

**Васютинська К. А.**, канд. хім. наук, доц.;

**Перекрест А. Л.**, д-р техн. наук, проф.;

**Вадурін К. Л.**, аспірант;

**Корцова О. Л.**, канд. техн. наук, доц.

*Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса, Україна*

*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,*

*м. Кременчук, Україна*

## **АНАЛІТИЧНА СИСТЕМА ДЛЯ УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНИМИ РИЗИКАМИ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ НА ОСНОВІ ДАНИХ МОНІТОРИНГУ ПОВІТРЯ**

Сучасні виклики управління екологічною безпекою в умовах інтенсивної урбанізації вимагають якісно нових підходів до моніторингу довкілля, що є базовою передумовою оцінювання стану навколишнього середовища, динаміки урбанізаційних ризиків та потенційних загроз для населення. У регіонах України, де спостерігається просторово нерівномірне урбогенне навантаження, поєднання природно-техногенних факторів з наслідками воєнної агресії створює складне середовище для прийняття ефективних управлінських рішень. Особливої ваги набуває потреба в системах, здатних опрацьовувати постійно оновлюванні, часто неповні або гетерогенні дані моніторингу.

Існуючі підходи зазвичай зосереджуються на фрагментарному аналізі, зокрема, прогнозуванні концентрацій забруднювачів, кластеризації територій або обчисленні локальних індексів. Проте у відриві від єдиного аналітичного простору результати таких досліджень часто залишаються поза рамками практичного використання. Розрив між моніторинговими даними та системами ухвалення рішень унеможливорює оперативне реагування на зміну ризиків, що особливо критично для регіонів із високим рівнем урбанізаційного стресу.

У цьому контексті розробка моделей, здатних забезпечити повний аналітичний цикл, від формалізації індикаторів еколого-демографічної урбанізації та оцінювання факторних ризиків до інтегрованого індексу й автоматизованої підтримки рішень, є актуальним науковим і практичним завданням. Застосування алгоритмів машинного навчання, методів онлайн-оновлення кластерних структур та інструментів фільтрації шуму сприяє створенню адаптивних систем, що здатні не лише інтерпретувати наявні

дані, а й самонавчатися на нових спостереженнях. Такий підхід підвищує точність прогнозів, релевантність інтервенцій та стійкість систем екологічної безпеки в умовах невизначеності та змінності середовища.

Тож, **метою** дослідження є розроблення адаптивного конвеєру перетворення моніторингових даних на управлінські рішення для оцінювання екологічних ризиків, що забезпечує кластеризацію територій та динамічну підтримку рішень на основі постійно оновлюваних і гетерогенних екологічних даних.

Аналіз сучасних моделей засвідчує низку системних обмежень, що знижують їхню ефективність для управління ризиками в екологічній сфері. Передусім, більшість рішень залишаються фрагментарними: вони зосереджені на окремих етапах аналізу даних і не забезпечують логічного переходу до конкретних управлінських дій. Висока чутливість до якості вхідних даних і нестабільність ETL-процесів призводять до спотворення результатів, зокрема через відсутність уніфікації одиниць виміру, нормалізації та обробки викидів. Кластеризація часто має описовий характер і не перетворюється на дієві стратегії. Індекси ризику зазвичай статичні, не враховують нові дані, бракує механізмів їх онлайн-калібрування. У підсумку спостерігається розрив між аналітичними результатами й прийняттям рішень: навіть за наявності оцінок ризику відсутні інструменти оптимізації дій з урахуванням обмежених ресурсів, термінів реалізації та очікуваної ефективності результатів.

Запропонована нами модель орієнтована на реалізацію наскрізного інтегрованого аналітичного циклу від формалізації індикаторів урбанізації, побудови факторних індикаторів ризику до обчислення комплексного індексу ризику, динамічної кластеризації регіонів і розгортання модуля підтримки прийняття рішень. Такий підхід дозволяє забезпечити не лише системне оцінювання урбанізаційних ризиків, але й трансформацію результатів аналізу у практичні управлінські дії. Актуальність моделі зумовлена необхідністю використання робастних методів обробки даних, зокрема фільтрації шуму, автоматизованого виявлення викидів, інкрементального (онлайн) оновлення вагових коефіцієнтів і центрів кластерів. Це забезпечує здатність моделі до адаптації у разі надходження нових або змінених даних, зберігаючи стабільність і точність оцінок. Додаткову цінність становить інтеграція всіх компонентів у єдиний наскрізний цикл, включно з компонентами штучного інтелекту, що підвищує прогнозну точність та адаптивність системи до змінних просторово-часових умов, характерних для екологічної динаміки урбанізованих територій. Модель залишається прозорою завдяки використанню інтерпретованих індексів та статистично обґрунтованих вагових

