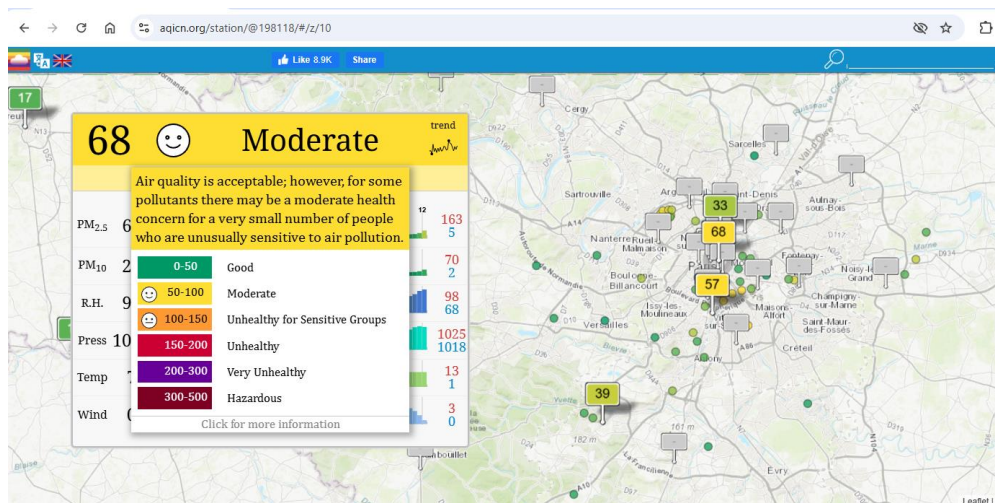
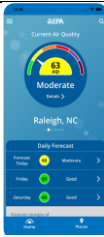


Рис. 4. Моніторинг якості повітря з допомогою ресурсу <https://aqicn.org/>

Ці ресурси надають обширну інформацію про якість повітря, що допомагає користувачам відстежувати стан повітря в їхньому регіоні та вживати заходів для захисту свого здоров'я. Багато з них також пропонують мобільні версії додатків, що дозволяє користувачам отримувати інформацію про якість повітря в будь-який час і в будь-якому місці, див. табл. 1.

Таблиця 1

Мобільні версії додатків для моніторингу

Програмний продукт	Короткий опис
 AirVisual	Мобільна версія доступна для iOS та Android. Додаток надає поточні дані про якість повітря, прогнози, історичні дані та поради щодо здоров'я. Користувачі можуть встановлювати повідомлення про різкі зміни якості повітря, в тому числі в містах.
 AirNow	Мобільна версія доступна для iOS та Android, і надає доступ до даних про якість повітря в США, включаючи поточні показники, прогнози та поради щодо здоров'я.
 BreezoMeter	Мобільна версія, доступна для iOS та Android. BreezoMeter пропонує прогнози якості повітря, повідомлення про зміни, історичні дані та рекомендації щодо зменшення впливу забруднення повітря, в тому числі в містах.



 Plume Labs	Доступно додаток для iOS та Android. Особливість — пропонує історичні дані та поради щодо зниження впливу забруднення повітря, в тому числі в містах.
World Air Quality Index (WAQI)	Додаток надає карту якості повітря в реальному часі, індекси якості повітря для різних міст та повідомлення про значні зміни в якості повітря, в тому числі в містах.

