

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

ВАСЮТИНСЬКА К.А., ПЕРЕКРЕСТ А.Л., ВАДУРІН К.Л., КОРЦОВА О.Л.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА», М. ОДЕСА, УКРАЇНА

*КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ МИХАЙЛА
ОСТРОГРАДСЬКОГО,*

М. КРЕМЕНЧУК, УКРАЇНА

Актуальність теми: Зростання екологічних викликів

Сучасна Україна стикається з безпрецедентними екологічними викликами:

- ❖ *стрімка урбанізація*, що створює значне навантаження на природні системи;
- ❖ *забруднення повітря* від промисловості та транспорту, що впливає на здоров'я населення;
- ❖ *водні дефіцити* та погіршення якості водних ресурсів;
- ❖ ризики, пов'язані з *техногенними аваріями*;
- ❖ та все більш відчутні наслідки *кліматичних змін*.

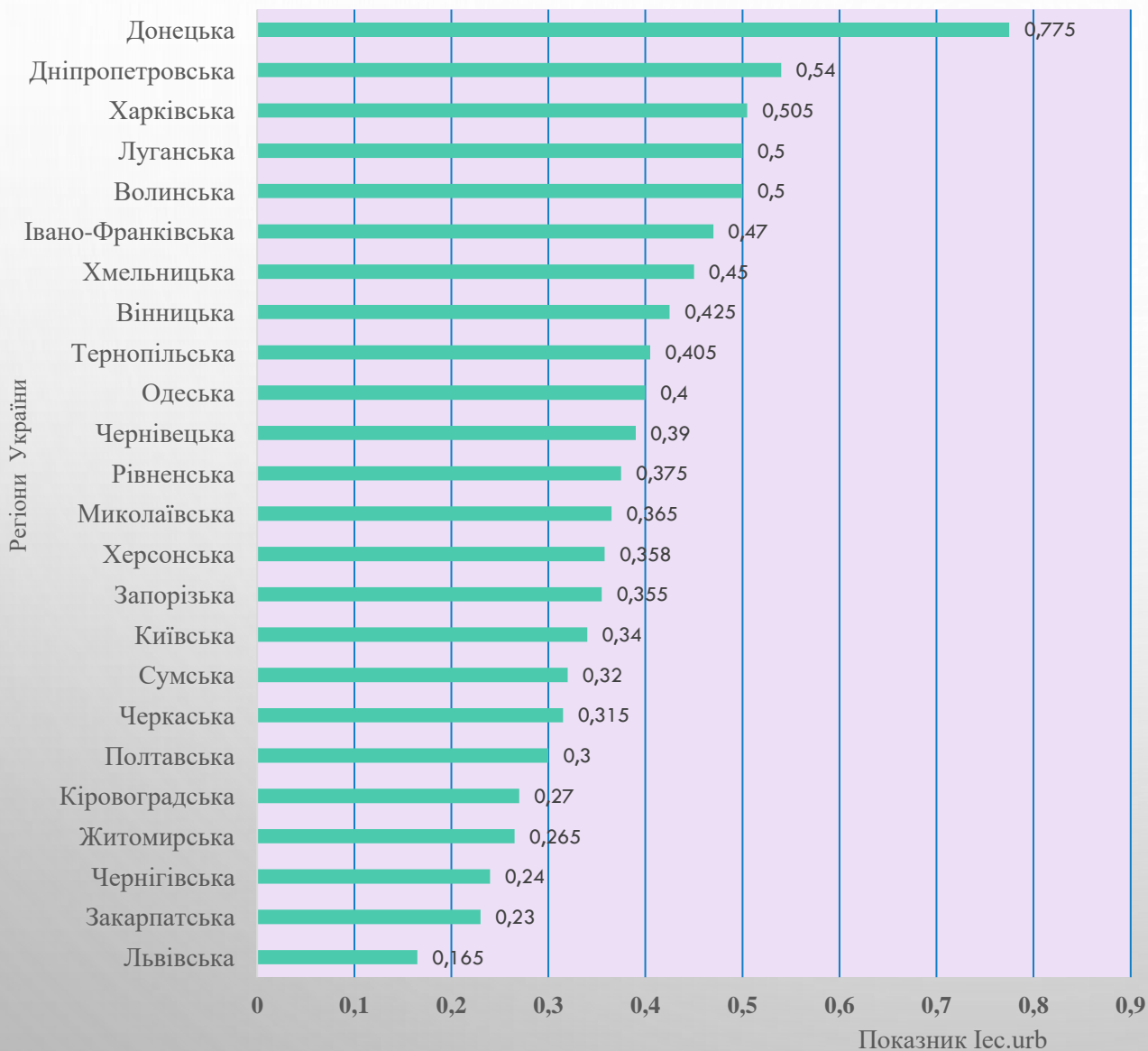
Воєнна агресія росії суттєво збільшило потенціал природно-техногенних небезпек в усіх регіонах країни, створивши нові виклики для системи екологічної безпеки.

Всі ці фактори вимагають негайного реагування.

Потрібна інтегрована модель для кількісної оцінки ризиків та ефективного управління на регіональному рівні.

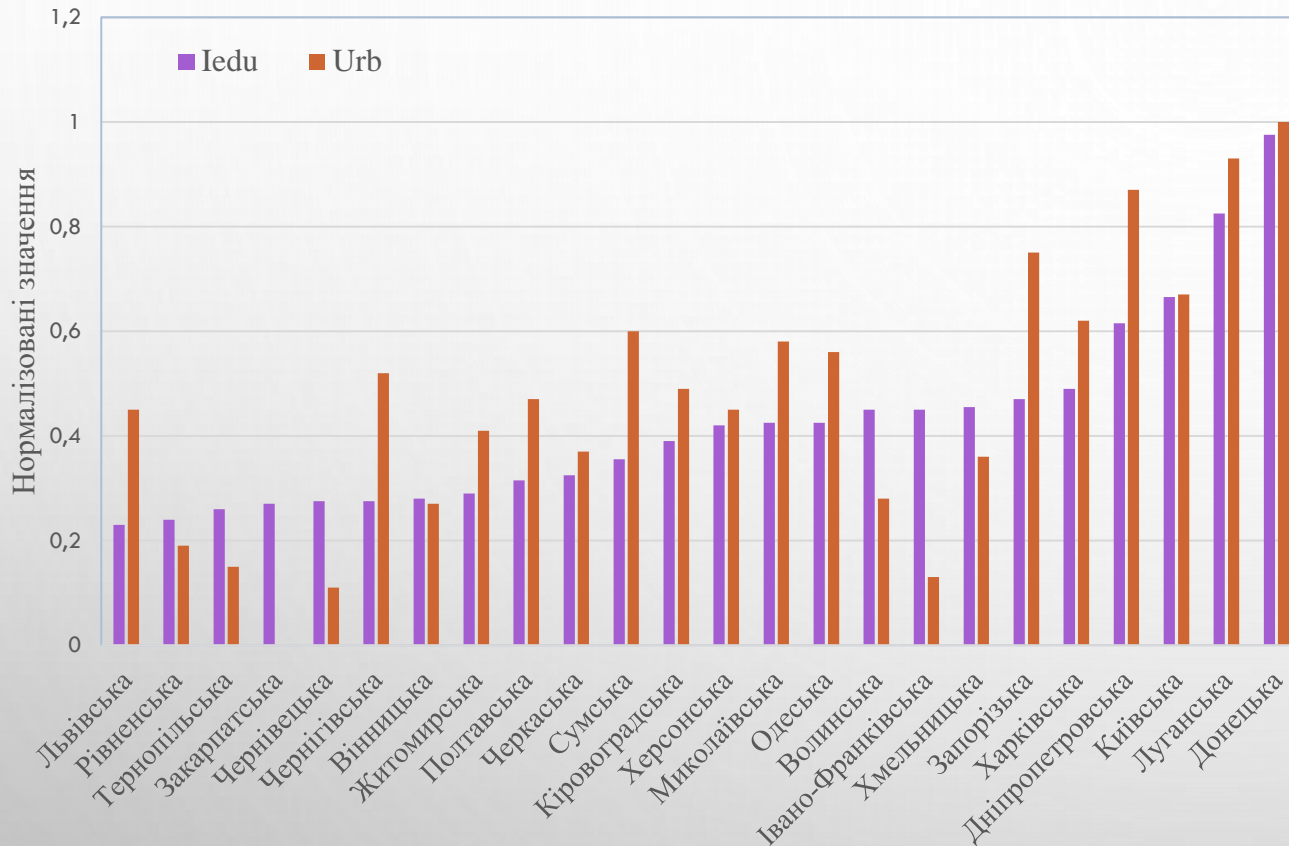


ІНДЕКС ЕКОЛОГІЧНОЇ УРБАНІЗАЦІЇ $I_{EC.URB}$



- **ПОКАЗНИК ЧАСТКИ МІСЬКОЇ ТЕРИТОРІЇ, ВІД ЗАГАЛЬНОЇ ПЛОЩІ І-ГО РЕГІОНУ**– S_{URB} , (ТИС.КМ²/ ТИС. КМ²)·10⁻²;
- **ПОКАЗНИК ЩІЛЬНОСТІ МІСЬКОГО НАСЕЛЕННЯ РЕГІОНУ** – $P_{POP.URB}$, (ТИС. ЛЮД./ТИС. КМ²) X 10⁻⁴.
- $(I_{ec.urb})_i = k_1(\rho_{pop.urb})_i^n + k_2(S_{urb})_i^n$