коефіцієнтів, що дозволяє не лише здійснювати кількісне оцінювання ризиків, але й пояснювати логіку ухвалених рішень. Такий рівень інтерпретованості критично важливий для підвищення довіри до результатів аналітики у сфері управління екологічною безпекою, особливо в контексті державного і муніципального планування.

Крім того, архітектура моделі є масштабованою й модульною: вона легко інтегрується з новими джерелами даних, включаючи сенсорні платформи, супутникові спостереження чи адміністративну статистику. Це забезпечує її адаптивність до різних рівнів деталізації від локального (міського) до регіонального чи національного. Завдяки цим властивостям модель може бути інтегрована до систем моніторингу й підтримки управлінських рішень, формуючи основу для розробки сценаріїв сталого розвитку, адаптаційних стратегій і зниження ризиків у реальному часі.

Загальну архітектуру моделі подано на рисунку 1, що демонструє взаємозв'язки між основними компонентами та потоками даних. Архітектура моделі структурована у послідовність взаємопов'язаних етапів, кожен з яких має власні вхідні дані, методи обробки та вихідні результати, зберігаючи при цьому прозорість перетворень і відтворюваність обчислень.

Модуль підтримки прийняття рішень завершує інтегрований аналітичний цикл, перетворюючи результати кластеризації та індексної оцінки на обґрунтовані управлінські дії. На відміну від традиційних експертних систем, він реалізує адаптивний підхід із безперервним навчанням на основі ефективності заходів і змін екологічної ситуації. Його основою є багатокритеріальна оптимізація, що враховує ефективність, вартість і строки виконання. Методи машинного навчання дозволяють уточнювати ці оцінки, підвищуючи релевантність рішень у динамічному середовищі.

Запропонована методика побудови комплексного індексу ризику на основі  $t$ -критерію Стюдента забезпечує об'єктивність оцінювання завдяки статистичному визначенню ваг факторів без суб'єктивних експертних припущень. Її адаптивність полягає у здатності моделі автоматично оновлюватися при надходженні нових даних, а робастність – у вбудованих механізмах виявлення викидів і контролю статистичної значущості, що знижує вплив шумів. Модель також вирізняється прозорістю: всі розрахунки ґрунтуються на чітко визначених статистичних критеріях, що полегшує інтерпретацію та верифікацію результатів. Завдяки використанню інкрементальних алгоритмів, розроблена система є масштабованою й придатною до роботи з великими масивами даних у реальному часі.

Таким чином, модель є ефективним інструментом для моніторингу ризиків та ухвалення управлінських рішень в умовах динамічного середовища, що потребує надійних, адаптивних та прозорих методів оцінювання.