Зазначимо, що мобільні версії цих додатків значно спрощують доступ до важливої екологічної інформації та дозволяють користувачам своєчасно вживати заходів для оперативного реагування на погіршення якості повітря в містах. На думку багатьох учених алгоритми МН можуть відігравати важливу роль в адаптивному управлінні та ефективному моніторингу, аналізі та управлінні екологічною ситуацією в містах [17] – [19]. Відповідно до [17] МН можуть використовуватися для аналізу даних з датчиків якості повітря, встановлених по всьому місту, для виявлення забруднювачів, їх джерел та їх впливу на здоров'я людини. На основі цих даних можна створювати моделі, що прогнозують рівні забруднення, та розробляти цільові стратегії скорочення викидів. Також методи МН можуть використовуватися для аналізу даних про споживання води, погодні умови та стан інфраструктури, щоб оптимізувати використання водних ресурсів Smart City. Це може включати виявлення витоків води, контроль за зрошенням та розробку стратегій скорочення споживання води. У [18] показано як методи МН можуть використовуватися для аналізу даних про споживання енергії в Smart House та на транспортних засобах, щоб оптимізувати енергоспоживання та скоротити викиди парникових газів. Це може включати інтелектуальне управління освітленням, опаленням та охолодженням, а також розвиток систем «розумного» транспорту. Також методи МН можуть використовуватися для оптимізації маршрутів збору сміття, визначення оптимальних місць розміщення сміттєвих контейнерів та сортування сміття для переробки, що може призвести до скорочення витрат, зменшення кількості звалищ та підвищення рівня переробки. Важливо, що МН можуть навчатися на нових даних та коригувати свої моделі в режимі реального часу, що дозволяє їм адаптуватися до змінних умов міського НС. У [19] розглядаються різні методи МН, що використовуються для передбачення якості повітря. Автори аналізують ефективність методів, таких як лінійна регресія, вирішальні дерева та нейронні мережі, застосовувані для прогнозування рівнів забруднення повітря. Робота акцентує увагу на важливості вибору відповідних методів для підвищення точності прогнозів у Smart City. У [21] розглядаються різні МН, такі як випадковий ліс, градієнтний бустинг та глибокі нейронні мережі, для прогнозування показників якості повітря у Smart City. Автори проводять порівняльний аналіз методів та обговорюють результати їх застосування для моніторингу та покращення якості повітря. У [22] авторами виконано огляд застосування глибоких нейронних мереж для передбачення та прогнозування якості повітря. Автори розглядають різні архітектури глибокого навчання, такі як рекурентні та згорткові нейронні мережі, та їх застосування у світлі моніторингу якості повітря у Smart City. У [23] аналізуються алгоритми МН, такі як підтримуючі векторні машини та регресійні моделі, для прогнозування рівня

забруднення повітря у Smart City. Дослідження включає експериментальні результати та обговорення найбільш ефективних підходів для забезпечення точності прогнозів. У [24], [25] показано, як алгоритми МН можуть бути використані для адаптивного управління системами вентиляції та кондиціонування у Smart House, що знижує енергоспоживання та викиди. На думку авторів цих робіт технології МН та Data Science відкривають нові можливості для ефективного моніторингу, аналізу та управління екологічною ситуацією, що сприяє покращенню якості життя та стійкому розвитку міст.

Рішення екологічних завдань у рамках розвитку міської екоінфраструктури тісно пов'язане з іншими контурами управління містом, див. рис. 5, такими як енергетика, водопостачання, транспорт, охорона здоров'я, переробка сміття, освіта та інші [26], [27]. Усі ці контури взаємодіють один з одним, утворюючи складну та взаємопов'язану систему, яка спрямована на покращення якості життя та стійкий розвиток міст.

Екологічні дані, що збираються метеостанціями, інтегруються в загальну систему управління Smart City. Ці дані дозволяють муніципальним властям приймати обґрунтовані рішення, спрямовані на зниження забруднення та покращення якості повітря.