ІНДЕКС ЕКОЛОГО-ДЕМОГРАФІЧНОЇ УРБАНІЗАЦІЇ



Регіони України впорядковані за показником I_{edu}

- $I_{РЕАЛЬН.УРБ} = \sqrt[4]{X_1 \times X_2 \times X_3 \times X_4}$

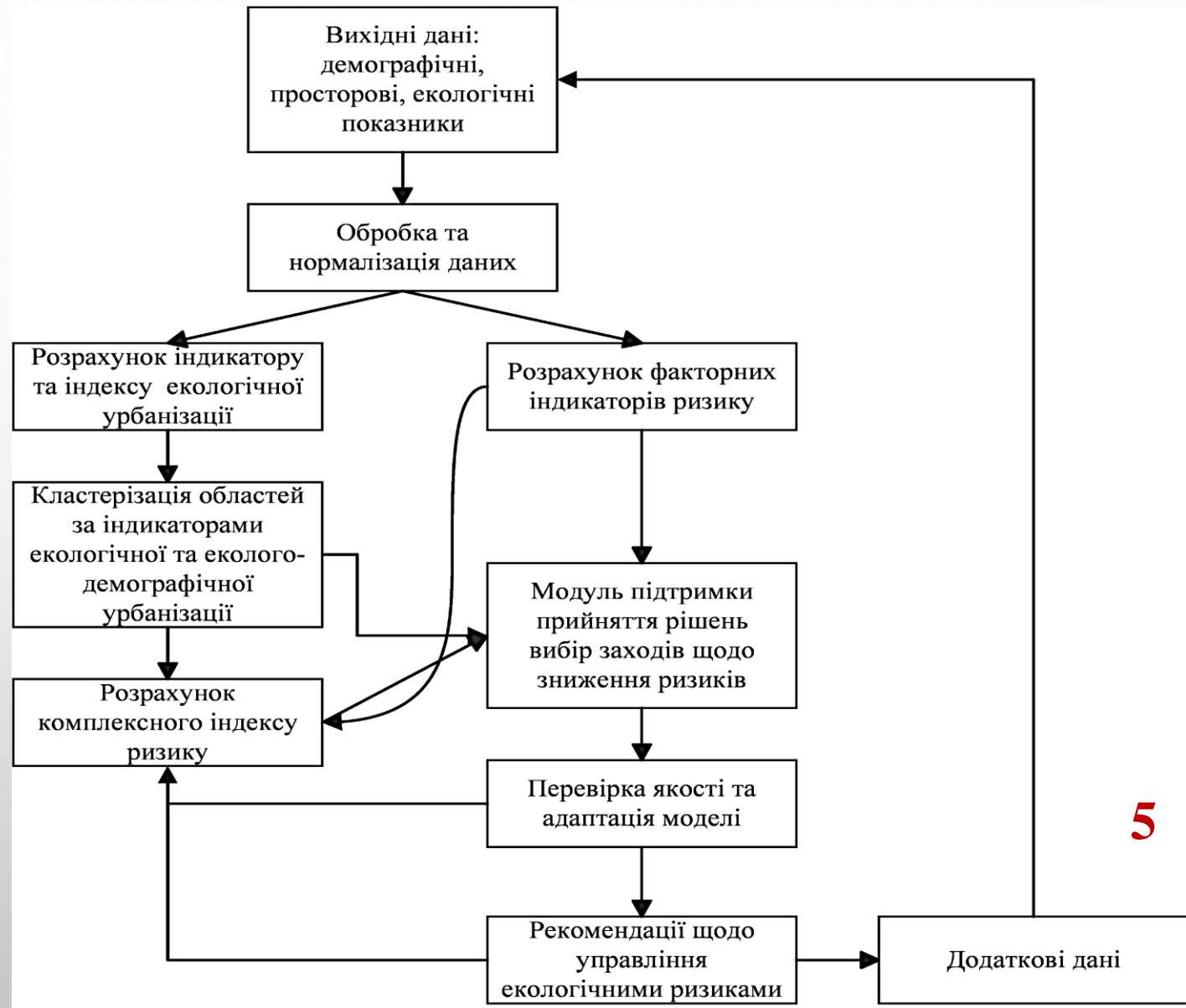
X_1 – ЧАСТКА МІСЬКОГО НАСЕЛЕННЯ ВІДНОСНО ЗАГАЛЬНОГО НАСЕЛЕННЯ РЕГІОНУ (РІВЕНЬ УРБАНІЗАЦІЇ РЕГІОНУ); X_2 – ЧАСТКА МІСЬКИХ ПОСЕЛЕНЬ У ЗАГАЛЬНІЙ КІЛЬКОСТІ ПОСЕЛЕНЬ; X_3 – ЧАСТКА МІСТ З НАСЕЛЕННЯМ БІЛЬШЕ 50 ТИС.; X_4 – ЧАСТКА МІСТ У ЗАГАЛЬНІЙ КІЛЬКОСТІ МІСЬКИХ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТИВ

- $I_{edu_i} = k_1 \cdot I_{ec.urb_i} + k_2 \cdot I_{РЕАЛЬН.УРБ_i}$

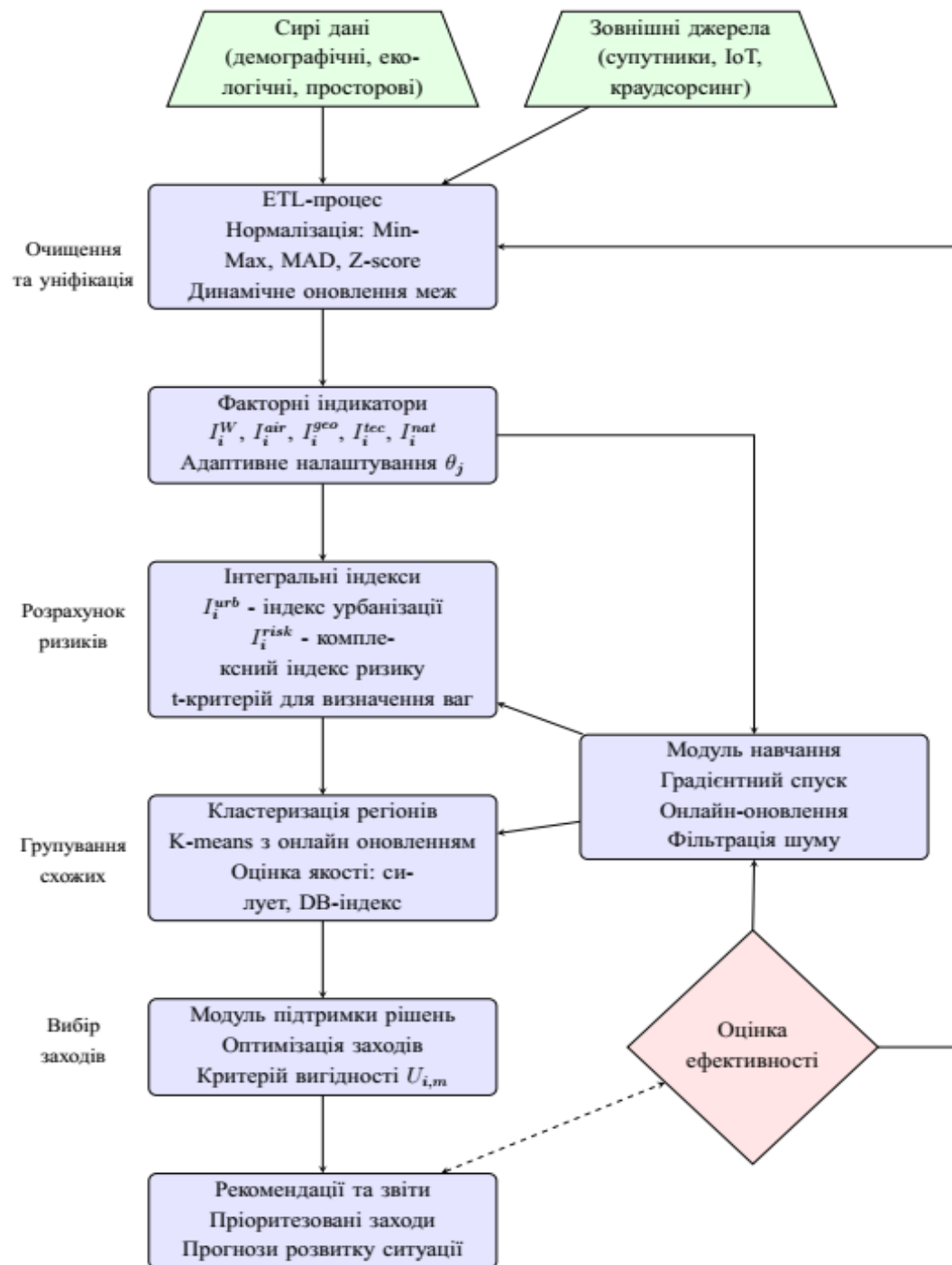
БЛОК-СХЕМА МОДЕЛІ КОМПЛЕКСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ