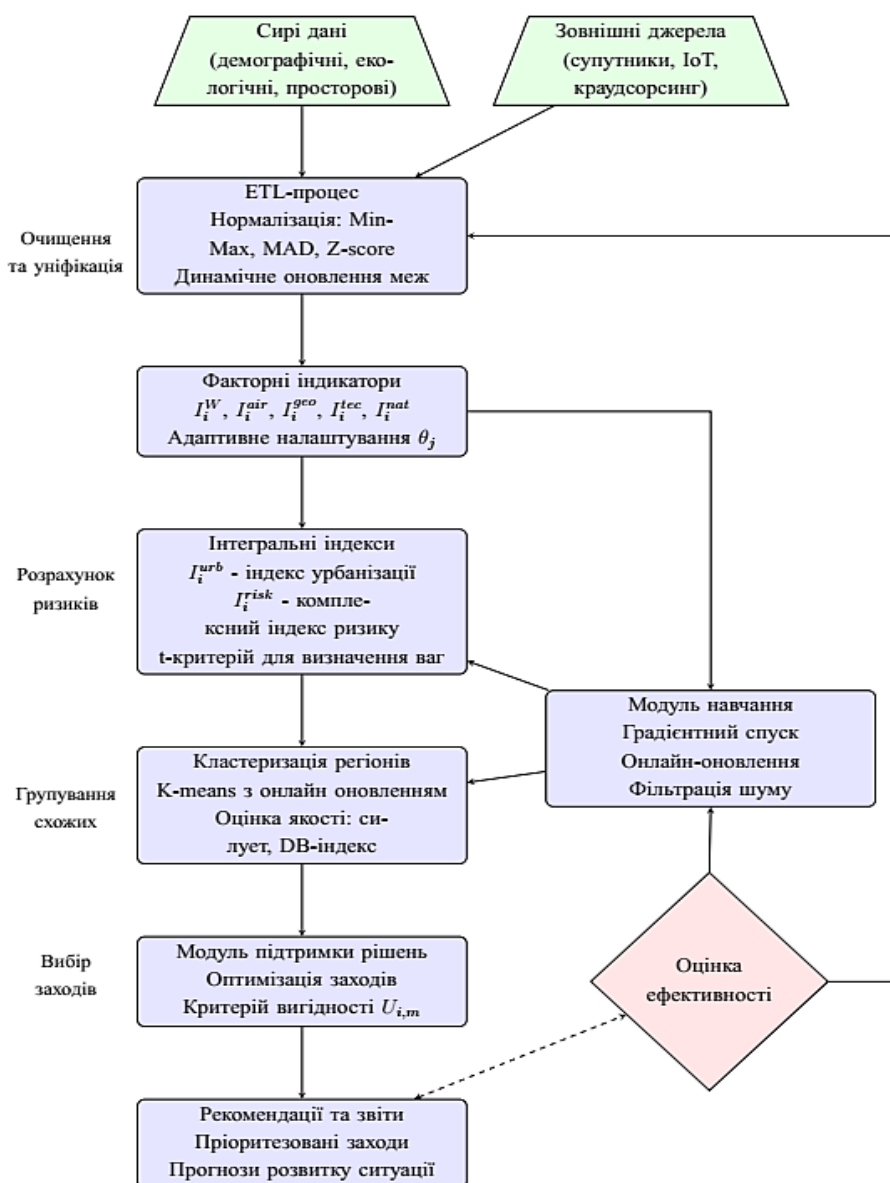


Рисунок 1 – Загальна архітектура моделі оцінки екологічних ризиків

Розроблена концепція була використана у валідації багатоетапного конвеєру обробки та аналізу даних, що трансформує розрізнені, «сирі» дані моніторингу якості повітря у структуровані аналітичні продукти, придатні для формування науково обґрунтованих управлінських рішень (рис. 2).

Система побудована у вигляді шести послідовних логічно пов'язаних етапів, кожен з яких виконує специфічну функцію підготовки та трансформації даних для наступного рівня аналізу. Алгоритм створення синтетичних даних підтримує режим

випадкової генерації, що імітує нерегулярні вимірювання та режим генерації за розкладом, що створює рівномірні вимірювання з фіксованою дискретністю (наприклад, кожні 20 хв) та наближує модель до автоматизованих систем моніторингу.