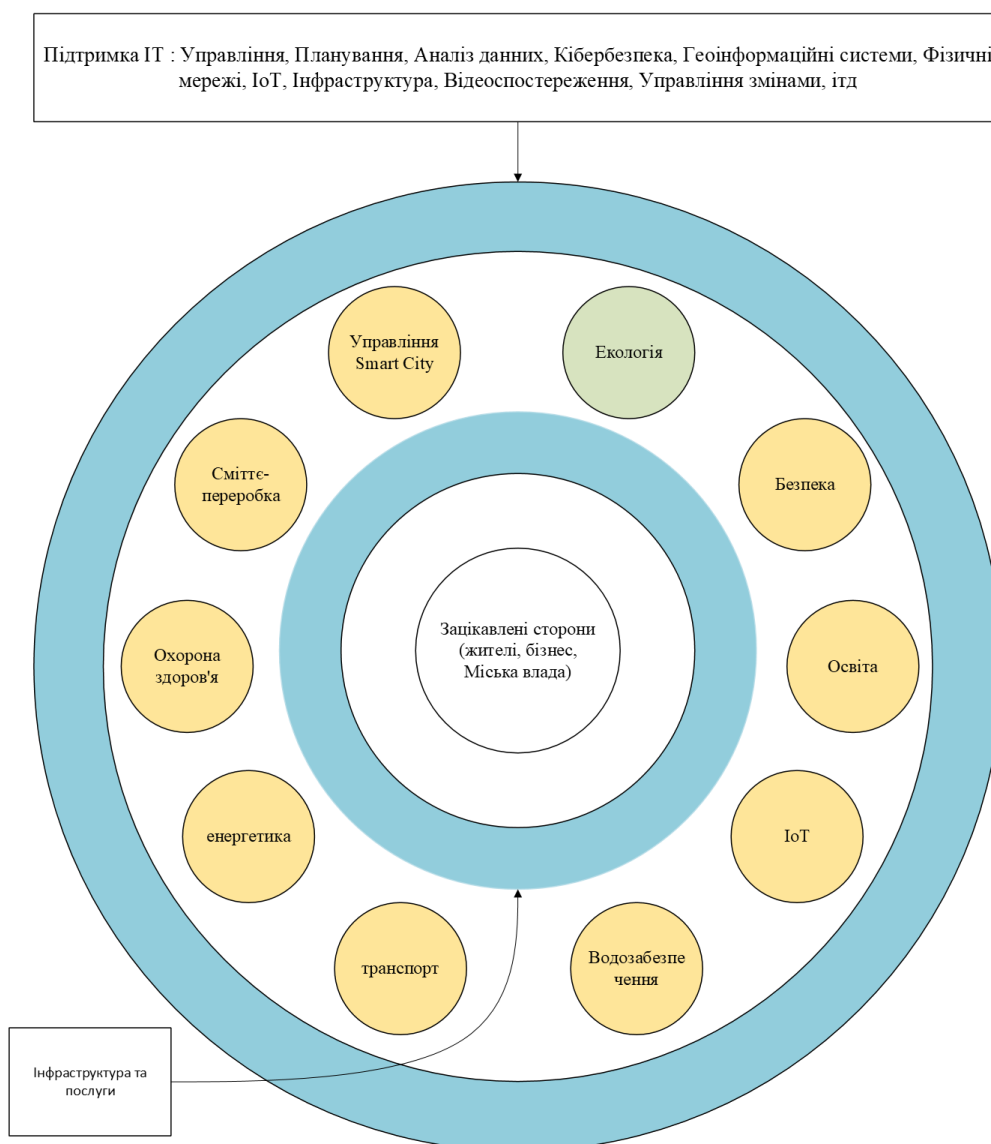


Рис. 5. Типові контури Smart City



Наприклад, інформація про поточний рівень забруднення може використовуватися для регулювання транспортних потоків або обмеження роботи промислових підприємств у певні періоди. Якість повітря та кліматичні умови безпосередньо впливають на енергоспоживання міста. Наприклад, дані з метеостанцій можуть використовуватися для оптимізації роботи енергетичних систем, таких як системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC), що дозволить знизити енергоспоживання та зменшити викиди шкідливих речовин в атмосферу. Також метеорологічні дані відіграють важливу роль в управлінні водопостачанням. Наприклад, інформація про погодні умови та рівень забруднення повітря може використовуватися для прогнозування потреби у воді та управління водними ресурсами, що особливо важливо в умовах посухи або повеней. Зазначимо, що у великих містах та мегаполісах, дані про якість повітря та метеорологічні умови можуть використовуватися для управління транспортними потоками. Наприклад, у періоди високого рівня забруднення повітря можна обмежувати рух автомобілів у певних зонах міста або заохочувати використання громадського транспорту та електромобілів. Це допоможе знизити викиди шкідливих речовин та покращити якість повітря. Інформація про якість повітря виключно важлива для охорони здоров'я, оскільки забруднення повітря безпосередньо впливає на здоров'я населення. Дані з метеостанцій можуть використовуватися для прогнозування спалахів захворювань, пов'язаних із забрудненням повітря, та прийняття превентивних заходів, таких як попередження для уразливих груп населення (діти, літні люди, люди з хронічними захворюваннями). Це корелюється і з контуром Smart City з переробки сміття, оскільки дані про якість повітря можуть використовуватися для оптимізації роботи систем переробки сміття. Наприклад, у періоди високого рівня забруднення можна обмежувати діяльність сміттєспалювальних заводів або змінювати графік вивезення сміття, щоб мінімізувати вплив на НС. Освітні установи також можуть використовувати дані про якість повітря та метеорологічні умови для проведення досліджень та навчання студентів, що сприяє підвищенню обізнаності про проблеми екології та розвитку інноваційних рішень для покращення якості НС. Таким чином, оптимізація розміщення спостережних мереж з метеостанцій на основі IoT є важливим аспектом розвитку Smart City, оскільки дозволяє збирати та аналізувати дані про якість повітря та метеорологічні умови, що в свою чергу допомагає покращити управління містом в цілому.