Модель виступає гнучкою системою, яка:

- ❖ інтегрує різноманітні дані;
- ❖ адаптується до появи нових спостережень;
- ❖ фільтрує та маркує шум;
- ❖ запитує уточнення для найбільш значущих факторів;
- ❖ генерує обґрунтовані рекомендації для кластерів областей

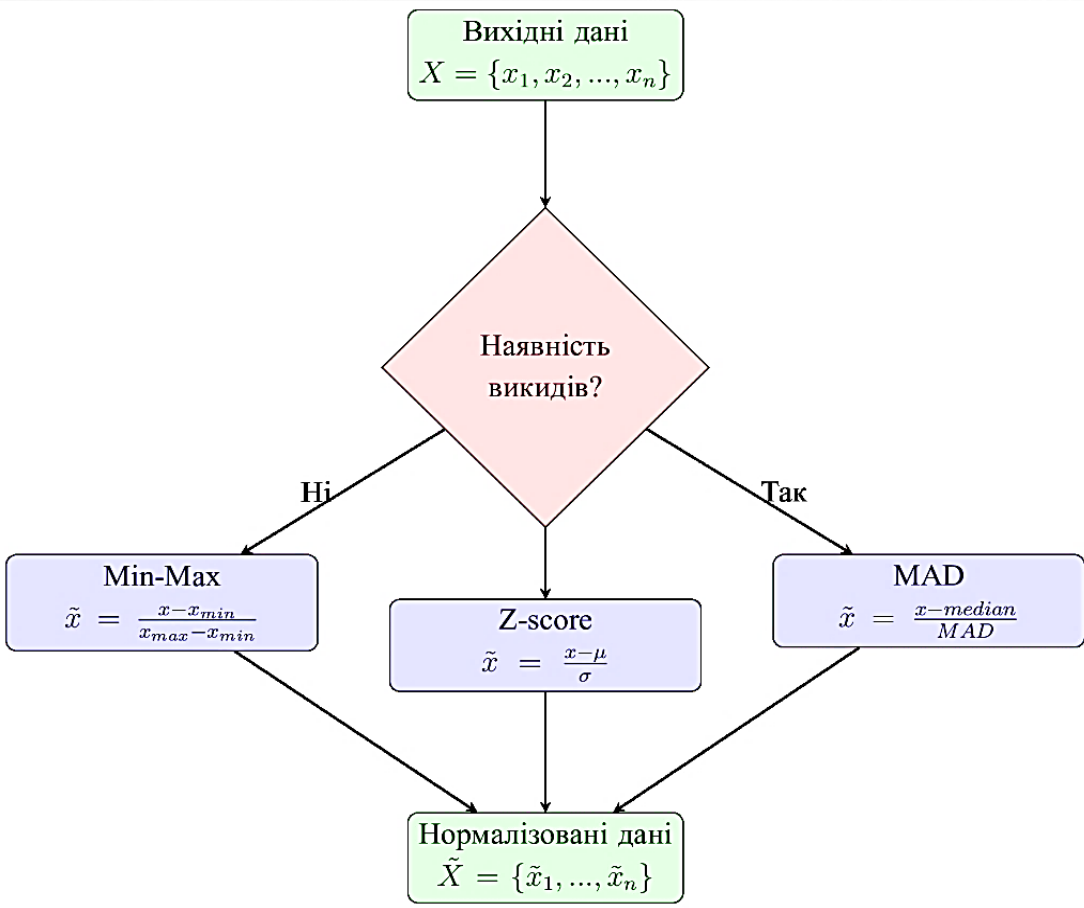


Загальна архітектура моделі оцінювання екологічних ризиків



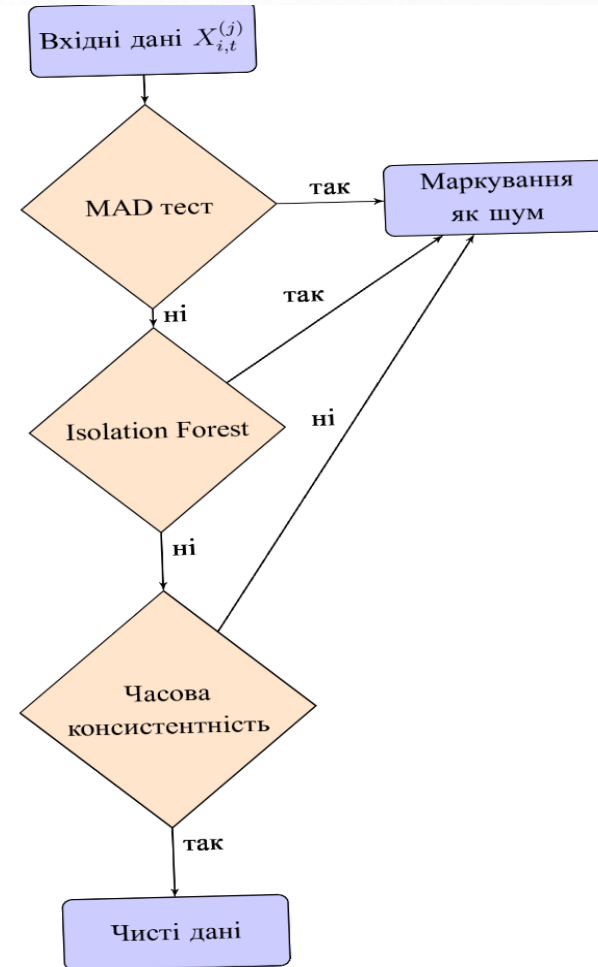
1. Підсистема збору та первинної обробки даних — агрегує вхідну інформацію з різних джерел (державна статистика, супутникові знімки, IoT-сенсори, відкриті дані), здійснює уніфікацію одиниць вимірювання, перевірку повноти та видалення дублювань.
2. Підсистема робастної нормалізації та формування індикаторів — перетворює початкові показники у безрозмірні значення з урахуванням нормативів, гранично допустимих концентрацій (ГДК) та середніх значень, видаляє або маркує аномалії.
3. Підсистема розрахунку індексів — визначає індекс еколого-демографічної урбанізації та комплексний індекс ризику з використанням статистично обґрунтованих вагових коефіцієнтів.
4. Підсистема кластеризації регіонів — групує регіони за схожістю їх багатовимірних індикаторів із застосуванням методів, стійких до шуму, та оцінює якість кластеризації за метриками (силует, індекс Девіса-Боулдіна).
5. Модуль підтримки прийняття рішень — здійснює багатокритеріальний відбір заходів для кожного кластера, балансуючи ефективність, вартість та строки впровадження, і формує пріоритетовані рекомендації.
6. Модуль навчання на зворотному зв'язку — аналізує ефективність реалізованих заходів, автоматично коригує вагові коефіцієнти та інші параметри моделі, забезпечуючи її самоадаптацію.