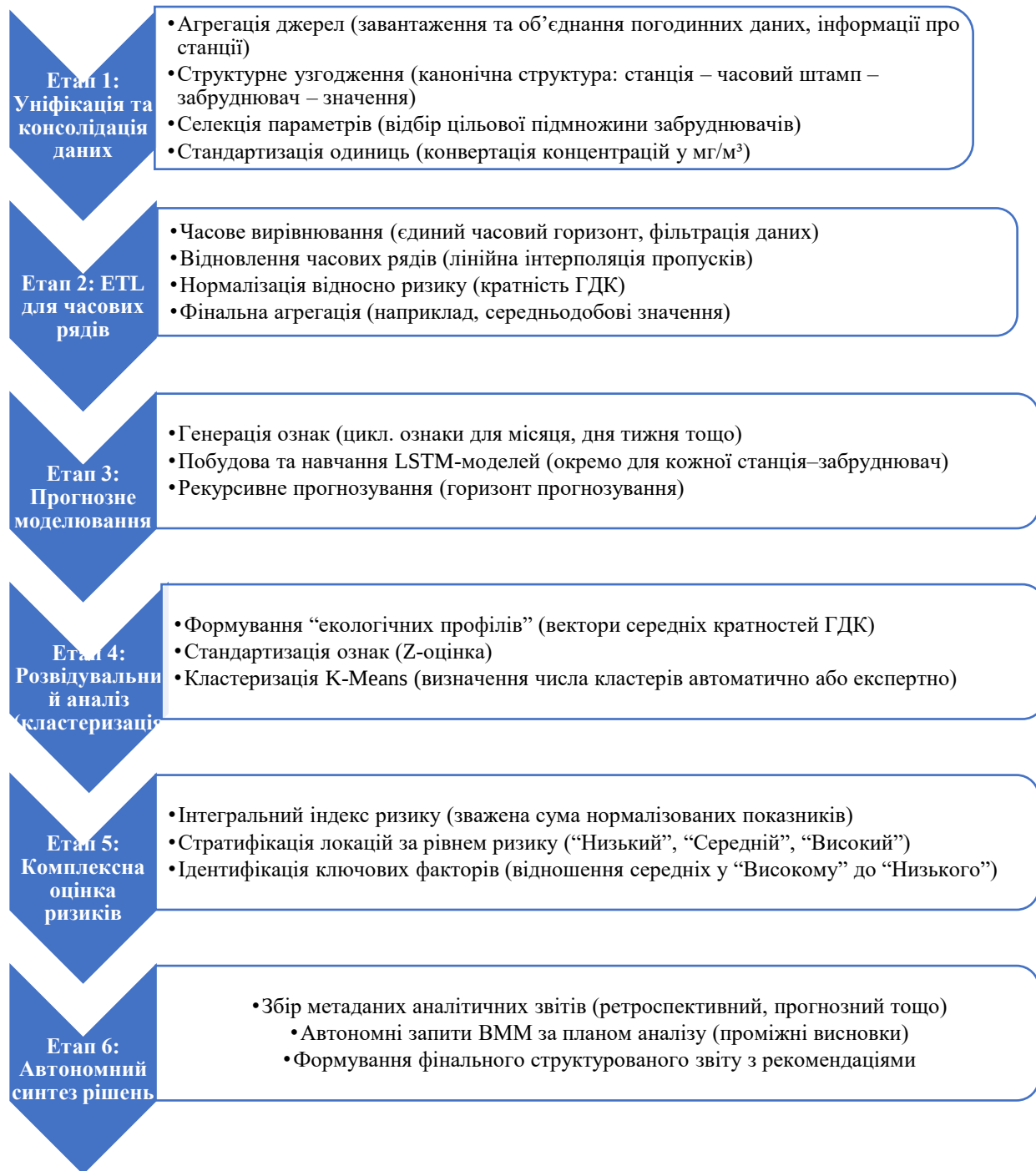


Рисунок 2 – Ієрархічний текстовий контур конвеєру обробки та аналізу даних для підтримки прийняття рішень

Для валідації запропонованої системи було створено еталонний синтетичний набір даних, що охоплює весь календарний 2024 рік і характеризується високою часовою роздільною здатністю із кроком у 20 хвилин. Генерація здійснювалася в

режимі максимальної інтенсивності, що забезпечило формування щільного масиву спостережень великого обсягу, придатного для стрес-тестування продуктивності та масштабованості системи, а також для перевірки її здатності виявляти довгострокові й сезонні закономірності у варіаціях забруднювачів.

Для наближення даних до умов реального моніторингу було враховано типові джерела похибок: по-перше, до кожного значення додано стохастичний шум рівня 10 %, що імітує короткотривалі флуктуації та випадкові похибки вимірювань; по-друге, введено механізм пропусків із ймовірністю 5 %, що відтворює втрати даних унаслідок перебоїв зв'язку чи технічних помилок. Таким чином, синтетичний набір відображає як структуру «чистих» вимірювань, так і реалістичні виклики, властиві практиці екологічного моніторингу.

Для додаткової перевірки стійкості та універсальності методології було використано реальний датасет «Air Quality Monitoring from EcoCity» [1], який містить результати громадського моніторингу повітря у місті Вінниця та прилеглих районах. Вінниця як репрезентативне українське місто із населенням близько 300 тис. осіб та розвиненою інфраструктурою є оптимальним прикладом для тестування масштабованості та прикладної цінності розроблених аналітичних інструментів.