Так, наприклад, у роботі [28] автори досліджують динамічну взаємодію між екологічною стійкістю та розвитком міської інфраструктури, включаючи Smart City. У роботі підкреслюється необхідність трансформаційних підходів для вирішення екологічних проблем та створення стійких екосистем Smart City. Також у статті розглядаються питання енергоспоживання, викидів вуглецю та оптимізації ресурсів Smart City. У [29] розглядаються питання злиття концепцій розумних, стійких та зелених міст. Підкреслюється, що Smart City використовують технології та дані для надання ефективних послуг та покращення якості життя мешканців. Дослідження детально описує багато практичних аспектів створення розумних та екологічно стійких міст. Чисте атмосферне повітря є основоположною умовою для здорового життя. Однак багато видів людської діяльності, що сприяють соціально-економічному розвитку, призводять до забруднення повітря у містах, особливо у великих, з розвиненою промисловою базою. Запобігання факторам ризику, викликаним забруднювальними речовинами, виявляється особливо ефективним, якщо вдається виявити та відстежувати конкретний вплив забруднень на населення, одночасно вживаючи заходів щодо їх зменшення. Одним із ключових напрямків є моніторинг якості атмосферного повітря [30].



Тим не менш, згідно з низкою досліджень, до основних недоліків існуючої системи моніторингу якості повітря можна віднести [30], [31], [35]:

1. Відсутність єдиної мережі спостережень.
2. Застаріле технічне та методичне забезпечення спостережень.
3. Неузгодженість окремих елементів ІТ, що використовуються у системі моніторингу.
4. Невідповідність нормативно-технічної та правової бази сучасним вимогам.

Ці недоліки перешкоджають ефективному управлінню якістю повітря на регіональному рівні та не сприяють запобіганню негативним змінам у навколишньому середовищі, що призводить до погіршення здоров'я населення. Аналіз можливих рішень цієї проблеми, викладених у наукових публікаціях ряду авторів [32] – [35], показує, що створення нової мережі спостережень без урахування існуючих станцій потребуватиме значних фінансових витрат. Більш реалістичним підходом є модернізація існуючої мережі. Однак більшість наукових досліджень, що пропонують підходи до модернізації системи моніторингу атмосфери, або занадто концептуальні [31], або зосереджені на інженерних аспектах, таких як розробка програмного та апаратного забезпечення для вимірювань [33].

Ефективний моніторинг якості повітря повинен охоплювати весь технологічний процес, починаючи з планування мережі і закінчуючи підготовкою та поширенням інформації. Наразі питання оптимального планування просторової структури мережі спостережень залишається недостатньо дослідженим. Відповідно виникає завдання визначення раціональних місць для розміщення пунктів спостереження за забрудненням (включаючи спостережні мережі з метеостанцій на основі IoT) та їх кількості, з урахуванням економічних та технічних обмежень.

Таким чином, на основі проведеного огляду та аналізу попередніх досліджень, представляється актуальною проблема подальших досліджень для вибору оптимальних алгоритмів вирішення завдань, пов'язаних з розміщенням моніторингових станцій у містах, з урахуванням специфічних вимог кожної конкретної ситуації, що відкриває перспективи для розвитку методик оптимізації мережі моніторингових станцій контролю стану повітря у містах на основі застосування нових математичних методів та моделей.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В результаті досліджень було показано, що екологічна складова відіграє ключову роль у розвитку сучасних міст, включаючи перспективні розумні міста або Smart City. Використання технологій IoT та Data Science дозволяє створити ефективні системи моніторингу та управління екологічними параметрами у містах, а впровадження таких систем сприяє своєчасному виявленню та реагуванню на екологічні проблеми, що дозволяє оперативно приймати заходи щодо їх усунення та зниження негативного впливу на навколишнє середовище.

Проведено огляд та аналіз попередніх досліджень з проблематики застосування різних математичних методів для оптимізації розміщення ресурсів, включаючи метеостанції та сенсори моніторингу стану НС у містах. Показано, що розгляд різних математичних методів, таких як лінійне та нелінійне програмування, еволюційні алгоритми (наприклад, генетичні алгоритми), кластерний аналіз, методи машинного навчання (МН), мережеві алгоритми та алгоритми побудови точних планів, дозволяє виявити їх переваги та недоліки у рамках вирішення завдань дослідження. На основі