Схема вибору методу нормалізації



Ефективна фільтрація шумів і виявлення потреби в додаткових даних:

- висока дисперсія оцінок,
- низька інформативність фактору,
- часова нестабільність.



Каскадна
схема
фільтрації
шуму

СХЕМА РОЗРАХУНКУ ІНДЕКСУ ЕКОЛОГІЧНОЇ УРБАНІЗАЦІЇ З УРАХУВАННЯМ ВЗАЄМОДІЙ ПОКАЗНИКІВ

Для врахування нелінійних ефектів та синергії між показниками пропонується розширена модель:

$$I_i^{urb} = \sum_{j=1}^m w_j \cdot f_j(x_{ij}) + \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{k=j+1}^m w_{jk} \cdot g_{jk}(x_{ij}, x_{ik}),$$

де: $f_j(\cdot)$ – функція перетворення для j -го показника; $g_{jk}(\cdot, \cdot)$ – функція взаємодії між показниками j та k ; w_{jk} – вага взаємодії.

Функції перетворення $f_j(\cdot)$ обираються відповідно до природи показника:

- лінійна функція (для показників з прямою залежністю),
- логарифмічна функція (для показників з насиченням),
- сигмоїдна функція (для показників з пороговими ефектами),
- ступенева функція (для показників з нелінійним впливом)

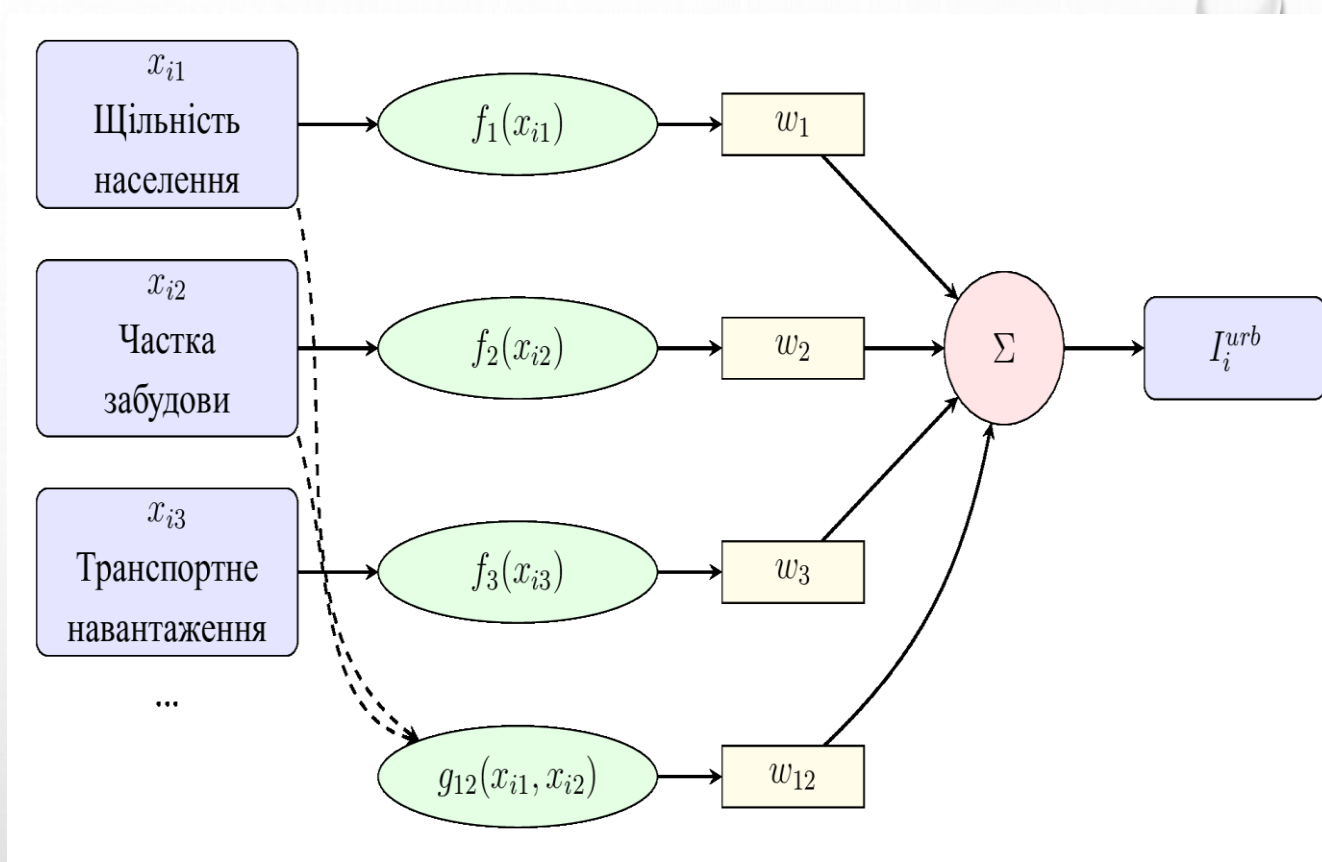
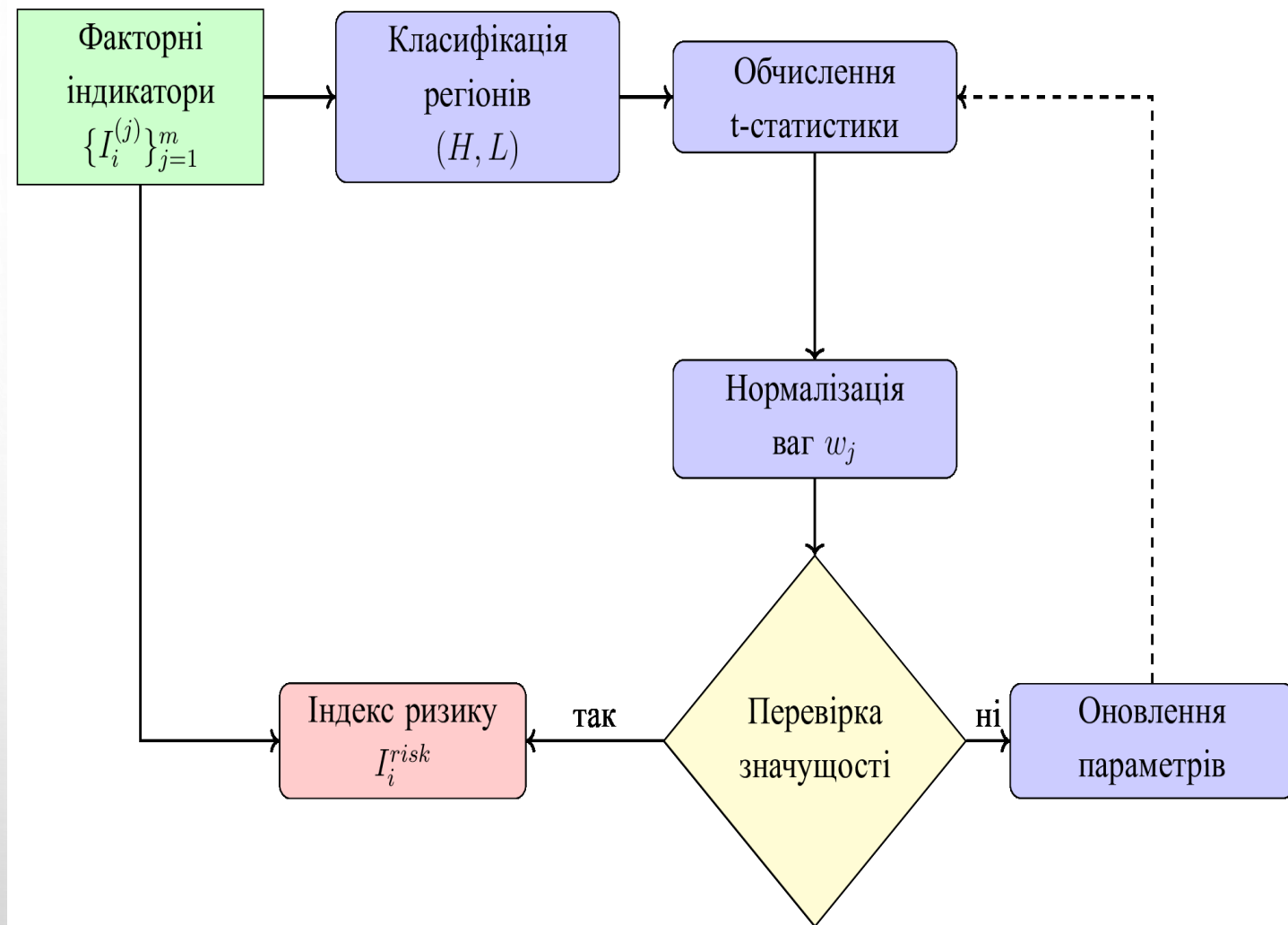