Для валідації базової функціональності системи було використано ретроспективні дані за 2024 рік. Вбудований механізм визначення кількості кластерів (метод «лікоть») дозволив виявити оптимальне розбиття на п'ять кластерів, що свідчить про наявність п'яти відмінних екологічних профілів моніторингових станцій. Автоматичне ранжування кластерів за рівнем екологічної безпеки від найбезпечнішого (кластер 0) до найризикованішого (кластер 4) значно полегшило інтерпретацію результатів і візуалізацію. На наступному етапі проаналізовано прогнозні дані за січень 2025 року з обчисленням інтегрального індексу ризику для кожної станції з урахуванням ваг, де ключовим фактором виступав  $\text{NO}_2$ . Це дозволило класифікувати станції за трьома рівнями ризику: низький, середній, високий. Зокрема, *Station-East-1*, *Station-South-2* та *Station-South-1* ідентифіковано як найбільш ризиковані. Аналіз показав, що різниця в середніх концентраціях між кластерами незначна, що вказує на багатовимірну природу ризику. Підсумкова валідація на регіональному рівні дозволила побудувати рейтинги небезпеки: у 2024 лідував регіон *South*, тоді як у прогнозі – *West*. Діаграма «Анатомія ризику» деталізує внесок кожного чинника, що критично важливо для регіонального екологічного планування (рис. 3).

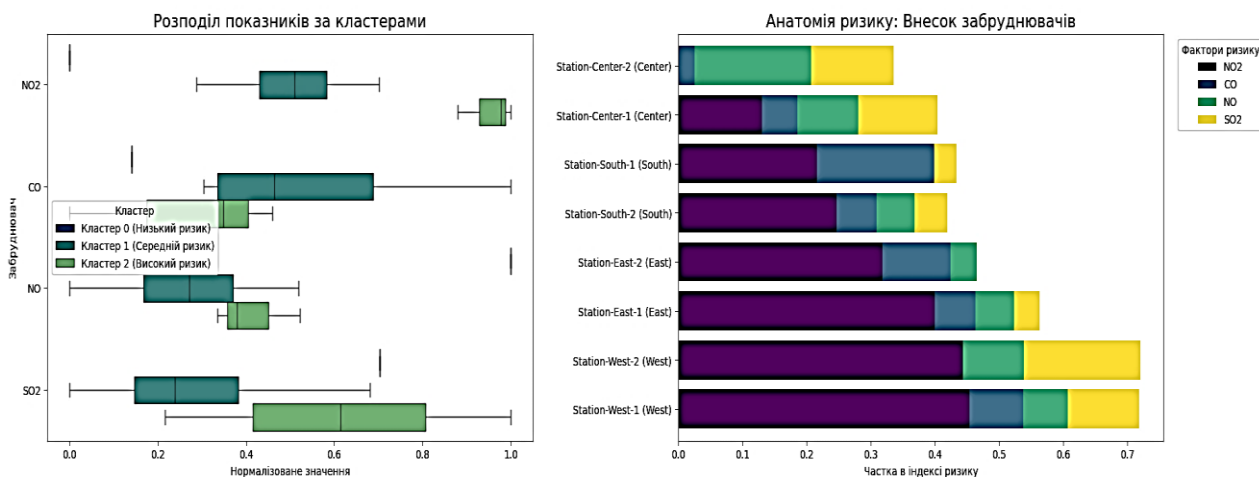


Рисунок 3 – Комплексний аналіз екологічного ризику на синтетичних ретроспективних даних

Завершальний етап валідації був присвячений оцінці здатності системи агрегувати показники на регіональному рівні. Для кожного з чотирьох регіонів розраховано середній інтегральний індекс ризику, що дозволило побудувати рейтинг екологічної небезпеки. У ретроспективному сценарії 2024 року найвищий ризик спостерігався в регіоні *South* (0.708), тоді як у прогнозі на 2025 рік лідирував регіон *West* (0.720). Візуалізація показала специфіку внеску факторів у кожному регіоні, що є ключовим для формування цільових заходів екологічного реагування.

## Висновок

Запропонована інформаційна система моніторингу забезпечує повний аналітичний цикл від обробки сирих даних до управлінських рішень. Особливістю є удосконалений модуль прогнозування, в якому реалізовано автоматичний вибір оптимальної моделі часових рядів за MSE. Це забезпечує вищу точність прогнозів, особливо при складній динаміці показників. Удосконалення підвищує надійність системи для оцінки ризиків, стратифікації територій і підтримки адаптивного управління.

## Література

1. Air Quality Monitoring from EcoCity. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/vbmokin/air-quality-monitoring-from-ecocity> (дата звернення: 22.08.2025)