проведеного огляду попередніх досліджень встановлено, що лінійне та нелінійне програмування надає точні рішення для завдань оптимізації, однак вони можуть вимагати значних обчислювальних ресурсів. Еволюційні алгоритми, такі як генетичні алгоритми, пропонують гнучкість та здатність справлятися з великими обсягами даних, але їх рішення можуть бути менш передбачуваними. Методи МН можуть виявляти приховані закономірності у даних та прогнозувати зміни, однак потребують великої кількості даних для навчання. Мережеві алгоритми дозволяють оптимізувати розміщення станцій з урахуванням топології мережі, але можуть бути складними у реалізації. Алгоритми побудови точних планів та динамічне програмування забезпечують оптимальні рішення, однак їх застосування може бути обмежене через обчислювальну складність. Для вибору конкретного алгоритму вирішення завдання необхідно продовжувати дослідження, враховуючи специфічні вимоги до конкретної постановки завдання, пов'язаної з особливостями розміщення моніторингових станцій у містах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rahman, A.-U., Abbas, S., Gollapalli, M., Ahmed, R., Aftab, S., Ahmad, M., Khan, M. A., & Mosavi, A. (2022). Rainfall Prediction System Using Machine Learning Fusion for Smart Cities. *Sensors*, 22(9), 3504. <https://doi.org/10.3390/s22093504>
2. Ullah, A., Anwar, S. M., Li, J., Nadeem, L., Mahmood, T., Rehman, A., & Saba, T. (2024). Smart cities: The role of Internet of Things and machine learning in realizing a data-centric smart environment. *Complex & Intelligent Systems*, 10(1), 1607–1637. <https://doi.org/10.1007/s40747-023-01175-4>
3. Sharma, H., Haque, A., & Blaabjerg, F. (2021). Machine learning in wireless sensor networks for smart cities: A survey. *Electronics*, 10(9), 1012. <https://doi.org/10.3390/electronics10091012>
4. Monastyrskyi, L., & Hura, V. (2023). Predicting air quality using machine learning. *Electronics and information technologies*, 22, 57–68.
5. Nochvai, V., Kryvakovska, R., & Ishchuk, O. (2012). The use of GIS in air quality management tasks. *Electronics and information technology*, 2, 154–163.
6. Zaporozhets, A. O. (2017). Analysis of environmental air pollution monitoring equipment. *Science-Based Technologies*, 35(3), 242–252. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.35.11846>
7. Hassani, A., Santos, G. S., Schneider, P., & Castell, N. (2024). Interpolation, satellite-based machine learning, or meteorological simulation? A comparison analysis for spatio-temporal mapping of mesoscale urban air temperature. *Environmental Modeling & Assessment*, 29(2), 291–306. <https://doi.org/10.1007/s10666-023-09943-9>
8. Du, R., Zhang, X., Li, Y., & Wang, J. (2018). The sensible city: A survey on the deployment and management for smart city monitoring. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(2), 1533–1560. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2881008>
9. Bacco, M., Delmastro, F., Ferro, E., & Gotta, A. (2017). Environmental monitoring for smart cities. *IEEE Sensors Journal*, 17(23), 7767–7774. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2722819>
10. Olenych, I., & Babiak, S. (2024). Automated system for air pollution research. *Electronics and information technology*, 26, 59–72.
11. Zhu, N., & Zhao, H. (2018). IoT applications in the ecological industry chain from information security and smart city perspectives. *Computers & Electrical Engineering*, 65, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.05.036>
12. 4 ways cities are using low-cost sensors to improve air quality. (n.d.). Clean Air Fund. <https://www.cleanairfund.org/news-item/4-ways-cities-are-using-low-cost-sensors-to-improve-air-quality/>
13. 3 ways smart cities can improve air quality. (2020). Smart Cities Dive. <https://www.smartcitiesdive.com/news/3-ways-smart-cities-can-improve-air-quality/580519/>
14. 5 ways new monitoring technologies can help cities combat air pollution. (2021). World Economic Forum. <https://www.weforum.org/agenda/2021/04/air-pollution-cities-monitoring-technologies/>
15. Air quality monitoring and smart cities: Will smart cities have cleaner air? (n.d.). BlueSky HQ. <https://blueskyhq.io/blog/air-quality-monitoring-and-smart-cities-will-smart-cities-have-cleaner-air>
16. Air quality. (n.d.). IQAir. from <https://www.iqair.com/>