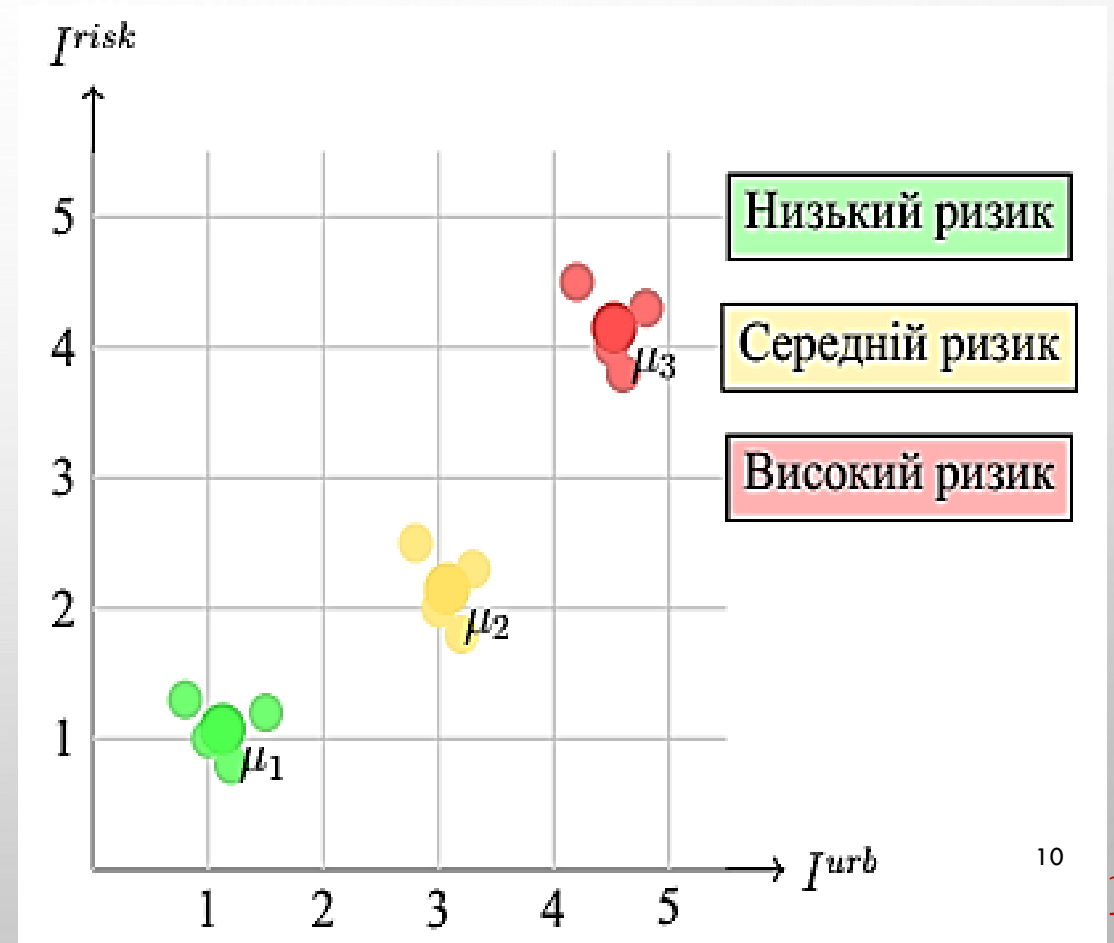
СХЕМА ПОБУДОВИ КОМПЛЕКСНОГО ІНДЕКСУ РИЗИКУ



Архітектура модуля підтримки прийняття рішень

- 1) СИСТЕМА ФОРМАЛІЗАЦІЇ ТА СТРУКТУРУВАННЯ МНОЖИНИ ПОТЕНЦІЙНИХ ЗАХОДІВ,
- 2) ОПТИМІЗАЦІЙНЕ ЯДРА ДЛЯ ВІДБОРУ ОПТИМАЛЬНИХ КОМБІНАЦІЙ РІШЕНЬ,
- 3) ПІДСИСТЕМА ДИНАМІЧНОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ КОРИГУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕФЕКТИВНОСТІ,
- 4) МЕХАНІЗМ ФІЛЬТРАЦІЇ НЕНАДІЙНИХ АБО НЕДОСТАТНЬО ОБҐРУНТОВАНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ,
- 5) ІНТЕРФЕЙС ВЗАЄМОДІЇ З ОСОБАМИ, ЩО ПРИЙМАЮТЬ РІШЕННЯ

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ У ПРОСТОРИ ІНДЕКСІВ



ІЄРАРХІЧНИЙ ТЕКСТОВИЙ КОНТУР КОНВЕЄРУ ОБРОБКИ ТА АНАЛІЗУ ДАНИХ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Етап 1: Уніфікація та консолідація даних

- Агрегація джерел (завантаження та об'єднання погодинних даних, інформації про станції)
- Структурне узгодження (канонічна структура: станція – часовий штамп – забруднювач – значення)
- Селекція параметрів (відбір цільової підмножини забруднювачів)
- Стандартизація одиниць (конвертація концентрацій у мг/м^3)

Етап 2: ETL для часових рядів

- Часове вирівнювання (єдиний часовий горизонт, фільтрація даних)
- Відновлення часових рядів (лінійна інтерполяція пропусків)
- Нормалізація відносно ризику (кратність ГДК)
- Фінальна агрегація (наприклад, середньодобові значення)

Етап 3: Прогнозне моделювання

- Генерація ознак (цикл. ознаки для місяця, дня тижня тощо)
- Побудова та навчання LSTM-моделей (окремо для кожної станція–забруднювач)
- Рекурсивне прогнозування (горизонт прогнозування)

Етап 4: Розвідувальний аналіз (кластеризація)

- Формування “екологічних профілів” (вектори середніх кратностей ГДК)
- Стандартизація ознак (Z-оцінка)
- Кластеризація K-Means (визначення числа кластерів автоматично або експертно)

Етап 5: Комплексна оцінка ризиків

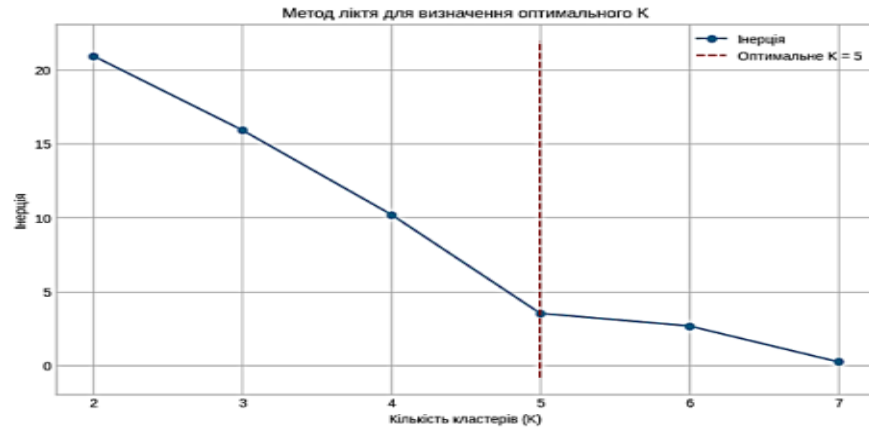
- Інтегральний індекс ризику (зважена сума нормалізованих показників)
- Стратифікація локацій за рівнем ризику (“Низький”, “Середній”, “Високий”)
- Ідентифікація ключових факторів (відношення середніх у “Високому” до “Низького”)