17. Mahalingam, U., Elangovan, K., Dobhal, H., Valliappa, C., Shrestha, S., & Kedam, G. (2019, March). A machine learning model for air quality prediction for smart cities. In *2019 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 452–457. <https://doi.org/10.1109/WiSPNET45539.2019.9032734>
18. Neo, E. X., Hasikin, K., Lai, K. W., Mokhtar, M. I., Azizan, M. M., Hizaddin, H. F., & Razak, S. A. (2023). Artificial intelligence-assisted air quality monitoring for smart city management. *PeerJ Computer Science*, 9, e1306. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1306>
19. Ameer, S., Shah, M. A., Khan, A., Song, H., Maple, C., Islam, S. U., & Asghar, M. N. (2019). Comparative analysis of machine learning techniques for predicting air quality in smart cities. *IEEE Access*, 7, 128325–128338. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2925082>
20. Sato, S. (2018). Integration, Third Region Effect, and Policy Commitment. *Regional Economic Analysis of Power, Elections, and Secession. New Frontiers in Regional Science: Asian Perspectives*, 21. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55897-2_5
21. Singh, M., & Mehrotra, M. (2018). Impact of biclustering on the performance of biclustering based collaborative filtering. *Expert Systems With Applications*, 113, 443–456. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.06.001>
22. Liao, Q., Zhu, M., Wu, L., Pan, X., Tang, X., & Wang, Z. (2020). Deep learning for air quality forecasts: A review. *Current Pollution Reports*, 6, 399–409. <https://doi.org/10.1007/s40726-020-00159-z>
23. Iskandaryan, D., Ramos, F., & Trilles, S. (2020). Air quality prediction in smart cities using machine learning technologies based on sensor data: A review. *Applied Sciences*, 10(7), 2401. <https://doi.org/10.3390/app10072401>
24. Majdi, A., Alrubai, A. J., Al-Wardy, A. H., Baili, J., & Panchal, H. (2022). A novel method for indoor air quality control of smart homes using a machine learning model. *Advances in Engineering Software*, 173, 103253. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2022.103253>
25. Zhang, W., Wu, W., Norford, L., Li, N., & Malkawi, A. (2023). Model predictive control of short-term winter natural ventilation in a smart building using machine learning algorithms. *Journal of Building Engineering*, 73, 106602. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106602>
26. Ammara, U., Rasheed, K., Mansoor, A., Al-Fuqaha, A., & Qadir, J. (2022). Smart cities from the perspective of systems. *Systems*, 10(3), 77. <https://doi.org/10.3390/systems10030077>
27. Lom, M., & Pribyl, O. (2021). Smart city model based on systems theory. *International Journal of Information Management*, 56, 102092. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102092>
28. Wang, M., & Zhou, T. (2022). Understanding the dynamic relationship between smart city implementation and urban sustainability. *Technology in Society*, 70, 102018. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.102018>
29. Tregua, M., D'Auria, A., & Bifulco, F. (2021). Sustainability in smart cities: Merging theory and practice. In *Smart cities and the UN SDGs*, 29–44. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85151-0.00003-8>
30. Marques, G., Saini, J., Dutta, M., Singh, P. K., & Hong, W. C. (2020). Indoor air quality monitoring systems for enhanced living environments: A review toward sustainable smart cities. *Sustainability*, 12(10), 4024. <https://doi.org/10.3390/su12104024>
31. Kaivonen, S., & Ngai, E. C. H. (2020). Real-time air pollution monitoring with sensors on city bus. *Digital Communications and Networks*, 6(1), 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2019.03.003>
32. Kagainalkar, A., Kumar, S., Gargava, P., & Niyogi, D. (2021). Review of urban computing in air quality management as smart city service: An integrated IoT, AI, and cloud technology perspective. *Urban Climate*, 39, 100972. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100972>
33. Li, L., Zheng, Y., Zheng, S., & Ke, H. (2020). The new smart city programme: Evaluating the effect of the internet of energy on air quality in China. *Science of The Total Environment*, 714, 136380. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136380>
34. Richter, M. A., Hagenmaier, M., Bandte, O., Parida, V., & Wincent, J. (2022). Smart cities, urban mobility and autonomous vehicles: How different cities need different sustainable investment strategies. *Technological Forecasting and Social Change*, 184, 121857. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121857>
35. Koziy, I. S. (2023). *Scientific and theoretical foundations of a systematic approach to improving the level of environmental safety of oil-producing areas* [Avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk].