Етап 6: Автономний синтез рішень

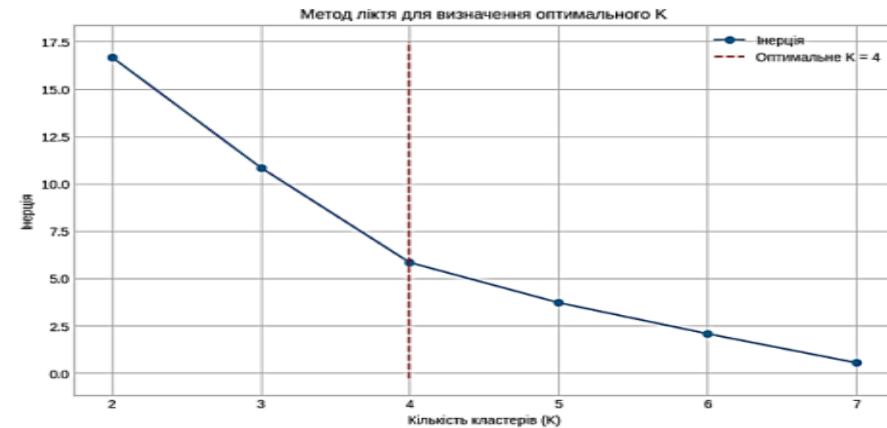
- Збір метаданих аналітичних звітів (ретроспективний, прогнозний тощо)
- Автономні запити ВММ за планом аналізу (проміжні висновки)
- Формування фінального структурованого звіту з рекомендаціями

ГРАФІЧНА ЧАСТИНА АЛГОРИТМУ РОБОТИ МОДУЛЯ *REGIONSAFETYCLUSTERER* НА СИНТЕТИЧНИХ ДАНИХ

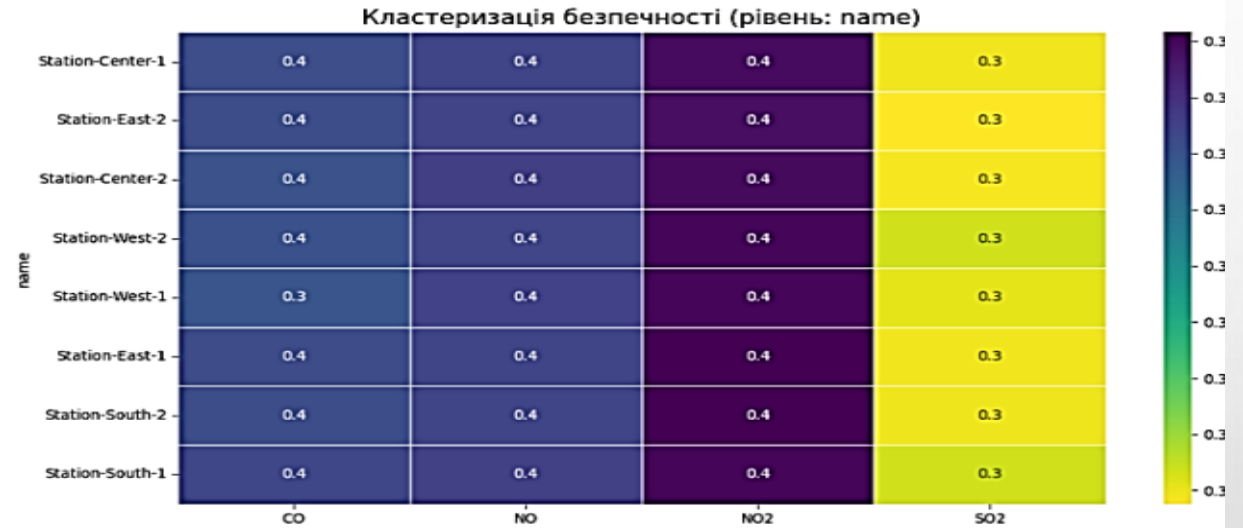
Ретроспективний



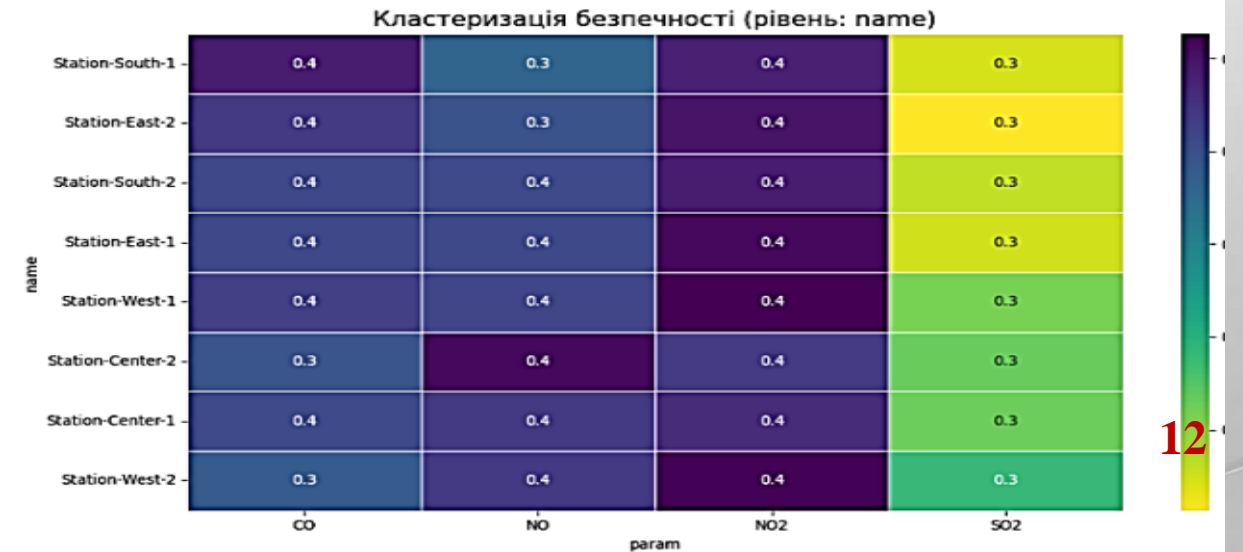
Прогнозований



Ретроспективний

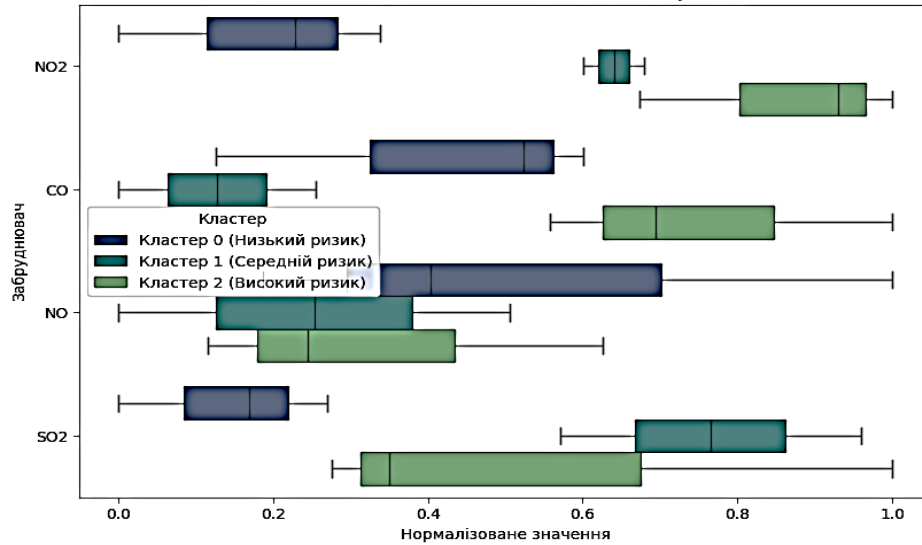


Прогнозований

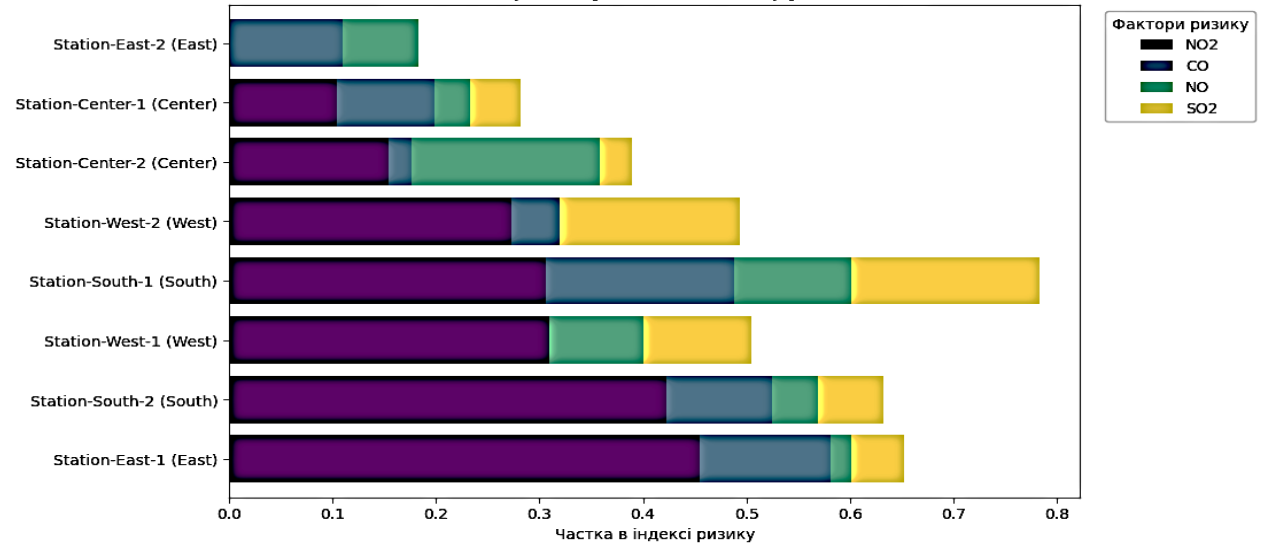


Аналітична панель: Глибокий аналіз ситуації

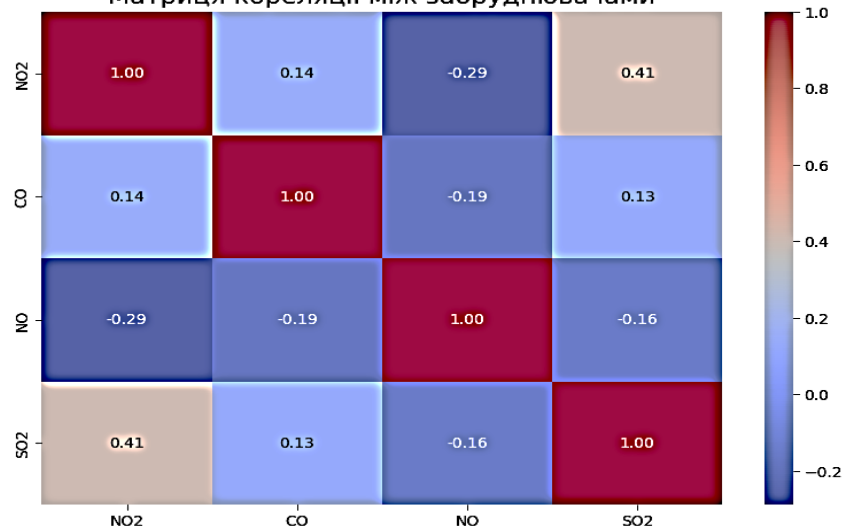
Розподіл показників за кластерами



Анатомія ризику: Внесок забруднювачів



Матриця кореляції між забруднювачами



ГЛИБОКИЙ АНАЛІТИЧНИЙ ЗВІТ

••• Порівняльний аналіз кластерів на основі РЕАЛЬНИХ середніх значень •••

Порівняльна таблиця факторів ризику по кластерах:

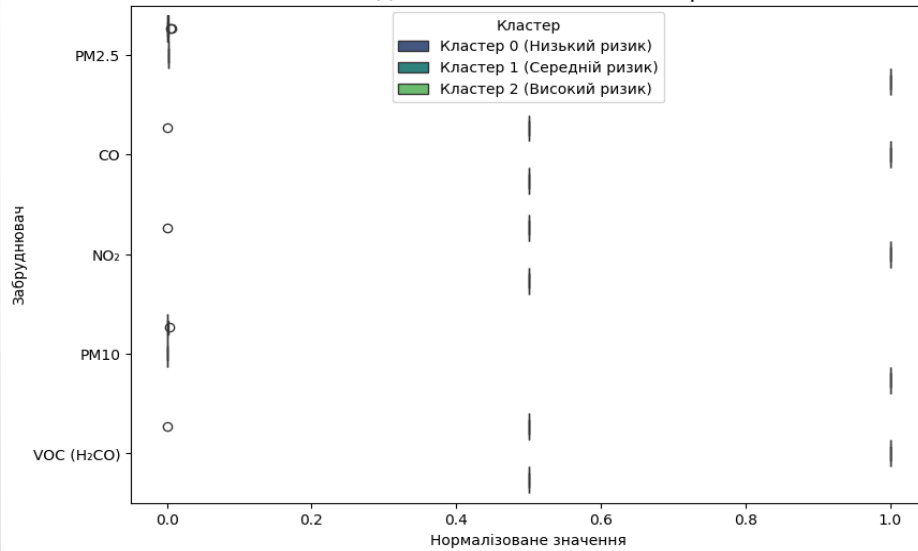
Параметр	Середнє (Низький)	Середнє (Середній)	Середнє (Високий)	Кратність (Високий/Низький)
Діапазон (Високий)				
SO2	0.319	0.321	0.320	1.0x 0.32 • 0.32
NO2	0.360	0.360	0.361	1.0x 0.36 • 0.36
CO	0.351	0.350	0.351	1.0x 0.35 • 0.35
NO	0.353	0.352	0.352	1.0x 0.35 • 0.35

••• Ключові аналітичні висновки •••

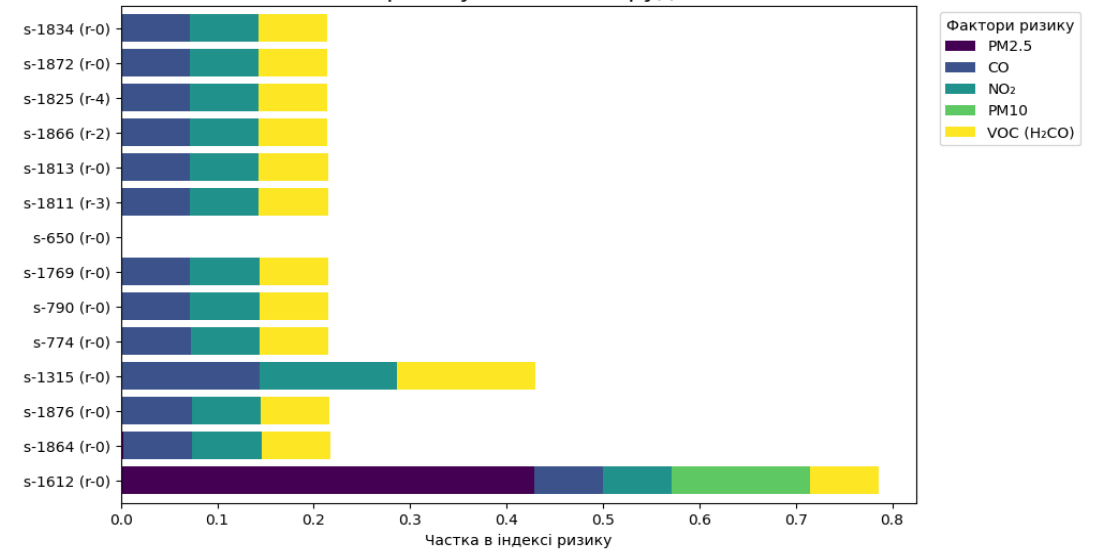
- Найбільший розрив між 'Високим' та 'Низьким' кластерами ризику спостерігається за параметрами: SO2, NO2.
- Найбільша різномірність станцій всередині 'Високого' кластера спостерігається за параметром: SO2.
- Загалом, найбільший внесок у формування індексу ризику вносить: NO2 (враховуючи задані ваги).