**Andrii Palyvoda**

Doctor of Philosophy Degree Candidate

Department of Software Engineering and Cyber Security

State University of Trade and Economics, Kyiv, Ukraine

ORCID ID: 0009-0009-4785-244X

palyvoda.andrii@gmail.com**Adlet Kassymbekov**

Doctor of Philosophy Degree Candidate

K.I. Satbayev Kazakh National Research Technical University,

Almaty, Kazakhstan

ORCID ID: 0009-0009-1995-4860

kas.adl.13@gmail.com**INTELLIGENT SYSTEM FOR THE PLACEMENT OF
URBAN ENVIRONMENTAL MONITORING STATIONS**

Abstract. The article emphasizes the key role of information systems in the development of the environmental component of modern smart cities. It highlights that the implementation of IoT and Data Science technologies can significantly enhance the efficiency of monitoring and managing environmental parameters, which in turn allows for timely detection and response to environmental issues. This approach, combined with the use of intelligent information systems, can facilitate the prompt adoption of effective measures to eliminate and minimize negative impacts on the environment. A review of previous studies dedicated to the application of various information technologies and systems for optimizing the placement of resources, such as weather stations and environmental monitoring sensors, is conducted. It is substantiated that while linear and nonlinear methods provide accurate solutions, they require significant computational resources. Evolutionary algorithms offer flexibility, but their results can be less predictable. It is noted that evolutionary algorithms, such as genetic algorithms, demonstrate significant potential in solving tasks related to large data volumes. Machine learning methods can detect hidden patterns but require large volumes of data for training. Network algorithms optimize the placement of stations considering network topology, although their implementation can be complex. The conclusion emphasizes the need for further research to select optimal algorithms for solving tasks related to the placement of monitoring stations in cities, taking into account the specific requirements of each situation. This opens up prospects for developing optimization methods for air quality monitoring station networks in smart cities. The need for further research to improve optimization methods for monitoring station networks in urban conditions is underscored.

Keywords: information technology; smart city; infrastructure; ecological monitoring; environment; air quality analysis.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Rahman, A.-U., Abbas, S., Gollapalli, M., Ahmed, R., Aftab, S., Ahmad, M., Khan, M. A., & Mosavi, A. (2022). Rainfall Prediction System Using Machine Learning Fusion for Smart Cities. *Sensors*, 22(9), 3504. <https://doi.org/10.3390/s22093504>
2. Ullah, A., Anwar, S. M., Li, J., Nadeem, L., Mahmood, T., Rehman, A., & Saba, T. (2024). Smart cities: The role of Internet of Things and machine learning in realizing a data-centric smart environment. *Complex & Intelligent Systems*, 10(1), 1607–1637. <https://doi.org/10.1007/s40747-023-01175-4>
3. Sharma, H., Haque, A., & Blaabjerg, F. (2021). Machine learning in wireless sensor networks for smart cities: A survey. *Electronics*, 10(9), 1012. <https://doi.org/10.3390/electronics10091012>
4. Monastyrskiy, L., & Hura, V. (2023). Predicting air quality using machine learning. *Electronics and information technologies*, 22, 57–68.
5. Nochvai, V., Kryvakovska, R., & Ishchuk, O. (2012). The use of GIS in air quality management tasks. *Electronics and information technology*, 2, 154–163.