Аналітична панель: Глибокий аналіз ситуації

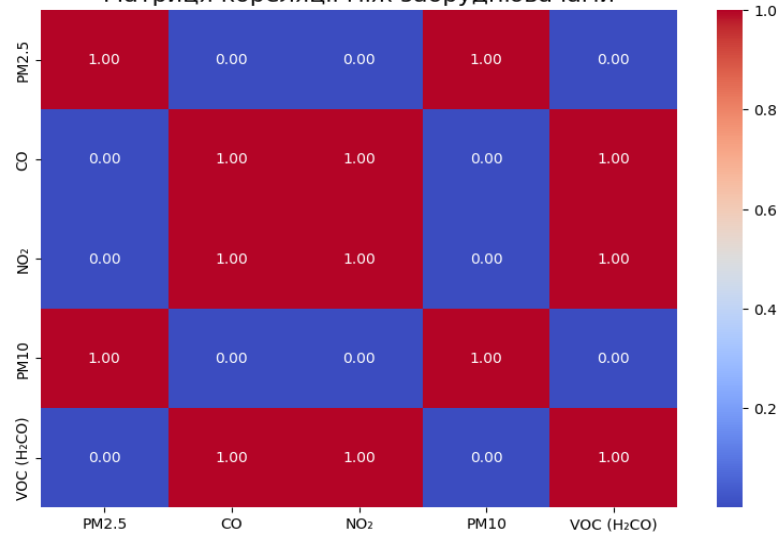
Розподіл показників за кластерами



Анатомія ризику: Внесок забруднювачів



Матриця кореляції між забруднювачами



ГЛИБОКИЙ АНАЛІТИЧНИЙ ЗВІТ

••• Порівняльний аналіз кластерів на основі РЕАЛЬНИХ середніх значень •••

Порівняльна таблиця факторів ризику по кластерах:

Параметр	Середнє (Низький)	Середнє (Середній)	Середнє (Високий)	Кратність (Високий/Низький)
PM10	0.034	0.032	18.151	535.8x
PM2.5	0.021	0.028	9.329	441.8x
NO ₂	0.318	0.693	0.347	1.1x
CO	0.053	0.115	0.057	1.1x
VOC (H ₂ CO)	0.048	0.090	0.051	1.1x

••• Ключові аналітичні висновки •••

1. Найбільший розрив між 'Високим' та 'Низьким' кластерами ризику спостерігається за параметрами: PM10, PM2.5.
2. Найбільша різноманітність станцій всередині 'Високого' кластера спостерігається за параметром: PM10.
3. Загалом, найбільший внесок у формування індексу ризику вносять: NO₂ (враховуючи задані ваги).

Загальний висновок

За результатами комплексного аналізу екологічної ситуації виявлено, що станція s-1612 у регіоні r-0 є найбільш критичною точкою забруднення, стабільно демонструючи екстремально високі показники PM10 та PM2.5 як ретроспективно, так і в прогнозі, визначаючи її як головний осередок високого ризику. Станція s-1315 (також в r-0) стабільно належить до кластеру середнього ризику з підвищеними рівнями CO та NO₂. Регіон r-0 послідовно визнається найбільш екологічно небезпечним. Хоча прогноз показує суттєве зниження абсолютних значень PM10 та PM2.5 для s-1612, середній комплексний індекс ризику для регіонів (зокрема r-0) показує незначне зростання, а основний ваговий внесок у загальний індекс ризику зміщується з NO₂ (ретроспективно) на CO (прогнозно). Надзвичайних екологічних подій за аналізований період не зафіксовано, а наявні інструменти оповіщення населення ("Дія", місцеві ЗМІ, брошури) є ефективними для донесення інформації. Існуючі заходи контролю виявились недостатніми для усунення критично високих рівнів PM на s-1612, а зміна пріоритетного забруднювача на CO вимагає адаптації стратегій.

Рекомендовані заходи

Локація: Станція s-1612, регіон r-0

Проблема: Станція s-1612 у регіоні r-0 є стабільно найризикованішою точкою з аномально високими концентраціями PM10 та PM2.5 як ретроспективно, так і в прогнозному періодах.

Рекомендація: Розробити та негайно впровадити комплексну програму моніторингу та зниження викидів твердих частинок (PM10, PM2.5) у зоні впливу станції s-1612. (Пріоритет: Високий, Впевненість: Висока)

Обґрунтування: Пряме усунення найбільш критичного та постійного фактора ризику, що ідентифікований у високоризиковому кластері. Це може включати ідентифікацію та регулювання локальних джерел забруднення (промислові об'єкти, транспортні вузли, будівельні майданчики, джерела опалення), впровадження пилопригнічуючих технологій та посилення екологічного контролю.

Очікуваний вплив: Значне покращення якості повітря та прямий позитивний вплив на респіраторне та серцево-судинне здоров'я населення.

Локація: Станція s-1315, регіон r-0

Проблема: Станція s-1315 у регіоні r-0 послідовно демонструє найвищі рівні CO, NO₂ та VOC, що відносить її до кластера середнього ризику, а CO стає домінуючим ризиком у прогнозі.

Рекомендація: Провести детальне дослідження джерел викидів монооксиду вуглецю (CO), діоксиду азоту (NO₂) та летких органічних сполук (VOC) поблизу станції s-1315 та застосувати заходи щодо зменшення цих викидів. (Пріоритет: Високий, Впевненість: Висока)

Обґрунтування: Адресує середній рівень ризику та потенційно зростаючу проблему з CO, який стає ключовим фактором ризику у майбутньому. Заходи можуть включати оптимізацію транспортних потоків, модернізацію промислового обладнання або впровадження енергоефективних рішень.

Очікуваний вплив: Зменшення газоподібних забруднювачів та покращення якості повітря у зоні середнього ризику.

Локація: Регіон r-0

Проблема: Регіон R-0 є найвищим за рівнем екологічного ризику загалом, оскільки включає як станцію найвищого ризику (s-1612), так і станцію середнього ризику (s-1315).

Рекомендація: Зосередити більшу частину екологічних програм та фінансових ресурсів на регіоні R-0, розробляючи для нього комплексні регіональні стратегії зменшення забруднення повітря. (Пріоритет: Високий, Впевненість: Висока)

Обґрунтування: Забезпечує цілісний підхід до управління найпроблемнішим регіоном, охоплюючи всі значні джерела забруднення.

Очікуваний вплив: Загальне покращення екологічної безпеки та зниження навантаження на довкілля у найбільш забрудненій зоні.

Локація: Загальне населення, особливо в регіоні r-0

Проблема: Існує постійний ризик перевищення допустимих норм забруднення повітря, особливо твердими частинками та газовими забруднювачами.

Рекомендація: Активно використовувати доступні інструменти оповіщення населення ("Дія" – SMS та публікації у соцмережах, місцеве Радіо та Телебачення, інформаційні брошури) для своєчасного інформування про поточний стан якості повітря, рекомендації щодо поведінки в умовах підвищеного забруднення та превентивні заходи. Зокрема, слід надавати рекомендації щодо захисту від PM2.5/PM10 у зоні s-1612. (Пріоритет: Високий, Впевненість: Висока)

Обґрунтування: Проактивне інформування громадськості підвищує обізнаність, сприяє прийняттю свідомих рішень та допомагає мінімізувати вплив забруднення на здоров'я. Наявні інструменти забезпечують швидке та широке охоплення.

Очікуваний вплив: Підвищення обізнаності населення, сприяння свідомій поведінці та загальній екологічній безпеці в найбільш ризикованій області.

ВИСНОВКИ

- ❖ Розроблено модель інформаційної підтримки прийняття рішень щодо екологічної безпеки регіонів в залежності від рівня екологічної урбанізації та основних ризикових чинників, яка дозволяє забезпечити адаптивний механізм прийняття рішень на основі використання механізмів онлайн-навчання, k-кластеризації та алгоритмів градієнтного спуску. На цій основі отримана можливість оптимізувати вибір ефективних заходів зниження ризиків в кластерах регіонів одного рівня, що забезпечує підвищення точності та оперативності управлінських рішень.
- ❖ З метою деталізації та практичної апробації базової моделі інформаційної підтримки прийняття рішень створено інтегровану інформаційну технологію, що реалізує наскрізний аналітичний цикл від обробки сирих даних до формування управлінських рекомендацій у системі екологічного моніторингу атмосферного повітря. Побудовано модель у вигляді шестикрокового конвеєра, яка поєднує методи ETL-обробки, прогностичного моделювання на базі LSTM, кластеризації, розрахунку інтегральних індексів ризику та автоматизованого синтезу рішень. Створено комплексне програмне забезпечення, що реалізує розроблені методи й моделі. Практичне застосування валідовано на синтетичних і реальних даних, підтверджено високу точність прогнозів і робастність аналітики.

**ДЯКУЮ
ЗА
УВАГУ!**