6. Zaporozhets, A. O. (2017). Analysis of environmental air pollution monitoring equipment. *Science-Based Technologies*, 35(3), 242–252. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.35.11846>
7. Hassani, A., Santos, G. S., Schneider, P., & Castell, N. (2024). Interpolation, satellite-based machine learning, or meteorological simulation? A comparison analysis for spatio-temporal mapping of mesoscale urban air temperature. *Environmental Modeling & Assessment*, 29(2), 291–306. <https://doi.org/10.1007/s10666-023-09943-9>
8. Du, R., Zhang, X., Li, Y., & Wang, J. (2018). The sensible city: A survey on the deployment and management for smart city monitoring. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(2), 1533–1560. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2881008>
9. Bacco, M., Delmastro, F., Ferro, E., & Gotta, A. (2017). Environmental monitoring for smart cities. *IEEE Sensors Journal*, 17(23), 7767–7774. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2722819>
10. Olenych, I., & Babiak, S. (2024). Automated system for air pollution research. *Electronics and information technology*, 26, 59–72.
11. Zhu, N., & Zhao, H. (2018). IoT applications in the ecological industry chain from information security and smart city perspectives. *Computers & Electrical Engineering*, 65, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.05.036>
12. 4 ways cities are using low-cost sensors to improve air quality. (n.d.). Clean Air Fund. <https://www.cleanairfund.org/news-item/4-ways-cities-are-using-low-cost-sensors-to-improve-air-quality/>
13. 3 ways smart cities can improve air quality. (2020). Smart Cities Dive. <https://www.smartcitiesdive.com/news/3-ways-smart-cities-can-improve-air-quality/580519/>
14. 5 ways new monitoring technologies can help cities combat air pollution. (2021). World Economic Forum. <https://www.weforum.org/agenda/2021/04/air-pollution-cities-monitoring-technologies/>
15. Air quality monitoring and smart cities: Will smart cities have cleaner air? (n.d.). BlueSky HQ. <https://blueskyhq.io/blog/air-quality-monitoring-and-smart-cities-will-smart-cities-have-cleaner-air>
16. Air quality. (n.d.). IQAir. from <https://www.iqair.com/>
17. Mahalingam, U., Elangovan, K., Dobhal, H., Valliappa, C., Shrestha, S., & Kedam, G. (2019, March). A machine learning model for air quality prediction for smart cities. In *2019 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, 452–457. <https://doi.org/10.1109/WiSPNET45539.2019.9032734>
18. Neo, E. X., Hasikin, K., Lai, K. W., Mokhtar, M. I., Azizan, M. M., Hizaddin, H. F., & Razak, S. A. (2023). Artificial intelligence-assisted air quality monitoring for smart city management. *PeerJ Computer Science*, 9, e1306. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1306>
19. Ameer, S., Shah, M. A., Khan, A., Song, H., Maple, C., Islam, S. U., & Asghar, M. N. (2019). Comparative analysis of machine learning techniques for predicting air quality in smart cities. *IEEE Access*, 7, 128325–128338. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2925082>
20. Sato, S. (2018). Integration, Third Region Effect, and Policy Commitment. *Regional Economic Analysis of Power, Elections, and Secession. New Frontiers in Regional Science: Asian Perspectives*, 21. https://doi.org/10.1007/978-4-431-55897-2_5
21. Singh, M., & Mehrotra, M. (2018). Impact of biclustering on the performance of biclustering based collaborative filtering. *Expert Systems With Applications*, 113, 443–456. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.06.001>
22. Liao, Q., Zhu, M., Wu, L., Pan, X., Tang, X., & Wang, Z. (2020). Deep learning for air quality forecasts: A review. *Current Pollution Reports*, 6, 399–409. <https://doi.org/10.1007/s40726-020-00159-z>
23. Iskandaryan, D., Ramos, F., & Trilles, S. (2020). Air quality prediction in smart cities using machine learning technologies based on sensor data: A review. *Applied Sciences*, 10(7), 2401. <https://doi.org/10.3390/app10072401>
24. Majdi, A., Alrubai, A. J., Al-Wardy, A. H., Baili, J., & Panchal, H. (2022). A novel method for indoor air quality control of smart homes using a machine learning model. *Advances in Engineering Software*, 173, 103253. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2022.103253>
25. Zhang, W., Wu, W., Norford, L., Li, N., & Malkawi, A. (2023). Model predictive control of short-term winter natural ventilation in a smart building using machine learning algorithms. *Journal of Building Engineering*, 73, 106602. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106602>
26. Ammara, U., Rasheed, K., Mansoor, A., Al-Fuqaha, A., & Qadir, J. (2022). Smart cities from the perspective of systems. *Systems*, 10(3), 77. <https://doi.org/10.3390/systems10030077>
27. Lom, M., & Pribyl, O. (2021). Smart city model based on systems theory. *International Journal of Information Management*, 56, 102092. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2020.102092>
28. Wang, M., & Zhou, T. (2022). Understanding the dynamic relationship between smart city implementation and urban sustainability. *Technology in Society*, 70, 102018. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2022.102018>



29. Tregua, M., D'Auria, A., & Bifulco, F. (2021). Sustainability in smart cities: Merging theory and practice. *In Smart cities and the UN SDGs*, 29–44. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85151-0.00003-8>
30. Marques, G., Saini, J., Dutta, M., Singh, P. K., & Hong, W. C. (2020). Indoor air quality monitoring systems for enhanced living environments: A review toward sustainable smart cities. *Sustainability*, 12(10), 4024. <https://doi.org/10.3390/su12104024>
31. Kaivonen, S., & Ngai, E. C. H. (2020). Real-time air pollution monitoring with sensors on city bus. *Digital Communications and Networks*, 6(1), 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2019.03.003>
32. Kaginalkar, A., Kumar, S., Gargava, P., & Niyogi, D. (2021). Review of urban computing in air quality management as smart city service: An integrated IoT, AI, and cloud technology perspective. *Urban Climate*, 39, 100972. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100972>
33. Li, L., Zheng, Y., Zheng, S., & Ke, H. (2020). The new smart city programme: Evaluating the effect of the internet of energy on air quality in China. *Science of The Total Environment*, 714, 136380. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136380>
34. Richter, M. A., Hagenmaier, M., Bandte, O., Parida, V., & Wincent, J. (2022). Smart cities, urban mobility and autonomous vehicles: How different cities need different sustainable investment strategies. *Technological Forecasting and Social Change*, 184, 121857. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121857>
35. Koziy, I. S. (2023). *Scientific and theoretical foundations of a systematic approach to improving the level of environmental safety of oil-producing areas* [Avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk].

